Филип Филипов

КОНСТРУКЦИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ НА ПОЛУ-ПРОВОДНИКОВИТЕ ПРИБОРИ

Техника

Доц. к.т.н. инж.
ФИЛИП ФИЛИПОВ

КОНСТРУКЦИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ НА ПОЛУ-ПРОВОДНИКОВИТЕ ПРИБОРИ

ДЪРЖАВНО ИЗДАТЕЛСТВО • ТЕХНИКА •
СОФИЯ • 1983

ПРЕДГОВОР

Учебникът е предназначен за студентите от специалност електронна техника на ВМЕИ „Ленин“, които слушат курса от лекции по конструкция и технология на полупроводниковите прибори в два семестъра. Обемът на материала е съобразен с провеждането на лабораторни упражнения, също в два семестъра, и с изготвянето на курсов проект. Заедно с другите профилиращи дисциплини — технология и автоматизация на полупроводниковото производство и анализ и синтез на интегрални схеми — този курс има за цел да даде специалната подготовка на бъдещите инженери, работещи по проектирането и производството на полупроводникови прибори.

Основата на този курс са дисциплините физика, физически основи на полупроводниковата електроника, радиоелектронни материали, електронни и полупроводникови прибори, автоматизация на проектирането в електрониката, измерване в електрониката и основи на микроелектрониката, които се изучават последователно от студентите в предишните семестри.

Учебната програма е съобразена с квалификационната характеристика на НПК „Полупроводникова техника“ за подготовката на кадри. Дисциплината обхваща както дискретните, така и интегралните прибори, разгледани от тяхната конструктивно-технологична страна, и отделните технологични процеси, представени като инструменти на полупроводниковата техника. Съдържанието на курса е определено от крайния етап на обучението, от неговата инженерна насоченост и непосредствена връзка с производството. Това позволява книгата да се използува от многобройните специалисти, работещи в тази област.

Изразявам голямата си благодарност на студентите от няколко випуска от ВМЕИ „Ленин“, както и на моите колеги от лабораторията, които допринесоха за написването на учебника. Освен това благодаря за компетентните мнения и преди всичко за широкия отклик сред специалистите, който методиката на разглеждания материал намери в продължение на седемте години на преподаването му. Благодарение на тази „обратна“ връзка имах възможност да забележа доколко отделните теми са поставени правилно и се възприемат и да въздействувам положително на учебния процес.

Искам да изтъкна и благодарността си на рецензентите за голямото внимание, с което подходиха към предложения им ръкопис, и за ценните им препоръки.

Авторът

ГЛАВА I

МИНИАТЮРИЗАЦИЯ И НАДЕЖДНОСТ

Усъвършенстването на технологията и постигнатата степен на интеграция в единица обем определят основните етапи на миниатюризацията на полупроводниковите прибори: I — миниатюризиране, II — субминиатюризиране, III — микроминиатюризиране, IV — тънкослойна техника, V — монолитна техника, VI — хибридна и мултичипна техника [124, 125]. Показаните на фиг. 1.1 граници не са окончателни, тъй като дори и за материала силиций не са достигнати функционалните граници на биполярните и MOS-технологии.

На фиг. 1.2 са показани професионалните връзки между специалистите, произвеждащи полупроводникови прибори, и тези, които ги използуват. Дадена е и промяната в тези връзки в резултат на бързото развитие на полупроводниковата техника, изразяваща се във взаимно поемане на „чужди" функции.

В резултат от развитието на микросистемите конструкцията на прибора не може да се отдели от технологията на производство.

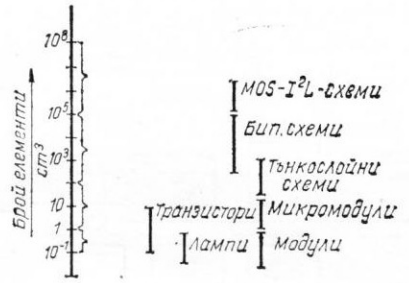
Основното предимство на микросистемите — голямата надеждност, може да бъде показано със следния пример [126]. Нека надеждността λ в h^{-1} се определя с израза

$$\lambda = -\frac{1}{z} \cdot \frac{dz}{dt},$$

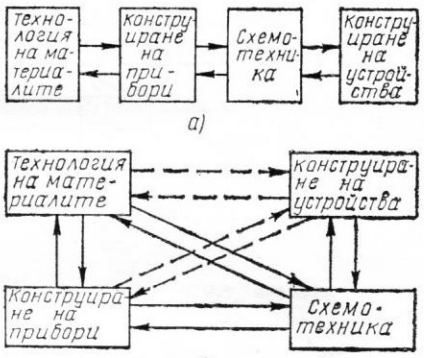
където z е броят на годните прибори, а $\frac{1}{z} \cdot \frac{dz}{dt}$ — относителната промяна на броя на тези прибори с течение на времето в резултат на настъпилите откази. За повечето типове полупроводникови прибори е в сила зависимостта, показана на фиг. 1.3:

$$z = z_0 e^{-\lambda t}.$$

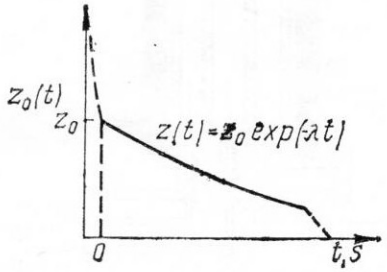
Тя описва средния участък на графиката, като z_0 е броят на изпитваните прибори. За да се определи експериментално λ, е необходимо да се намери броят на отказите на група прибори за определено време Δt. Определената надеждност е валидна само с известна вероятност, която е толкова по-голяма, колкото е по-голямо произведението $z_0 \Delta t$. За един производител това означава, че голяма част от неговата продукция трябва за дълго време да бъде подложена на изпитване. Изход от това неприемливо положение е изпитването на по-малък брой елементи при по-тежки условия. С помощта на математически съотношения така намерената надеждност се привежда към условията на нормална експлоатация. Вероятността, с която производителят оценява надеждността на произведените от него прибори, определя областта на доверие K. В табл. 1.1 са показани необходимите за изпитване прибори z_0 за $\Delta t = 1000$ часа, област на доверие K — 75% и 90% в зависимост от надеждността λ и броя на отказите Δz [126].



Фиг. 1.1



Фиг. 1.2



Фиг. 1.3

Таблица 1.1

	$\Delta z = 0$		$\Delta z = 1$		$\Delta z = 2$	
λ	$K = 75\%$	$K = 90\%$	$K = 75\%$	$K = 90\%$	$K = 75\%$	$K = 90\%$
10^{-5}	139	231	269	390	511	668
10^{-6}	1387	2303	2693	3891	5100	6681
10^{-7}	13863	23026	26927	38980	51094	66808
10^{-8}	138600	230000	269000	389000	510000	668000

В най-общия случай вероятността за времето Δt от общ брой z_0 да откажат Δz прибори, като $\Delta z \ll z_{10}$, се изразява чрез Поасоновото разпределение:

$$K(z_0, \Delta z) = \frac{(\lambda z_0 \Delta t)^{\Delta z}}{\Delta z!} e^{-\lambda z_0 \Delta t}.$$

За малък калкулатор от старите поколения с брой на приборите $z_0 = 10^4$ при $\lambda = 10^{-7}$ h^{-1} и време на работа $\Delta t = 1000$ h се получава вероятност за безотказно действие ($\Delta z = 0$):

$$K(10^4, 0) = \frac{1}{0!} e^{-1} = 0{,}37 \rightarrow 37\%.$$

Ако се увеличи λ до 10^{-8} h^{-1}, получава се $K = 90\%$. Може да се приеме, че надеждността на един дискретен прибор и тази на една интегрална схема със средна степен на интеграция са еднакви. Така за калкулатор от по-ново поколение със $z_0 = 500$ прибора (средна степен на интеграция) вероятността за безотказно действие още при $\lambda = 10^{-7}$ h^{-1} е вече 95%.

ГЛАВА 2

ТЕХНОЛОГИЯ НА ПОЛУПРОВОДНИКОВИТЕ МАТЕРИАЛИ

Усъвършенстването на технологията на полупроводниковите материали е решаващо за бързия напредък на полупроводниковата техника, тъй като гарантирането на параметрите на материалите определя параметрите на самите прибори.

Технологията за добиване на силиций и германий включва химично разлагане, пречистване, редукция, изтегляне на монокристали и т. н. Полученият по този начин материал съдържа много примеси, които не могат да бъдат отстранени с помощта на класическите методи за пречистване. Основен параметър, определящ качеството на материала в резултат на пречистването, е специфичното съпротивление. Той дава информация за концентрацията на електрически активните примеси.

В полупроводниковата техника концентрацията на всички примеси се изразява обикновено в брой атоми на кубичен сантиметър. Всички останали начини за изразяване на концентрацията, например в ppm, атомни ($n_{ат\%}$) или тегловни проценти, трябва да бъдат приравнени. За целта се изхожда от числото на Авагадро L, чрез което се определя концентрацията на силициевите атоми в 1 cm^3 силиций $D_{A_{Si}}$:

$$D_{A_{Si}} = \frac{L\gamma_{Si}}{A_{Si}} = \frac{6 \cdot 10^{23} \cdot 2{,}3}{28} = 5 \cdot 10^{22},$$

където γ_{Si} е плътността на силиция; A_{Si} — атомната му маса.

Абсолютната концентрация на даден примес на кубичен сантиметър се изразява с $D_A\, n_{ат\%}/100$. Този израз може да се използува за всеки примес, ако се приеме, че наличието му в основния материал не изменя плътността на последния. Например 1 ppm желязо в силиция означава 10^{-4} ат.% или 5.10^{16} атома желязо на cm^3. Тегловните проценти се превръщат в атомни по прости съотношения (вж. гл. 9).

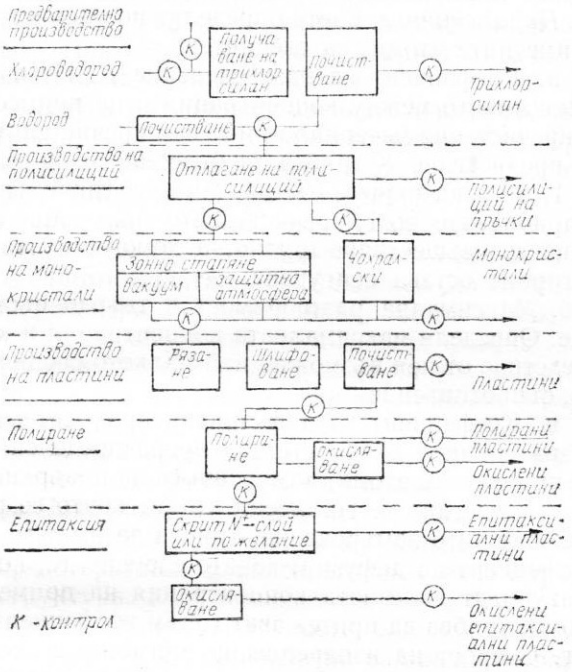
2.1. СИЛИЦИЙ

Силицият е разпространен широко главно като силициев двуокис. На фиг. 2.1 е показана технологичната схема за добиване на силиций и за понататъшната му обработка.

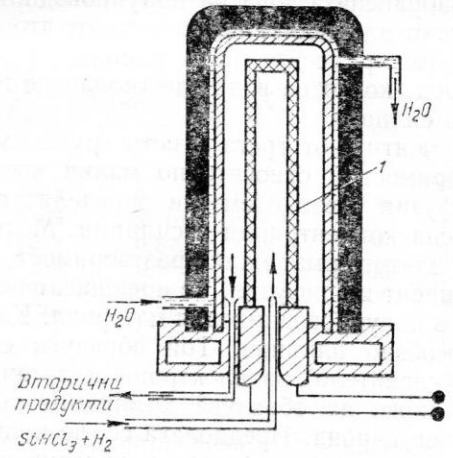
На фиг. 2.2 е показан производствен метод, при който химическата реакция, в резултат на която се получава атомарен силиций, се извършва на повърхността на силициева пръчка *1*, загрявана от преминаващия през нея електрически ток. Реакциите, които описват този процес, са следните:

$$SiHCl_3 + H_2 \rightleftarrows Si + 3HCl;$$

$$4\ SiHCl_3 \rightleftarrows Si + 3SiCl_4 + 2H_2.$$



Фиг. 2.1



Фиг. 2.2

Полученият по този начин силиций представлява поликристал с висока степен на чистота. Въпреки това в него се съдържат примеси, които не са желателни при по-нататъшните процеси. Обикновено за постигане на желаното специфично съпротивление нежелателните примеси се компенсират до предварително зададена степен. Например за постигане на $\rho_N = 1000\ \Omega$cm концентрацията на донорните (фосфорните) атоми трябва да бъде намалена до $1{,}25.10^{12}$ cm^{-3} или чрез пречистване, или

чрез компенсиране с акцепторни примеси. Производителите определят горната граница на компенсацията на около 10%. Степента на компенсация е важен параметър, гарантиран от производителите на силиций, тъй като кристали с особено голяма степен на компенсация по-лесно променят своите параметри в неблагоприятна посока по време на някои технологични процеси.

Параметрите, които определят поведението на примесните атоми, са следните:

а. Коефициент на разпределение K. Изразява отношението между концентрацията на примеса в непречистения материал към тази в пречистения — за пречистване K трябва да бъде много по-голям от 1, а за легиране — $K \ll 1$. Ако коефициентът K е приблизително 1, пречистването чрез зонно стапяне се осъществява трудно, а хомогенността на легиране остава осигурена.

б. Максимална разтворимост в твърдо състояние. Определя максималната концентрация и като следствие от нея възможно най-малкото специфично съпротивление.

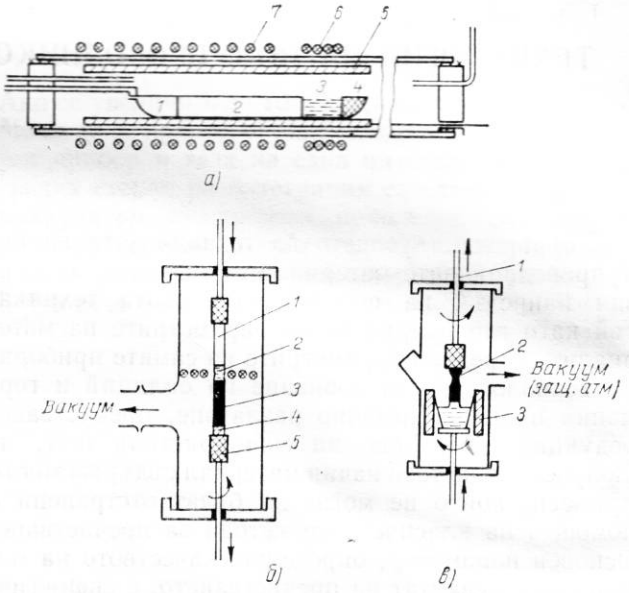
в. Коефициент на дифузия на примесите. Показва с каква скорост става преразпределението на примесните атоми, намиращи се на повърхността на пластината. Примесни атоми, които се разглеждат като замърсяване, трябва да имат малък коефициент на дифузия, докато елементите, които осигуряват полезната концентрация на примесни атоми, трябва да притежават голям коефициент.

г. Скорост на изпарение на примесните атоми. Трябва да бъде възможно най-голяма за вредните примеси.

д. Плътност на допълнителните разрешени нива в забранената зона на полупроводника. Определя се от плътността на примесните атоми. Много малко са примесите, като паладий, германий и въглерод, които не водят до създаване на такива нива в силиция.

Елементите от трета и пета група имат добра разтворимост и относително малки коефициенти на дифузия. Тези елементи определят полезната примесна концентрация в силиция. Медта, желязото и златото имат малка разтворимост, но голям коефициент на дифузия. Те повишават рекомбинацията в полупроводниковия материал. Кислородът има особено влияние. Той образува енергийни нива (уловители) за електрони и дупки. Въглеродът може да образува химичното съединение силициев карбид. Предполага се, че количеството въглерод в силиция, водещо до образуването на силициев карбид, влияе върху микронехомогенностите, които са определящи по отношение на пробивното напрежение на създадения PN преход.

Монокристали се изтеглят от силиций по метода на Чохралски, метода на зонното стапяне и метода на зонното безтигелно стапяне (фиг. 2.3 *а*, *б*, *в*) [131, 132, 134]. Безтигелните методи имат предимството, че осигуряват по-висока степен на чистота, докато тигелните методи и особено методът на Чохралски се характеризират с по-малка плътност на дислокациите. И в двете направления съвременната полупроводникова техника е постигнала значително подобряване на параметрите.



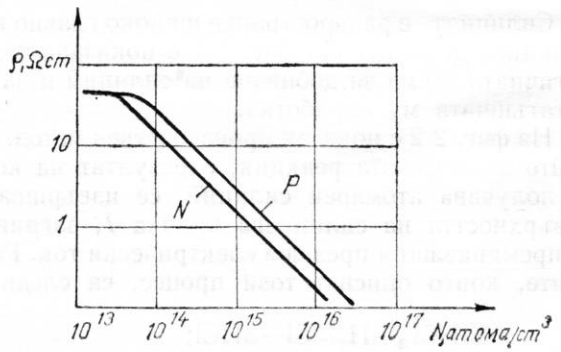
а) Зонно тигелно стапяне
1–зародиш, 2–монокристал, 3–стопилка,
4–поликристал, 5–графитова тръба, 6,7–нагреватели
б) Зонно безтигелно стапяне
1–силициева пръчка, 2–разт. област,
3–монокристал, 4–зародиш, 5–държател
в) метод на Чохралски
1–държател за изтегляне, 2–израстващ кристал
3–тигел с нагревател

Фиг. 2.3

2.2. ГЕРМАНИЙ

С германия е свързано изобретяването на транзистора. За разлика от силиция той не е широко разпространен в природата и дори известно време е бил считан за рядък елемент. Въпреки това към 1970 г. производството му в световен мащаб е било около 3000 тона. Изходният продукт — германиевият окис, се получава като страничен продукт в цветната металургия. Германият спада към полупроводниците с непряк преход. По-малката широчина на забранената му зона спрямо силиция позволява използуването му при температури само до 75°C.

Характерна за германия е по-голямата подвижност на токовите носители, която позволява да се изграждат високочестотни прибори. На фиг. 2.4



Фиг. 2.4

е показана зависимостта на специфичното съпротивление на германия от концентрацията на примесите. Германият се получава по технологична схема, подобна на показаната за силиций. След фракционна дестилация на германиевия четирихлорид и хидролиза отново се получава германиев двуокис, който на два етапа се редуцира до чист германий. Полученият в резултат на физико-химичните процеси германий има специфично съпротивление около 1—20 Ω cm. За получаване на необходимата проводимост се използуват главно антимон и арсен за N-проводимост и индий и галий — за P-проводимост. Важно свойство за този полупроводников материал е силно изразената зависимост на времето на живот на неосновните носители от специфичното съпротивление.

2.3. СЛОЖНИ ПОЛУПРОВОДНИЦИ

Развитието на полупроводниковата техника показва, че в бъдеще все по-голяма част от полупроводниковите прибори ще се създават на базата на сложните полупроводници. За тях са характерни редица структурни особености. Например в структурата на галиевия арсенид галият и арсенът участвуват по равно — по 50%. Това означава, че всеки галиев атом в тетраедъра е заобиколен от четири арсенови атома и обратно, всеки арсенов атом — от четири галиеви атома. В посока (1 1 1) всяка равнина се състои последователно само от галиеви или само от арсенови атоми. Равнината, образувана от галиевите атоми, се отбелязва като *A*-равнина. Трите валентни връзки на галия са обикновено свързани, поради което тази равнина е устойчива. Равнината *B* (1 1 1) е образувана от арсенови атоми. Арсенът е петвалентен, т. е. на всеки атом остават две свободни връзки, поради което тази равнина е химично силно активна.

Особеностите при сложните полупроводници намират отражение в технологичната схема на получаването им. Обикновено единият от компонентите е по-лесноизпарим, т. е. има по-голямо налягане на парите. При нормално стопяване пръв напуска съединението този компонент. Това налага получаването на монокристали да става в затворена система с компенсиращо налягане. Така се предотвратява дисоциацията на сложния полупроводник. Температурата на цялата система трябва да бъде по-висока, отколкото кондензационната температура на по-лекия компонент. Така например при стопяването на галиевия арсенид се получава налягане 87279,1 Pa (0,89 at). То е равно на налягането, което се получава при сублимирането на чист арсен при 610°C. Следователно при получаването на галиев арсенид, напр. по метода на Бриджмен, за запазване на стехиометрията на полупроводника е необходимо в реактора да се осигури допълнително количество чист арсен. Пещта се характеризира с две плата на температурата — при тигела до 1300°C, при източника на арсен до 650°C.

Сложните полупроводници могат да бъдат класифицирани по следния начин: а) полупроводници с налягане на парите (при температура на топене) до няколко стотици паскала (няколко тора) — индиев антимонид, галиев антимонид (това означава, че те могат да бъдат обработвани подобно на германия, но не и във вакуум); б) полупроводници със средно налягане на парите — галиев арсенид, индиев антимонид; в) полупроводници с високо налягане на парите — галиев фосфид и индиев фосфид. При последния тип монокристалите се получават в автоклавни системи.

Друга възможност предлага използването на т. нар. нестехиометрична стопилка. Като пример може да се разгледа получаването на индиев фосфид. Той се топи при температура 1070°C с налягане на парите 60 at. Ако се работи със стопилка, в която вместо 50% фосфор има само 20%, парциалното налягане се намалява до 39226,8 Pa (0,4 at).При 950°C от такава стопилка може да се получи монокристал на индиевия фосфид, но физико-химичните му параметри са по-лоши от тези на получения монокристал от стопилка с нормална стехиометрична структура.

За полупроводниците със средно налягане на парите може да се приложи видоизменението на Чохралски. При него стопилката се покрива с течно съединение, например борен окис, който предотвратява изменението на стехиометричната структура. При температура 800°C борният окис е чиста прозрачна течност.

На табл. 2.1 са показани най-важните параметри на някои сложни полупроводници. Те имат следните особености.

Таблица 2.1

	Температура на топене, °C	Налягане на парите*, Pa	E, eV	Подвижност, $cm^2 . V.S^{-1}$		Диелектрична константа, ε_r
				електрони	дупки	
AlSb	1060	9,8	1,49	900	400	10,1
GaP	1465	245.10^3	2,25	300	150	8,5
GaAs	1238	$0,87.10^1$	1,38	8600	250	11,1
GaSb	706	0,98	0,68	5000	1000	14,0
InP	1070	588.10^4	1,27	5300	100	10,7
InAs	940	2,94	0,36	33000	450	11,7
InSb	525	0,098	0,17	80000	7000	15,7

* На по-летливия компонент.

Алуминиев антимонид. Произвежда се сравнително лесно. Окислява се при стайна температура, като процесът е силно изразен при увеличена примесна концентрация. Редуцира кварца и е активен спрямо графита, поради което като материал за тигели и други съдове за обработка се използува алуминиев окис. Прилага се за създаване на фотоелементи.

Галиев фосфид. Кристалите на галиевия фосфид са оранжеви и прозрачни. Производството им е много трудно. Използуват се стопилки, които имат повече галий, отколкото фосфор. Напоследък се съобщава за изтегляне и получаване на кристали чрез реакции на газови съставки. Галиевият фосфид е изключително подходящ за луминесцентни

диоди, но не е приложим за лазери, тъй като при него не е възможен директен преход. В зависимост от концентрацията на полезните примеси диодите от галиев фосфид могат да излъчват от жълта до тъмночервена светлина.

Галиев антимонид. Топи се лесно и се използува най-вече за лазерни диоди, които излъчват в областта около 1,6 μm. Използуват се и за специални прибори.

Индиев фосфид. Производството му е сложно, но въпреки това намира широко приложение за лазерни диоди.

Индиев арсенид. Производството му е подобно на това на галиевия арсенид. Използува се главно за създаване на инфрачервени детектори.

Индиев антимонид. Характеризира се с ниско налягане на парите. Прилага се главно за прибори, в които се използува ефектът на Хол.

За всички сложни полупроводници е характерно, че един от двата компонента лесно може да бъде заместен от елемент от същата група на периодичната система. Много и все по-приложими са сложните полупроводници със смесен състав, например галий, арсен и фосфор. В зависимост от концентрацията на смесените компоненти може да се получи лазерен диод с излъчване в областта 0,8—8 μm.

Други перспективни полупроводникови материали са силициевият карбид, кадмиевият сулфид и др. Забранената зона на силициевия карбид е 2,8 eV. Кристалите му се получават чрез реакция в газообразно състояние. Силициевият карбид се използува за луминесцентни елементи. Кадмиевият сулфид и цинковият сулфид се използуват главно за фотоелементи. Все по-широко приложение намира една нова група от термоелектрически полупроводници, прилагани в елементи на Пелтие. Най-добър ефект дават смеси от следните материали: бисмутов телурид — бисмутов селенид, антимонов телурид — бисмутов телурид.

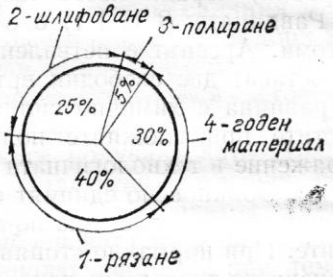
2.4. МЕХАНИЧНА ОБРАБОТКА НА ПОЛУПРОВОДНИКОВИТЕ МАТЕРИАЛИ

Създадените монокристали трябва да бъдат подготвени за използуване в полупроводниковото производство. За да може да се реализира планарният процес, изтегленият кристал се нарязва на пластини. От своя страна те се обработват по подходящ начин. За различните полупроводникови прибори се изискват различни параметри на повърхността на полупроводниковите пластини [134÷136, 137, 1÷3].

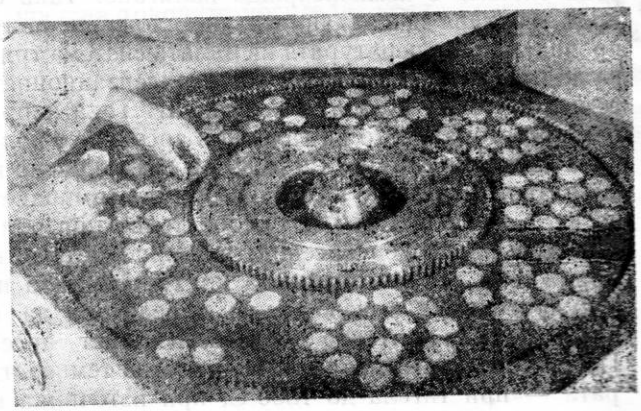
Етапите на механичната обработка (фиг. 2.5) са рязане, шлифоване и полиране. През различните етапи се изразходва значителна част от полупроводниковия материал. Само една малка част от материала — *4*, остава годна за по-нататъшна обработка. Нарязаните пластини имат различна дебелина — обикновено около 300—400 μm. На повърхността им се получава нарушен слой с много механични дефекти, който е непригоден за изграждането на полупроводников прибор и трябва да бъде отстранен чрез операцията шлифоване. Съществуват няколко вида машини за шлифоване. В съвременната полупроводникова техника най-широко приложение са намерили машините със свободно движещи се дискове, от долната страна на които са залепени пластините. Подреждането им върху диска е показано на фиг. 2.6. Огледалната повърхност на пластината се получава едва след третия етап от механичната обработка — полирането. Механичното полиране не се различава принципно от шлифоването. Различна е само големината на абразивните зърна, както и някои химични процеси, които протичат на повърхността на пластината.

Абразивните зърна представляват окиси на някои елементи — алуминий, цирконий, церий или диамантен прах. Ако е засилено влиянието на химичните процеси, полирането се нарича химико-механично. Този метод осигурява най-добро качество на повърхността. Механизмът на химико-механичното полиране се разглежда в гл. 3.

Дори и най-съвършеното полиране не отстранява напълно всички дефекти. Дълбочината на остатъчните дефекти зависи най-вече от диаметъра на абразивните зърна. При полиране с Al_2O_3 се използуват зърна с диаметър 0,3÷1 μm за предварително полиране и γ-Al_2O_3 с диаметър на зърната 0,01÷0,05 μm за окончателно полиране. Използува се свободен абразив във вид на водна емулсия, в която се прибавят и някои пълнители. Основен недостатък е трудното отделяне на абразивните зърна от обработваната повърхност след завършване на операцията. Полирането с диамантена паста е по-бързо, но при него се получават локални дефекти с по-голяма дълбочина. Поли-



Фиг. 2.5



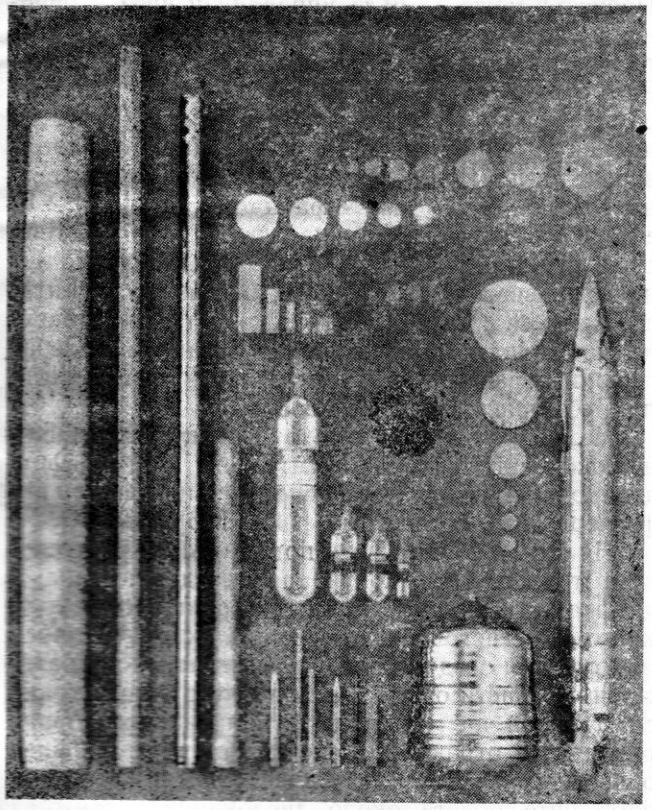
Фиг. 2.6

раните по този начин пластини трудно се използуват като подложки в епитаксиалния процес.

2.5. ПОЛУПРОВОДНИКОВАТА ПЛАСТИНА КАТО ИЗХОДЕН МАТЕРИАЛ НА ВСЯКА ТЕХНОЛОГИЧНА СХЕМА

След механичната обработка полупроводниковата пластина придобива блестяща (огледална) повърхност. Обикновено двете страни се обработват еднакво, с изключение на някои последни етапи. Нарязаните пластини са с грапавина до 12 μm, като средната аритметична стойност на разликите в грапавината на разстояние 10 mm е 1 μm. За шлифованите пластини производителят гарантира грапавина 5 μm и средна аритметична стойност на отклонение 0,8 μm.За полираните пластини производителят гарантира обикновено равнинност и гладкост. От полираната страна ръбът е заоблен, а от обратната страна — отвесен. По този начин при първоначалното окисление лесно се определя работната повърхност.

За всички видове пластини производителят предоставя геометричните размери, диаметъра и дебелината, като данните са придружени от гарантирани толеранси. Това се отнася както за кръгли пластини, така и за пластини със специфична форма — правоъгълна, квадратна, елиптична и др. На фиг. 2.7 е показана продукция на един производител на полупроводников материал, в случая силиций, от която се вижда голямото многообразие на форми на пластините. Обикновено точността за



Фиг. 2.7

диаметъра на пластините достига до ±25 μm. Точността при определянето на дебелината зависи от успоредността на пластината. Успоредността се определя от разликата между максималната и минималната стойност на дебелината. За тази цел се прави измерване в три точки, които представляват върховете на един мислен равностранен триъгълник и се намират на 3 mm от ръба. Възможно е и измерване на дебелината в пет точки в центъра и в четири точки, разположени във върховете на мислен вписан квадрат на 3 mm от ръба. Във връзка с дебелината е и еластичността на пластината. За нейното измерване пластината се подпира на три места отново на 3 mm от ръба през 120° и се натиска например с маса 8 g.

Характерно за всички параметри е задаването на максимална, минимална и типична стойност. Това дава възможност на конструктора по-добре да използува полупроводниковия материал.

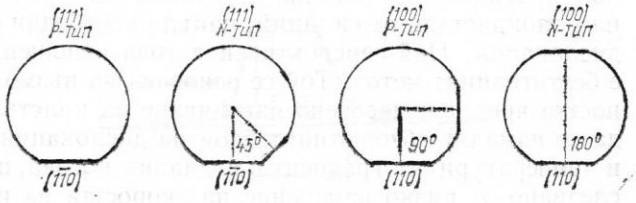
Параметрите на повърхността на пластината са грапавост, механични увреждания на ръба и равнинност. Неразрушаващото измерване на грапавости става по индуктивен път. Регистрират се грапавини до няколко хилядни от μm. Обикновено се измерват два взаимноперпендикулярни диаметъра, като се определя максималната стойност и средната аритметична стойност на грапавостта.

Полупроводниковата повърхност трябва да бъде свободна от механични увреждания. Производителят гарантира цялата повърхност на пластината без областта на 0,5 mm от ръба. Наличието на механични дефекти се установява с отразен светлинен лъч.

Равнинността на пластината се определя чрез отчитане на интерференцията, породена от евентуалната вълнообразна повърхност. За целта пластината се прикрепва чрез вакуум към еталонна стъклена повърхност и се „опипва“ със светлинен лъч.

Друга група от параметри е свързана с гарантирането на ориентацията на пластината. При силиций обикновено се осигурява точност до 0,5° за равнините (1 1 1), (1 1 0) и (1 0 0). Освен това за редица конструктивни задачи е необходимо и гарантирането на допълнителни кристалографски посоки. Това става чрез изрязването на ориентиращи ръбове, които служат едновременно и за поустойчиво транспортиране. Точността им при отрязването е ±2°. Към основните ориентиращи ръбове могат да се прибавят и допълнителни. Разположението е показано на фиг. 2.8. Допълнителните ръбове са винаги с по-малка дължина.

От електрофизичните параметри на пластината производителят гарантира специфичното съпро-



Фиг. 2 8

тивление, типа проводимост и времето на живот на неосновните носители. Чрез използуване на четирисондовия метод могат да бъдат определени толерансите в специфичното съпротивление. Използуват се следните методи:

а) $\pm$ Толеранс, $\% = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1} \cdot 100$,

където ρ_1 е стойността на специфичното съпротивление в центъра; ρ_2 — средната аритметична стойност от четири измервания на разстояние половин радиус от центъра през 90°.

б) $\pm$ Толеранс, $\% = \frac{\rho_3 - \rho_1}{\rho_1} \cdot 100$,

където ρ_3 е средната аритметична стойност, измерена на 3 mm от ръба в четири точки през 90°; ρ_1 — стойността в центъра.

При монокристалите, изтеглени по зоновия безтигелен метод, толерансът се определя по формулата

в) $\pm$ Толеранс, $\% = \frac{\rho_{max} - \rho_{min}}{\rho_{max} + \rho_{min}} \cdot 100$,

където ρ_{max} и ρ_{min} са съответно максималната и минималната стойност от измерените в четири точки стойности по продължение на един диаметър.

Освен изброените по-горе параметри производителите осигуряват допълнително за полирани пластини следната информация: а) наличие на драскотини — 90% от пластините на една партида трябва да бъдат без драскотини, за останалите 10% са допустими най-много 3 драскотини на пластина с обща дължина, непревишаваща половината от диаметъра; б) петна или други покрития — гарантира се 100% отсъствие; в) наличност на ямички от механична и химична обработка — гарантира се също пълно отсъствие. (Само при пластини с диаметър, по-голям от 76,2 mm, се допускат до два броя такива ямички на пластина.); г) наличие на повърхностни напрежения — гарантира се липса при проявяващо ецване с продължение до 1 минута; д) закръгляне на ръба — за (1 1 1) се задава от 7÷21 μm с максимално проникване към центъра 2 mm; е) механични увреждания по ръба — гарантират се максимално до два дефекта на разстояние 0,75÷1 mm от ръба; ж) чистота на повърхността — гарантират се най-много до пет отразяващи при засветяване точки, които не могат да бъдат отстранени чрез обдухване с азот.

От обратната страна производителят гарантира допълнително: а) следи от рязане — липса на следи в 90% от пластините; б) за чистота — повърхност, свободна от механични примеси.

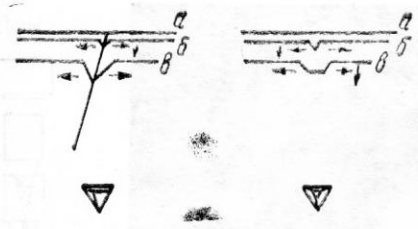
Производителят е длъжен да гарантира и плътността на дислокациите в материала. Съвременната полупроводникова техника позволява изтеглянето на монокристали от силиций, напълно свободни от дислокации. Най-перспективен в това отношение е безтигелният метод. Той се основава на възможността чрез целенасочено изтъняване на кристала да се намалят абсолютният брой на дислокациите и температурният градиент в радиална посока, последвано от рязко изменение на скоростта на изтегляне и ново рязко изтъняване на кристала. Дислокациите се изтеглят към периферията на монокристала и се избягва възможността за тяхното взаимно влияние. При достигане на диаметър на монокристала 3 mm дислокации не се наблюдават, не се образуват и нови, което е характерно за монокристали с малък диаметър. При следващото увеличаване на диаметъра до желаната стойност дислокации не се получават, ако чрез подходяща апаратура и условия на изтегляне новосъздадените напрежения се запазят по-малки от определена стойност. Физичният смисъл на това явление е, че образуването на нова дислокация в свободен от дислокации кристал изисква по-голяма енергия, отколкото умножението на дислокации. Ето защо „по-лесно" е да се изтеглят идеални монокристали, отколкото да се поставя за цел получаване на монокристали с плътност на дислокациите 5.10^2 cm^{-2}. Възможно е достигането на диаметър от 75 mm за монокристали, свободни от дислокации.

За редица стандартни технологии е необходимо да се отчита получаването на висока променлива плътност на дислокациите в резултат на редуващите се високотемпературни процеси.

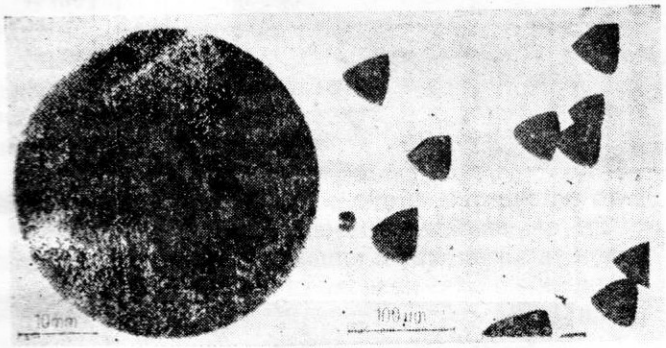
Най-простият метод за откриване на дефекти е химичната обработка на изследваната повърхност с течни или газообразни агенти (фиг. 2.9). Този метод е съпроводен обаче с разрушаващо действие, тъй като проявяването на дефектите става чрез разтваряне на материала. Поради анизотропното действие на разтворителите и изменената скорост на ецване на местата на дефектите се получават характерни геометрични форми (фиг. 2.10 и 2.11). Например при изследване на равнината (111) ограничаващи са равнините $(1\bar{1}1)$, $(\bar{1}11)$ и $(1\bar{1}\bar{1})$. Процесът може да бъде управляван чрез изменение на продължителността на обработката, от която зависят големината и дълбочината на ямичките. Различават се два вида ямички — триъгълна пирамида с връх, насочен навътре в пластината, и пресечена пирамида, която се получава при проявяване на плитки дислокации и при продължително ецване расте само странично. На фиг. 2.12 е показана повърхността на пластина, обработена със специални разтворители. Спираловидните линии показват резки промени в концентрацията, дължащи се на колебаеща се скорост при изтегляне на кристала. По подобен начин се колебае и концентрацията на електрически неактивните примеси кислород и въглерод.

Между методите за неразрушаващ контрол най-широко приложение имат рентгеновата топография, двойнокристалната рефлексионна топография и инфрачервената фотография [141÷146].

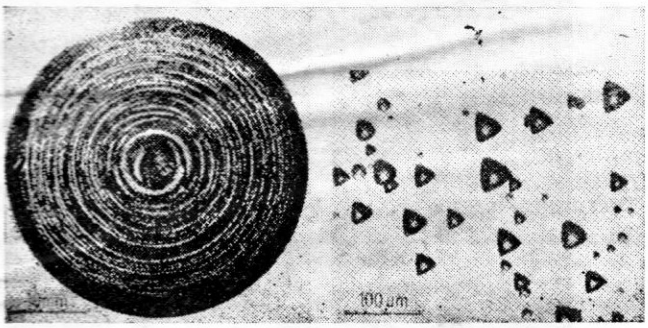
На фиг. 2.13 е показан принципът на рентгеновата топография. Монтираната зад кристала *1* диафрагма *2* пропуска само дифракционния лъч, който се регистрира върху фотоплака *3*. Той носи информация за динамично и кинематично отразяващите области от кристала, които от своя страна са функция на механичните напрежения. Поради различната отразяваща способност на двата вида области върху фотоплаката се регистрират напрежителните полета около дислокациите, които са типични кинематични области и осигуряват добър



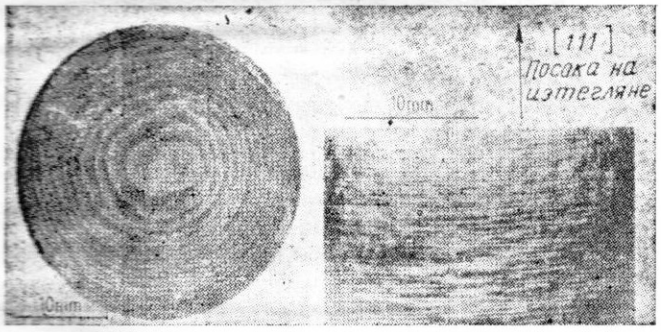
Фиг. 2.9



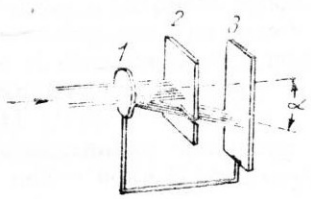
Фиг. 2.10



Фиг. 2.11



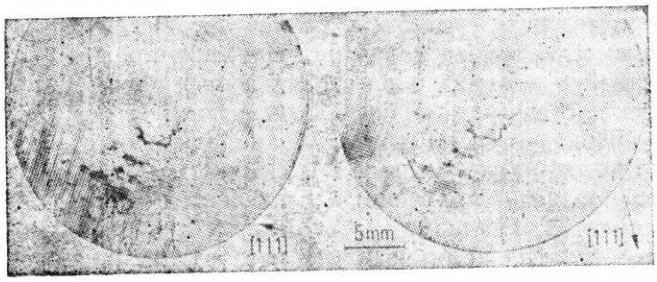
Фиг. 2.12



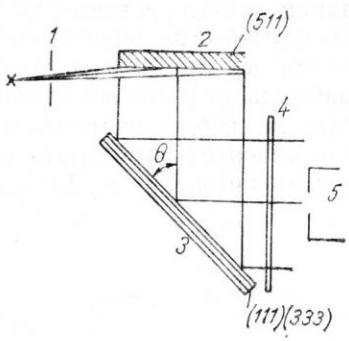
Фиг. 2.13

контраст на картината. На фиг. 2.14 са показани изображения на пластини, снети по този метод върху които дислокациите се наблюдават добре, като черни линии.

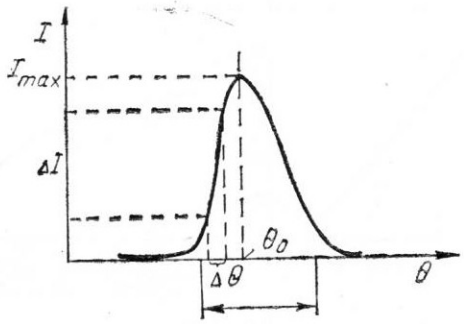
При двойнокристалната рефлексионна топография се използува принципната схема от фиг. 2.15. Насоченият сноп лъчи пада на ивици върху пригоден кристал *2* по възможност с малко дефекти. Излъчването се оразмерява така, че условието за отражение да се изпълнява за определена линия на рентгеновия спектър. По този начин се получава широк монохроматичен сноп за изследване на изпитвания кристал *3*. Ако последният се върти, получава се характерната крива на зависимостта на интензитета на отражението *I* от ъгъла на отражение θ (фиг. 2.16), която има стръмен фронт към по-малките ъгли. За да може да се използува пълната чувствителност на метода, преди фотоснимката кристалът се завърта, така че ъгълът да се намалява, докато интензитетът стане равен на половината от максималната си стойност, определена от ъгъла θ_0. По този начин работната точка се премества към стръмния фронт на крива-



Фиг. 2.14



Фиг. 2.15



Фиг. 2.16

та на отражението. Тогава и най-малките локални отклонения от идеалната решетъчна структура предизвикват силно изменение на интензитета на отражение на изследвания участък и с това дават съответен контраст върху фотографската плака *4*. При оптимално настройване могат да бъдат регистрирани колебания на решетъчната константа до $\Delta a/a = 10^{-7}$. Колебания от този порядък се предизвикват например от периодично изменяща се концентрация на примесни атоми в силиция (фиг. 2.17).

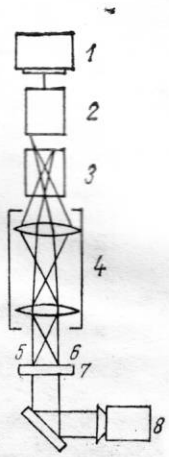
За редица случаи са развити специални рентгенотопографски методи. Създаден е метод за получаване на рентгенотопографски стереоснимки, с които може да бъде анализиран пространственият ход на дефекти в решетката дори в условията на високотемпературни процеси.

Инфрачервената фотография представлява друг прост и бързо информиращ метод за оценка на двустранно полирани монокристални пластини. Той дава възможност за бърз преглед на дефекти като дислокации и замърсявания. За получаване на изображение се използува линейно поляризирана инфрачервена светлина, тъй като полупроводниците, като силиций и галиев арсенид, не пропускат видимата светлина. При преминаване на линейно поляризирана светлина през област с дефекти става промяна в поляризацията.

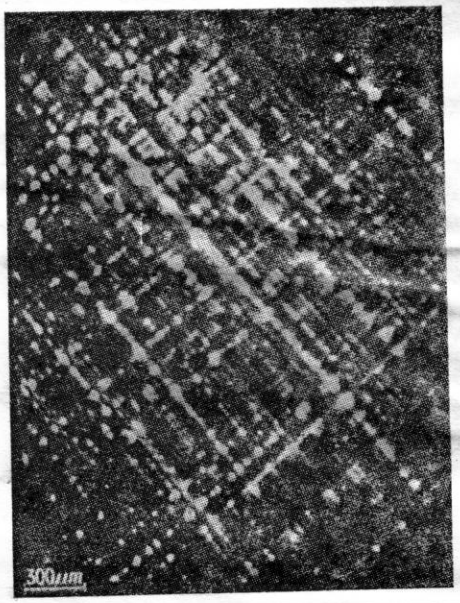
Показаната на фиг. 2.18 апаратура се състои от източник на светлина *8* и *7*, микроскоп *4*, който изобразява увеличено изследвания участък от кристала, анализатор *3*, който абсорбира според посоката на поляризацията част от преминалата светлина, инфрачервен преобразувател на изображението *2* и монитор *1*. С *5* и *6* са означени светлинните лъчи. Апаратурата се настройва така, че линейно поляризираната светлина да бъде абсорбирана. В този случай само дислокациите и другите дефекти, водещи до промяна в поляризацията, могат да се наблюдават като светли извивки и точки. Разделителната способност на метода е до няколко микрометъра и зависи от интензитета на източника и качеството на монитора (фиг. 2.19).



Фиг. 2.17



Фиг. 2.18



Фиг. 2.19

ГЛАВА 3

ХИМИЧНА ОБРАБОТКА

3.1. ВЛИЯНИЕ НА ХИМИЧНАТА ОБРАБОТКА ВЪРХУ ПОВЪРХНОСТТА

В процеса на създаването на полупроводниковите прибори многократно се изпълняват разнообразни химични обработки. Те се основават на физико-химичните свойства на полупроводниковия материал и се различават една от друга както по състава на реактивите, така и по предназначение.

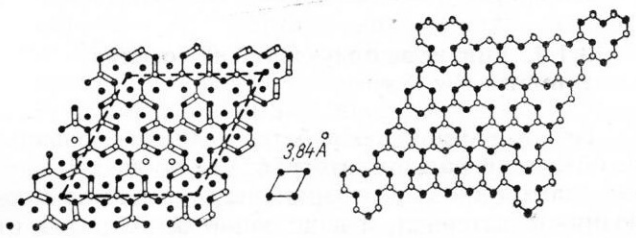
В полупроводниковата техника повърхностните свойства на полупроводниковите материали отдавна са обект на задълбочени изследвания, тъй като много интересни явления и параметри на приборите не могат да бъдат обяснени само с обемните свойства на материала. С помощта на поток от нискоенергийни електрони 50—500 eV е установено, че кристалната структура на повърхността на силиция се различава съществено от тази на обемния материал.

Този експеримент се провежда в свръхвисок вакуум, за да се гарантира атомарно чиста повърхност. Електроните рефлектират от първите няколко реда на кристалната решетка и полученото изображение дава информация за строежа на повърхността. Елементарната клетка на повърхността (фиг. 3.1) се различава по размери от тази на обемния материал. Температурна обработка над 800°C води до нова промяна в нея. Изменението спрямо елементарната клетка на обемния материал до 800°C е петкратно, а над тази температура — седемкратно. В резултат на това в най-горните редове на решетката трябва да има излишни електрони, което може да води до повърхностно стабилизиране. Следователно химичната обработка е „отговорна" за състоянието на повърхността на полупроводниковия материал във всеки случай на приложението ѝ.

3.1.1. Химично полиране

При химичното и електрохимичното полиране повърхностният слой се разтваря, при което не се получават деформации. Получената повърхност е вълнообразна и в най-общия случай негодна за създаване на огледална повърхност. При най-известния метод за химико-механично полиране като абразив се използува SiO_2 [147—152]. Абразивната смес се получава като утайка от реакцията на $SiCl_4$ или $SiHCl_3$ с натриева основа. Полиращата суспензия е на основата на вода в съотношение 200g SiO_2 на 1l вода. За да бъде полирането ефективно, pH-стойността на разтвора трябва да бъде между 10 и 11 [155].

За химико-механично полиране може да се използуват и медни йони. В този случай механизмът е електрохимичен:



Фиг. 3.1

$$Cu^{++} + 2e^- \rightarrow Cu; \tag{3.1}$$

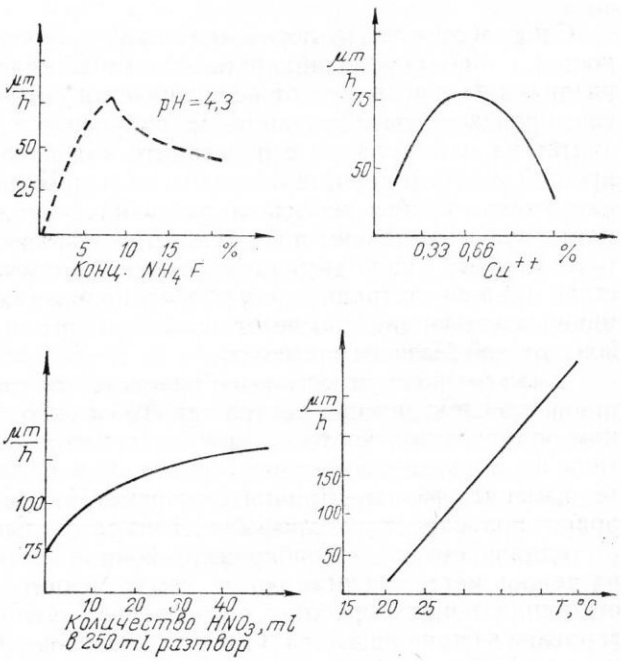
$$Si^{4+} + 6F^- \rightarrow SiF_6^{--};$$

$$Si \rightarrow Si^{4+} + 4e^-; \tag{3.2}$$

$$SiF_6^{--} + 2(NH_4)^+ \rightarrow (NH_4)_2 SiF_6.$$

Обмяната на електрони между силициевите и медните йони става в присъствие на амониеви и флуорни йони. Полученият силициево-амониев флуорид е разтворим, а медта се отлага като тънък слой. Недостатък на този метод е необходимостта от пълно пречистване на полупроводниковата повърхност от този слой, за което са разработени специални методи.

Параметрите, от които зависят скоростта и качеството на полирането, са общи за различните методи. На фиг. 3.2 са показани характерни зависимости за случая на използуване на медни йони.



Фиг. 3.2

Скоростта на снемане на полупроводниковия материал, изразена в μm/h, има максимум по отношение на процентното съдържание на компонентите на разтвора амониев флуорид NH_4F и меден нитрат $Cu(NO_3)_2$, докато зависимостта от количеството азотна киселина HNO_3 в единица разтвор има друг характер. Скоростта на операцията нараства линейно при увеличаване на температурата.

3.1.2. Ецване за получаване на локални геометрични форми

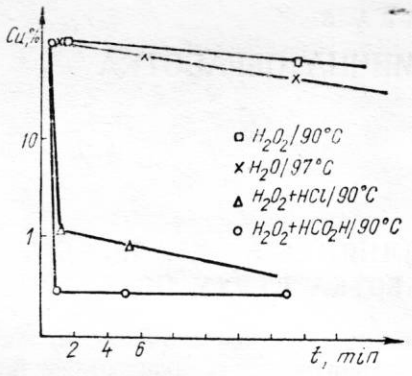
Този вид химична обработка е една от основните подоперации на фотолитографския процес. В случая става дума за разтваряне не само на полупроводников материал, а и на защитни покрития от негови окиси или нитриди, както и на метални слоеве, отложени или направо върху материала, или върху защитното покритие. При конструирането на един полупроводников прибор се налага многократно да се прилага тази химична обработка, за да се даде възможност за локално провеждане на следващите операции от технологичната схема [160÷173].

При силиция например се ецват освен чистия материал още SiO_2, Si_3N_4, Al_2O_3, както и Al, Mo, Ni, W, Au и други метали. Защитата на тези слоеве един от друг с помощта на фотолак не винаги е възможна, а и не винаги е целесъобразна. Ето защо химичните реактиви, които образуват съответния разтвор, трябва да имат подходящ състав и съотношение на отделните компоненти, които да осигурят селективно действие само върху обработвания слой. В този смисъл конструкторът винаги трябва да отчита влиянието на всяка следваща химична обработка върху резултатите от предишните операции.

3.1.3. Почистване на полупроводникови пластини

След механичната обработка върху повърхността на полупроводниковата пластина остават различни замърсявания от неорганичен и органичен произход. Замърсявания се получават в резултат на манипулации с пластините или поради престой между отделните операции на технологичната схема. Трябва ясно да се разграничи химичната обработка, целяща почистване на повърхността, от другите видове химични обработки. В случая става дума за отстраняване на адсорбирани и химично адсорбирани слоеве от молекули, атоми и йони от най-различен произход.

Замърсяванията от органичен произход са само привидно електрически неутрални. Те са склонни към поляризация, която изменя енергийната картина на повърхността на пластината. Освен това те изменят физико-химичните параметри, като правят повърхността хидрофобна. Това затруднява отстраняването на абсорбираните йони и атоми на тежки метали. Органичните замърсявания се отстраняват чрез обработка с фреон или чрез изваряване в сярна киселина. Освен тях водородният прекис H_2O_2 има добро въздействие, съчетано с



Фиг. 3.3

предимството, че позволява да се отстранят някои метални атоми — главно на медта. На фиг. 3.3 е показана ефективността на измиването с H_2O_2 за отстраняване на медни атоми според [174, 175]. Тежък проблем представлява почистването на повърхността от получените в резултат на ецване с флуороводородна киселина йони. Някои автори предлагат обработка с разтвор на йод-метанол за отстраняване на анионите.

Силициевата повърхност може да се почиства не само в течна среда. Известни са методи за газово почистване чрез химична реакция на силиция и хлороводорода (вж епитаксия). Някои автори предлагат почистване чрез образуване на стопилка метал — полупроводник. Образуваните твърди разтвори се отстраняват по химичен път.

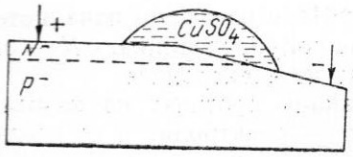
Основната цел при почистването е „раздвижване" на замърсяванията върху пластината и създаване на възможност за тяхното отстраняване.

Конструкторът е длъжен да отчита влиянието на почистването върху изградената вече част от структура. Затова почистването се извършва по различни начини — почистване преди окисление, почистване за дифузия, почистване за метализация и т. н.

Полупроводниците въпреки общата си прилика имат различни физико-химични свойства. Това води също до съществени изменения в състава на разтворите за почистване.

3.1.4. Проявяване на дефекти и pN преходи

В този случай химичната обработка се извършва винаги в течна среда. В зависимост от съотношенията в състава на ецващия разтвор се проявяват повече или по-малко анизотропните свойства на полупроводниковия материал по отношение на скоростта на ецване. В резултат върху повърхността се получават различни фигури — ямички с определена форма, характеризираща съответната равнина. В този случай се говори за структуриращо ецване, чиято основна цел е ориентирането на монокристала и проявяване на дефектите в кристалната решетка. Поради различната енергия на свързване разтварянето на полупроводниковия материал е различно по скорост в направление на дислокациите, в резултат на което дефектите ста-



Фиг. 3.4

ват явни и могат да бъдат преброени. Съставът на тези разтвори не се различава от другите по компоненти, а само по тяхното съотношение. В резултат на оптимален избор започва да преобладава един или друг механизъм при протичане на химичната реакция, който води до структуриращо или полиращо ецване.

За нуждите на дифузионния и епитаксиалния процес химичната обработка се използува за пречистване и проявяване на PN-преходи. Проявяването е свързано с различно оцветяване на P- и N-областите, което прави възможно отчитането на дълбочината на прехода. За целта се изготвя шлиф от пробата (виж гл. 9), който се обработва по химичен начин. Използуват се изправящите свойства на PN-прехода. Върху шлифа се поставя капка от меден сулфат ($CuSO_4 . 5H_2O$ 20—200 g/l, HF—1%), а на прехода се подава обратно напрежение. Вместо поставяне на капка върху шлифа той може да бъде потопен в разтвора. Положителните медни йони се отлагат на отрицателно заредената P-област. На фиг. 3.4 е показана принципната схема. Химичната обработка се подпомага чрез подаване на обратно напрежение или чрез засветяване на пробата (фотоефект), като металът се отлага по електрохимичен път. Проявяването на PN-прехода може да стане и чрез анодно ецване. В случая N-областта действува като анод (положително заредена) в резултат на приложеното обратно напрежение. В разтвор на KOH или NaOH (10%) или $HF+HNO_3$ за Si и GaAs анодът се разтваря и полученото стъпало отбелязва дълбочината на прехода. Друга възможност е използуването на различната скорост на анодно разтваряне на P- и N-материала. Както показва механизмът на химичната реакция, N-областта се разтваря по-бавно, в резултат на което отново се получава стъпало. Методът е приложим за германий, силиций и галиев арсенид. В някои случаи се получава и оцветяване на отделните области, което помага при отчитането на дълбочината на прехода.

С развитието на полупроводниковата техника дълбочината на преходите става все по-малка, поради което преходите се проявяват само на опитни образци с много малък ъгъл на наклона на шлифа от 1° до 3°.

3.1.5. Метализиране чрез електрохимично и химично отлагане

Тази химична обработка служи за отлагане на метални покрития върху полупроводниковата пластина. Електрохимичното и химичното отлагане се прилагат при необходимост от дебели покрития (по-големи от 1 μm), които трудно могат да бъдат получени чрез вакуумни процеси. Най-широко използувани в полупроводниковата технология са химичното отлагане на никел и галваничното позлатяване. Дебели метални слоеве се използуват за провеждащи шини в хибридната технология, за изводи в биймлид-технология, за защитна маска при силовите прибори, както и за източник на дифузия при същите (вж.гл.11).

Никелирането на силиция се предшествува от предварителна химична обработка, целяща пълното премахване на SiO_2 върху повърхността.

Обикновено никелираните пластини се използуват в силовото производство. Пластините са механично обработени до механично полиране, така че дефектите служат като катализатори на реакцията (напр. след струйно шлифоване). Тъй като химичното отлагане на никела става без протичане на ток от външен източник, необходимите електрони за редукция на металните йони се получават за сметка на химична реакция на един от компонентите на никеловата „баня". За разлика от химичното (редуктивно) отлагане при електрохимичното това става за сметка на разтварянето на металните атоми. Това означава, че при никелирането се осъществява размяна на електрони между компонента и метала, при което значение има отношението между техните електрохимични потенциали. При никела като редуктиращ компонент се използува натриев хипофосфат. Получените слоеве съдържат 6—7% фосфор —аморфна структура. След темпериране до 600°C слоят съдържа до 35% Ni_3P и 65% Ni. Това води до намаляване на специфичната електрична проводимост с около 14% по отношение на обемния материал.

Обикновено никелирането предшествува електрохимичното отлагане на злато, като адхезията на слоевете зависи от дебелината им.

Примерният състав на никеловата „баня" е следният:

Баня А — 25 g никелов хлорид, 35 g амониев хлорид, 42 g амониев цитрат, 30 g натриев хипофосфат, 62 ml амоняк в един литър дестилирана вода. Тази баня има pH=8, работна температура 92°C, скорост на отлагане 16 μm/h, съдържание на фосфор 9,2%.

Баня Б—30 g никелов хлорид, 45 g амониев хлорид, 98 g натриев цитрат, 10 g натриев хипофосфат, 30 ml амоняк в литър дестилирана вода, pH=9,15, температура 92°C, скорост 12 μm/h, съдържание на фосфор 6%.

Прибавеният натриев цитрат и редуктивният компонент са в определено съотношение. При поголямо количество на нитрата скоростта на реакцията се забавя. Изравняването ѝ става чрез увеличаване на съдържанието на втория компонент, което води до нарастване на съдържанието на фосфор. Препоръчва се загряването на пластината в защитна атмосфера до температурата на банята непосредствено преди потопяването ѝ. Това предотвратява получаването на пасивиращи слоеве на повърхността.

Позлатяването се извършва електрохимично в следната баня: 21 g Au—калиев цианид (68,4% Au), 14 g калиев цианид, 10 g калиева основа, 6 g ки-

сел фосфат в литър дестилирана вода, температура 60°C, скорост 10 μm/h при 0,004 A/cm².

Обикновено в полупроводниковата техника се използуват слоеве с едрозърнеста структура за подобро бондиране.

3.2. МЕХАНИЗЪМ НА ХИМИЧНАТА ОБРАБОТКА

Използуването на всеки вид химична обработка е свързано с постигане на определени параметри, които от своя страна са залегнали в технологичната схема на прибора. Гарантирането на тези параметри е възможно само при добро познаване на механизма на химичната обработка. За инженерно приложение най-добра информация за този механизъм в течна среда дават Гибсон и Бургес.

3.2.1. Химична обработка в течна среда

При химичното ецване в течна среда една от съставките е винаги окислител, а другата — разтворител на получените междинни продукти. Към тях обикновено се прибавят и други съставки, чието предназначение е да изменят скоростта на реакцията и някои други параметри. В зависимост от полупроводниковия материал се избират и отделните компоненти. Така за силиций като окислител се използува азотна киселина, а при германия и галиевия арсенид — водородният прекис. Разбира се, има и други окислители, като йод, бром, етилдиамин, амониев хипофосфат, които са включени в различните рецепти.

Разтворителите са обикновено флуороводородна киселина за силиций и калиева и натриева основа за германий и за галиев арсенид. Допълнителни съставки, които се използуват най-често, са оцетната киселина и дейонизирана вода. Под химично ецване трябва да се разбира спонтанното разтваряне на полупроводниковия материал в окислителна среда. Процесът на разтваряне зависи от много фактори, като вида на полупроводника, строежа на кристалната решетка и броя на дефектите й, състава на разтворите, температурата и кинетиката на процеса над границата твърдо тяло — разтвор [155—159, 171—182].

Химичното ецване се описва от електрохимични закони и общият резултат се получава от сумирането на катодната и анодната реакция. Кинетиката на процеса се описва от „микрокатоди" и „микроаноди", които се намират в съседство с повърхността, която се обработва. При полупроводниците прилагането на общата електрохимична теория за разтваряне трябва да отчита особеността, пораждаща се от съществуването на два вида токоносители. Тъй като полупроводниковата повърхност може да бъде различно заредена, се получават допълнителни условия за промяна на параметрите на процеса. Основните уравнения, които описват ецването на полупроводника, са:

$$(3.3)\qquad M^{0} \rightleftarrows M^{n}+ne^{-}\ \text{(окисление)},$$
$$N+ne^{-} \rightleftarrows N^{-n}\ \text{(редукция)},$$

където с M^{0} е означено началното (нулевото) състояние на полупроводника, с N — окислителят, с n — броят на електроните.

Тези реакции протичат на фазовата граница твърдо тяло — електролит и се обединяват чрез

$$(3.4)\qquad M^{0}+N \rightleftarrows M^{n}+N^{-n},$$

Количествено това уравнение може да бъде ограничено от скоростта на протичане на едната или другата реакция или от двете едновременно. В този случай се говори за електрохимичен контрол на процеса, съответно аноден или катоден. Ако двете реакции (3.3) протичат много бързо, може да се стигне до случая, когато лимитиращ става потокът окислител към повърхността, т. е. транспортът на окислителя към твърдото тяло. В тези случаи се говори за дифузен контрол, като механизмът на пренасянето се приема за дифузен. При сложните полупроводници са възможни повече от една окислителна реакция, но принципите остават същите дотогава, докато в разтвора протичат окисление и редукция [10].

Приема се, че окислителната реакция се осъществява на „микроанода" и затова тази реакция се нарича анодна, а другата реакция — катодна. На практика „микроанодът" и „микрокатодът" образуват една локална електролитна клетка. Особено интересно е влиянието на свойствата на полупроводника върху анодната реакция. Полупроводникът с P-проводимост се разтваря без ограничение. Опитът показва, че при N-полупроводник реакцията е склонна към насищане, когато започва да се чувствува липсата на дупки. Най-труден етап от анодната реакция е отделянето на силициевия атом от повърхността, свързано с разкъсване на връзка, за което е необходима дупка. Уравнения (3.3) и (3.4) за германий и силиций изглеждат по следния начин:

1) Ge, окислител фероцианид $Fe(CN)_6^{3-}$

Анодна реакция

$$(3.5)\quad Ge+3H_2O=H_2GeO_3+4H^{+}-4n_a e^{+}+4(1-n_a)e^{-}.$$

Отделянето на n_a електрони означава, че в полупроводника е съставен следният баланс — във валентната зона са получени n_a дупки, а в зоната на проводимостта са останали $(1-n_a)$ електрони. Катодна реакция

$$(3.6)\quad 4Fe(CN)_6^{3-}+4(1-n_к)e^{-}=4Fe(CN)_6^{4-}+4\ n_к e^{+}.$$

Приемането на $n_к$ електрони за редуциране на окислителя означава, че отново е нарушен балансът на токоносителите в полупроводника — иззети са $n_к$ електрони, т. е. в зоната на проводимост са останали $(1-n_к)$ електрони, а във валентната зона са получени $n_к$ дупки. От (3.5) и (3.6) следва общият баланс:

$$(3.7)\quad Ge+3H_2O+4F_6(CN)_6^{3-}=$$
$$=H_2GeO_3+4F_c(CN)_6^{4-}+4(n_к-n_a)e+4(n_к-n_a)e^{+}.$$

2) Si, окислител азотна киселина HNO_3

$$(3.8)\quad Si+2H_2O=SiO_2+4H^{+}-4n_a e^{+}+4\quad(1-n_a)e^{-};$$

$$(3.9)\quad SiO_2+6\ HF\rightarrow H_2SiF_6+2H_2;$$

(3.10) $HNO_3+2H^++(1-n_к)e^-=HNO_2+H_2O+n_кe^+$.

Общото време за протичане на реакцията се определя от най-бавната реакция. Очевидно генерацията на токови носители, специфичното съпротивление, повърхностният заряд и рекомбинацията оказват съществено влияние върху кинетиката на химичната обработка. Влиянието на всеки един от тези фактори трябва да се отчита по отношение на механизма на обработка. Например лесно обяснимо е, че при осветяване скоростта на ецване нараства. Същото се отнася и за температурата и е свързано с генерацията на носители [11—16].

От уравн. (3.5÷3.10) се вижда, че скоростта на генериране на електрони и дупки е равна на $(n_к-n_а)$ пъти броя на разтворените атоми от полупроводниковия материал. Ако се търсят количествени зависимости, трябва да се разграничат двата случая — $n_к > n_а$ и $n_к < n_а$. В единия случай се осъществява анодeн контрол на обработката, а в другия — катоден контрол. Ако концентрацията на дупки по време на анодната реакция превишава тяхната генерация по време на катодната реакция, термогенерацията и дифузията на дупките към повърхността ще бъдат определящи за скоростта на обработката в случай на N-полупроводник. Съответно, ако концентрацията на електрони при катодната реакция превишава тяхната генерация при анодната реакция, определящ става потокът от електрони за случая на P-полупроводник.

Може да се запише, че

$$(n_а-n_к)\,J=J_р+(g_S-R_S); \tag{3.12}$$

$$(n_а-n_к)\,J=J_п+(g_S-R_S).$$

В тези уравнения левите страни представляват консумацията на дупки и електрони, изразена като брой разменени заряди на единица площ и за единица време [N/cm^2s]. В десните страни $J_р$ и $J_п$ са съответно плътността на потоците дупки и електрони, движещи се чрез дифузия към повърхността, а изразите в скобите — разликата между генерацията g_s и рекомбинацията R_s.

Известно е, че;

$$J_р=p_0\left(\frac{D_р}{\tau_р}\right)^{1/2}, \tag{3.13}$$

$$J_п=n_0\left(\frac{D_п}{\tau_п}\right)^{1/2}$$

В уравн. (3.13) p_0 и n_0 са равновесните концентрации на неосновните носители. Ако се приеме, че генерацията е незначителна, от (3.12) и (3.13) следва, че при електрохимичен контрол на химичната обработка

$$J=\frac{p_0\left(\frac{D_р}{\tau_р}\right)^{1/2}}{n_а-n_к} \tag{3.14}$$

за N-материал

и

$$J=\frac{n_0\left(\frac{D_п}{\tau_п}\right)^{1/2}}{n_а-n_к}$$

за *P*-материал.

Скоростта на обработките за двата материала ще бъде еднаква, но зависи от концентрацията на материала.

Вторият възможен вариант е дифузният контрол на реакцията. В този случай кинетиката се определя от транспорта на окислителя от обема на разтвора към повърхността за разтваряне, изразена като брой разтворени атоми за единица време на единица площ:

$$J=\frac{dn}{Adt}=\frac{Dc}{\delta}, \tag{3.15}$$

където D е дифузионният коефициент на окислителя, c — концентрацията, δ — дебелината на приповърхностния слой, A — площта. В равновесното състояние може да се приеме, че $D/\delta=\text{const}$, т. е. кинетиката ще се определя до голяма степен от дебелината на приповърхностния слой. Дебелината е силно зависима от механичното разбъркване на разтвора и от отделянето на газове по време на обработката. Според [174], ако отделянето на газ достигне стойност 10 cm^3/cm^2 min, за приповърхностния слой се получава $\delta=3$ μm. За сравнение механична бъркалка с 21,7 s^{-1} осигурява $\delta=6$ μm.

При дифузионен контрол различните материали имат еднаква скорост на ецване при използуване на еднакъв окислител.

Факторите, които влияят върху химичното ецване,могат да се разделят на две групи — фактори, които са определящи по отношение на макроскопичните параметри (напр. скорост на ецване), и фактори, които са отговорни за микроскопични параметри (напр. повърхностна структура). В много случаи няколко фактора имат общо комплексно влияние върху обработката.

Влиянието на ориентацията е свързано с плътността на съответната кристалографска плоскост. Колкото е по-плътна кристалната решетка, толкова по-бавна е химичната обработка.

Влиянието на ориентацията е констатирано и описано от различни автори за германий,силиций и сложни полупроводници.

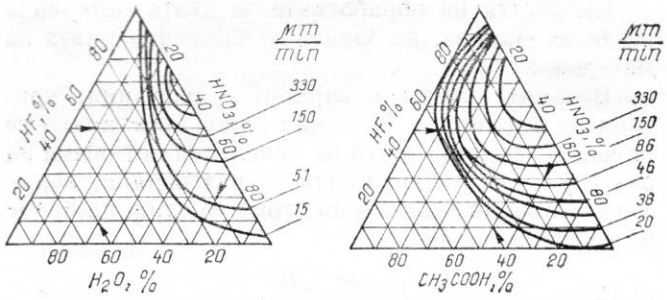
При последните допълнително влияние оказва наличието на *A*- и *B*-равнини, като различният строеж води до следното подреждане по скорост на ецване:

B (111) (100) (110) *A* (111).

Съществено влияние върху скоростта на ецване има и наличието на повърхностни напрежения и дефекти. Тяхното влияние е подобно на влиянието на ориентацията, тъй като те са свързани с нарушаване на кристалната решетка и разкъсване на валентните връзки.

При определяне на рецептите за химичната обработка се отчитат количествените съотношения между отделните компоненти. Основното изискване към тях е чистотата. Наличието на примеси води до изменение на кинетиката на ецването, като намиращите се в разтвора йони могат да ускоряват или забавят неконтролируемо реакцията.

Освен това скоростта на ецване има максимум по отношение на процентното съдържание на един от компонентите. На фиг. 3.5 са показани диагра-



Фиг. 3.5

мите на постоянна скорост на ецване за силиций.

Влияние оказват и адсорбираните на повърхността примеси, водещи в някои случаи до създаване на слоеве от различен характер. Това се изразява особено силно при обработката на пластинки, стояли при нетехнологични условия.

3.2.2. Химична обработка в газова среда

В основата на газовата химична обработка стои образуването на газообразни междинни продукти при реакция на полупроводниковия материал с пари на F_2, Cl_2, Br_2, HF, HCl, пари на водата и т. н. Технологията на тази обработка има много общо с високотемпературните процеси — епитаксия, дифузия и окисление.

Съоръженията за тази обработка са принципно различни от тези на течната обработка.

Тъй като механизмът на обработката е тясно свързан с механизма на епитаксията, дифузията и окислението, разгледан в гл. 8, тук се разглеждат само особеностите на газовото ецване.

Използуването на газовата обработка е ограничено поради изискването да се получават газообразни продукти по време на реакцията и поради високите температури. Високотемпературните обработки са свързани с изменения в кристалната решетка, които от своя страна водят до промяна в параметрите.

От друга страна обаче, газовата обработка е единственият метод за почистване непосредствено в кварцовата система преди процеси, като епитаксия и окисление. Чрез подходящ избор на ецващия газ може да се постигне анизотропност при обработката. Според [174, 173] при температура до 777°C хлорът може да бъде използуван за проявяване на дефекти на опаковката, дислокации и др.

Критерий за качеството на газовата обработка е състоянието на повърхността след химичната обработка, а основно изискване към този метод е чистотата на газовете. Някои автори съобщават за нарушаване на плоскопаралелността в резултат на завихряния в потоците, преминаващи през кварцовата система.

3.2.3. Химична обработка в плазмена среда

Обработката в плазмена среда е свързана с бомбардирането на обработваемата повърхност с положително заредени йони, чиято енергия трябва да превишава енергията на междуатомната връзка в полупроводника или тази в отложените върху полупроводниковата повърхност слоеве от защитни покрития, като силициев двуокис, силициев нитрид, фотолак или метални покрития. Например за силициев двуокис енергията на активация е 20 eV. Тъй като енергията на йоните обикновено е много по-голяма, скоростите на обработката за повечето представляващи интерес материали са близки. Тъй като тази обработка протича във вакуум, по-подробно описание на механизма е направено в гл. 6.

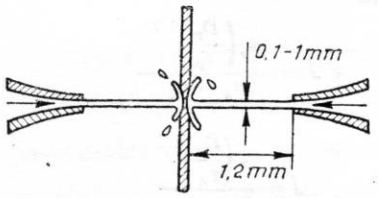
3.2.4. Специални методи за химична обработка

В съвременната полупроводникова технология широко приложение са намерили два метода— струйно ецване и ецване чрез образуване на легиран слой.

Струйната обработка е известна отдавна. С помощта на такава обработка са били изготвяни опитни образци полеви транзистори (повърхностнобариерни транзистори). При производството на микросплавни и дифузни транзистори също е бил използуван този метод. На фиг. 3.6 е показан принципът на струйната обработка, както е била използувана в началото. Чрез подходящ избор на разтвора по отношение на полупроводника се получава само локално разтваряне.

Голямото приложение на струйното ецване е свързано с повърхностната обработка на големи пластини от полупроводник. Образецът и дюзата се привеждат във възвратно-постъпателно движение един спрямо друг, поради което се осъществява обливане на цялата повърхност. Струята преминава многократно, като оставя гладка повърхност с минимална дълбочина на нарушения слой и почти идеална плоскопаралелност. Обикновено извършената по този начин електрополировка става с помощта на разтвор на сярна киселина с малка прибавка на флуороводородна и азотна киселина за силиций и флуороводородна киселина за германий.

Някои производители на силициеви пластини използуват образуването на легирани слоеве на повърхността за отстраняване на повърхностния слой. В зависимост от диаграмите на състоянието на двукомпонентната система се избира температура на сплавяне. Полученият рекристализационен слой се разтваря по химичен път.



Фиг. 3.6

3.3. ХИМИЧНА ОБРАБОТКА В ПРИМЕРИ

Тук са събрани рецепти на различни ецващи разтвори за германий, силиций и някои сложни полупроводници, както и за различните метали и защитни покрития. Разтворите са групирани по вида на полупроводника, като тези за сложните полупроводници са обединени. Допълнителни рецепти могат да се намерят в [176÷185].

Съвременната полупроводникова технология разполага с ецващи разтвори за всеки тип полупроводник.

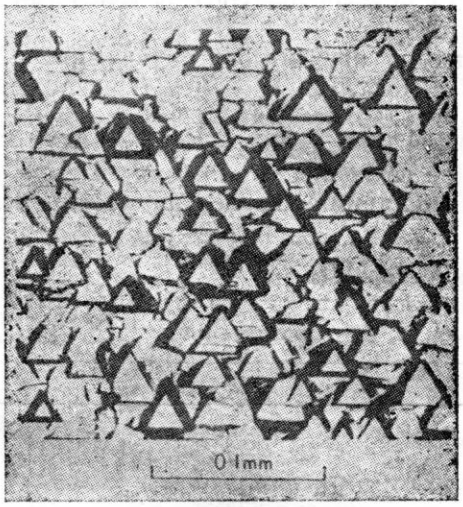
Обикновено процентното съдържание е следното: HF — 48%, HNO_3 — 70% (концентрирана), HNO_3 — 90% (димяща), H_2O_2 — 30%, HCl — 36%, CH_3COOH — 98%, H_2SO_3 — 97%, NH_4OH — 30% и т. н. При изчисляване на обемните части се използуват молярните процентни съотношения.

Si — SiO_2, Si_3N_4, Al_2O_3

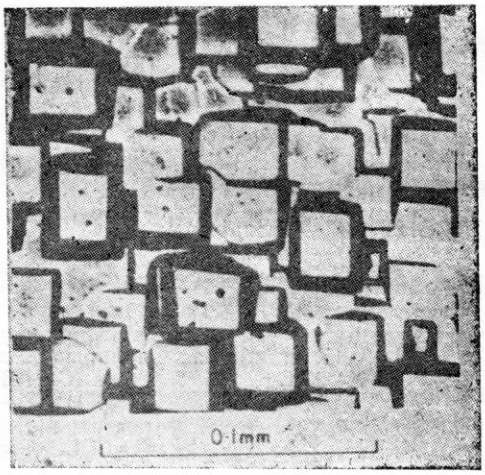
Състав	Скорост/време	Предназначение/забележки
1	2	3
$NH_4OH:H_2O_2:H_2O$ = 1:1:3 HCl:H_2O_2:H_2O = 1:1:3 HF:H_2O = 1:10	10′ — изваряване 15′ — измиване 10′ — изваряване 15′ — измиване 15″ — изваряване 15′ — измиване	почистване
HNO_3 HF:H_2O = 1:10	10′ — изваряване 15″ — измиване	освежаване
H_2SO_4(150—200)°C	10′ — изваряване 15′ — измиване	почистване от органични замърсявания, отстраняване на сулфатните групи, отстраняване на SiO_2
HNO_3 (кипяща) HF:H_2O/NH_4OH: H_2O = 1:10	5′ — изваряване 10′ — измиване 6″ — изваряване 20′ — измиване 10′ — измиване с ацетон	
HNO_3:HF:CH_3COOH: :Br = 45,45: :27,27:27,27 + 0,5 ml Br/100 ml (об%)	0,15 μm/min за T = 23°C	полиращо действие (СРЧ) HF — 40%, HNO_3 — концентрирана CH_3COOH — 98%
HNO_3:HF:CH_3COOH = = 45,45:27,27: :27,27	10 μm/min за T = 23°C	полиращо действие (СР6)
HNO_3:HF:CH_3COOH: :Br = 25:25:50 + + 0,75 ml Br/100 ml	0,18 μm/min за T = 23°C	структуриращо действие HF — 40%, HNO_3 — 56%
HNO_3:HF:CH_3COOH: J = 36,9:19,2:42,3 + + 1 g J/100 ml	12 μm/min за T = 23°C	полиращо действие
HNO_3:HF:CH_3COOH: :J = 48,1: :9,6:42,3 + 0,1 g J/100 ml	1,2 μm/min за T = 23°C	полиращо действие
HNO_3:HF:CH_3COOH = = 21,4:7,2:71,4	0,13 μm/h за T = 23°C	структуриращо действие (проява на дислокации)
HNO_3(дим 86%): H_2:CH_3COOH = 2:1:1 HF (48%):CH_3COOH (98%)	15 μm/min за T = 23°C	полиращо действие
HNO_3 конц. HNO_3 димяща HF 40% CH_3COOH 98%	16,67% 27,78% 11,11% 44,44%	3 μm/min за T = 23°C полиращо действие
HNO_3 конц. HF 40% CH_3COOH HClO (перхлорат)	74,63% 10,45% 7,46% 7,46%	1 μm/min за T = 23°C полиращо действие
HNO_3 конц. HF 48% $AgNO_3$ 1% р.р пропиленгликол H_2O	I: 400ml I: 10ml I: 10ml II: 200ml II: 200ml	0,1 μm/min за T = 23°C ецване на силиций с фотолак, компонент I и компонент II се смесват непосредствено преди обработката, съхранява се в полиетиленов съд
HNO_3 конц. HF 48%	0,5% 99,5%	— проявяване на PN преход
HNO_3 конц. HF 48% $Cu(NO_3)_2$ 10% р.р CH_3COOH 98% Br 1,8 ml/100 ml	31,% 43,4% 17,7% 7,9%	11 μm/min проявяване на PN преход и плътност на дефектите
$CuSO_4.5H_2O$ HF 48%	(20—200)g/l 1%	— проявяване на PN преход
HNO_3 67% HF 49% H_2O	50 % 49,9% 0,1%	— проявяване на PN преход
$NH_2(CH_2)_2NH_2$ 8ml $C_6H_4(OH)_2$ 17ml H_2O 3 g	[111] — 3 μm/h [110] — 30 μm/h [110] — 50 μm/h T = 98°C	селективно ецване на силиций в затворена система (защитен газ)
HNO_3 70% 30 части HF 48% 20 части $C_6H_5NH_2$ (анилин) 1 част CH_3COOH	40 g — 12 μm/min 50 g — 8—10 μm/min 70 g — 4 μm/min 90 g — 2 μm/min за T = 23°C	полиращо действие

1	2	3
HF 48% $KMnO_4$	— 97% тегл. 3% тегл.	проявяване на PN преход.
NH_4F 150g HF 48% 70ml H_2O 150ml Разтвор: H_2O=1:1	0,1 μm/min за T=23°C	ецване на SiO_2
NH_4F 200g HF 48% 68ml H_2O 300ml Разтвор : H_2O= =1:8,5(1:10)	0,07 μm/min за T=23°C	ецване на SiO_2
NH_4F HF 48% H_2O Разтвор: H_2O=1:6		за SiO_2 без съдържание на P
HF:H_2O=1:99 (тегл.%)	0,008 μm/min	ецване на SiO_2
KOH: H_2O 5% разтвор 100% разтвор 20% разтвор 40% разтвор	1—2 μm/min	матова блестяща силно изразена микроструктура (фиг. 3.7)
NaOH: H_2O както при KOH	1—2 μm/min	както при KOH
NaOH (30%)	75°C /15′	проявяване на ориентирани фигури [111]
KOH (30%)	вряща/30′	[100]
HNO_3 (68%) 715 cm³ HF (38—40%) 887 cm³ CH_3COOH 1000 cm³	23°C/10′—15′	полиращо ецване
HF (38—40%) 265 cm³ CrO_3 100 cm³ H_2O 200 cm³	23°C/10′	проявяване на дислокации [111]
HF (38—40%) 355 cm³ CrO_3 100g H_2O 200 cm³	23°C/25′	проявяване на дислокации [100]
HNO_3 концентрирана 25 HF 48% 50 $Cu(NO_2)_3$ 10% р-р 25	1,5 μm/min за T=23°C	полиращо действие
H_2O_2 30% 1 част HF 48% 1 част H_2O 4 части	3 min	проявяване на дефекти, структуриращо действие (фиг. 3.8)

1	2	3
HNO_3 70% 5 части HF 48% 10 части CH_3COOH 98% 11 части J_2 30 mg	4 min	полиращо действие



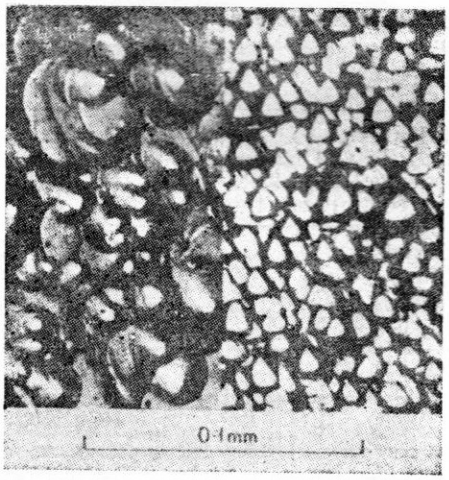
Фиг. 3.7



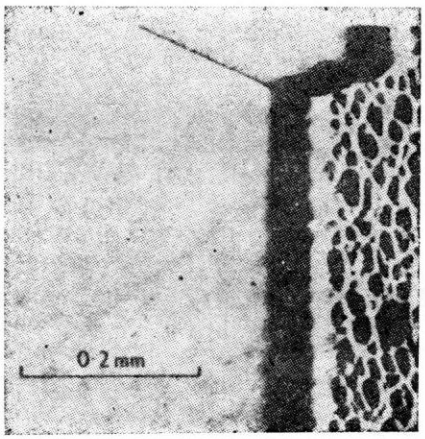
Фиг. 3.8

Сложни полупроводници

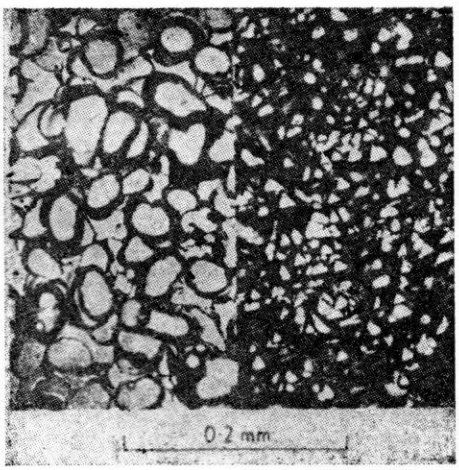
	Състав	Скорост/време	Предназначение/ забележка
GaAs	H_2O_2 30% 1 част HF 48% 1 част H_2O 1 част	10 min	позволява диференциране на А и В равнините (фиг. 3.9)
	HNO_3 70% 1 част HCl 36% 2 части H_2O 2 части	10 min	ецва А и В равнини (фиг. 3.10)
	HNO_3 70% 3 части HF 48% 1 част H_2O 2 части		полиращо действие
	Br_2 0,05/об.% метанол	за $T=30°C$ 5 μm/min	полиращо действие
	H_2O_2 30% 25 (сб.%) HF 40% 25 (об.%) H_2O 50 (об.%)	за $T=23°C$	структуриращо действие
	H_2O_2/H_2O 4/100 $NaOH/H_2O$ 2/100 1:1	0,06 m/min за $T=3°C$	полиращо действие
GaP	метанол, наситен с Cl_2	за $T=25°C$	полиращо действие
	HNO_3 кон. 50 (об.%) HCl 50 (об.%)	за $T=50°C$	полиращо действие
	HNO_3 2 части HCl 1 част	1—2 min	фиг. 3.11
	Br_2 1 част CH_3COOH 10 части	20 s	полиращо действие
	$MFe_2(SO_4)_3$ 0,1(об.%) HCl	1—5 min	проявяване на фигури (фиг. 3.12)



Фиг. 3.10



Фиг. 3.11



Фиг. 3.9



Фиг. 3.12

Разтвори за ецване на метали

	Състав	Скорост/ време	Предназначение/ забележка
Al	$HF:H_2O=1:1$ $HNO_3:CH_3COOH$: орто-фосфорна:H_2O_3=2ml: :5 ml:80 ml:10 ml		ецва се още от: NaOH, HCl, $FeCl_3$
Cr	$HCl:H_2O_2=3:1$ $HCl:H_2O=1:1$ $Ce(SO_4)_2$: H_2O: H_2SO_4= 20 g:0,5 l:50 ml		HNO_3, $FeCl_3$, HCl $Fe(CN)_6$, NaOH
ковар	$CrO_3+H_2SO_4$		$FeCl_3$
Au	$HCl:HNO_3=3:1$		$HCl:HNO_3=3:1$
Mo	$HCl:H_2O_2=1:1$ $H_3PO_4:CH_3COOH$: $HNO_3:H_2O=70:15:3:5$		$K_3Fe(CN)_6+NaOH$ $H_2SO_4:HNO_3$: $H_2O=1:1:3$
Ni	$HNO_3:CH_3COOH$: ацетон=1:1:1		$FeCl_3$ $HNO_3:HCl:H_2O$= =1:1:2
Fe_2O_3	$H_3(PO_4)$ $HCl:FeCl_2:H_2O$ $CuJ:HCl:H_2O$= 0,5g:1 l:1 l		80°C
Pd	$HCl:HNO_3=3:1$		гореща баня 60—80°C
Pt	$HCl:HNO_3=3:1$ $NH_4OH:H_2O_2=1:1$ $HF:HNO_3=1:1$ $HNO_3:HF:H_2O=50:1:1$ $H_2O_2:HF:H_2O=20:1:1$		гореща баня 60—80°C $HF:H_2O=1:9$ $HF:HNO_3$ } голяма скорост

ГЛАВА 4

ДИЕЛЕКТРИЧНИ ПОКРИТИЯ В ПОЛУПРОВОДНИКОВОТО ПРОИЗВОДСТВО

4.1. ПРЕДНАЗНАЧЕНИЕ НА ДИЕЛЕКТРИЧНИТЕ ПОКРИТИЯ

При производството на полупроводникови прибори широко приложение намират различни диелектрични покрития. Според предназначението си те са:

а) стабилизиращи и пасивиращи слоеве, които повишават качеството и гарантират функцията на полупроводниковия прибор;

б) слоеве, които служат като защитна маска за провеждане на селективна дифузия и които след изпълнение на това си предназначение могат да служат и за пасивиране (тази област на приложение е типична за планарната технология);

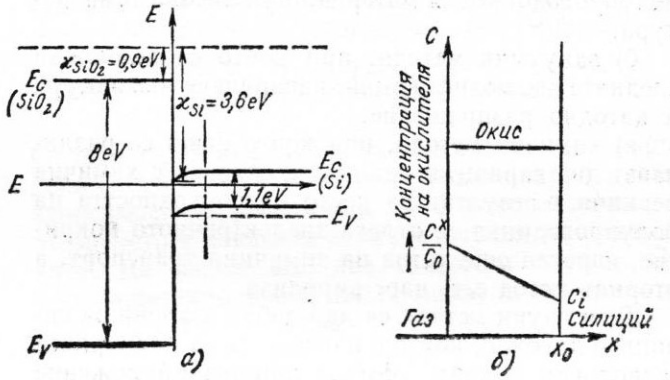
в) изолиращи слоеве между отделните компоненти на една интегрална схема;

г) слоеве, които участвуват активно в действието на полупроводниковия прибор като диелектрик в MOS кондензатора или чрез обмяна на токоносители както при полевите транзистори с двоен диелектрик.

Принципът на планарната технология се състои в употребата на защитни слоеве по време на технологичните операции, което позволява провеждането примерно на селективна дифузия и по този начин получаването на области, характеризиращи се с локални нехомогенности по тип проводимост и концентрация в полупроводника.

Да се намери универсално покритие, което удовлетворява всички изисквания в съвременната полупроводникова технология, е трудно. На практика по време на технологичния процес се сменят различни защитни покрития, използуват се многослойни структури, в които съвкупността от свойствата на защитното многослойно покритие се определя от индивидуалните качествени параметри на отделните слоеве. Извършват се и структурни промени в защитните слоеве чрез въвеждане на различни примесни елементи, а също и чрез термична обработка.

В резултат на използуването на диелектричните покрития на повърхността на полупроводниковия прибор се явява допълнителна фазова граница, която представлява в най-общия случай област, нехомогенна по отношение на проводимост и рекомбинация, като параметрите ѝ рязко се различават от тези на обемния материал. Под фазовата граница обикновено се образува обеднена или обогатена област, в резултат на което спектърът на повърхностните нива в забранената зона на повърхността е рязко променен по отношение на този в обемния материал. В резултат силно се



Фиг. 4.1

влияят параметрите на полупроводниковия прибор, като влиянието е най-силно върху обратните характеристики, шумовите характеристики и др. Причините за тези явления са няколко: на първо място, разликата в отделителната работа между полупроводника и изолатора, която в състояние на термодинамично равновесие предизвиква обменни заряди, и на второ място, прекъсването на периодичното изграждане на кристалната решетка на полупроводника или по-точно нейната деформация близо до фазовата граница, което води до създаване на допълнителни разрешени нива в забранената зона [190, 191]. В зависимост от положението на нивото на ферми в нивата, свързани с фазовата граница, се получава определено количество заряд. На фиг. 4.1 *а* е показана зонна диаграма на системата силиций—силициев двуокис. Поради изключителното си приложение в планарната технология тази система е най-добре изследвана [186, 187, 188].

Поради по-малката отделителна работа в силициевия двуокис в сравнение със силиция фазовата граница силиций — силициев двуокис се характеризира с положителен товар в силициевия двуокис, чиято стойност е в границите 1,6 (10^{-8}—10^{-7})As/cm^2. Зоната с обемен заряд в силиция се характеризира с отрицателен заряд, който за N-силиций води до обогатяване N^+, а за P силиций— до обедняване, евентуално инверсия и създаване на инверсен канал под фазовата граница. Най-важният статичен параметър на тази система е изкривяването на дъната на зоните. Заедно със заряда в изолатора важни параметри са и разпределението на повърхностните състояния по отношение на енергията в забранената зона, техният характер, както и ефективното им сечение на захващане.

4.2. МЕТОДИ ЗА ПОЛУЧАВАНЕ НА ТЪНКИ ДИЕЛЕКТРИЧНИ ПОКРИТИЯ И МЕХАНИЗЪМ НА ПРОЦЕСИТЕ

Съществуват различни методи за получаване на тънки диелектрични покрития. Те могат да се разделят на следните групи:

а) термични методи, свързани с окисление на полупроводниковия материал при висока температура;

б) вакуумни методи, при които са възможни следните две модификации: изпаряване във вакуум и катодно разпрашване;

в) химични методи, при които също се различават два варианта: единият е свързан с химична реакция, в резултат на което на повърхността на полупроводника се отлага диелектричното покритие, наречен още метод на химичния транспорт, а вторият метод е т. нар. пиролиза.

Тези групи методи са най-добре изучени за силициев двуокис, който е в основата на планарната технология и който намира широко приложение и при някои други полупроводници, като галиев арсенид и германий. Другите диелектрични покрития, като например силициев нитрид, алуминиев окис, окиси на някои редки метали, алуминиев нитрид, борен нитрид и т. н., също се отлагат по някои от тези методи. Тук е разгледан механизмът на процесите при отделните методи за силициев двуокис, тъй като е най-пълно изследван. Другите диелектрични покрития все още имат повторяеми резултати само за определен метод на получаване [22, 195—205].

4.2.1. Термично окисляване на силиций [19,22]

Преди да се премине към разглеждане на процеса на получаване на диелектрични покрития чрез термично окисляване, необходимо е да се проучат условията, които гарантират високо качество и възпроизводимост на резултатите. Многобройните експерименти показват, че почистването на повърхността преди окисляване и поддържането на необходимата чистота в продължение на самия процес са необходимите условия за получаване на пасивиращи слоеве с високовъзпроизводими свойства. Реалните силициеви повърхности след ецване се характеризират с различна степен на нестабилност, породена от особеността на микроструктурата и параметрите на химичната обработка. Освен това въздействието на околната среда води до изменение на свойствата на тези повърхности, а оттам и до неповторяеми резултати при окислението. При химичната обработка, предшествуваща окислението, е необходимо да се получат следните резултати: да се отстранят повърхностните дефекти и увреждания, да се отстрани остатъкът от органични съединения, които са слабо свързани с повърхността, да се отстранят химично свързаните с повърхността вещества, т. е. да се извърши десорбция на хемиадсорбираните вещества. Последното условие е да се отстранят всички метални примеси и особено всякакви алкални атоми. Високи изисквания се предявяват и към химично чистата вода, към флуидите, които се употребяват, към органичните разтворители и към чистотата на апаратурата, използувана при окислението.

Известно е, че на повърхността на силиция съществува тънък слой окис, образуван по време на предварителната химична обработка и на престоя на пластината при стайна температура. На фиг. 4.1 *б* е показана повърхността на силициева пласти на, покрита с някакво начално диелектрично покритие с дебелина x_0. С C^*, C_0 и C_i са отбелязани концентрациите на окислителя на различни места в модела. Експериментите позволяват да се предположи, че окислението се извършва на фазовата граница окис — силиций. Растежът на диелектричното покритие се свежда към следните основни процеси: адсорбция на молекули на окислителя на повърхността на SiO_2, преминаване на атоми на окислителя през диелектричното покритие чрез дифузия, реакция на окислителя с полупроводника на разделителната повърхност Si/SiO_2, при което нараства нов слой от SiO_2. За да може количествено да се изясни кинетиката на процеса, целесъобразно е да се въведе понятието **поток на окислителя**. Поток окислител означава количеството молекули окислител, които пресичат единица повърхност за единица време. Нека равновесната концентрация на кислорода в повърхностния слой над полупроводниковата пластинка да бъде C^*, на повърхността на пластинката, т. е. на повърхността, разделяща диелектричното покритие от газовата среда — C_0, а на границата силиций—силициев двуокис — C_i. Тогава потокът окислител към повърхността в равновесно състояние се описва по следния начин:

$$F_1 = h_r(C^* - C_0), \tag{4.1}$$

където h_r е коефициент на пропорционалност.

По принцип се счита, че равновесната концентрация е свързана с парциалното налягане на газа чрез следното съотношение:

$$C^* = K_{02}P_{02}. \tag{4.2}$$

Това условие се изпълнява само при отсъствие на различни процеси на дисоциация и асоциация на окислителя върху повърхността на пластината. Във вътрешността на диелектричното покритие окислителят дифундира към границата силиций — силициев двуокис и неговият поток F_2 ще бъде пропорционален на разликата на концентрациите

$$F_2 = D_{\text{еф}} \frac{C_0 - C_i}{x_0}. \tag{4.3}$$

В този израз $D_{\text{еф}}$ е коефициентът на дифузия, като се има предвид, че е отчетено и влиянието на обемния заряд, намиращ се в изолатора. На границата силиций—силициев двуокис потокът от окислител ще встъпва в реакция със силиция и потокът F_3 през тази гранична повърхност ще бъде пропорционален на концентрацията на окислителя на това място. Коефициентът на пропорционалност $K_{\text{п}}$ е скоростта на повърхностната реакция $F_3 = K_{\text{п}}C_i$. Ако се приеме, че в равновесно състояние всички потоци са равни, след решаване на уравненията по отношение на $\frac{C_i}{C^*}$ и $\frac{C_0}{C^*}$ получаваме

$$F_1=F_2=F_3$$

(4.4)
$$\begin{cases} h_г\,(C^*-C_0)=D_{сф}\dfrac{C_0-C_i}{x_0}; \\ K_п C_i \quad\quad =D_{сф}\dfrac{C_0-C_i}{x_0}; \end{cases}$$

$$\frac{C_р}{C_i}=\frac{1+\dfrac{K_п x_0}{D_{сф}}}{1+\dfrac{K_п}{h_г}+\dfrac{K_п x_0}{D_{сф}}}.$$

Разглежда се случаят, характеризиращ се с малък коефициент на дифузия по отношение на скоростта на реакцията на силициевата повърхност. Това означава $D_{сф} \ll K_п$. Това условие отразява механизъм, който се определя от дифузията. От стойностите за C_i и C^* се получава следният израз за потока окислител:

(4.5)
$$\left(\text{за } \frac{D_{сф}}{K_п x_0} \to 0,\ C_i \to 0 \text{ и } C_0=C^*\right);$$

$$F_3=K_п C_i=\frac{K_п C^*}{1+\dfrac{K_п}{h_г}+\dfrac{K_п x_0}{D_{сф}}}.$$

Ако предположим, че за образуването на единица обем от диелектричното покритие е необходимо изразходването на N кислородни атома или по-общо казано, N частици окислител, скоростта на израстване на слоя ще се изрази с

(4.6)
$$F_3=\frac{d}{dt}(N\,.\,x)=N\frac{dx}{dt};$$

$$\text{и}\quad \frac{K_п C^*}{1+\dfrac{K_п}{h_г}+\dfrac{K_п x_0}{D_{сф}}}=N\frac{dx}{dt}.$$

За получаване на началните условия в общ вид се отчита, че пълната дебелина на диелектричното покритие се състои от две части — начален слой с дебелина x_0, разположен на полупроводниковата повърхност преди започване на окислението, и допълнителен слой x, получен по време на окислението. Тогава началното условие ще бъде $x-x_0=0$ при $t=0$. Такова разделяне на окисния слой, от една страна, позволява да се изучи механизмът на многократното окисление и от друга страна, отчита влиянието на полето и обемния заряд в процеса на термичното окисление на първичния слой силициев двуокис. Да въведем следните означения:

(4.7)
$$A=2D_{сф}\left(\frac{1}{K_п}+\frac{1}{h_г}\right);$$

$$B=\frac{2D_{сф}C^*}{N}.$$

Ако заместим тези означения в уравнението, за скоростта на процеса ще се получи следният израз:

(4.8)
$$\frac{dx}{dt}=\frac{B}{A+2x_0}.$$

Интегрирането на това уравнение в границите от x до x_0 води до

(4.9)
$$x^2+Ax=Bt+x_0^2+Ax_0.$$

Преобразуваме това уравнение до

(4.10)
$$x^2+Ax=B(t+\tau).$$

В този израз
$$\tau=(x_0^2+Ax_0)B$$

е изместването по отношение на времето, съответстващо на началната дебелина на окиса. Като решим квадратното уравнение, получаваме

(4.11)
$$\frac{x}{A/2}=\left[1+\frac{t+\tau}{A^2/4B}\right]^{1/2}-1.$$

От този израз дебелината на окиса може да се определи като функция от времето. Такава параболична зависимост на дебелината на окисното покритие от времето е доказана в някои случаи на практиката. Да разгледаме два гранични случая. За продължително време на процеса, т. е. при $t \gg A^2/4B$ и $t \gg \tau$, следва:

(4.12)
$$\frac{2x}{A}\approx\left(\frac{4Bt}{A^2}\right)^{1/2};$$

$$x^2=Bt.$$

В другия граничен случай при относително кратко време на процеса

(4.13)
$$\frac{2x}{A}\approx\frac{1}{2}\left[\frac{4B(t+\tau)}{A^2}\right]$$

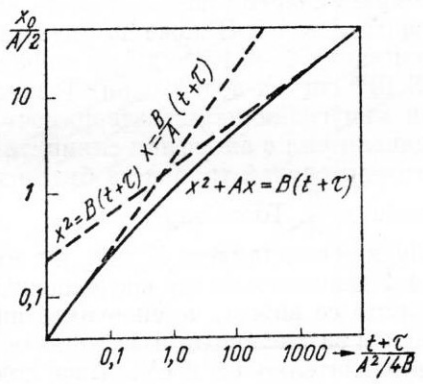
или

$$x=\frac{B}{A}(t+\tau).$$

Коефициентът

(4.14)
$$\frac{B}{A}=\frac{K_п h_г}{K_п+h_г}\cdot\frac{C^*}{N}$$

се нарича линейна константа на скоростта. На фиг. 4.2 е показана общата зависимост на скоростта на окисление от времето в двата гранични случая. Диаграмата позволява да се обобщят резултатите и да се направи изводът, че за по-голямата част параболичното приближение дава добри резултати. Разликата, която се получава между изчислените и експерименталните стой-



Фиг. 4.2

ности, е в областта на малките времена и зависи от началната дебелина x_0. За всеки един от тези случаи може да се определи допълнително зависимостта на скоростта на окисление от фактори, като напр. електрическо поле, ориентация на полупроводниковия материал, концентрация на примесите и т. н.

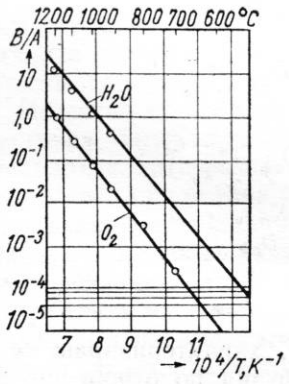
4.2.2. Видове термично окисление

Разгледаният в 4.2.1 механизъм е присъщ на всички разновидности на термичното окисление. Разбира се, при всеки конкретен случай е в сила едно или друго гранично условие, което съгласно показаната количествена зависимост за скоростта на окисление от времето има решаващо влияние върху дебелината на полученото покритие. От различните видове термично окисление в практиката с най-широко приложение са: окисление във водни пари, окисление в сух кислород и окисление във влажен кислород. От уравн. (4.12) и (4.13) следва, че можем да разграничим следните два случая:

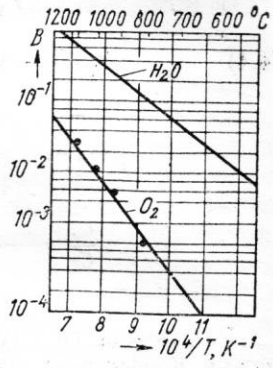
$$\frac{dx}{dt}=f(B) \quad \text{и} \quad \frac{dx}{dt}=f\left(\frac{B}{A}\right).$$

Да изследваме зависимостта на A и B от параметрите на режима. На първо място трябва да се дефинира зависимостта им от парциалното налягане на газовете, което е технологичен параметър и може да се управлява чрез изменения на магистралната система за газове. Окислението протича задължително при свръхналягане на кислорода 0,1—0,3 atm, за да се запълни цялата тръба с O_2 и да се избегне обратно засмукване на въздух в тръбата. Щом коефициентът B е пропорционален на парциалното налягане, а оттам съответно и на повърхностната концентрация на окислителя, това означава липса на дисоциация и дифузия на кислородни атоми през диелектричното покритие. B е функция на температурата, което следва от зависимостта на дифузионния коефициент от температурата. На фиг. 4.3 е показана експериментална зависимост за различни случаи на окисление на константата B от температурата. От наклона на характеристиките може да бъде определена енергията на активация — за O_2 1,24 eV, за H_2O 0,71 eV. Тези стойности показват, че определящи действието са коефициентите на дифузия на окислителите, защото тяхната енергия на активация е приблизително същата. От A и B може да бъде определена концентрацията C^*—5.10^{16} cm^3 за случая на кислород и 3.10^{19} cm^3 за водни пари. Тези стойности са близки към граничната разтворимост на съответните окислители в аморфния силициев двуокис.

Във втория случай трябва да бъде изследвано съотношението $\frac{B}{A}$. То се определя от по-малката стойност между константите $K_п$ и $h_г$. От показаните на фиг. 4.4 зависимости на коефициента B/A от температурата се вижда, че енергията на активация е еднаква за кислорода и за водните пари и е равна приблизително на 2 eV. Това показва, че основният механизъм, по-точно определящата съставка на механизма, е дисоциацията на силициевите атоми на повърхността на полупроводника, т. е. че $K_п$ е много по-малко от $h_г$. Следователно определяща е реакцията на повърхността на полупроводника. Потвърждение за това е скоростта на окисление, която при най-плътната равнина $<1\,1\,1>$ е най-ниска. Редица обяснения за създаване на началния участък предлага отчитането на дисоциацията на молекулата на кислорода на кислороден йон и положително заредена дупка, при което коефициентът на дифузия и за двете частици е доста голям. При дифузията им към границата окис—полупроводник възниква поле, което ускорява кислородните йони. Доказано е, че такова ускорение може да действува ефективно само ако дебелината на покритието не превишава 20 nm. Когато окислението става във водни пари, теорията показва, че началният участък е само няколко ангстрьома. Такова обяснение води до добро съвпадение на експерименталните данни с изчислената скорост на окислението.



Фиг. 4.3



Фиг. 4.4

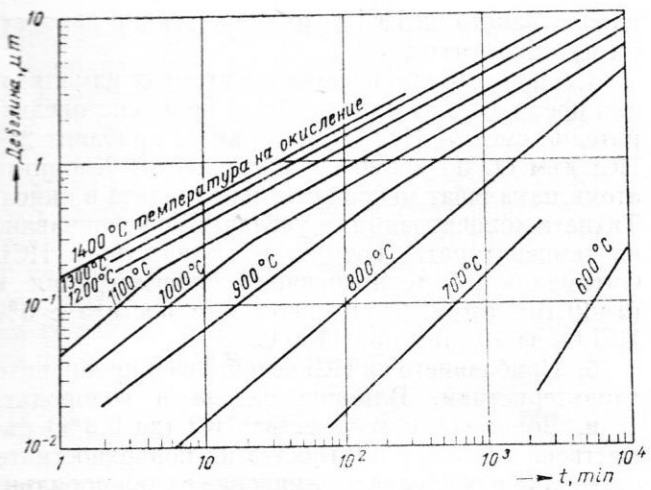
Действителното термично окисление се провежда не само в чист кислород или в чисти водни пари, а до голяма степен в смес от кислород и водни пари. Това се отнася особено за случая на окисление във влажен кислород. Количествените разглеждания за този случай се отклоняват от направените досега изчисления.

4.2.2.1. Окисляване на силиций във водни пари

Източник на парите е вода с високо специфично съпротивление, която се нагрява до температура, достатъчна за създаване на водни пари. Температурата на водата видимо не оказва някакво въздействие върху процеса на окисление при условие, че е достатъчно висока, за да поддържа парциално налягане на водните пари около 9, 8. 10^4 Pa (1). Такова окисление се нарича о к и с л е н и е в о т в о р е н а т р ъ б а. Температурата на водата е около 100—105°C. От експериментално снетите зависимости за скоростта на нарастване на покритието може да бъде изчислена енергията на активация в този случай на окисление

$$x^2=7{,}26\,t\exp\left(-\frac{\Delta E}{kT}\right), \tag{4.15}$$

където x се изразява в μm, t— в min, $\Delta E=0{,}8$ eV.



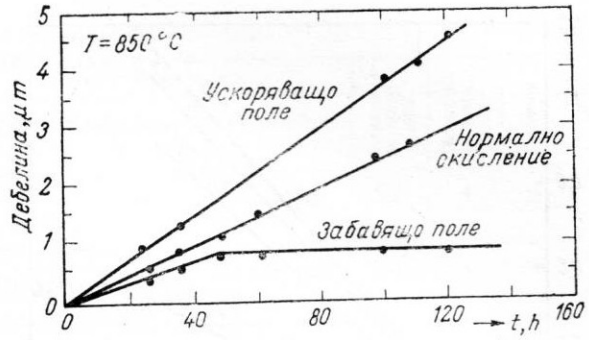
Фиг. 4.5

Тази зависимост за скоростта на нарастване на окисното покритие е валидна с голяма точност за температури, по-високи от 1100 C, и време, по-дълго от 5 min (фиг. 4.5). При по-ниски температури скоростта е по-малка и дебелината на израстващото покритие по-дълго време е сравнима с широчината на областта от обемен заряд, определена от движението на йонизирания окислител. Това е влиянието на полето, което не е отчетено в механизма, описан с уравн. (4.11) и (4.13).

Друг фактор, който влияе силно на скоростта на окислителната реакция на фазовата граница и на коефициента на дифузия на окислителя през създаденото покритие, е специфичното съпротивление на полупроводника. Материал с висока концентрация на фосфор се окислява при температура до 1100°C по-бързо, отколкото този с по-ниска концентрация. Растящият слой окис „изтласква" фосфора, така че концентрацията му в него е много малка. При бора е валидно обратното — растящият окис включва в своята структура голямо количество бор, което води до повишаване на коефициента на дифузия на окисляващите вещества. Поради това полупроводникът с голяма концентрация на бор се окислява по-бързо както във високотемпературната област, където е валиден параболичен закон, така и в нискотемпературната област. Някои автори се опитват да улеснят обяснението на преразпределението на примесите в Si и SiO_2 чрез въвеждане на понятието коефициент на сегрегация K_p, като $K_p = \frac{C_{пр-SiO_2}}{C_{пр-Si}}$, където с $C_{пр}$ е отбелязана съответната концентрация.

4.2.2.2. Окисление в сух и влажен кислород

Основната разлика между окислението във водни пари и окислението в сух кислород се свежда до това, че във втория случай окислителят дифундира през слоя във вид на кислородни йони. В този случай скоростта на израстване може да бъде ускорена или забавена с помощта на електрическо поле, както е показано на фиг. 4.6. Израстването се описва от уравн. (4.11). То е валидно за целия

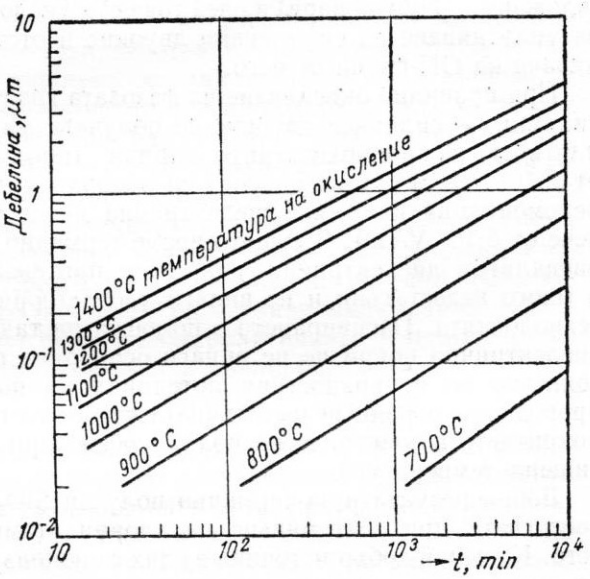


Фиг. 4.6

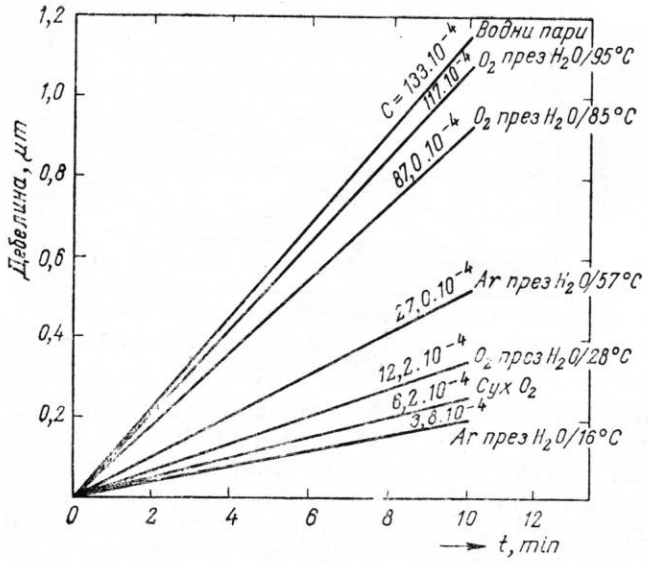
температурен обхват и за концентрации на примесите до 10^{20} cm^{-3}. При окислението със сух кислород се забелязва голямата стойност на енергията на активация (фиг. 4.7), която е свързана с механизма на самия процес. При сухото окисление е характерна силната зависимост на дебелината на покритието от концентрацията на примесите.

$$(x, \mu m)^2 = 21{,}2(t,\ min) \exp\left(-\frac{1{,}33\ eV}{kT}\right). \quad (4.16)$$

Апаратурата за окисление във влажен кислород представлява система, в която сухият кислород преминава през водна баня и постъпва в пещта за окисление. Тъй като окислението във водни пари става много по-бързо, отколкото в сух кислород, съдържанието на водни пари в потока-носител е най-важният фактор, влияещ върху скоростта на окисление при зададено време на процеса и температурата. Основната разлика от сухото окисление се състои в това, че скоростта на окисление може да се изменя в зависимост от съдържанието на водните пари. На фиг. 4.8 е показана зависимостта на дебелината на покритието от времето за различни случаи на окисление (от сухо окисление до окисление във водни пари) с различен газ-носител. Във всички случаи енергията на активацията на този вид окисление е в границите, определени от стойностите на граничните случаи — сух кислород и водни пари.



Фиг. 4.7



Фиг. 4.8

В повече от случаите се прилага двуетапно или триетапно окисление. Първоначалното окисление се извършва в атмосфера на сух кислород, после — във водни пари и накрая отново в сух кислород. Основната идея е, че окислението във водни пари става по-бързо и в резултат целият процес е по-икономичен при запазване на добрите параметри, които окислението в сух кислород осигурява. Окислението във водни пари води непременно до наличие на хидроксилни групи в изграденото диелектрично покритие, което се отразява на параметрите му. Бавното нарастване на окиса в атмосфера на сух кислород позволява на легиращите примеси от подложката да се включат в него, особено при ниска температура на окисление. Същото се отнася и за замърсяванията, които се включват както от подложката, така и от окислителния реагент кислород—водни пари. Ето защо за някои междинни окисления, следващи дифузни процеси, се предпочита бързо окисление в началото на процеса (влажен O_2, H_2O — пари) и след това сух кислород за уплътняване на силициевия двуокис и отстраняване на OH-групи от него.

При правилно окисляване на фазовата граница силиций — силициев двуокис се получава малка плътност на повърхностните заряди (по-малко от 2.10^{11} cm^{-2}), малка скорост на повърхностната рекомбинация и висока диелектрична якост (повече от 6.10^6 V/cm). В същото време термично израсналите диелектрични покрития притежават и много недостатъци и не винаги удовлетворяват технологията. Пасивирането с помощта на такова диелектрично покритие не винаги осигурява постоянство на повърхностния потенциал на полупроводника поради недостатъчната стабилност на покритието в електрическо поле, особено при повишена температура.

Добри резултати за термично получен SiO_2 са постигнати при осигуряване на хлорни атоми в него. Като най-добър източник за тях се използува хлороводородът, но някои производители употребяват и трихлоретилен. Практиката показва, че използуването на HCl подобрява всички параметри на покритието:

а. Присъствието на алкални атоми се намалява, ако през нагорещената тръба се пропуска предварително смес от $HCl:O_2$ или ако се прибавят 2% HCl към O_2 по време на окислението. Хлорните атоми намаляват миграцията на зарядите в окиса. Тяхната концентрация се увеличава с увеличаване на температурата, времето и количеството HCl. Оптималната технологична концентрация е $(6 \div 9).10^{20}$ атоми Cl/cm^3, която се постига с 6% $HCl:O_2$ за 20 min при 1150°C.

б. Прибавянето на HCl подобрява и пробивните характеристики. Влияние оказва и водородът.

в. Дори малки количества HCl (до 0,3%) съществено променят плътността на повърхностните състояния и осигуряват намаление с един порядък.

г. Използуването на HCl води до съществено елиминиране на влиянието на високотемпературния процес върху времето на живот, като τ расте с концентрацията на HCl за температури (1000—1150)°C, свързано с генериране на атомите на тежките метали.

4.2.3. Анодно окисление на полупроводников материал

Методът на анодното окисление включва две модификации — окисление на повърхността на силиция в течен електролит и окисление в газова плазма. Тези процеси се наричат съответно електролитна анодизация и газова анодизация [203, 204, 205]. Под електролитна анодизация се разбира обработка на повърхността на силиция при стайна температура в течен електролит. При стайна температура повърхността на силиция е покрита с тънък слой от диелектрично покритие с дебелина около 3 nm (някои автори сочат и по-голяма дебелина — до 20 nm), което разделя веществата, които участвуват в реакцията. Ето защо израстването на диелектричното покритие по-нататък е възможно само в резултат на дифузията и миграцията на йони през диелектричното покритие. Скоростта на нарастване на окисното покритие за случая на силициев двуокис, който не се разтваря в електролита, зависи от стойността на електростатичния потенциал в окиса, който стимулира миграцията на йони. Някои автори показват, че подвижният компонент в разглежданата реакция са йоните на силиция. Поради това процесът на израстване може да бъде описан в първо приближение като пренос на йоните на силиция през границата окис—силиций към границата окис—електролит, където протича реакцията. Допустимата дебелина на окисното покритие се определя от напрежението на пробив и от физико-химичните му свойства.

Въпреки че фазовата граница в системата влияе на кинетиката на израстването, управляващи са токът през системата и параметрите, от които той зависи. Регулирането на големината на общия поток в системата може да се осъществява по няколко начина: а) токът може да бъде постоянен; б) токът може да бъде осигуряван при постоян-

но напрежение; в) токът може да бъде осигуряван чрез комбинация на двата варианта. Да разгледаме окислението при условията на постоянен ток. За поддържане на постоянния йонен ток през окиса е необходимо с увеличаване на дебелината на диелектричното покритие да се осигурява повисоко напрежение. Ето защо анодизацията при постоянен ток може да се характеризира като скорост на увеличаване на пада на напрежението в окиса. Ако се приеме, че електрическото поле в окиса не зависи от времето и разстоянието, може да се използува следното уравнение:

$$\frac{dV}{dt}=E\frac{dx}{dt}=\frac{JEM}{zF\rho}, \tag{4.17}$$

където x е дебелината на покритието; t — времето; J — плътността на тока; F — коефициент на Фарадей $9{,}65.10^4$ к/мол; z — коефициент на пропорционалност, необходим за формиране на един грам-молекулекс, ρ — плътността на разтвора, M — грам-молекулекс на покритието.

От това уравнение следва, че скоростта на израстване е пропорционална на тока, т. е. колкото е по-голяма плътността на тока, толкова по-бързо ще се повишава напрежението и по-бързо ще расте дебелината на окиса. Анодното окисление при постоянен ток продължава, докато се достигне определена дебелина на покритието, след което при по-нататъшно увеличаване на напрежението настъпва пробив в диелектричното покритие. Технологичната практика показва, че най-важните показатели са точността, с която се постигат параметрите на покритието, и възпроизводимостта на резултата. При това от особено голямо значение са типът електролит и процентът вода в него. За да може полученото покритие да удовлетворява изискванията, предявени към него по отношение на плътност, специфично съпротивление, диелектрична якост, коефициент на пречупване и т. н., необходимо е да се подбират разтвори с определени съотношения. В табл. 4.1 са описани някои разтвори.

При газовата анодизация принципите са същите с тази разлика, че се използуват газове вместо електролити. Този метод е перспективен при отлагането на дебели покрития, но кинетиката на процеса не е изследвана. Кислородната плазма, възбуждана от поле с висока честота, е източник на отрицателно заредени кислородни йони. С помощта на анодното окисление се получават слоеве от силициев двуокис, които удовлетворяват изискванията на пасивиращия слой, но се характеризират с голяма плътност на повърхностните състояния.

Таблица 4.1

Състав на електролита			Максимално напрежение, V	Плътност на тока, mA/cm²	Полезен ток, %
разтворител	разтворено съединение	концентрация на разтвора			
HNO_3	—	концентриран	200	4	—
H_3PO_4	—	концентриран	200	4	—
Н-метилацетамид	KNO_3	0,04	560	5÷12	0,8
Етиленгликол	KNO_3	0,04	—	1÷25	2÷3
Тетрахидрофурфуролов спирт	$NaNO_2$	2	500	3	1
	HNO_3	10	250	5	—
	$H_4P_2O_7$	15	280	3÷5	4
	NH_4NO_3	0,04	600	6	1
	NaOH	0,04	250	5	—

4.2.4. Химично отлагане на диелектрични покрития

Химичното отлагане на диелектрични покрития може да става по два метода — чрез пиролитично отлагане и чрез химичен пренос. Пиролитично отлагане е за сметка на термичното разлагане на различни силициеви съединения. Този метод се използува за отлагане на силициев двуокис и силициев нитрид. Основното съединение, което се използува, е алкоксисиланът при температури около 700°C. В процеса на разлагане на алкоксисилана се отделя силициев двуокис, силициев окис, въглерод и някои органични радикали в газообразна форма. Източник на кислород в тази реакция е самата органична молекула. Ето защо съединенията, молекулите на които съдържат по-малко от три атома кислород, встъпват много трудно в тази реакция. Най-перспективни са съединенията като тетраоксисилана. Пиролитичното отлагане се извършва по няколко метода [200, 201, 202]. При първия парите на алкоксисилана се увличат от газ-носител и постъпват в кварцовата система. Термичното разлагане се осъществява върху повърхността на силиция. Във втория случай температурата на пластинката е много по-ниска от тази, необходима за да осигури термичното разлагане, поради което то се извършва в самия поток-носител, а до подложката се поставят продуктите на разлагането. При първия метод определяща е преди всичко температурата на подложката. Диелектрични покрития, които са отложени при температури под 800°C, имат органични включвания, които се отстраняват с помощта на термообработка. При температура над 800°C се отлагат покрития без такива включвания.

Друг пример на пиролитичната реакция е окислението на силана в кислород.

$$SiH_{4(г)}+2O_2\rightleftarrows SiO_{2(тв)}+2H_2O. \tag{4.18}$$

Силанът и кислородът в поток от инертен газносител се подават в кварцовата система, в която са разположени нагретите силициеви пластинки. Реакцията става в непосредствена близост до повърхността на подложката. При използуването на такъв процес не се образуват сложни органични производни и температурата, осигуряващ-

провеждането на тази реакция, остава по-ниска. Диелектрични покрития с високи качества се получават дори при температури от 300°C.

Пиролизата на алкоксисилана може да бъде ускорена с помощта на високочестотен газов разряд (например аргонов разряд). В този случай температурата, необходима за провеждане на пиролизата, се получава за сметка на самата плазма. Важно предимство на този метод е възможността да се комбинира с термично отлагане на силициев двуокис.

Химичният пренос се осъществява например по химичната реакция:

(4.19) $SiO_{2(тв)}+4HF_{(г)}\rightleftarrows SiF_{4(г)}+2H_2O.$

При наличие на температурен градиент обратимата реакция може да послужи за пренос на твърдия силициев двуокис от една част на закритата система в друга. Такава система може да бъде кварцова тръба. Ако температурата при силициевите пластинки е около 400—600°C, а при източника — 100—300°C, става пренос на силициев двуокис към повърхността на силиция. Скоростта е значителна — 0,1÷0,6 μm/h. Методът на химичния пренос позволява да се формират слоеве от диелектрично покритие с голяма чистота или с необходимото съдържание на различни примеси.

Химичното отлагане се използува с голям успех за получаване и на слоеве от силициев нитрид. При това се използуват леснолетливи съединения на силиция, като SiH_4, $SiCl_4$, азот и амоняк. Реакциите, които протичат, могат да бъдат описани по следния начин:

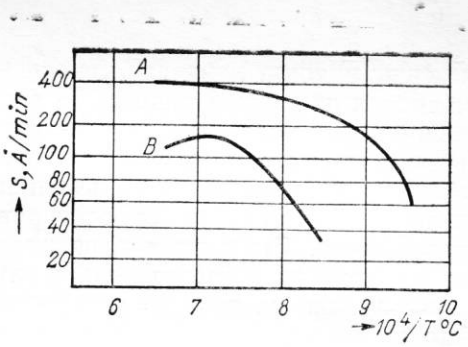
(4.20) $SiCl_4+8NH_3\rightarrow Si(NH_2)_4+4NHCl;$

(4.21) $Si(NH_2)_4\rightarrow Si(NH)_2+2NH_3;$

(4.22) $3Si(NH)_2\rightarrow Si_3N_4+2NH_3.$

За преноса на силициевия четирихлорид до мястото на реакцията се използува обикновено водород. Покритията от силициев нитрид се отлагат при температура 1000÷1200°C, разходът на амоняк е примерно 6÷16 l/min, разходът на силициев четирихлорид е 3.10^{-4} mol/min. Скоростта на отлагане не зависи от температурата в посочения температурен обхват. Отлагането на силициев нитрид от силан и амоняк е по-перспективен метод. Реакцията протича в атмосфера на излишен водород, който позволява да се предотврати разлагането на силана. Температурата на подложката е в температурен обхват 750÷1100°C, а съставът на реакционната смес в съотношение силан: водород: амоняк е 1:20:40. На фиг. 4.9 е показана скоростта на отлагане на силициев нитрид S,nm/min в зависимост от температурата на реакцията и от потока на амоняка: *A* — 20 l/min, *B* — 40 l/min. Скоростта на отлагане нараства линейно с увеличаване на концентрацията на силана (изменение на потока силан от 0,5÷5 ml/min съответствува на изменение на скоростта на отлагане от 5÷50 nm/min).

Съществуват и други методи за отлагане на покрития от силициев нитрид, които се отличават с по-ниска температура на провеждане. Най-широко приложение е намерил методът, при който



Фиг. 4.9

химичната реакция е между силан и хидразин. Тъй като последният се разлага при по-ниска температура в сравнение с амоняка, отлагането на силициевия нитрид става при технологично по-изгодни температури.

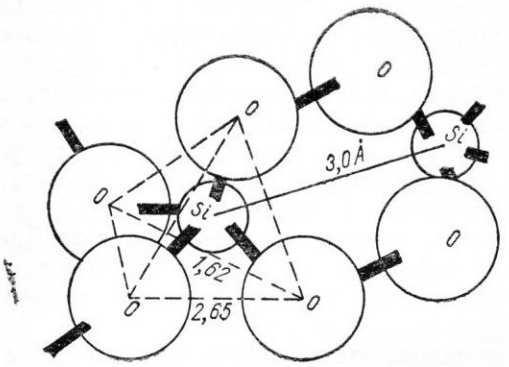
4.2.5. Вакуумни методи за отлагане на диелектрични покрития

В полупроводниковата технология се използуват с голям успех различни вакуумни методи за отлагане на диелектрични покрития. Основното им предимство е ниската температура на отлагане и сравнително добрите параметри. Тъй като механизмът и кинетиката на този процес са свързани с вакуумните процеси, те са разгледани в глава 6.

4.3. ПАРАМЕТРИ НА ДИЕЛЕКТРИЧНИТЕ ПОКРИТИЯ

Общите изисквания по отношение на заложените в технологичните схеми покрития са висока химична и физична стабилност и добри изолационни параметри. При това особено значение има фактът, че както обемните, така и повърхностните свойства на покритието са в „конфликт" с параметрите на полупроводника. Например мигрирането на зарядите по повърхността на силициевия двуокис в резултат на потенциалните съотношения, създадени от работния режим на изградения под него полупроводников прибор, е честа причина за промяна и „пълзене" на свойствата на самия прибор. Във връзка с непрекъснато нарастващите изисквания към качеството и надеждността през последните години се правят многобройни опити да се намерят подходящи изолационни слоеве. Основната цел е да се разкрият възможности за създаване на диелектрични покрития с гарантирани параметри независимо от толерансите на технологичните операции.

Един от най-важните параметри на диелектричното покритие е неговата структура. С помощта на електронна дифракция е констатиран аморфен до дребнокристален строеж на слоевете от SiO_2, получени по термичен начин чрез пиролиза или изпарение във вакуум. Съгласно съвременните схващания кварцовите покрития, както и самото кварцово стъкло, имат структура, изградена на базата на тетраедри, във върховете на които се намират кислородните атоми, а в центъра — силициевите (фиг. 4.10). Тетраедрите се допират със



Фиг. 4.10

своите върхове, а не с ръбовете или със страните, като по този начин образуват кръгове и вериги, характерни за кварца. Решетката на стъклото може да има значителен размер, включително до образуване на кристални структури с размери $1 \div 10$ nm. Разстоянието между два атома силиций в решетката на силициевия двуокис е 0,3 nm, размерът на връзката силиций—кислород е 0,162 nm, на връзката кислород—кислород, която е фактически ръб на тетраедъра — 0,265 nm. Всеки атом на кислорода е свързан с 2 атома на силиция. Ъгълът на връзката силиций—кислород е $143 \pm 17°$. Тъй като структурата на покритието представлява решетка, макар и не добре построена, употребяват се понятия като ваканция, междувъзлови атоми и т. н. [206, 207, 208, 209].

Всеки атом кислород, който е съединен с два атома на силиция, се нарича мостов. Ако една от връзките със силиция липсва, атомът се нарича немостов. Атомите на силиция, свързани с 4 атома кислород, не могат да се разместват по решетката. Кислородният атом, свързан с два или един атом силиций,може да се движи, да преминава в междувъзлията, да дифундира по решетката. Ако в междувъзлието е преминал мостов или немостов атом, образува се кислородна ваканция. Когато в решетката са вградени примесни атоми, които са способни да доведат до образуване на различни силикатни стъкла, например бор, фосфор и др., те могат да заместват силиция в центъра на тетраедъра. Други примеси, които са в състояние да дифундират по междувъзлията като натриеви йони, могат да нарушават една от връзките на кислорода между два тетраедъра с образуване на немостов кислород и една ваканция. При получена връзка между такъв примесен атом и кислорода е възможно връзката да се разкъса, при което кислородът заема ваканцията и се образуват два немостови атома. При дифузията на хидроксилни групи може да се получи разкъсване на един от свързаните кислородни атоми във върховете на два тетраедъра, при което хироксилната група заема един от върховете и образува несвързан кислород в другия. Такива структури по принцип изменят физическите свойства на диелектричното покритие.

В системата силиций—азот всеки атом на силиция в нитрида е свързан с четири атома азот, които се намират във върховете на тетраедъра. Всеки атом азот е свързан с три атома силиций, които са в основата на триъгълната пирамида. Такова разположение на атомите осигурява голяма плътност на покритието за разлика от силициевия двуокис. Структурата на силициевия нитрид е почти два пъти по-плътна от тази на силициевия двуокис. Ковалентната връзка между азота и силиция обяснява химичната и термичната издръжливост на нитрида. За аморфното покритие от силициев нитрид тази стойност е по-малка. Това се обяснява с отсъствието на някои условия при получаването му и с влиянието на самата повърхност. В най-общия случай характерът на дефектите на структурата на Si_3N_4 се определя от съществуването на валентни връзки между азота и силиция на повърхността и в обема на покритието. Да се разглеждат примесни атоми в междувъзлията е нецелесъобразно поради голямата плътност на структурата. Тъй като азотът е неутрален примес, участието на негови атоми в междувъзлията има известно значение.

Повърхностните наситени връзки определят абсорбционните свойства на покритието и на повърхностния заряд. В обема на покритието ненаситената връзка се явява вследствие на нарушение в решетката на силициевия нитрид. В някои случаи тя може да се разглежда като просто разместване на структурите, а в други като следствие на съществуващи ваканции. Разтворимостта на силиция в силициевия нитрид е незначителна. При стайна температура например тя е около 10^{12} cm^{-3},а при температура на топене — 10^{19} cm^{-3}. Концентрацията на излишния азот е малка и трудноустановима, тъй като той е електрически неутрален и по общоприетите методи за изследване е трудноустановим. Силициевият нитрид се разлага при температури над 1000°C, а се топи при температури около 1900°C, и то в атмосфера от азот.

Рентгенографският анализ на силициевия нитрид показва, че са известни две модификации—α и β, които имат близка плътност — съответно 3,184 g/cm^3 и 3,187 g/cm^3. Обикновено експериментално се определят стойности, които са по-големи и са от 3,44 до 3,7 g/cm^3. За α-модификацията се приема, че има хексагонална структура със следните размери на елементарната решетка: $a=0{,}77$ nm, $c=0{,}56$ nm, а за β-модификацията $a=0{,}76$ nm, $c=0{,}29$ nm. При температура над 700°C става полиморфно превръщане на α- в β-фаза. В полупроводниковата технология обикновено се използуват аморфни покрития от силициев нитрид, които имат плътност от 2,78 до 3,21 g/cm^3.

Кристалният алуминиев окис има девет модификации. Изучаването на аморфните покрития от алуминиев окис с помощта на електронна дифракция показва, че в тях слоевете, получени чрез термично изпарение и анодно окисление, съдържат α- и β-модификации. При покритията, получени чрез катодно разпрашване, се получава основно α-модификация.

Коефициентите на термично разширение на полупроводника и на изолатора не са еднакви. В резултат на многократни високотемпературни обработки системата Si—SiO_2 е подложена на силното въздействие на получените механични напрежения. Това се отразява на спектъра на електронните състояния на самата граница. Доказано е, че плътността на рекомбинационно действуващите нива се увеличава от механични напрежения от порядъка на 10^4 N/cm^2, които са напълно възможни за системата силиций—силициев двуокис. Някои най-нови изследвания показват, че при термично получения силициев двуокис се получава силно изразена зависимост на механичните напрежения от дебелината на покритието, когато тя е под 150 nm. Например при покрития от 20 nm напреженията са в интервал от (10÷20). 10^5 N/cm^2 и те са с около 3÷6 пъти по-високи, отколкото напреженията, които са нормални за слоеве от силициев двуокис с дебелина над 150 nm. Това означава, че тънките покрития от силициев двуокис, каквито се използуват например в транзисторите с двоен диелектричен слой, са подложени на по-силни промени. Изследванията върху системата силиций—силициев двуокис—полисилиций показват, че влиянията на силните механични напрежения върху фазовата граница силиций—силициев двуокис могат да бъдат силно намалени чрез използуване на материали с подходящи коефициенти на термично разширение.

Електричните параметри на изолиращия слой се определят от механизма на пренасяне на заряди. Промените в структурата на покритието са причина за необратимите промени в електричните параметри на изолатора. Повторяеми резултати могат да се очакват за аморфни слоеве, които са структурно стабилни, и при високи температури. Такива свойства притежават силициевият двуокис и силициевият нитрид. Слоевете от алуминиев окис, алуминиев нитрид и други са както аморфни, така и поликристални, поради което се получават резки промени в параметрите им в резултат на високотемпературни процеси.

Стабилни свойства на слоевете могат да се очакват и при монокристални структури. Досега обаче не са решени проблемите за изготвяне на такива слоеве върху монокристален полупроводников материал. Очакваните резултати — фазовата граница полупроводник—изолатор да отговаря на един хетеропреход и електричните свойства на изолатора да са повторяеми и стабилни, позволяват да се постигнат определени предимства в тази област при по-нататъшни разработки. Като изолаторни материали в този случай могат да се използуват съединения от вида A^{III} B^{V}, които фактически са полупроводници с широка забранена зона (алуминиев нитрид, борен нитрид, галиев нитрид) [4.45, 4.40].

Силициевият двуокис е диелектрик с широка забранена зона — около 8 eV. Покритията от силициев двуокис с дебелина от 100 nm до няколко микрона притежават високо специфично съпротивление — 10^{11} до 10^{16} Ωcm,и висока диелектрична якост — 3 до 9.10^6 V/cm. Диелектричната константа на кварцовото стъкло е равна на 3,84. Покритията, получени от различни методи, имат диелектрични константи, близки до тази стойност. Термично получените слоеве в сух кислород имат стойности 3,8 до 4, които са най-близки до тази на кварцовото стъкло. Покритията, получени по други методи (пиролитично отлагане, химично отлагане, разпрашване или изпаряване във вакуум), имат в някои случаи по-големи стойности на ε. Диелектричната константа на силициевия двуокис има слаба честотна зависимост за всички видове обработки.

Силициевият нитрид има широка забранена зона — 3,8 до 4 eV. При стайна температура специфичното съпротивление на тези покрития е около 10^{12} до 10^{16} Ω cm. Температурният коефициент на съпротивлението е отрицателен. Диелектричната константа на кристалния силициев нитрид е голяма — 9,4. За покритията, които се използуват в полупроводниковата технология, тя е в границите от 6 до 11 в зависимост от условията на получаване. Диелектричната якост на тези покрития е около 10^7 V/cm.

Диелектричните покрития от алуминиев окис имат специфично съпротивление при стайна температура от 10^{12} до 10^{15} Ω cm. Полученото съпротивление не зависи от начина на отлагане на покритието. Диелектричната константа на алуминиевия окис е близка до 10 и честотно независима в обхвата от 100 Hz до 1 MHz, включително и за слоеве, получени чрез катодно разпрашване. За анодно окислените покрития ε достига стойност 9, като се забелязва известна честотна зависимост.

Слоевете, получени чрез изпаряване, показват намаление на диелектричната константа. На фазовата граница полупроводник—изолатор интерес представлява разпределението на повърхностните нива по място и по енергия, тяхното ефективно сечение на захващане на токоносители, както и свойствата на рекомбинационните центрове. Многобройни експерименти потвърждават влиянието на технологичните условия върху тези параметри и по този начин доминиращата роля на границата полупроводник—изолатор и получените в резултат на това ефекти. Чрез подходящи методи за отлагането и за температурна обработка конструкторът е в състояние да получава на фазовата граница както положителни, така и отрицателни заряди. Качествено ново ниво при тези слоеве е възможността за промяна на зарядите в нивата в близост до границата между два изолаторни слоя. Обмяната на токови носители между полупроводника и тези нива става чрез тунелен ефект. За алуминиев и други окиси, които образуват смесени системи със силициев двуокис, този модел не дава резултати. Ето защо за изследване на причините за тези ефекти и възможността да им се влияе чрез насочена технологична работа е необходимо да се извършат допълнителни експерименти. Високата подвижност на йоните води до значителни трудности при реализирането на стабилни планарни прибори. Възможни са редица технологични операции, чрез които концентрацията на йони в силициевия двуокис може да бъде намалена и йоните стабилизи-

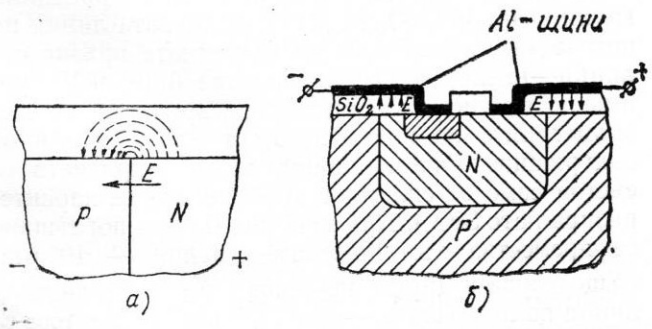
рани. Открит остава въпросът за причината на наблюдаваните явления. Експерименталните изследвания показват, че съществува зависимост между концентрацията на подвижни йони и технологията на метализационните процеси. Чрез реакция на силициевия двуокис с алуминия активиращата енергия на съществуващите в изолатора алкални атоми значително се намалява. Силициевият нитрид и алуминиевият окис имат много по-малка подвижност на йоните. Проводимостта на повърхността на изолиращия слой е свързана с концентрацията на подвижните йони. Тя е особено силно изразена, ако в резултат на реакцията с водните пари от околната атмосфера на повърхността се получават хидроксилни групи. Такива реакции са известни за силициевия двуокис и алуминиевия нитрид. Силициевият нитрид и алуминиевият окис, обратно, са доста стабилни в това отношение. Пасивиращите изолационни слоеве са подложени на различни електрични натоварвания: а) електрични полета на PN преходи,които проникват в изолатора (фиг. 4.11 *а*) [198]; б) електронно поле между алуминиевите шини и полупроводниковата подложка (фиг. 4.11 *б*); в) управляващо електрично поле между гейта и подложката в MOS-транзистора.

Най-големите натоварвания при това се получават за случая на MOS-транзистора. При него напрегнатостта на полето достига 10^6 V/cm. Голямо значение за стабилността на полупроводниковите прибори имат следните два фактора:

— непрозрачност на диелектричното покритие по отношение на компонентите на обкръжаващата среда, които, ако преминат през диелектричното покритие, биха довели до промяна на разпределението на нивата на фазовата граница;

— стабилност на зарядите и тяхното разпределение в изолатора спрямо силни електрични полета. (Не трябва да се забравя, че мигрирането на зарядите по повърхността на изолатора е равностойно на обемни промени.)

Установено е, че и двата фактора не могат да бъдат удовлетворени от силициевия двуокис. При дебелина от 150÷500 nm, типична за планарната техника, слоевете от SiO_2 притежават значителна активност по отношение на водата, което води до промяна на състоянието на повърхностните нива. Освен това в силициевия двуокис съществуват много подвижни положително заредени йони, като натриеви, водородни, които също допринасят за промяна на параметрите. Друга възможност за изменение на параметрите на приборите и условията на тяхната работа е обмяната на заряди между полупроводника и изолатора или между метала и изолатора. При това в изолатора се получават токови носители, които могат да запълнят дълбоко залегналите нива и по този начин да допринесат за създаване на отрицателен обемен заряд. Нестабилността на планарните прибори може да бъде обяснена само с модели, които взимат под внимание както движението на йоните, така и размяната на токови носители.



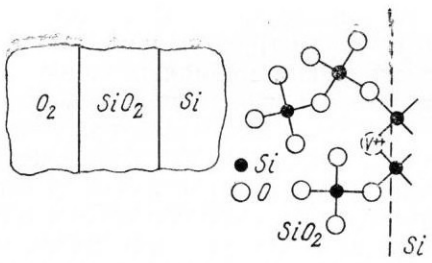
Фиг. 4.11

Поставените проблеми са били предмет на многобройни изследвания и експерименти, които са довели до замяна на слоевете силициев двуокис със слоеве с по-добри параметри. Изискванията при това могат да бъдат формулирани така: висока химична и физична стабилност, което гарантира изпълнението на защитните и пасивиращи функции; технологично гарантирани заряди в изолатора и на фазовата граница, висока електрична стабилност на слоя, т. е. никакви подвижни заряди; малка степен на поляризация и малка плътност на уловките, голяма стабилност на системата полупроводник—изолатор спрямо променливи термични натоварвания; за MOS-прибори произведението от диелектричната константа и пробивното напрежение трябва да бъде по възможност по-голямо (по-голямо от 5.10^{-7} As cm^{-2}). Все още силициевият двуокис е трудно да бъде изместен като защитен слой, макар че по отношение на отделни параметри други покрития имат много по-добри показатели.

В планарната технология осигуряването на малка плътност на зарядите в изолатора и нейната висока технологична повторяемост е едно от решаващите условия за постигане на добри параметри на полупроводниковите прибори. За да се разберат по-добре условията, при които възникват зарядите, трябва да се разгледа самото израстване на диелектричното покритие.

Да вземем за пример термично израсналия окис върху повърхността на силиция. В този случай окисът нараства за сметка на самия силиций и прониква навътре в него. Експерименталните изследвания показват, че нарастването на слоя е много по-бързо, отколкото би позволил дифузният коефициент на кислорода в силициевия двуокис. Ето защо се предполага, че кислородът навлиза в силициевия двуокис като йон, което от своя страна означава, че на фазовата граница силициев двуокис—силиций съществуват много възможности за проникване на тези йони в полупроводника.

На фиг. 4.12 е показан един модел за възникването на свободни ваканции V^{++} на фазовата граница, които имат донорен характер и образуват положителен окисен заряд. При нарастването на окисния слой могат да бъдат вградени и чужди атоми, които действуват като донорни или акцепторни центрове в силиция, заместват силициевите атоми в кристалната решетка или пък се движат като свободни йони в диелектричното покритие. В това отношение особено подвижни са алкалните йони. Електрични полета, които биха раздвижили



Фиг. 4.12

тези йони, възникват много често в една интегрална схема. Ако силициевият двуокис е с дебелина 1 μm, достатъчни са само 10 V разлика в потенциалите между една шина и подложката, за да се получи напрегнатост на полето около 10^5 V/cm. Експериментите показват, че енергията на активация на натриевите йони в силициевия двуокис е около 32 kcal/mol. Ето защо при температура 150°C и при тази напрегнатост на полето те са твърде подвижни. Източници на натриевите йони са самите кварцови системи, химикалите, с които се обработва полупроводниковата повърхност, и т. н. Натриевите йони се отстраняват с невероятно големи технологични трудности. Дори замърсяването с един 1 ppm натрий (един натриев атом на 10^6 тетраедъра от силициев двуокис) води до плътност на зарядите около 10^{12} cm^{-2}.

Пренасянето на йоните в силициевия двуокис се влияе съществено от наличието на уловки на границата полупроводник—изолатор и особено на границата метал—изолатор. Механизмът на действие на тези уловки теоретично не е добре изяснен и досега, но те са ключът към разбиране на зависимостта на проводимостта на йоните в силициевия двуокис и зависят много от технологията на метализацията. Наличието на тънки (от порядъка на 2000÷700 nm) стъкла върху силициевия двуокис, възникнали по време на дифузни процеси, уплътнява диелектричното покритие спрямо околната среда. По този начин много от електронните процеси, които биха се развили на фазовата граница силиций—силициев двуокис, се преместват по-далече от структурата — на фазовата граница силициев двуокис—силикатно стъкло. На това място се образуват йонни комплекси с голяма енергия на активация. Тези взаимодействия са в основата на фосфорното стабилизиране на силициевия двуокис. Получената по този начин стъклена фаза предпазва силициевия двуокис, „извлича" натриевите йони,прави ги неподвижни чрез свързване в комплекси, което е типично за всички стъкла.

Друга възможност за свързване на подвижните йони в силициевия двуокис и за уплътняване на слоя е отлагането на допълнителен слой от силициев нитрид. Маскиращите свойства на покритието от SiO_2 или Si_3N_4 имат съществено значение за параметрите на полупроводниковия прибор. От друга страна, дебелината на покритието, определена от технологичната схема, трябва да отговаря на времетраенето и на скоростта на дифузия на примесите в съответното покритие. В технологичната схема на един биполярен прибор се извършва неколкократна дифузия с повишаване на температурата до стойности, осигуряващи проникване на примесите в силициевия двуокис [212]. Конструкторът трябва добре да прецени времетраенето на поредния дифузен процес и на съответната температурна обработка, съчетана с окисление, за да може точно да определи покритието по дебелина. Съществена роля при това играе дифузният коефициент в покритието на съответния примес, който зависи от начина на получаването му. Особеност представлява използуването на силикатни стъкла като локални източници на дифузия. Тъй като при термичното отлагане покритието се получава за сметка на силиция, в него се вграждат примесни атоми, които със своята концентрация влияят върху собствения си дифузионен коефициент и върху този на другите примеси.

Борът има относително малък коефициент на дифузия. Това предопределя и по-малката дебелина на покритието при употреба на бор като дифузант. Използуването на някои други елементи от трета група като галий е затруднено от несравнимо по-големия коефициент на дифузия на този елемент. Голям коефициент на дифузия в силициевия двуокис притежават и алуминият, и индият. От донорните примеси фосфорът дифундира относително бавно. В някои случаи се употребява и дифузия на антимон или арсен, но фосфорът дава най-добри параметри. Когато се разглеждат защитните свойства спрямо дифузанти, трябва да се имат предвид коефициентите на дифузия и на други елементи, за които съществува възможност да проникнат в структурата по време на високотемпературни процеси. Всъщност тук се засягат вече пасивиращите свойства на покритието. Така например коефициентът на дифузия на водорода или водата е също толкова силно изразен и важен, както и на самите дифузанти. Интересни и важни са и коефициентите на дифузия на редица метални йони, като например натрий, злато, мед, чиято енергия на активация трябва да се познава и отчита от конструктора,за да могат да бъдат гарантирани свойствата на фазовата граница.

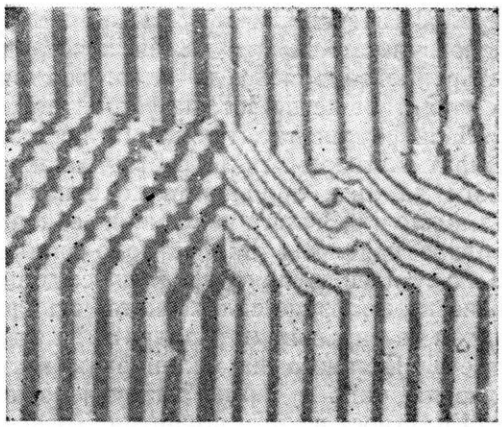
Един от най-важните параметри, които се използуват за идентифициране на покритията, са оптичните свойства в инфрачервената област. Положението и интензивността на линиите на поглъщане на покритие от силициев двуокис позволяват да се проявят характерът на връзките в решетката, количеството примеси, наличието на хидроксилни групи и др. [22, 23, 24, 211]. Основната линия на поглъщане, характерна за валентната връзка силиций—кислород, се наблюдава при 9.17 μm и зависи силно от характера на връзката, от стехиометрията на покритието, от плътността и от съдържанието на кислород (дали покритието се състои само от силициев двуокис или се характеризира като SiO_x). При $x=1$ линията на поглъщане се премества към по-дългите вълни — 10 μm. Съществува и друга по-слаба по интензивност линия на поглъщане —при 12,5 μm. Освен това са възможни и следните линии на поглъщане — 9,6

μm, 11,5 μm и 21,5 μm. Първите две характеризират наличието на SiO_2, а последната линия характеризира деформационните колебания на структурата Si—O—Si.Съдържанието на хидроксилни групи, което е показател за порьозността на окисното покритие и за състоянието на повърхността, се характеризира с линии на поглъщане при 2,74 и 2,94 μm, а също и с една слаба линия при 10,75 μm. Линиите на поглъщане в инфрачервената област на силициев нитрид зависят силно от метода на тяхното получаване. Основният максимум на поглъщане при пиролитично отлагане се наблюдава в областта $10 \div 12$ μm (в зависимост от условията на получаване). При катодно разпрашване покритията имат максимум на поглъщане при 4,7 μm, който се определя от химическите връзки Si—Si_3N_4; Si—H; N=Si=0; N=C=0; C=N; N=N=N и др.

При някои специални методи за получаване на силициев нитрид се получават линии на поглъщане и при 11,6 μm. Коефициентът на пречупване, определен по интерференчни методи, е $2,0 \pm 0,03$. Инфрачервените спектри на слоеве от алуминиев окис са също разнообразни. Те отговарят на спектрите на поглъщане на самия материал. Коефициентът на пречупване на получените по различни начини слоеве има следните стойности: за катодно разпрашени покрития $n=1,41$, за разпрашване в аргонова плазма — $1,50 \pm 0,05$, а за анодно окислени покрития — 1,535. Покрития, получени чрез изпарение на сапфир, имат коефициент на пречупване 1,56, а при плазмено разпрашване на алуминиев окис и високочестотно реактивно разпрашване — съответно $1,77 \pm 0,005$ и $1,85 \pm 0,5$. Важен параметър, характеризиращ диелектричното покритие, е неговата скорост на ецване. С химичната обработка (вж. гл. 3) се цели селективно разтваряне на силициевия двуокис за получаване на локални нехомогенности по повърхността на полупроводниковата пластина. Скоростта на ецване зависи силно от структурата на покритието. При термично получения силициев двуокис не се забелязват някакви резки промени в скоростта на ецване независимо от това, дали покритието е получено чрез окисление в сух, влажен кислород или във водни пари. Основните ецващи разтвори са на базата на флуороводородната киселина и амониевия флуорид и имат скорост на ецване от 20 до 70 nm/min.

Диелектричните покрития, получени по други начини и главно чрез катодно разпрашване и вакуумно изпарение, имат скорост на ецване, значително по-голяма от тази при термичното окисление. Изменението се дължи на различната плътност на слоевете. Съществено влияние върху скоростта на ецване има и съдържанието на примесни атоми в покритието. Тъй като покритието се използува като защитна маска по време на дифузните процеси, в него непременно се съдържат атоми на дифузанта. При това отложеното върху покритието фосфорно-силикатно стъкло има значително по-голяма скорост на химична обработка, а борно-силикатното стъкло, обратно, неколкократно по-малка скорост. Изменението на скоростта на ецване при силициевия двуокис в зависимост от предишната операция в технологичната схема е важен конструктивен параметър, който трябва да се отчита винаги, за да се гарантира качеството на фотолитографския процес. За избягване на затрудненията обикновено се подбират разтвори с такъв състав, че скоростта на ецване да бъде приблизително еднаква. Ако не е възможно и се налага непременно едновременното ецване на слоеве от фосфорно-силикатното стъкло и силициев двуокис, прибягва се до цялостно ецване на фосфорно-силикатното стъкло. По този начин се гарантират размерите на отвора в покритието. Ецването на силициевия нитрид и алуминиевия окис е силно затруднено поради голямата плътност на тези покрития. Това, разбира се, е и предимство, тъй като киселиноустойчивостта на силициевия нитрид подобрява неговата пасивираща роля. За ецване на силициев нитрид обикновено се правят маски от молибден, силно киселиноустойчиви фотолакове или SiO_2. В последния случай ецването се извършва в ортофосфорна киселина при 170°C с обратна кондензация на водните пари.

Методите за измерване на дебелината на тънки слоеве могат да бъдат разделени на три групи — оптични, основани на интерференцията на светлината, електрични, при които се използуват кварцови резонатори, и методи, основани на различни физични и химични явления. Принципът на всички интерференчни методи се състои в създаване на интерференчни ивици при монохроматични светлинни и наслагването им върху полученото в микроскопа изображение от повърхността на полупроводниковата пластина [23, 24, 210]. В резултат на неравностите по пластинката (стъпка в покритието) се получава изместване на интерференчните ивици, което в зависимост от дължината на вълната и формата на стъпката може да бъде използувано за измерване на дебелината на нанесеното покритие. При стръмен ръб на слоя се получава рязко изместване на ивиците. Съществуват няколко възможности, които се различават по широчината на ивиците, по използуването на един или два лъча монохроматична светлина (едно- и двулъчева интерферометрия), по ъгъла на наблюдение. За всички методи е характерно, че точността се подобрява, когато върху ръба на покритието е нанесен тънък слой отразяващ материал (сребро или алуминий). Необходимостта от такова покритие се обяснява с това, че изместването на фазата на отразената светлина зависи от дебелината на покритието. При дебелина обаче, по-голяма от 0,03 μm, изместването на фазата зависи само от материала на покритието. Това означава, че при дебелина на отразяващия слой, по-голяма от 0,03 μm, изместването във фазата при отражение от съседни участъци на подложката около ръба на покритието ще бъде еднакво и интензивността на отразената светлина ще бъде функция само на дебелината на измерваното покритие. Нанасянето на допълнително покритие усложнява контрола и прави образеца неизползуваем за по-нататъшната обработка. Ето защо съществено предимство имат методите, които позволяват измерване чрез интер-



Фиг. 4.13

ференция без покритие. Интерференчната картина в този случай се отличава, но въпреки това може да бъде използувана за измерване на дебелина. На фиг. 4.13 са показани тези възможности. Друг оптичен метод е елипсометричният. При него се използува разликата в параметрите на поляризованата светлина в перпендикулярна и паралелна посока на изследваната равнина. Съвременната полупроводникова техника разполага с различни елипсометри, които позволяват определянето на дебелината на покритието от $(10^{-4} \div 2{,}5)$ μm и на коефициента на пречупване с голяма точност.

За нуждите на текущия контрол върху дебелината на диелектрични покрития, отложени на силиция, се използува цветовият метод. Съществуват таблици, по които цветът се определя в зависимост от дебелината на слоя силициев двуокис. Когато се познават коефициентите на пречупване, данните за SiO_2 могат да се използуват директно за всяко друго диелектрично покритие (табл. 4.2). Характерно за този метод е повтарянето на цветовете, което изисква познаване на порядъка на дебелината при използуването му. Обикновено пластината се наблюдава при дневна светлина или под флуоресцентна лампа — 0,545 nm. Тази таблица може да бъде използувана за отчитане на дебелината d_x и за друго покритие при условие, че се познава коефициентът му на пречупване n_x. Използува с съотношението $k = n_{SiO_2} n_x$. Тогава

$$d_x = k\, d_{SiO_2}. \tag{4.23}$$

Един от най-разпространените методи в микроелектрониката за оценка на някои параметри на диелектричните покрития — C—V-методът, е описан подробно в гл. 10.

Таблица 4.2

Дебелина, μm±0,005	Цвят	Дебелина, μm+0,005	Цвят	Дебелина, μm+0,005	Цвят
0,05	ръждив	0,325	син до синьозелен	0,49	син
0,075	кафяв	0,34	светлозелен	0,50	синьозелен
0,10	тъмновиолетов червеновиолетов	0,35	зелен	0,54	зелен
0,125	царско син	0,36	жълтозелен	0,54	жълтозелен
0,15	светлосин (мет.)	0,37	зеленожълт	0,56	зеленожълт
0,175	много светложълтозелен (метално)	0,39	жълт	0,57	жълт до жълтеникав
0,20	златист или жълт (метално)	0,41	светлооранжев	0,58	светлооранжев
0,225	златист, леко жълт,	0,42	розов	0,60	розов
0,25	оранжев	0,44	виолетовочервен	0,64	виолетовочервен
0,275	червеновиолетов	0,465	червеновиолетов	0,68	синкав (между виолетово и синьозелен)
0,30	син до виолетовосин	0,47	виолетов		
0,31	син	0,48	синьовиолетов		

ГЛАВА 5

ФОТОЛИТОГРАФИЯ

5.1. ПРЕДНАЗНАЧЕНИЕ И СЪЩНОСТ НА ФОТОЛИТОГРАФИЯТА

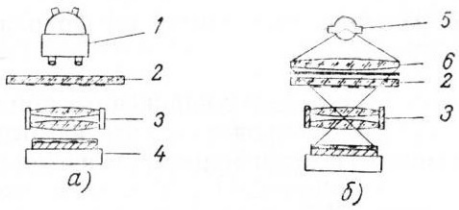
Заплануваният в технологичната схема фотолитографски процес позволява селективно извършване на следващата операция. В най-общия случай под *фотолитография* се разбира прехвърлянето на желаната топология, възникнала в резултат на конструктивното пресмятане върху повърхността на полупроводниковата пластина. Като типичен фотографски процес фотолитографията служи за създаване на изображение в нанесения върху пластината фоточувствителен слой. Поради химичните си свойства този слой служи като защитна маска за прехвърляне на полученото изображение в полупроводниковия материал или в метален слой, или в диелектрично покритие, разположено на повърхността на пластината. Покритието може да бъде например от силициев двуокис или силициев нитрид за получаване на отвори за по-нататъшна обработка чрез дифузия. Металните слоеве се използуват за получаване на провеждащи шини и контакти. Основните предимства на фотолитографския метод се определят от възможността, която той предлага за създаване на прибори с произволна конфигурация, от голямата прецизност на размерите, от произволното разположение и най-важното от възможността за групова обработка на структури върху полупроводниковата пластина.

5.2. МЕТОДИ НА ФОТОЛИТОГРАФИЯ

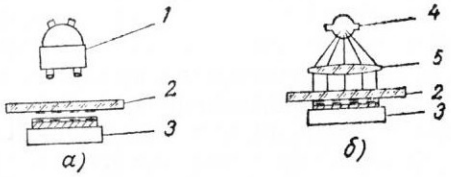
5.2.1. Контактна и проекционна фотолитография

Съвременната полупроводникова технология разполага с различни методи за засветяване (експониране) на повърхност с нанесен върху нея фотолак. *Контактната фотолитография* е по-стара. Тя удовлетворява все още до голяма степен изискванията на полупроводниковата технология, но вече се явява пречка за по-нататъшната миниатюризация на полупроводниковите прибори. Освен това тя в голяма степен влияе отрицателно и върху рандемана на производство, тъй като по този метод е невъзможно да се избегне допирът между нанесения върху полупроводниковата повърхност фотолак и шаблона. При последователната обработка на пластините броят на дефектите нараства и след 10 до 20 експонирания шаблонът не може да бъде използуван повече и трябва да бъде заменен. В резултат на това се оскъпява производството.

На фиг. 5.1 е показан принципът на контактната фотолитография. Преди засветяването шаблонът *2* се съвместява с полупроводниковата пластина *3*, като за целта се използуват допълнителни репери. При съвместяването се взема под внимание чувствителността на човешкото око към паралелност на прави. Реперите се правят с подходяща геометрия, така че лесно и удобно да може да се осъществява този процес. Съвместяването се извършва обикновено на минимално разстояние, примерно $10 \div 20$ μm, което позволява все още едновременно фокусиране на шаблона и на повърхността на пластината и взаимното им движение с хоризонтална разрешаваща способност на площ до няколко квадратни милиметра. Това означава, че свързаните с тези параметри увеличение V и апертура A трябва да бъдат подходящо подбрани [212, 223]. Хоризонталната разрешаваща способност Δ_{min} се изчислява по следния начин: $\Delta_{min}=1{,}22\ \lambda/2A \approx 0{,}33\ \mu m/A$ за $\lambda=0{,}5$ μm. Вертикалната разрешаваща способност се състои от три съставки — вълнова $T_u=\lambda/2A^2$, геометрична $T_g=150\ \mu m/AV$ и акомодираща, която се изразява чрез $T_a=250\ nm/V^2$. За $V=1000$ A и $\lambda=0{,}5$ μm се получават $T_{общ}=0{,}65\ \mu m/A^2 \approx 7\ (\Delta_{min})^2$. За съвместяването на структури с размери от 5 до 10 μm е необходима хоризонтална разрешаваща способност Δ_{min} от около 1 μm. Това означава апертура $A \geq 0{,}2$ и вертикална разрешаваща способност $T_{общ} \approx 16$ μm. При необходимост от $\Delta_{min}<1$ μm трябва да се увеличи апертурата A, което води до намаление на $T_{общ}$, т. е. до намаление на разстоянието между пластината и шаблона по време на съвместяване. Поради съществуващата кривина на полупроводниковата повърхност не е възможно това разстояние да се намалява. Трябва да се прибави и допълнителното изкривяване и разместване, което се получава при придвижването за прилепване на пластината към шаблона по време на засветяване



Фиг. 5.1



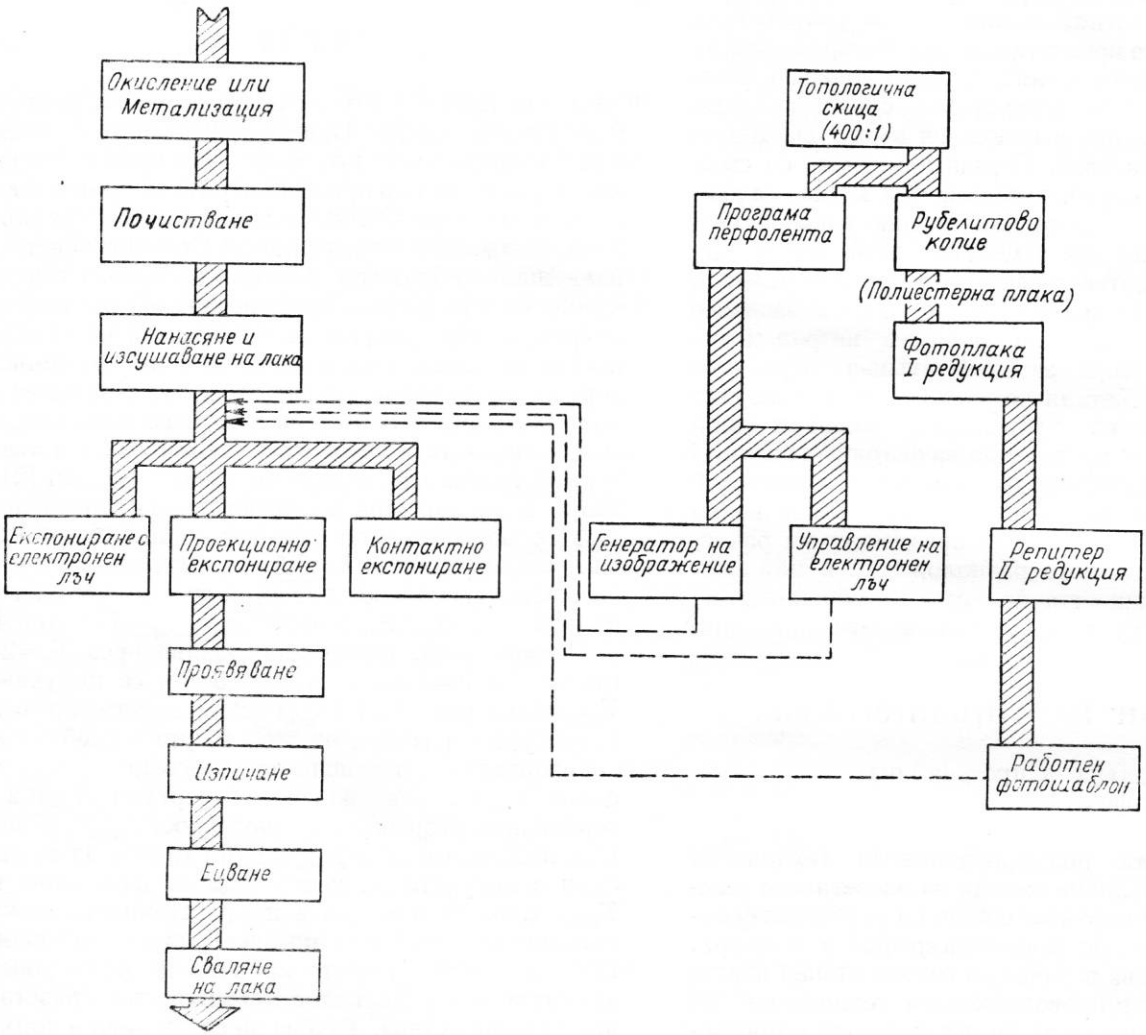
Фиг. 5.2

[4, 5]. Тези недостатъци се избягват при проекционното съвместяване (фиг. 5.2). При този метод с помощта на проекционен обектив *3*, *6* изображението от шаблона *2* се проектира върху полупроводниковата повърхност *4*, т. е. пластината, която трябва да бъде съвместена, се намира винаги в равнината, в която се проектира шаблонът.

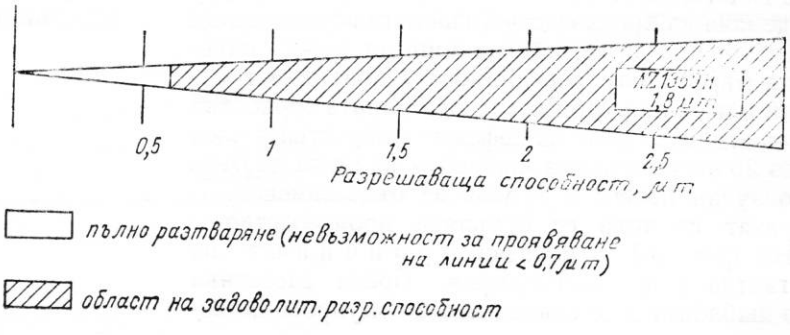
5.2.2. Технологична схема на фотолитографския процес

На фиг. 5.3 е показан най-общият принцип на фотолитографския процес и на изготвяне на фотошаблони. Изходен пункт при изготвянето на фотошаблона е рисунката на желаната конфигурация. Този конструктивен чертеж се прави в необходимото увеличение, обикновено 200:1, снабдява се с необходимите репери и се подава на ръчен координатограф или с помощта на перфоленти — направо на автоматичен координатограф. При съвременната фотолитография чрез програмно устройство може да се управлява направо електронен лъч, както е при електронната литография. При нея чрез придвижване на електронен лъч изображението се „изписва" върху фоточувствителния слой.

Традиционният начин за създаване на фотошаблони включва първоначално намаление (1



Фиг. 5.3



Фиг. 5.4

редукция) на работния чертеж, обикновено 20:1 (10:1), последвано от мултипликация с помощта на репитер върху емулсионна фотоплака, съпроводено с още едно намаление (II редукция), например 10:1 за случая, когато работният чертеж е бил с увеличение 200:1.

Като пример за обработка на фотолаковете ще разгледаме обработката на лаковете AZ1350 и AZ1350H. Това са позитивни лакове с голяма разрешаваща способност, характеризираща се с ясно очертана конфигурация на ръба на покритието, леко проявяване и отстраняване след завършване на фотолитографския процес [221, 222, 237]. Лаковете се използуват по показаната на фиг. 5.3 технологична схема. Нанасянето на лака, изсушаването, засветяването и проявяването трябва да се извършват в помещение, защитено от дневна светлина. На фиг. 5.4 са показани границите на използуване в зависимост от дебелината на лаковото покритие. По-голяма разрешаваща способност може да бъде достигната чрез използуване на потънки покрития.

За да се постигне оптимална адхезия на лака, особено важно е повърхността, върху която ще бъде нанасян, да бъде чиста и суха. Една примерна процедура е следната: потопяване в кипящ трихлоретилен за 2 min, потопяване във втора баня от кипящ чист трихлоретилен, изсушаване с пречистен въздух или азот, изсушаване при 120°C в суха атмосфера и темпериране в ексикатор до нанасяне на лака.

Използуват се главно два метода за н а н а с я н е н а л а к — нанасяне с центрофуга и нанасяне чрез пулверизиране. В някои случаи се използува и нанасяне чрез потопяване. В табл. 5.1 - показана зависимостта на дебелината на покритиее то за двата лака от честотата на въртене на центрофугата. Най-добро качество на фотолитографията се получава, когато лаковете се нанасят без допълнително разреждане при равномерно разтичане по повърхността.

Таблица 5.1

Честота на въртене s^{-1}	Дебелина, μm	
	AZ 1350	AZ 1350H
33,3	0,74	1,87
50	0,60	1,51
66,7	0,51	1,32
83,3	0,42	1,19

Нанасянето на лак чрез потопяване зависи до голяма степен от формата и големината на повърхността, върху която трябва да бъде нанесен лакът. При нанасянето на лака чрез пулверизиране се работи с пречистен въздух и с налягане от $20 \div 27.10^4$ Pa (2,1 до 2,8 at). Нанесеният по този начин лак трябва веднага да бъде поставен в пещта за изсушаване, за да може да продължи неговата „обработка". Както и при нанасянето с центрофуга, и тук не се препоръчват разреждания освен в случаите, когато трябва да се получат по-тънки слоеве. Общо за всички методи е необходимостта от филтруване на лака. При дълго съхраняване или продължително използуване в резултат на вътрешна полимеризация в него се получават твърди субстанции. При „стар" лак се препоръчва нанасяне през подходящи филтри, които позволяват отфилтрирането на частици, по-големи от 0,6 μm.

Най-широко разпространен метод за изсушаване е използуването на продухвана с азот пещ при температура 60—65°C. Времето на изсушаване зависи от дебелината на покритието. По-тънките слоеве, които се получават при нанасянето с центрофуга, изискват 5—10 min, по-дебелите — до 30 min. Пещта трябва да работи с филтриран азот, за да може да се осигури отвеждане на летливите съставки на фотолака, каквито обикновено са разтворителите. Друга възможност за изсушаване на лака е използуването на инфрачервена лампа, например 250 W, с дължина на вълната 800 nm, насочена от около 30 cm към работната повърхност. За лабораторни условия се препоръчва такава лампа да се монтира директно над центрофугата, което облекчава работата и осигурява добри условия. Тънките покрития изискват при този начин време за изсушаване от 3 до 5 min, а дебелите — от 5 до 15 min. Оптималното време за изсушаване независимо от това, какъв метод се използува, се определя с помощта на серия от опити, като при това се спазват еднакви условия на предварителната обработка. От друга страна, критерий за оптимално време на изсушаване са образците с най-голяма разрешаваща способност и с най-голяма рязкост на ръбовете на покритието.

В зависимост от параметрите на използуваната апаратура времето за засветяване може да бъде от няколко секунди до няколко минути. Оптималната чувствителност на фотолака обикновено е в границите 340—450 nm. Засветяването зависи от различните параметри, които са свързани главно с фотохимичната реакция на покритието. Времето за засветяване зависи от спектъра на лампата, нейната интензивност, дебелината, цвета и отражателната способност на покритието, поглъщането на светлина от самата оптична система, стъклото на шаблона, оптиката на микроскопа и т. н. В полупроводниковата технология обикновено се използуват живачни лампи от 200 W. За покритие, нанесено при 50 s^{-1}, времето за засветяване е обикновено между 15 и 25 s.

Засветеният лак се проявява по няколко различни метода. Във всеки случай в резултат на засветяването и на протеклата фотохимична реакция се изменят химичните свойства на покритието. Това е същността на *проявяването*, което протича в течна среда, като се използуват или оригинален проявител, или разтвор, приготвен по рецепта. Важно условие за осигуряване на добро качество на фотолитографския процес е температурата на проявителя. Обикновено тя е в границите от 15 до 22°C. След проявяването за прекъсване на процеса пластината се измива с вода и се изсушава. За проявяване в оригинален проявител на покрития, нанесени с центрофуга при 50 s^{-1}, са необходими 4 до 5 s. При увеличаване на дебелината на покритието

това време може да достигне и до 45 s (за покритие с дебелина до 2,5 μm). Определянето на оптималното време за процеса е свързано с най-важните параметри на фотолитографията — разрешаващата способност и резкостта на релефа. Гарантирането на тези параметри е критерий за правилно проявяване.

Следващата операция след проявяването е *изпичане при висока температура*. При използването на релеф от фотолак за обработка при вакуумни процеси тази операция може да се пропусне. В повечето случаи обаче е необходимо чрез температурната обработка да се повиши киселиноустойчивостта на покритието. Темперирането на фотолака, особено при температура $T>160°C$, затруднява неговото отстраняване след завършване на фотолитографския процес. Времетраенето и температурата зависят от времетраенето и характера на следващата химична обработка и от параметрите, които трябва да бъдат достигнати. За особени случаи като мезаецване се позволява темпериране на фотолака до 200°C.

При температура на изпичане до 95°C за сваляне на лака се използуват обикновено разтворители, като ацетон, метилетилекетон и др. Фирмите-производители препоръчват и специални разтворители, които по състав не се различават съществено от гореизброените. При температура на изпичане, по-висока от 95°C, се използуват същите разтворители, но загрети до температура 50—60°C. Може да бъде използувана и ултразвукова баня. При температура на изпичане над 180°C се използува обикновено сярна киселина. Прилага се и механична обработка за сваляне или доизгаряне на лаковото покритие, когато това е целесъобразно и възможно. В табл. 5.2 са показани някои от най-важните физични свойства на разгледаните два позитивни фотолака.

Таблица 5.2

	AZ1350	AZ 1350H	AZ—разредител	AZ—проявител	AZ—разредител
Вид на разредителя	органичен	органичен	органичен	алкален	алкален
Цвят	червен (бернщайн)	червен (бернщайн)	прозрачен	леко мътен	жълт
Вискозитет, сантистокс	4,2 — 4,9 ± 1,5	25±0,015	—	—	—
Специфична плътност, g/cm³	0,99—1,01	1,04±0,1	0,95	1,045	0,99
Покривност, %	17,5	30	—	—	—

От негативните лакове, които се използуват в полупроводниковата технология, трябва да споменем следните: KTFR, KPL, KOR, KMER, FK 11.3 [219, 221, 212, 213, 29].

Като представител на негативните лакове KTFR е изграден подобно на KPR на базата на разтвор на поливинилов алкохол и канелена киселина в ксилол. KPL е подобен на KPR, но е с по-голяма покривност (около 4 пъти) и с по-лесно летлив разтворител. KOR е с 4—5 пъти по-голям вискозитет от KPR. При KPR чувствителността е преместена към дължина на вълната 550 nm, тъй като в състава има специален сенсибилизатор. За химична обработка на метални покрития и метални ленти се използува KMER. Той е подобен на KTFR, като при него полимерът е изграден на принципа на модифицирани молекули на полиизопрена, които позволяват по-добра адхезия върху метални повърхности. Използува се и лакът FK 113 [224].

5.3. МЕХАНИЗЪМ НА ФОТОЛИТОГРАФСКИЯ ПРОЦЕС

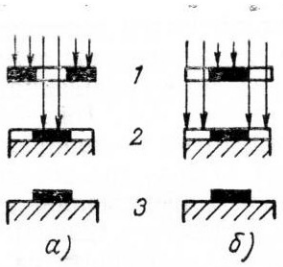
5.3.1. Фотохимична реакция

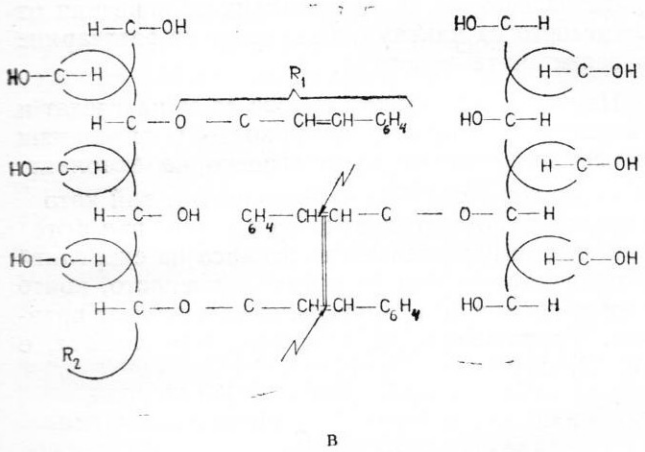
На фиг. 5.5 е показана принципната разлика при засветяване между негативен *(а)* и позитивен лак *(б)*. Релефът *3*, който се получава във фотолака, е резултат на няколко типа процеси. Първият, характерен за негативните лакове, е свързан със собствена полимеризация и образуването на неразтворими участъци. Вторият се характеризира със свързване на линейните полимери с радикали, които се получават по време на фотолизата на светлочувствителните съставки и също се наблюдава при негативните лакове. Третият е свързан с фотолизата на светлочувствителните съединения и образуване на разтворими вещества и характеризира позитивния лак. Според [41] химичните промени при засветяването на негативния лак протичат по начина, показан на фиг. 5.5 *в*.

Като се вижда от показаната структура, молекулите на поливиниловия спирт и канелената киселина са свързани в реда $R_1—O—R_2$, където R_1 е светлочувствителната съставка, а R_2 — молекулата на поливиниловия спирт. При поглъщане на фотон с достатъчна енергия се разкъсва двойната връзка $C=C$. Разкъсването на връзката $C=C$ изисква енергия, равна на 2,51 J/mol. За разкъсването на всяка друга връзка от молекулата се изисква по-голяма енергия. Появяването на свободни връзки е причината за полимеризацията на лака и неговата химична устойчивост.

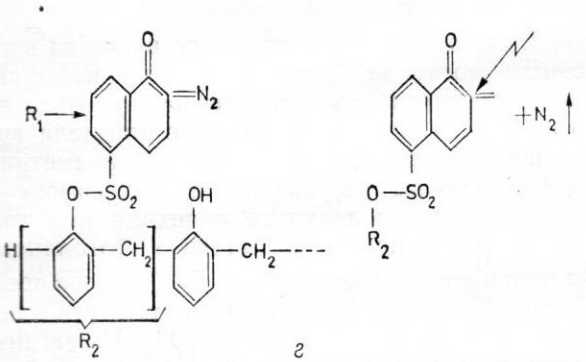
При позитивните лакове се използуват диазосъединения и химичните промени са показани на фиг. 5.5 *г* [41].

При поглъщане на фотон се разкъсва връзката въглерод—азот, молекулата на азота се освобождава и шестчленното бензолно ядро се преустройва в петчленно. Образува се ново съединение — инденкарбен, което, като взаимодействува с намиращата се в проявителя вода, образува инденкарбонова киселина. Солите на тази киселина, получени





в



г

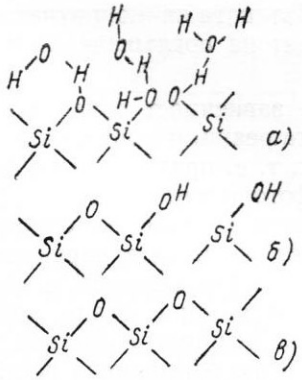
Фиг. 5.5

при обработка с основни разтвори, са разтворими. Тези разтвори са базата за приготвяне на проявители. В незасветения участък молекулата на полимерното съединение остава стабилна. Именно напускането на азота води до получаване на нетрайни съединения и химично неустойчиви участъци, които лесно могат да бъдат проявени.

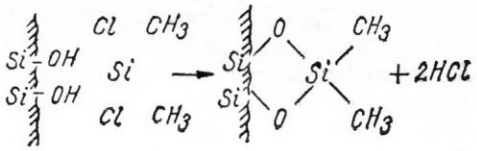
5.3.2. Основни зависимости, характеризиращи фотолитографския процес [41]

Изследванията на фотохимичните процеси при лаковете се свеждат до разглеждане на основните три операции, свързани с фотолитографията — експониране, проявяване и термообработка, и на състоянието на повърхността преди нанасянето на лака.

Почистването е химична операция, която може да бъде проведена в няколко варианта. Както е показано на фиг. 5.6, термично изсушеният силициев двуокис има една от трите възможни по-



Фиг. 5.6



Фиг. 5.7

върхности — първият тип (*а*) съдържа абсорбирани молекули вода, вторият тип (*б*) — силанолови групи, а третият тип (*в*) — силоксанови структури. Съществуват химични съединения, които подобряват адхезията на лака към повърхността. Те реагират с групите, намиращи се на повърхността. Например тънко покритие от диметилдихлорсилан позволява да се увеличи съществено качеството на фотолитографския процес, тъй като реагира химически със силаноловите групи и осъществява чиста хидрофобна повърхност. Тази реакция е показана схематично на фиг. 5.7.

При операцията „експониране“ най-съществена информация носи характерът на протичане на фотохимичната реакция както по време на засветяване, така и на тъмно. Подобно на разгледаните досега механизми на другите технологични обработки трябва да се определи най-бавният процес, който е определящ по отношение на цялата реакция. Критерий за скоростта на протичане може да бъде изменението на концентрацията на молекулите на светлочувствителната съставка за единица време. Изменението на концентрацията е пропорционално на потока от фотони и се описва с уравнението

$$\frac{dC}{dt} = -\varphi \cdot \Phi,$$

където C е концентрацията на молекулите; φ — квантовата ефективност на реакцията; Φ — количеството фотони за единица време и на единица площ.

Като се използува уравнението на Бугер и Ланберт, се получава зависимостта

$$\frac{d\,|\ln C|}{dt} = -\varphi\varepsilon\, d_\Phi\, \Phi,$$

където d_Φ е дебелината на покритието, ε — поляният коефициент на поглъщане на диазосъединението.

Получената зависимост означава, че динамиката на светлата реакция е описана с уравнение от първи порядък, т. е. права линия с наклон, зависещ от потока фотони и от дебелината на покритието. Ако светлата реакция е определяща, при слаба осветеност основният параметър, от който зависи времето на експониране, е дебелината на фотолака. Обратно, при силна осветеност се създава условие реакцията (реакция на тъмно) да започне да играе определяща роля по отношение на кинетиката на цялата реакция. Тъй като реакцията на тъмно е чисто химична, тя се описва чрез уравнението

$$\frac{dC_{x\,T}}{dt} = K_x C_{x,T}$$

където K_x е коефициентът на реакцията; $C_{x,T}$ — концентрацията на полученото междинно съединение.

Това уравнение води до

$$\frac{d \ln C_{x,T}}{dt} = \text{const}/_{\text{парциално налягане } H_2O=\text{const}},$$

т. е. при условия на свободно протичане на светлия етап на реакцията скоростта на изменение на концентрацията и времето на експониране зависят от влажността на околната среда. При средна стойност на засветяване от 3.10^3 lx за една секунда във фоточувствителния слой ще се разложат около 10^{15} молекули. Това означава, че за една минута експониране ще бъдат разложени всички налични молекули в покритие от фотолак с дебелина от 1 μm.

Основният процес на проявяването, разгледан конкретно за позитивен лак, е разтварянето на получените в резултат на експонирането соли на инденкарбоновата киселина [41]. Уравнението, с което се описва взаимодействието на фотолака с основния разтвор на проявителя, има следния вид:

$$V = K_{\text{пр}} (C^{OH^-})^m C,$$

където V е скоростта на реакцията; $K_{\text{пр}}$ — коефициентът на реакцията; m — порядъкът на реакцията; C^{OH^-} — концентрацията на хидроксилните йони в проявителя; C — концентрацията на разтворимите молекули. Изменението на порядъка на реакцията свидетелствува за това, че между отделните съставки на фотолака има не само механична връзка, но се получава и промяна в общите химични свойства на лака като цяло. За това свидетелствува и разликата в енергията на активация при разтваряне отделно на смола и на фотолак [27, 28, 29]. Експериментите показват, че скоростта на протичане на проявяването зависи от дифузията на хидроксилните групи към повърхността на фоточувствителния слой и по-слабо от тяхната концентрация.

Интерес представлява и разтварянето на незасветените части от лака в проявителя. Неразложените молекули на диазосъединенията са бариера срещу тяхното разтваряне. Това обяснява определянето на времето на експониране така, че не всички молекули да бъдат разложени. Важен експериментален извод представлява и оцветяването на проявителя. Той остава безцветен, когато молекулите на диазосъединенията са напълно разложени и обратно, оцветява се в малинов цвят, когато покритието е добре експонирано. Минимумът на времето за експониране се определя от достигането на максимална скорост на разтваряне на засветените участъци.

Не на последно място трябва да се разгледат и процесите на *термолизата*, която е определящ процес по време на изсушаването на фотолака. Термолизата е подобна на фотолизата, тъй като свързана също с предаване на енергия във фотолака, т. е. с нарушаване на баланса на енергията на химичната връзка на диазосъединението, която може да доведе до разрушаване на някои от връзките. Уравнението, което описва термолизата, е [31, 33, 41]:

$$\frac{dC}{dt} = K_T C.$$

В практиката се предполага, че по време на изсушаването могат да бъдат разложени най-много няколко процента от молекулите на диазосъединението. От това условие може да се определи времето, което гарантира запазване на параметрите на фотолака след изсушаване. В зависимост от количеството на молекулите и техния вид това време е различно за различните фотолакове. Така например за съветския лак ФР 383 това време за $T=100°C$ е около 1 час, а за някои други лакове може да бъде до 10 минути [33, 34]. Някои производители гарантират неразрушаване на фотолака при изсушаване до определена температура в атмосфера на азот.

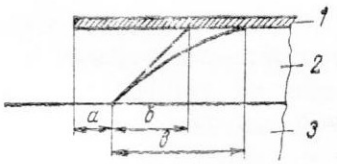
При избора на дебелината на фотолака се изхожда, от една страна, от допустимата плътност на дефекти, а от друга — от възможността за получаване на малки размери на полупроводниковите структури. Определянето на минималния размер, който може да бъде гарантиран от даден фотолак, е трудна задача, тъй като пренасянето на изображението зависи от много фактори, а и в голяма степен от степента на запрашеност на околната страна. Освен това в нанесения фотолак съществуват локални потенциални дефекти, които при съответни условия могат да се превърнат в действителни и да доведат до влошаване на параметрите на процеса. Потенциалните дефекти могат да бъдат механични включвания, например прашинки, различни физико-химични несъвършенства, наличие на механична смес от компонентите и т. н.

5.4. ПАРАМЕТРИ НА ЛАКОВЕТЕ И ФОТОШАБЛОНИТЕ И КОНТРОЛ НА ПАРАМЕТРИТЕ НА ФОТОЛИТОГРАФСКИЯ ПРОЦЕС

Конструкцията на различните полупроводникови прибори поставя изисквания към параметрите на употребените в технологичната схема фотолакове. Повърхността на полупроводниковата пластина получава разнообразни свойства — отражение на цялостното изготвяне на прибора. Реализуемите параметри на структурата — широчина на прозорци, геометрични размери на части на структурата, също поставят изисквания спрямо лаковете. Изискванията към фотолаковете може да се формулират най-общо по следния начин: фотолакът трябва да запазва свойствата си за дълго време, да осигурява получаването на хомогенни слоеве с необходимата дебелина, да не оставя следи от органични замърсявания след отстраняването му от повърхността, да има подходяща спектрална характеристика и възможност за използуване на кратко време за експониране, да няма примеси, които с проникването си в полупроводниковата повърхност да влошават параметрите на структурата. Лакът трябва да има голяма разрешаваща способност, много добра възможност за репродуциране на изображение с рязкост на ръба на релефа, висока степен на адхезия независимо от характера на повърхността, върху която е отложен, и голяма киселиноустойчивост. Обобщаването на тези параметри показва, че е трудно да се намери лак, който да отговаря на всички тези условия. Въпреки това позитивните лакове AZ1350, ФП-383, ФП-РН-7 и др., както и негативните лакове KTFR, KPR и някои поспециални видове удовлетворяват до голяма степен тези изисквания. При конструиране на полупроводниковите прибори трябва да се познават качествата на лаковете, за да се гарантира геометрията на структурата.

Адхезията на фотолака се дефинира чрез силата, с която могат да бъдат разкъсани връзките между молекулите на фотолака и тези на подложката, върху която е нанесен (окисно покритие, метал или полупроводник). Малка адхезия води до получаване на различни структурни дефекти, особено по ръба на релефа. На фиг. 5.8 е показано влиянието на адхезията върху качеството на фотолитографския процес, като за пример е взет ръбът на един отвор в окисно покритие *2*. Адхезията зависи главно от химичните свойства и от чистотата на повърхността, от чистотата на компонентите на самия фотолак *1* и до голяма степен от влажността на околната среда, която определя, както беше показано на фиг. 5.6, повърхностните напрежение и ъгъла на мокрене. С *а* е отбелязано подецване, с *б* — нормална и с *в* — намалена адхезия.

Всякакви замърсявания от вида на прах, мазнини, дори остатъци, получени в резултат на дишането на персонала в непосредствена близост на пластината по време на нанасяне на фотолака, се отразяват върху състоянието на повърхността, а оттам върху адхезията на самия фотолак. Както

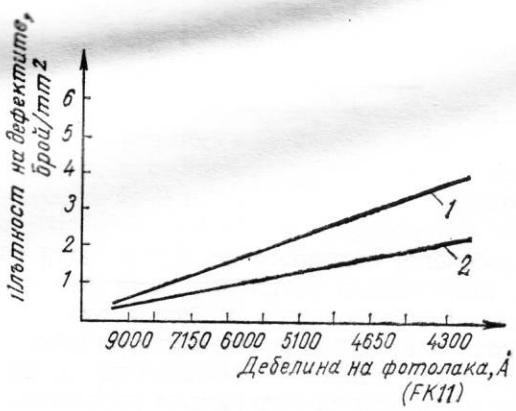


Фиг. 5.8

беше посочено, наличието на силоксанови групи, които притежават рязко изразени хидрофобни свойства, е предпоставка за добра адхезия. Силоксанова повърхност се образува от силанолова при температура над 850°С. Слабо свързаната вода се отделя и ъгълът на умокряне се увеличава. Този процес, който обикновено се нарича освежаване на пластината, може да се получи при температурна или плазмена обработка.

При избора на фотолака трябва добре да се отчитат особеностите на диелектричното покритие върху което ще се формира конфигурацията на прибора. Съществуват различни възможности в зависимост от начина на получаването им, които изменят скоростта на ецване, определяща качеството на фотолитографския процес. Обикновено се счита, че прясно окислените пластини притежават силно изразена хидрофобна повърхност и в резултат на това осигуряват най-добра адхезия на фотолака. Експериментите показват, че добра адхезия се осигурява, ако фотолакът се нанесе веднага след получаването на покритието, което трябва да бъде обработено. Ако се наложи пластините да престоят известно време поради невъзможност от непосредствена обработка, използува се предварително темпериране до 200°С в чист азот. Температура на обработката 800—900° , и то в атмосфера на сух кислород, се използува, ако пластините са били в допир с вода или други разтвори. При проявяването е необходимо процесът да не спира изведнъж, а да се осигури междинен етап, за да се избягнат напреженията, които биха се получили в лаковото покритие. Върху адхезията оказват влияние и алкални инфрачервени разтвори, необходими при ецването на някои метални покрития.

Параметърът киселиноустойчивост определя минималния разтвор, който може да бъде гарантиран при конструирането на една структура. При големите интегрални схеми се получава възможност за увеличаване на плътността на дефектите на различни критични места, свързано с нарушаване на киселиноустойчивостта в резултат на различни замърсявания във фотолака. Този проблем се решава с филтруването. Така например за лакове KPR, AZ1350 и др. след филтруването се гарантира максимален размер на твърди частици от 0,5 μm. За KMER се гарантира 1,5 μm, а за KTFR — 1 μm [212]. Голямо значение има и дебелината на покритието. След като лакът се филтрира и се гарантира максималният размер на твърдите частици, в него може да се различи случаят, когато тези частици са изцяло обхванати от фотолака (дебел) или когато те са на повърхността му (тънък). Във втория случай се получава влошаване и по-голяма плътност на дефектите в ре-



Фиг. 5.9

зултат на отделянето на частиците и получаването на големи пори на повърхността. На фиг. 5.9 е показана зависимостта на плътността на дефектите от дебелината на покритието за 56 частици/mm² — *1* и 36 частици/mm² — *2* [224].

Разрешаващата способност на фотолака е комплексна величина, която зависи от многобройни фактори. Експериментите показват, че долната граница на разрешаващата способност на обикновено използуваните фотолакове все още не е достигната и по принцип се ограничава от оптичните системи. Така например засветяване с помощта на електронен лъч осигурява достигане на щрихи — от 0,25 μm, при което релефът на ръба е гарантиран с точност от няколко стотни от микрометъра. Гаранция за осигуряването на голяма разрешаваща способност е достатъчната киселиноустойчивост и адхезия на покритието, тъй като само голямата разрешаваща способност не е в състояние да гарантира добро качество на възпроизведеното изображение. В табл. 5.3 са показани стойностите на разрешаващата способност на различните фотолакове, използувани в полупроводниковите технологии, и минималните размери, които могат да бъдат гарантирани с тях.

Особено значение при конструирането на приборите има гарантирането на изображението между дълги, тесни, редуващи се черни и бели ивици. Засветяването в средата на тези бели ивици е по-слабо, отколкото в краищата. В резултат на това независимо от разрешаващата способност на лака се стига до изкривявания на успоредните прави и до влошаване на изображението.

Таблица 5.3

Фотолак	Разрешаваща способност, линии/μm	Минимален размер, μm	Дебелина на покритието, nm
KPR	2,5	2,5	900
KMER	5,0	7,5	1250
KTFR	2,5	7,5	900
WAYCOATIC	2,5	5,0	1200
AZ111	$<2,5$	2,5	700
AZ1350H	$<2,5$	2,5	1200
MICROLINE 102	$<2,5$	2,5	1000

Параметрите на фотошаблоните могат да бъдат характеризирани по следния начин — рязкост на релефа, чистота, прозрачност и запазване на параметрите на изображението. Експериментът показва, че покривността, която фотошаблонът може да осигури, определя качеството на изображението, прехвърлено във фотолака. Колкото по-фина става структурата, толкова по-голямо значение има този параметър. Особено значение за осигуряване на този параметър има работата на фоторепитера.

Оптимална покривност (защитимост на черните участъци) се постига при гарантиране на следните условия — избягване на допир с непроявения слой, почистване на стъклата с органични разтворители, разтварящи мазнините, изсушаване на стъклата с инертен газ, осигуряване на високо качество на фоточувствителния слой на повърхността на стъклото, осигуряване на необходимите параметри на проявяване, като химичен състав на проявителя, постоянна температура и т. н.

Качеството на релефа се определя от прехода „бяло-черно“, който се характеризира със „сив“ участък и с неравномерност на ръба. Толерансите, които се допускат, са обикновено помалки или равни на 0,8 μm и зависят до голяма степен от оптичната система при засветяването. При измерване с обектив с увеличение 10 и апертура 0,4 областта на прехода се получава до 3 μm. Кафеникави участъци по ръба на релефа не са допустими.

Качеството на самия ръб се определя до голяма степен от диаметъра на зърната на фоточувствителния слой. В слоеве, изградени на базата на сребро, размерът е до няколко десети от микрометъра.

В табл. 5.4 са дадени характеристиките на фотоплаки с голяма разрешаваща способност, използувани в микроелектрониката.

Таблица 5.4

Тип фотоплаки	Светлочувствителност, S_{o2} ед. ГОСТ	Коефициент на контрастност	Плътност на воала, D_o	Максимална плътност на почерняване, D_{max}	Разрешаваща способност R, линии/mm	Дебелина на емулсионния слой, μm	Дефектност, cm^{-2}
HRP, KODAK /САЩ/	5	4,3	0,03	3	1850	4—6	0,7—1
LP-1, ORWO /ГДР/	3,5	4,4	0,12	3	1054	15	0—20
MR-4, KODAK /Англия/	13	7,4	—	3	1300	20	—
AGFA-GAEVAERT /Белгия/	13	4,6	0,02	3	1900	4—6	0,7—1
СРБШ /СССР/	5	5,4	0,08	3	2000	8	—

Фотоплаките KHRP са с микрозърнеста структура и имат разрешаваща способност до 2000 линии/mm. Дебелината на емулсията преди проявяване е приблизително 6 μm, а след проявяване — 4μm. Размерите на зърната на хологенидното сребро са около 0,1μm. От обратната страна е нанесен противоореолен слой. Максимумът на спектралната чувствителност на тези плаки е при $\lambda = 545$ nm. Отличават се с голяма контрастност и рязкост на ръба. Фотоплаките KHRP-2 се отличават от KHRP с по-малкото си оптично разсейване, което позволява да се спести нанасянето на противоореолен слой от обратната страна.

ГЛАВА 6

ВАКУУМНИ ПРОЦЕСИ В ПОЛУПРОВОДНИКОВАТА ТЕХНОЛОГИЯ

6.1. ПРЕДНАЗНАЧЕНИЕ НА ВАКУУМНИТЕ ПРОЦЕСИ

Вакуумните процеси в полупроводниковата технология са предназначени за получаване на тънки слоеве от метали или диелектрици, необходими за всяка технологична схема в монолитната, слойната и хибридната технология.

Изискванията, които се предявяват към вакуумната система, произтичат от същността на процеса и от желаната стабилност на параметрите. При металните покрития е необходимо:

а) да се получи равномерна дебелина върху цялата пластина по време на едно изпарение или на редуващи се изпарения;

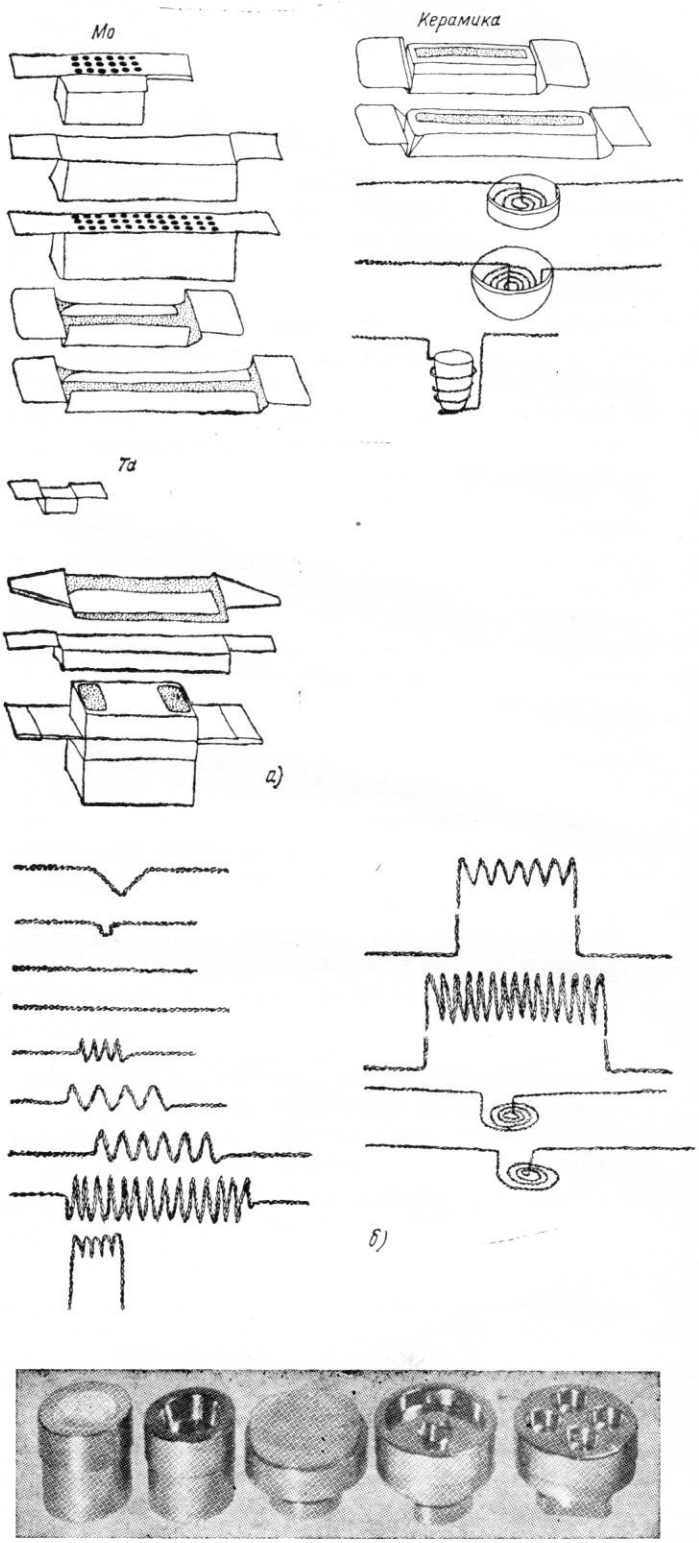
б) да се осигури необходимата електрична проводимост, т. е. повторяема структура и чистота на самото покритие;

в) да се осигурят добра адхезия към подложката и малки механични напрежения в слой.

Счита се, че ако вакуумната система осигури изпълнението на тези условия, в следващите технологични процеси няма да настъпи някаква съществена промяна в параметрите на покритието.

Вакуумният процес може да се раздели на няколко различни етапа. Имат се пред вид различните физични процеси, които изграждат самия технологичен процес и имат математично описание — изпарение на материала, транспортиране през вакуумното пространство до подложката, кондензиране и отлагане на покритието. Енергията на кондензиращите частици влияе съществено върху механизма на израстване на покритието. В зависимост от енергията, с която частиците на отлагания материал срещат подложката, се различават изпаряване, разпрашване и йонно нанасяне (поддържано от йони отлагане на покрития). При *вакуумното изпаряване* необходимият за отлагане материал се намира в тигел, който се загрява, като енергията се получава директно чрез електрическо подгряване или чрез бомбардиране на материала с поток от електрони. В единия случай е налице термично изпаряване, а във втория — изпаряване чрез електронен лъч (електронна пушка). Високият вакуум е необходим, за да се предотврати сблъсъкът между молекулите на изпаряваното вещество и тези на остатъчната атмосфера, както и възможната реакция помежду им. Енергията на частиците, с която те попадат върху подложката, е около 0,1 eV.

При *катодното разпрашване* с ускорени положително заредени йони се „бомбардира“ катод, на чиято повърхност е нанесен необходимият материал. Йоните се получават в резултат на газов разряд между два електрода (съществуват и по-сложни, например триодни системи) при налягане



Фиг. 6.1

на аргонови молекули от 1,33÷0,13 Pa (10^{-2} до 10^{-3} Torr). Енергията на частиците, които попадат върху подложката, е от порядъка на няколко десетки електронволта, а енергията, с която йоните попадат върху катода, е още по-голяма. Скоростта на отлагане при катодното разпрашване е много по-малка от скоростта при изпарението.

Съществуват различни по форма и з п а р и т е л и, показани на фиг. 6.1. Предназначението на изпарителите е да поемат материала, който трябва да бъде изпарен, и в същото време да го задържат, когато се разтопи. Това изисква добро мокрене между разтопения материал и изпарителя. Изборът на материала на изпарителите зависи от веществото, което трябва да бъде изпарявано. Съществуват различни таблици, които показват съвместимостта между изпаряемо вещество и тигел. В табл. 6.1 са показани някои от често срещаните комбинации. Важна част на вакуумната апаратура представляват д ъ р ж а т е л и т е. Те имат такава конструкция, че позволяват въртеливо движение на подложките, отлагане под ъгъл с подобряване на адхезията и морфологията на отложения слой, загряване или охлаждане на подложките.

Таблица 6.1

Съвместимост между материал на тигела и изпаряемо вещество

Изпаряемо вещество	Материал на тигела								
	ZR—Диборид	Ti—Диборид	C	Fe	AL	Хромел	W	Mo	Ta
Ag	—	—	—	—	—	—	×	×	×
AL	×	×	0	—	—	—	0	—	—
Au	—	—	—	—	—	—	×	×	—
Bi	—	—	—	—	—	—	×	—	×
Cd	—	—	—	—	—	×	×	—	×
Ce	—	—	—	—	—	—	×	—	—
Co	—	—	—	—	—	—	×	—	—
Cr	—	—	—	—	—	—	×	×	×
CrNi	—	—	—	—	—	—	×	—	—
Cu	—	—	—	—	—	—	×	—	×
Ge	—	—	—	—	—	—	×	×	—
In	—	—	—	—	—	—	×	×	—
Rh	—	—	—	—	—	—	×	×	—
Se	—	—	—	×	×	—	—	—	—
Si	—	—	—	—	—	—	—	—	×
Ti	—	×	—	—	—	—	×	—	—
Zn	—	—	—	×	—	×	×	—	×
Na_3ALF_6	—	—	—	—	—	—	×	—	×
MgF_2	—	—	—	—	—	—	×	—	×
ThF_4	—	—	—	—	—	—	×	—	×
SiO	—	—	—	—	—	—	×	×	×
TiO	—	—	—	—	—	—	×	—	×
ZnS	—	—	—	—	—	—	×	—	×

× — подходящ;
0 — подходящ за кратко време;
— — неподходящ.

6.2. МЕХАНИЗЪМ НА ОТЛАГАНЕТО

Процесът на отлагането се състои от следните частични процеси — изпарение, транспорт през вакуумната система, кондензация и нарастване на слоя. От теорията на вакуумната техника [225, 226, 236] е известно, че налягането на парите на изпаряемото вещество P_s и скоростта на изпарение m_v са свързани по следния начин:

$$P_s = \frac{17{,}1}{\sqrt{M}} m_v \sqrt{T}, \tag{6.1}$$

където M е молекулното тегло на изпарилото се вещество в g/cm², s;
P_s — парциалното налягане; T — температурата на изпарение.

За скоростта на изпарение може да се напише

$$m_v = 0{,}0585\sqrt{M}\,\frac{P_s}{\sqrt{T}}. \tag{6.2}$$

При известно налягане на парите в равновесно състояние и известна скорост на изпарение, т. е. на определено разстояние от изпарителя, дебелината на полученото покритие за единица време s може да се опише по следния начин:

$$S = m_v/\gamma_M$$

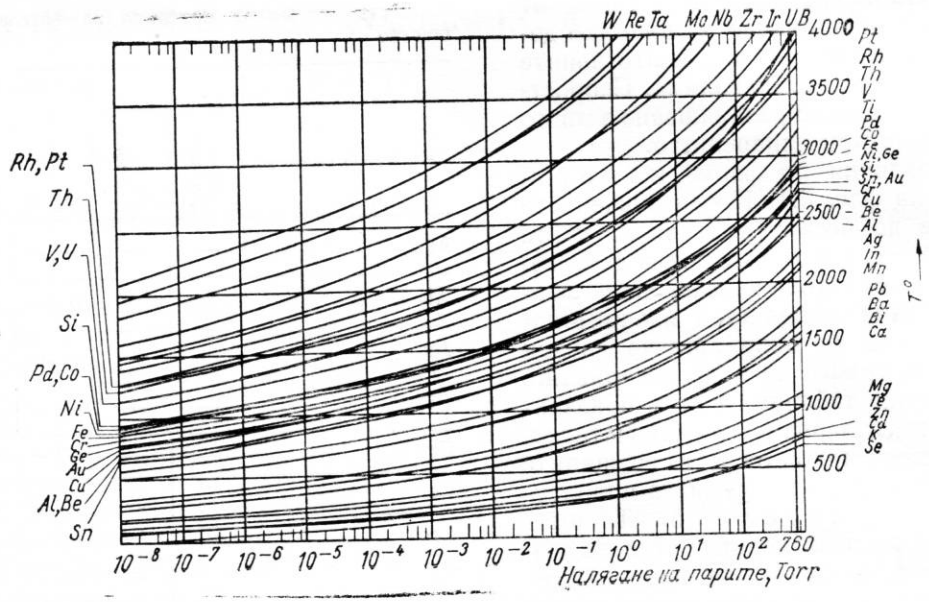
или

$$S = 2106\,\frac{\sqrt{M}}{\gamma_M}\cdot\frac{P_s}{\sqrt{T}}, \tag{6.3}$$

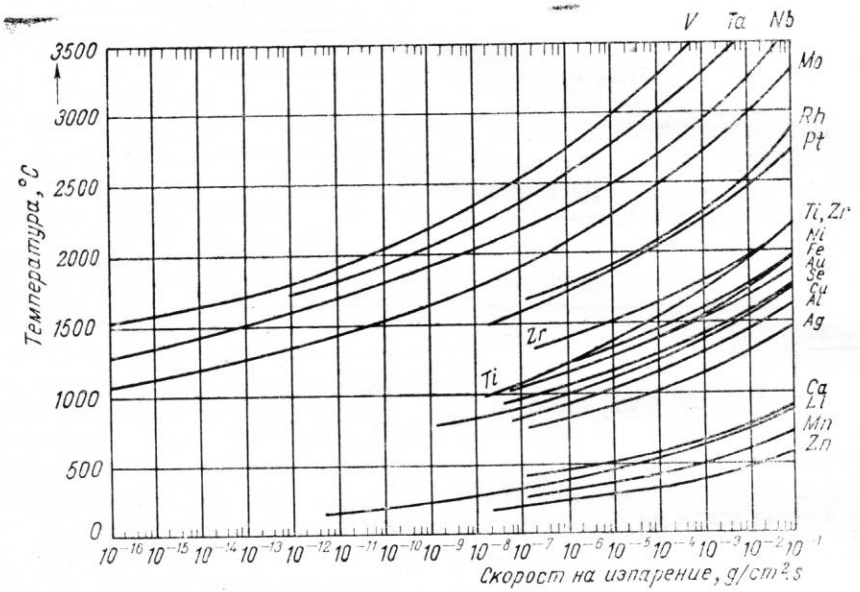
където γ_M е специфичната плътност, g/cm³.

На фиг. 6.2 и 6.3 са показани диаграми, които отчитат налягането на парите и скоростта на изпарение на различни метали в зависимост от температурата на изпарение.

Обикновено при изпарение се работи с постоянна скорост на изпаряване при достатъчно количество изпаряемо вещество, като температурата на изпарение и ефективната повърхност на изпарение са постоянни. По този начин количеството изпарен материал се контролира само чрез времето. Конструкторът на полупроводникови прибори трябва да отчита непостоянството, съществуващо в реалния процес, и да задава в технологичната схема усреднени стойности за дебелината на покритието. От своя страна скоростта на изпарение влияе върху морфологията на целия слой. Ето защо в реалния процес би трябвало да се има предвид и скоростта. Допълнителни възможности за регулиране на скоростта на изпарение са температурата на изпарение (чрез стойността на електрическия ток, който преминава през изпарителя) и количеството материал, поставен в изпарителя.



Фиг. 6.2



Фиг. 6.3

При достатъчно добър вакуум изпарените частици имат линейна траектория, като плътността на парите намалява обратно пропорционално с квадрата на разстоянието до изпарителя. Свободният пробег трябва да бъде по-голям от разстоянието между изпарителя и подложката. Той се описва по следния начин:

$$\bar{l} \cong \frac{5 \cdot 10^{-3}}{p} \cdot$$

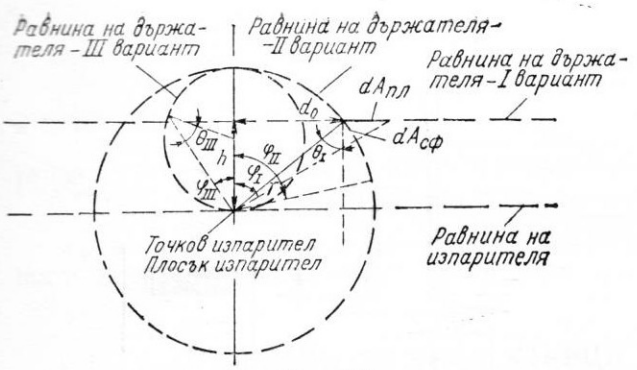
Ако в резултат на взаимните удари отделните частици загубят кинетичната си енергия и се съберат в капчици, изменя се морфологията на полученото матово покритие. Оптимизирането на свойствата на покритието в зависимост от скоростта на изпарение и от остатъчното налягане е важен процес при конструирането на полупроводниковите прибори.

Скоростта на израстване на покритието зависи главно от скоростта на изпарение и от разстоянието между подложката и изпарителя. На фиг. 6.4 е показана най-общата геометрия, която се получава при използуване на точков изпарител и подложка, поставена на разстояние R от него. Може да се запише [233, 236]

$$s = \frac{\alpha_2 m_v}{R^2 \lambda \gamma_M} \cdot \tag{6.4}$$

Следователно скоростта на отлагане зависи от коефициента на отражение α_2 и от геометричния фактор λ, характеризиращ геометрията на изпарителя. За точков изпарител λ е равна на 4 π, а за идеалния плосък изпарител с малка площ $\lambda = \pi$. За последния изпарител е в сила

$$m_{v_\varphi} = m_v \cos \varphi, \tag{6.5}$$



Фиг. 6.4

където φ е ъгълът на излитане, измерен спрямо нормалата на повърхността на изпарителя.

Конструктивно трябва да се различава и зависимостта на скоростта на отлагане от ъгъла на падане на изпарения поток, измерен спрямо нормалата на повърхността, върху която са разположени пластините.

(6.6) $$S_\theta = S\cos\theta.$$

На фиг. 6.4 е показан геометричен модел за изчисляване на дебелината на покритието за няколко случая от практиката. С прекъснати линии са показани равнината на изпарителя и три варианта на равнината на държателя. За плоския държател е изпълнено условието $\theta_I = \varphi_I$, за централната сфера (II вариант) $\theta_{II} = 0$, а за отвесната сфера (III вариант) $\theta_{III} = \varphi_{III}$. Освен това изпълнени са и следните условия за разстоянията:

$$h_{\varphi_I} = \frac{h}{\cos\varphi_I},\quad h_{\varphi_{II}} = h \quad \text{и} \quad h\,\varphi_{III} = h/\cos\varphi_{III}.$$

Дебелината на покритието за точков източник може да се изчисли по следния начин (фиг. 6.4). Върху площта $dA_{сф}$ се отлага покритие с маса dm, като е изпълнено

(6.7) $$\frac{dm}{m} = \frac{dA_{сф}}{A_{сф}} \quad \text{или} \quad dm = \frac{m}{4\pi r^2}\,dA_{сф}.$$

Тъй като $dA_{сф} = dA_{пл}\cos\varphi_I$, следва, че

(6.8) $$dm = \frac{m}{4\pi r^2}\cos\varphi_I\,dA_{пл}.$$

В сила са условията $r^2 = h^2 + d_0^2$ и $\cos\varphi_I = \frac{1}{[1+(d_0/h)^2]^{1/2}}$, което води до

(6.9) $$dm = \frac{m}{4\pi}\,\frac{h}{(h^2+d_o^2)^{3/2}}\,dA_{пл}.$$

Ако плътността на покритието е γ_M, за дебелината се получава

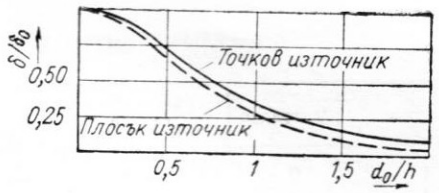
$$\delta_\varphi = \frac{m}{\gamma_M\,4\pi h^2}\,\frac{1}{[(1+(d_0/h)^2]^{3/2}}$$

и

(6.10) $$\delta_o/_{do} = 0 = \frac{m}{4\pi h^2|\gamma_M}$$

или

$$\delta_\varphi = \delta_0\cos^3\varphi_I.$$



Фиг. 6.5

При плосък източник (6.7) приема вида

(6.11) $$dm = \frac{m}{\pi r^2}\cos\varphi_I\,dA_{сф},$$

откъдето следва $\delta_\varphi = \delta_0\cos\varphi_I$,

където

(6.12) $$\delta_0 = \frac{m}{\pi h^2 \gamma_M}.$$

На фиг. 6.5 са показани зависимостите (6.10) и (6.12).

Конструкторът е заинтересован от получаване на еднаква дебелина на покритието върху няколко пластини. Това означава, че те трябва така да бъдат подредени, че да е изпълнено условието (от 6.4, 6.5, 6.6):

(6.13) $$\delta_{\varphi,\theta}/\delta_0 = \frac{h^2\cos\varphi\cos\theta}{h_\varphi^2} = 1.$$

От (6.13) могат да се получат не само (6.10) и (6.12), а и всички останали случаи, показани на фиг. 6.4. Така за втория вариант (централна сфера) следва $\delta_{\varphi,\theta} = \delta_0$ за точков източник и $\delta_{\varphi,\theta} = \delta_0\cos\varphi$ за плосък източник. За вариант III следва съответно $\delta_{\varphi,\theta} = \delta_0/\cos\varphi$ и $\delta_{\varphi,\theta} = \delta_0$. От тези теоретични разсъждения следва, че ако източникът се приеме за точков, (6.13) е изпълнено за вариант II, докато за малък плосък източник — от вариант III.

В реалния случай скоростта на изпарение m_v зависи по-сложно от конструкцията на изпарителя. Изследванията показват [236, 237, 238], че е удобно да се използува $m_{v\varphi} = m_v\cos^{(x)}\varphi$. От (6.10) за плосък държател и точков източник следва $\delta_{\varphi,\theta}/\delta_0 = \cos^{(3+x)}\varphi$, което позволява чрез подходящо експериментиране да се определи експлоатационната характеристика на изпарителя. От друга страна, от (6.13) следва

(6.14) $$\cos\theta = \frac{h_\varphi^2}{h^2\cos^{(x)}\varphi}.$$

Това условие се използува за оптимално конструиране на подложкодържатели, например за $h_\varphi = h$ се избира изпарение под ъгъл $\theta = \arccos^{(-x)}\varphi$, за $h_\varphi = h\cos^{(x)}\varphi$ следва $\theta = \arccos^{(x)}\varphi$, за $h_\varphi = h\cos^{x/2}\varphi$, $\theta = \arccos 1$ и т. н.

Независимо от оптималния избор на мястото и ъгъла на изпарение крайните размери на пластината водят винаги до отклонения в дебелината на покритието.

На табл. 6.2 са показани примерни отклонения в дебелината на покритието по един диаметър в точки A и B, разположени на 20 mm една от друга от двете страни на геометричния център за $x = 1$ (идеален плоскостен изпарител) и за $x = 3$ за случая $\delta_\varphi = \delta_0\cos^{x/2}\varphi$ и $\theta = \arccos 1$. От данните се вижда,

Таблица 6.2

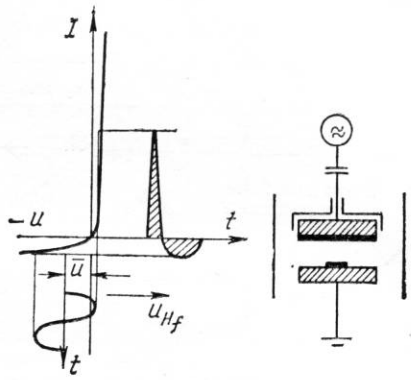
φ, градус	x	θ, градус	$\Delta\ \delta_{тА}/\ \delta_0$	$\Delta\ \delta_{тВ}/\ \delta_0$
0	1	0	— 2	— 2
14	1	0	— 5	0
35	1	0	—10	3
0	3	0	— 3	— 3
19	3	0	—12	1
35	3	0	—30	24

че чрез изменение на ъгъла може да се достигне минимално отклонение по диаметъра, особено ако за всяка пластина се използува различен ъгъл θ (изпарение под ъгъл).

От теоретичните изчисления може да се заключи, че повишаването на чистотата на покритието се достига чрез подобряване на вакуума, увеличаване на налягането на парите на изпаряемото вещество, намаляване на разстоянието между изпарителя и подложката, намаляване на абсорбционния коефициент за частиците от газа, увеличаване на абсорбционния коефициент за изпаряемото вещество чрез повишаване на температурата на подложката. Намаляването на абсорбционния коефициент за примесите е еквивалентно на намаляване на налягането на техните пари.

За обясняване на механизма на *катодното разпрашване* трябва да се разгледат процеси, подобни на тези в електронната лампа. В резултат на образуването на зона с обемен заряд (тъмна зона пред катода) положителните йони на плазмата се ускоряват в посока на катода и като попадат върху него, го разпрашват. За осигуряване на плазмата се използува инертен чист газ, например аргон. Само в този случай отложеното покритие върху подложката отговаря по състав на материала на катода. При реактивното катодно разпрашване, обратно, се цели да се получи реакция с йоните, които разпрашват материала. Използуват се йони на кислорода, азота, амоняка и някои други газове. При реактивното разпрашване е възможно реакцията да протече на самата повърхност на катода, на повърхността на подложката или някъде в междуелектродното пространство. Ако реакцията протича на самия катод, разпрашеният материал е самото съединение. В първия случай е възможно получаването на изолиращ слой върху катода. За продължаване и осигуряване на процеса е необходимо да се повиши налягането на газа. Увеличаването на парциалното налягане на газа и надминаването на определена стойност води до прекратяване на реакцията на повърхността на катода. По-нататъшното отлагане на покритието става чрез реакция върху подложката. На това място стехиометрията на слоя може да се изменя свободно за осигуряване на необходимите параметри.

Реакциите, които протичат при всички видове катодно разпрашване, влияят съществено върху скоростта на отлагане и определят параметрите на тази технологична операция. В по-голямата си част тези механизми са еднакви с механизмите на



Фиг. 6.6

вакуумното изпарение. При високочестотното разпрашване интерес представлява отрицателното зареждане на катода независимо от факта, че се използува променливо напрежение. Този факт се обяснява с различната подвижност на електроните и йоните, което е показано на фиг. 6.6. След запалването на плазмата през първата положителна полувълна електронният ток е много по-голям от съответния йонен ток през следващата отрицателна полувълна. С помощта на разделящ кондензатор във веригата на подложката се получава отрицателен потенциал на катода, който се запазва през цялото времетраене на процеса. При техническите устройства площите на двата електрода дори и при еднаква площ на подложката и катода не би трябвало да се разглеждат като равни, тъй като единият е винаги заземен.

Разпрашването се осъществява с определена ефективност, която се изразява с отношението

$$\eta=\frac{N_T}{N_G},$$

където N_T е броят на избитите от катода атоми, а N_G — броят на падащите йони на газа. Коефициентът η зависи от масата и енергията на йоните, от материала на катода и парциалното налягане.

При разпрашване на монокристални катоди значение има и ъгълът на бомбардировката. При еднакви условия η има следните стойности за някои метали: Ta — 0,6; Al — 1,2; Au — 2,8; Cu — 2,3; Ni — 1,5; Ti — 0,6; W — 0,6 и Ag — 3,4.

Скоростта на разпрашване е пропорционална на плътността на йонния ток, площта на катода и ефективността

$$m_{v-sp}=KAJ\,\eta. \tag{6.17}$$

Коефициентът на пропорционалност зависи от апаратурата и геометрията на катода и подложката. Познаването на скоростта на разпределение е наложително при едновременното разпрашване на два материала. За тях важи

$$m_{v-sp1}=KA_1J\,\eta_1 \quad \text{и} \quad m_{v-sp2}=KA_2J\,\eta_2.$$

В полученото покритие двата материала се появяват в отношение m_{v-sp1}/m_{v-sp2}. За определено съотношение и определена обща площ $A=A_1+A_2$ се получава

$$A_1=\frac{A}{1+a} \quad \text{и} \quad A_2=\frac{\alpha A}{1+\alpha},$$

където

$$\alpha=\frac{m_{v-sp2}}{m_{v-sp1}}\cdot\frac{\eta_1}{\eta_2}. \tag{6.18}$$

Уравн. (6.18) определя разпределението на общата площ на катода между двата материала.

6.3. РАЗПРАШВАНЕ НА ДИЕЛЕКТРИЦИ И ПОЛУПРОВОДНИКОВ МАТЕРИАЛ

Широко приложение в съвременната полупроводникова технология намира катодното разпрашване на диелектрични покрития. Разпрашват се силициев двуокис, силициев нитрид, алуминиев окис и напоследък диелектрици като борен нитрид, галиев нитрид, алуминиев нитрид и др. При това се използуват и двата варианта — високочестотно и реактивно.

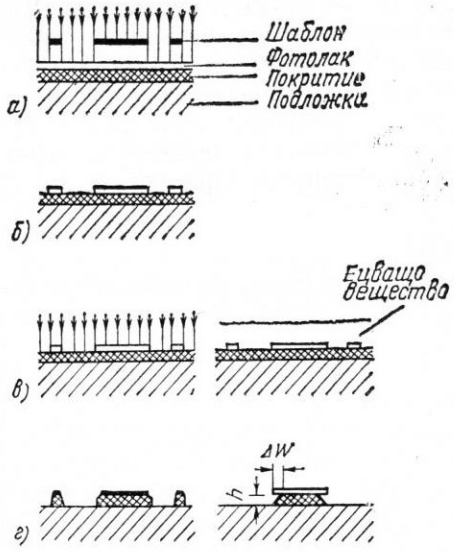
При силициевия двуокис, чиито качества и параметри са най-добре изучени, се използува катод от силиций (силициева пластина) или поликристал, като разпрашването се извършва в окислителна среда от чист кислород. По принцип най-добра стехиометрия на покритията се получава за налягане, по-голямо от критичното налягане за съответната система, при което реакцията протича направо върху подложката. В този случай йоните на газа при бомбардирането си избиват частици от веществото на катода, чиято кинетична енергия позволява протичането на реакцията едва на разстояние, равно на разстоянието до подложката. Всички методи на катодно разпрашване се отличават с голяма чистота на покритието (особено при реактивното разпрашване). Предимство на тези методи е и ниската температура, при която става отлагането. Това ги прави приложими за пасивиране на вече изготвени полупроводникови прибори. Важна особеност на тези методи е универсалността на метода, т. е. по този начин могат да бъдат разпрашвани произволни диелектрични покрития и да бъдат изучавани техните свойства, което е съществено предимство пред останалите методи, разгледани в гл. 4.

Осъществяването на стабилна плазма е основният критерий за получаване на добра стехиометрия на покритието. Обикновено за случая на аргона плазмата се запалва при налягане от 0,013 Pa (10^{-4} Torr), за азота — от порядъка на 0,039 Pa (3.10^{-4} Torr), а за някои смеси като аргон-кислород (примерно аргон: кислород 20:1) — при налягане 0,02 Pa ($1{,}5.10^{-4}$ Torr). Във всяка система за катодно разпрашване стойността на анодния ток е мярка, по която се съди за интензивността на плазмата и разряда. Натрупаният опит както по отношение на използуваните газове, така и по начина на използуване на разсейваната мощност, показва, че с помощта на катодното разпрашване във всичките негови разновидности могат да бъдат получавани различни диелектрични покрития с добре контролируеми параметри.

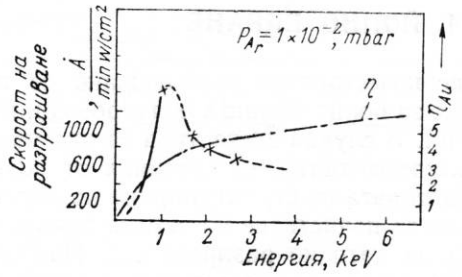
6.4. ЙОННО ЕЦВАНЕ

Високочестотното разпрашване се използува широко за йонно ецване в полупроводниковата технология. В случая става дума за отнемане на част от полупроводниковия материал от повърхността на пластината за структуриране на дадено покритие или за почистване на самата повърхност с помощта на катодно разпрашване. Йонното ецване намира широко приложение и замества до голяма степен химичната обработка при фотолитографията в случаите на СВЧ интегралните схеми, където е необходимо структуриране на дебели златни или медни покрития, а традиционна химична обработка не би дала добри резултати. Опитите показват че защитни покрития от фотолак или метални маски могат с успех да бъдат използувани при този вид ецване. Тяхното собствено разпрашване трябва да се познава и отчита, за да може да се гарантира добро качество на провеждания процес. При структурирането на металните маски се използуват фотолак и методът „свличане". За конструкторите това означава, че те имат възможност да приготвят маската без химична обработка на металното покритие. Такава обработка обаче се налага след йонното ецване за премахване на маската. Поради това е необходимо да се подбират такива метали, чиито разтворители не влияят върху ецваното покритие. При използуване на фотомаски за катодно разпрашване трябва да се вземат редица мерки, гарантиращи запазването на лака при високата температура, която би могла да се получи в резултат на йонната бомбардировка. Използуват се лакове, например AZ1350 и AZ119.

На фиг. 6.7 е показана принципна схема на йонното ецване, като за сравнение е дадена химичната обработка. Основните предимства в случая са свързани с получаването на строго гарантирани контури на релефа, който има съществено значение за гарантиране на конструктивните параметри на създадения прибор.



Фиг. 6.7



Фиг. 6.8

За да се осъществи йонното ецване, пластината, която трябва да се обработи, се поставя на мястото на катода, т. е. върху нея да бъде извършвана йонната „бомбадировка". За изясняване на механизма на самата операция трябва да се разгледа скоростта на разпрашване на златото в зависимост от енергията на йоните като най-често срещан случай от практиката на СВЧ ИС. Това е показано на фиг. 6.8. Трябва да се подчертае, че експерименталните данни зависят силно от начина на отчитане на режима, от вида на апаратурата и от съгласуването на ВЧ генератора [233, 238].

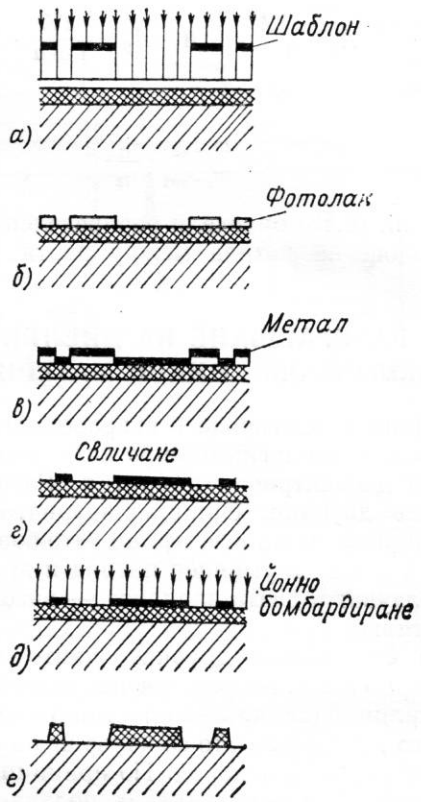
В табл. 6.3 са показани някои експериментални резултати със съответните скорости на разпрашване за различни материали на маската. Като стойност, която може да се счита за експериментално доказана, може да се приеме, че разпрашването на слоевете, защитени с фотолак, може да се извърши при мощност на високочестотния генератор 0,25 W/cm². За различните апаратури това води съответно до различни режими. При превишаване на мощността фотолакът се изпича. Това затруднява свалянето му. Има случаи, при които не се налага да се сваля фотолакът. В такъв случай трябва да бъде оптимизирана единствено дебелината на лаковото покритие.

В гл. 5 са дадени различни методи за отлагане на дебели покрития от фотолак — центрофугиране при малка ъглова скорост, потопяване и др. По отношение на хоризонталните размери и разрешаващата способност йонното ецване не отстъпва съществено на химичната обработка. Може да се твърди, че резултатите, получени чрез него, са сравними с тези на обикновената фотолитография. На фиг. 6.9 е показано използването на метална маска, която трябва да е с относително малка собствена скорост на разпрашване по отношение на съответния материал. При ецване на златото се

Таблица 6.3

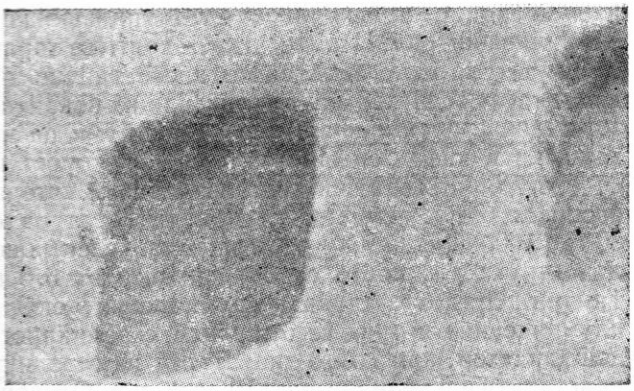
Скорост на плазмено ецване, nm. cm²/min. W за $P_{Ar}=8.10^2$ Pa

Злато	70
Мед	45
Фотолак	35
Хром	10
Титан	10
	1,5
Тантал	10
Желязо	15
Силициев двуокис	15
Алуминий	20



Фиг. 6.9

използуват титан, хром, манган и някои други материали, които лесно се отстраняват в химична среда след завършване на операцията. Може да се използува и реактивно разпрашване, чиято цел е намаляване на скоростта на разпрашване на маската. Експериментите показват, че прибавянето на 10% кислород към аргоновата атмосфера намалява с един порядък скоростта на разпрашване на титановата маска, а това се отразява благоприятно на качеството на процеса. В същото време разпрашването на златото не се повлиява. Важна особеност в случая е появата на тънък слой от титанов окис, който възпрепятствува отстраняването на титановата маска. Затова е необходимо в края на процеса да се премине отново към чист аргон, при което този слой се отстранява. Експериментите показват, че за разпрашване на 6 μm дебело златно покритие са необходими 2,5 часа при мощност 0,55 W/cm², налягане на аргона ≈0,9 Pa (6,6.10⁻³ Torr) и налягане на кислорода около 0,1 Pa (8.10⁻⁴ Torr). Освен аргон и кислород напоследък все по-често се използува реактивна смес от фреон и кислородни атоми $CF_4+O(3p)$. Експериментите показват, че в такава среда се извършва йонно ецване на Si и съдържащи силиций компоненти като SiO_2 и Si_3N_4. Някои труднотопими метали, като молибден и тантал, също могат да бъдат обработвани по този начин. В резултат на реактивното разпрашване се получават стабилни газообразни продукти SiF_4, $SiOF_2$, $SiOF_6$, придружени от малки части O_2, CO_2 и F_2. Особено голяма скорост на ецване се постига при предварително смесване на фреона и кислорода. На фиг. 6.10 са показани



Фиг. 6.10

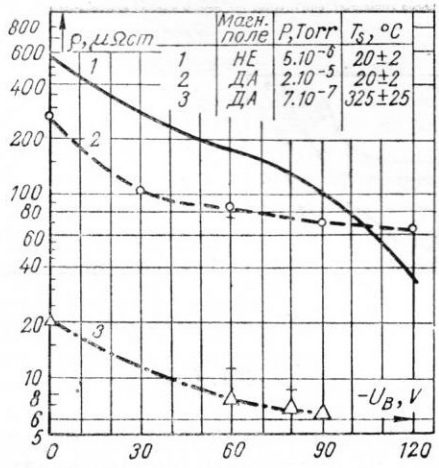
микроучастъци, обработени по този метод. Постигнатите хоризонтални размери от 2,5 μm показват големите му възможности.

6.5. ПАРАМЕТРИ НА ОТЛОЖЕНИТЕ ПОКРИТИЯ И ТЕХНИЯ КОНТРОЛ

При разглеждането на параметрите на отложените покрития трябва да се отчита техният характер. При отлагане на металните слоеве голямо значение имат проводимостта на покритието и неговата дебелина. Да разгледаме например покритията от алуминий, които са най-характерни и които заедно със злато, титан, никел, хром и някои други метали широко се употребяват в полупроводниковата технология. Експериментите показват, че специфичното съпротивление на алуминиевото покритие на 1 μm е с 10÷20% по-голямо, отколкото на компактния материал и е около 3.10^{-6} Ω cm.

Увеличението на специфичното съпротивление може да се обясни с наличието на структурни дефекти, примесни атоми или чужди фази, например окиси. Така например наличието на кислород в апаратурата при вакуум 10^{-6} Torr ($1{,}3.10^{-4}$ Pa) води до сериозно увеличение на специфичното съпротивление, независимо че абсорбционният коефициент на кислорода при такива малки налягания е много малък и е около 0,1. Специфичното съпротивление до голяма степен е мярка за доброто провеждане на самия процес. Тук трябва да се има пред вид,че става дума за тънки покрития, които до голяма степен имат вече изменена структура. Ако примесите се отразяват на специфичното съпротивление, очевидно ще има голямо значение и видът на използувания изпарител. Експериментите показват, че най-малко увеличение на съпротивлението се получава, когато изпаряването на алуминий става от меден тигел или от тигел от различни бориди, например титанов борид и др.

На фиг. 6.11 е показана зависимостта на специфичното съпротивление на отложения чрез постояннотоково разпрашване слой Mo от преднапрежението на подложката. Очевидно е влиянието на допълнителното магнитно поле, както и на температурата на подложката. Дебелината на покритието е в границите 400 nm до 1,4 μm, измерена с помощта на интерференчни методи. Специфичното



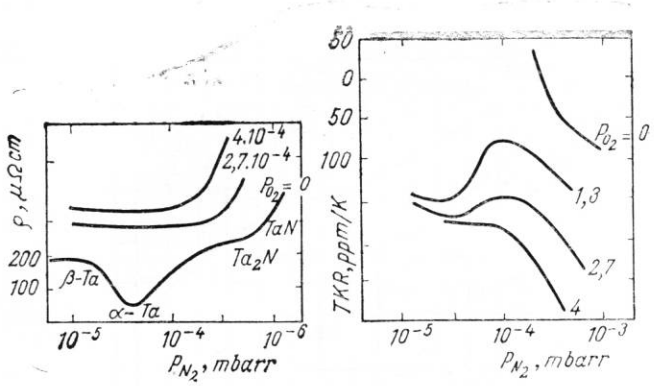
Фиг. 6.11

съпротивление е определено чрез листовото съпротивление по четирисондовия метод. Кривите 1 и 2 от фиг. 6.11 са снети при остатъчни налягания от $6{,}5.10^{-4}$ Pa и $2{,}6.10^{-3}$ Pa (5.10^{-6} и 2.10^{-5} Torr) без нагряване на подложката и се различават само по използуването на допълнително магнитно поле за концентриране на електронния поток. По този начин се получават големи стойности на специфичното съпротивление. От друга страна, сравнението с крива *3*, която се характеризира с по-ниско крайно изпомпване и със загряване на подложката, показва, че при достатъчно оптимизиране на параметрите на процеса може да се достигне малка стойност на специфичното съпротивление, сравнима със стойността на компактния материал.

От направените изследвания [239] се вижда, че влиянието на остатъчния водород е слабо, докато, от друга страна, влиянието на останалите във вакуумната камера водни пари има съществено значение за качеството на молибденовия слой. Намаляването на съдържанието на водните пари с помощта на уловки преди започването на процеса и по време на самото изпомпване има съществено значение за подобряване на параметрите на покритието по отношение на неговото специфично съпротивление. Приближаването на специфичното съпротивление до стойността на обемния материал е признак, по който се отчита качеството на процеса, както и стойността на остатъчното налягане и на парциалното налягане на газовете. На фиг. 6.12 е показано това влияние върху широко използувания в слойната техника тантал (1 Torr = 1,33 bar ≈ ≈133 Pa).

Получаването на модификациите α-та и β-та става в резултат на вграждането на N_2 и O_2 в междувъзловите пространства. При по-голямо парциално налягане P_{N_2} се получават съединенията Ta_2N и TaN.

Важен параметър е дебелината на покритието, която се дефинира като разстояние по нормалата, прекарана спрямо разграничаващите две повърхности. Различни експерименти показват, че това определение е доста идеализирано и физически погледнато, трудно за реализиране. Истинската дебелина на покритието е фактически една локална величина, която по принцип трудно може да бъде



Фиг. 6.12

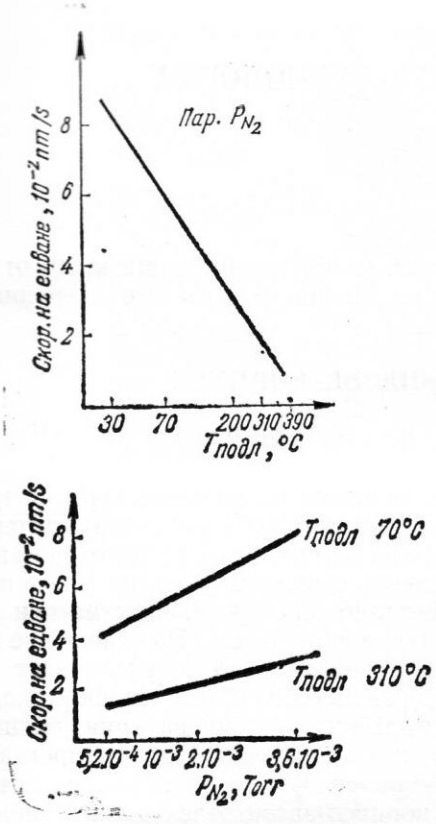
измерена. Известните методи за определяне на дебелината на покритието винаги дават усредена стойност. При използуването на тънки електрически провеждащи слоеве в микроелектрониката голямо значение има определянето на „електрична" дебелина. Определянето и чрез измерване на листовото съпротивление е неизгодно поради необходимостта от контактни площадки. Кварцовите резонатори позволяват безконтактно измерване, което намалява разброса. Използуват се главно два типа бобини-датчици. В единия слой електрическият сигнал, който носи информация, се получава чрез индуктиране на напрежение във вторична намотка. В другия случай при параметричния тип резонатор информация се получава в резултат на изменение на електрическите величини на самата бобина.

Нанесените чрез вакуумните методи покрития се отличават с механични напрежения, които се различават съществено от тези на обемния материал. Механичните напрежения в покритието са пластични деформации или различни други структурни дефекти, които се отразяват на адхезията на покритието и на някои други негови параметри. Съществено значение в случая има температурата на подложката, при която се отлага покритието. Експериментите показват, че голямата разлика в температурния коефициент се отразява съществено върху адхезията, особено ако металното покритие трябва да работи при повишени изисквания. Разбира се, общото правило за изпаряване на метално покритие при повишена температура на подложката не винаги е изпълнимо и правилно. Съществуват различни методи за определяне на механичните напрежения. В резултат на многобройните експерименти е доказано, че слой от алуминий с дебелина от порядъка на 1 μm, отложен при температура на подложката 200°C, след изстудяване до стайна температура притежава механични напрежения от порядъка на $1 \div 1{,}5.10^4$ N/cm² [236, 238]. Това означава една средна стойност на вътрешните напрежения от порядъка на $0{,}8.10^4$ N/cm². След темперираме при 570°C измерените напрежения се увеличават от 2 до $2{,}5.10^4$ N/cm². Темперирането на фазовата граница алуминий-силициев двуокис, която е най-често срещана, води до изравняване на напреженията между подложката и съответното покритие.

В гл. 4 бяха разгледани някои от най-важните параметри на катодно разпрашени слоеве от силициев нитрид, силициев двуокис, алуминиев окис и алуминиев нитрид. Параметрите, с които се характеризират катодно нанесените диелектнични покрития, са следните: микроструктура на покритието, наличие и интензивност на максимуми на поглъщане в инфрачервения спектър и скорост на ецване. Силициевият нитрид, получен чрез катодно разпрашване и темперирал при температура от 800 до 1000°C, показва при обработка с електронен лъч структури, които са в границите от 0,6 до 1,8 nm. От друга страна, алуминиевият окис и алуминиевият нитрид се отличават с поликристален характер, при който диаметърът на отделните кристалити е в границите от 10 до 20 nm. Отклонения от тази структура могат да бъдат получени, когато температурата на подложката е ниска, а скоростта на отлагане голяма. Наличието на α-, β- и γ-модификациите при тези покрития също може лесно да бъде установена. При получените чрез катодно разпрашване слоеве от силициев нитрид максимумите в инфрачервения спектър са в границите между 11, 4 и 12 μm. В зависимост от качеството на покритието и неговата чистота могат да се появят някои особености в спектъра. При увеличаване на температурата на подложката абсорбционните максимуми се придвижват към по-големите дължини на вълните. Алуминиевият окис се характеризира с широк спектър в обхвата 11 до 20 μm. При алуминиевия нитрид експериментите показват силно изразен по интензивност максимум при 14,8 μm.

Скоростта на ецване е характерен белег за плътността на покритието, а оттам съответно и за качеството на отложеното покритие. Експериментите показват, че скоростта на ецване на силициев нитрид се увеличава силно при намаляване на температурата на подложката по време на отлагането. Някои експериментални данни, които обаче не бива да се разглеждат като абсолютни, са показани на фиг. 6.13 [236].

Едно от приложенията на вакуумните процеси е свързано с получаването на работни копия на фотошаблоните. Както е показано в гл. 5, за изработване на работните копия се използува отлагане на хром чрез изпаряване или разпрашване или на слой от железен окис чрез реактивно разпрашване. Накратко ще бъде описана технологичната схема за получаване на работни фотошаблони. Първата операция при създаването на шаблоните е подготовката на стъклените подложки. Тя съдържа механично почистване, при което стъклата се измиват с гъба и кристалон и обилно с течаща дейонизирана вода. След това се премахва остатъчната емулсия чрез изваряване в разтвор от вода и прах за пране, като за катализатор се използува калиева основа (няколко капки за един държател). След повторно измиване в обилно течаща вода стъклените подложки се почистват с гъба и кристалон. Така почистените стъкла се изваряват в разтвор от водороден прекис, амоняк и вода в съотношение 1:1:7. Времетраенето на процеса е обикновено около 10 min. Следващата операция е почистване на стъклата в спиртни пари. Преди да започне разпрашването, стъклата се загряват с кварцова лам-



Фиг. 6.13

па до около 400°C, като самото разпрашване на железен окис се извършва при около 100°C в среда от 65% въглероден двуокис и 35% аргон. Времетраенето на процеса е в зависимост от параметрите на апаратурата и от дебелината на покритието. Увеличаването на процентното съдържание на аргона води до повишаване на качеството на покритието, но и до намаляване на скоростта на отлагане. Обратно, увеличаването на въглеродния двуокис води до увеличаване на скоростта на отлагане на железен окис, но полученият слой е с влошени параметри.

За получаване на равномерност при покритието, което е от изключително голямо значение при работните копия на фотошаблоните, подложките се подлагат на непрекъснато въртене. Окислителят се получава за сметка на разлагането на въглеродния двуокис във въглероден окис и кислород, а за катод се използува желязо. Хром се нанася чрез термично изпаряване. За целта отначало стъклените подложки се загряват до 300°C, като при 85—90° започва изпаряването на хрома. За гарантиране на високо качество на хромовото покритие се използува хром на прах, който позволява да се получи поравномерен слой. После се прави фотолитография на получените слоеве. След завършване на фотолитографския процес и снемане на фотолака подложките, на които е нанесен железен окис, се изпичат при температура 300°C за един час. Целта е да се повиши устойчивостта на покритието и да се удължи животът на работното копие. Химичната обработка за покритието от железен окис и хром се извършва по рецептите, дадени в гл. 3.

ГЛАВА 7

КОРПУСИ И МОНТАЖИ В ПОЛУПРОВОДНИКОВАТА ТЕХНОЛОГИЯ

7.1. ПРЕДНАЗНАЧЕНИЕ НА КОРПУСА И ВИДОВЕ МОНТАЖНИ ОПЕРАЦИИ

В резултат на груповата обработка върху полупроводниковата пластина се получават различен брой еднакви прибори. След последната метализация всеки от тези прибори е подготвен за по-нататъшен монтаж, т. е. създадени са контактни площадки, свързани с активните области на приборите. Въпреки това те не могат да се използуват още като самостоятелен елемент. Причината за това е липсата на пълна изолация от околната среда и недостатъчната способност за издържане на механични напрежения. За изпълнението на тези изисквания е необходимо всяка структура да постъпи в отделен корпус.

Корпусът е затворен обем, получен по различни методи в зависимост от използуваните полупроводникови технологии. Корпусът трябва:

а) да осигури механична якост и херметичност, т. е. да бъде надеждна защита от въздействието на обкръжаващата среда и от механични увреждания;

б) да осигури с достатъчно малко топлинно съпротивление отвеждането на разсейваната мощност, получена в работния режим на прибора;

в) да осигури надеждна електрическа връзка с другите части на схемата, в която е заложен даденият прибор, т. е. трябва да има достатъчно гъвкави електрически провеждащи изводи, които, свързани със съответните контактни площадки на самия прибор, осигуряват електрическа връзка с него;

г) да бъде достатъчно евтин и да позволява колективна обработка и автоматизиран монтаж.

Широко развитие е получила и техниката на изготвяне на локалните контакти върху структурата. *Контактната площадка* трябва да се разглежда като изходен пункт за по-нататъшната електрическа връзка извън корпуса. Поради малката големина, която има самият полупроводников чип, размерът на контактните площадки е винаги ограничен. При създаването на сплавните германиеви прибори не са съществували някакви особени проблеми за електрическа връзка между индиевите легиращи перли и външните изводи на корпуса. С развитието на планарната технология се налагат нови изисквания към електродните площадки, което води до изменение на методите на свързване, до използуване на различни варианти за връзка между тях и изводите на корпусите, а напоследък и до безкорпусно изпълнение на самите прибори. При разглеждане на проблемите на монтажа трябва да се обърне внимание и на монтажните процеси при слойните и хибридните схеми и мултичипната техника. Последната предлага редица предимства по пътя на изготвяне на специализирани схеми с голяма степен на интеграция, при което от особена важност са именно монтажните операции.

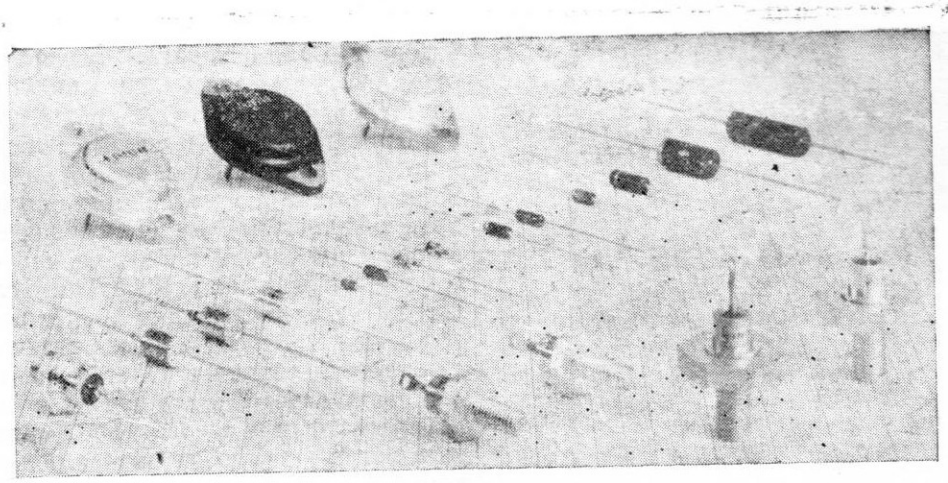
7.2. ВИДОВЕ КОРПУСИ

7.2.1. Класификация

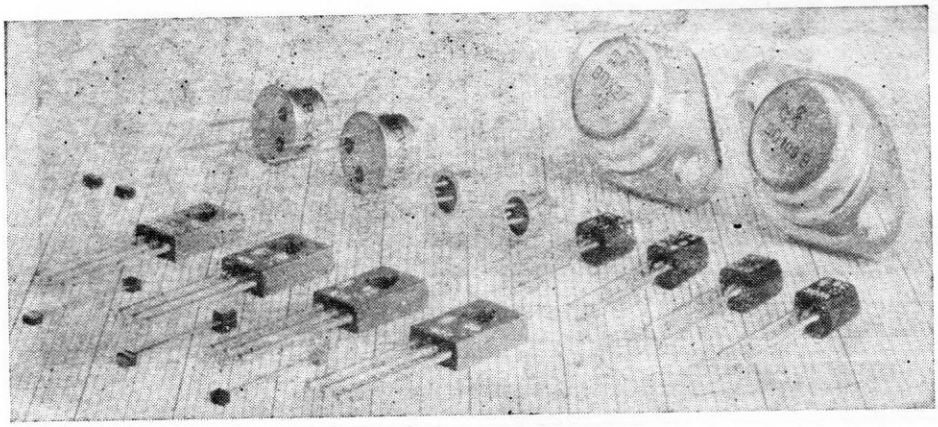
При определяне на видовете корпуси трябва да се изхожда от няколко различни критерия. По отношение на материалите, от които са направени, се различават стъклени, метално-стъклени, керамични, метално-керамични, пластмасови корпуси и безкорпусно изпълнение. По отношение на предназначението на прибора се различават корпуси за диоди, транзистори, СВЧ — прибори, корпуси за различни датчици — температурни, магнитни, за регистриране на електрическа напрегнатост на полето, корпуси за силови прибори, интегрални схеми и корпуси за оптоелектронни прибори. Забелязва се голямото многообразие на корпусите, като всяка разновидност в зависимост от предназначението на полупроводниковата структура се отличава със своите конструктивни особености. На фиг. 7.1 до 7.10 е показан външният вид на различни видове корпуси, събрани по предназначение на полупроводниковата структура, монтирана в тях [38, 217]. Мащабите на изображението могат да се определят от милиметровата хартия, върху която са разположени корпусите. Може да се смята, че до голяма степен има стандартизация в корпусите. Да разгледаме някои от най-характерните особености на различните видове корпуси.

Изцяло стъклените корпуси се използуват главно за херметизация на различни диоди и полупроводникови датчици. Основният проблем при тях е извършване на спойката метал—стъкло между металните носачи и стъклените перли, осъществяващи херметизацията. Полупроводниковата технология разполага с автоматизирани устройства за извършване на спойката метал—стъкло, свързана с образуване на тънък слой от метален окис преди извършване на спойката. За нуждите на полупроводниковата технология се избират стъкломаси с подходящи параметри, от които най-важни са коефициентът на топлинно разширяване, близък до този на металния носач, и херметичността. Освен това съществено значение има диелектричната якост на стъклото, която особено при силовите прибори не е достатъчна и затова там метално-стъклените корпуси се заменят с метално-керамични.

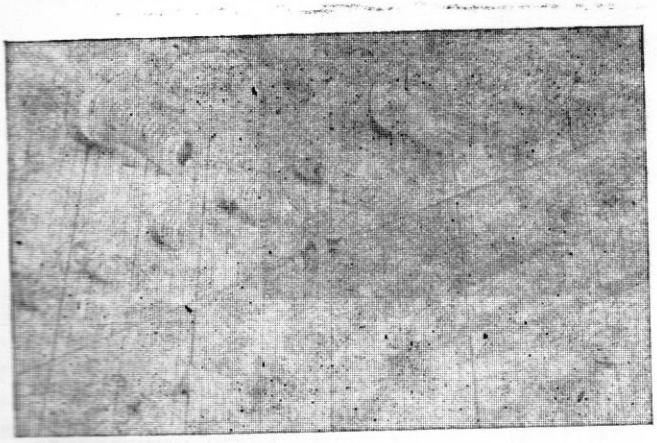
На фиг. 7.11 е показана принципна схема на един метално-стъклен корпус. В случая различаваме няколко разновидности. На показания корпус стъклото *3* служи за изолация на

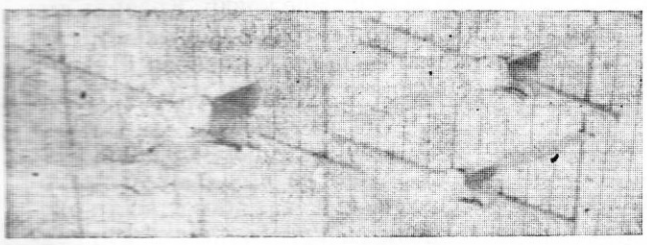


Фиг. 7.1

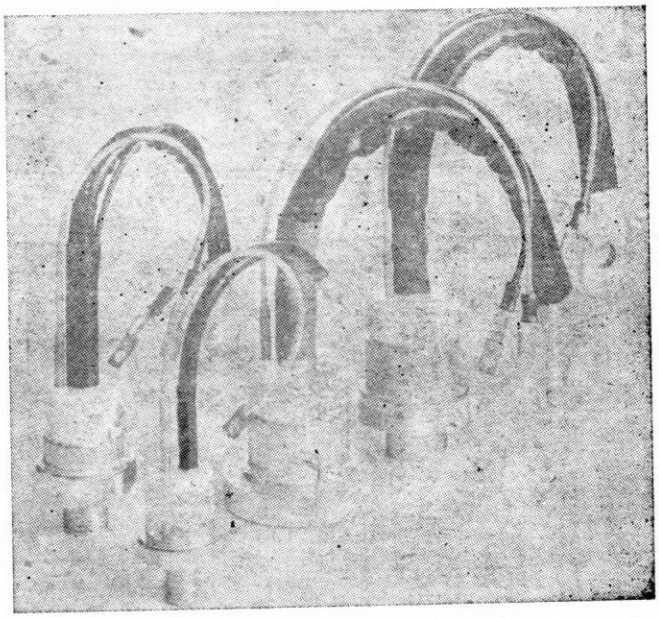


Фиг. 7.2

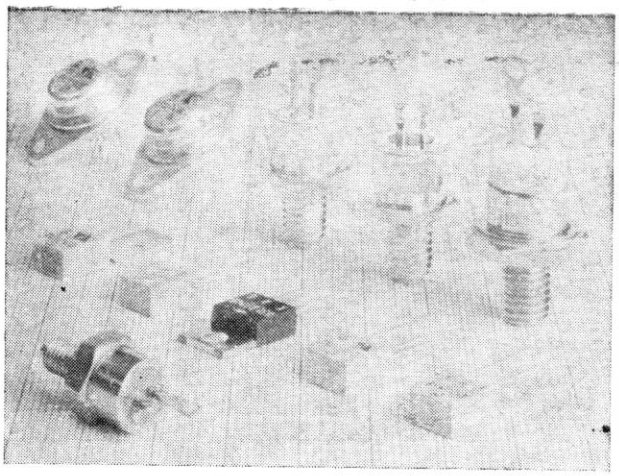




Фиг. 7.3

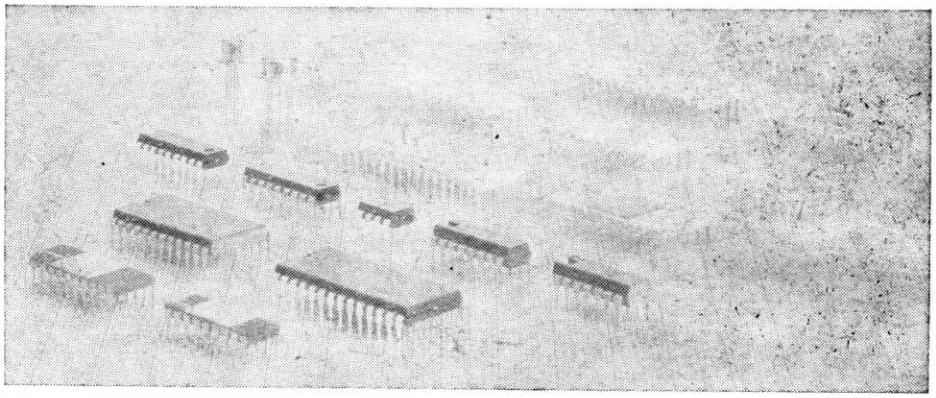


Фиг. 7.4

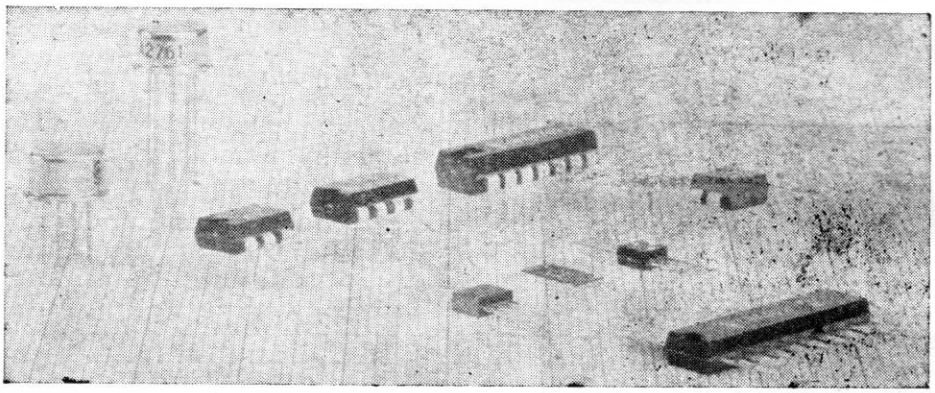


Фиг. 7.5

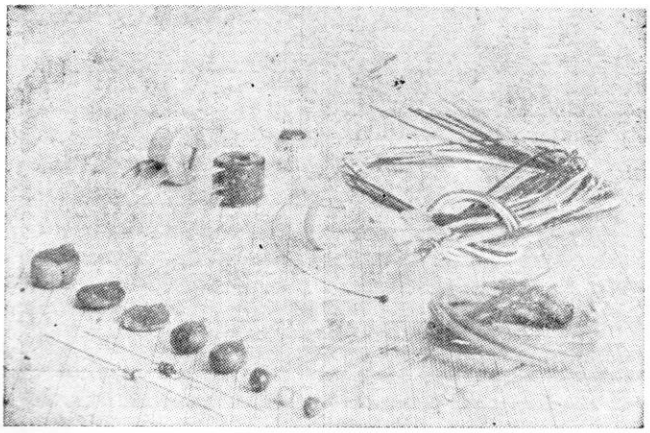
изводите *4*, *5* от основата *1*. Всеки корпус се състои от основа, където се залепва полупроводниковият чип, и капачка *2*, която се присъединява към основата при извършване на последната операция от монтажа — херметизацията. В зависимост от броя на изводите и от предназначението на прибора, например дали той е маломощен, средномощен или мощен, дали работи при високо напрежение и т. н., се избира и стъклената маса, която служи за изолация на изводите. Самият процес на залепване на изводите към основата не се различава съществено от спойката метал—стъкло. За целта на основата се правят необходимите изводи и ако металът, от който е изготвена основата, не е подходящ за спойката метал—стъкло, се избира подходяща втулка, която се залепва към основата и осигурява по-



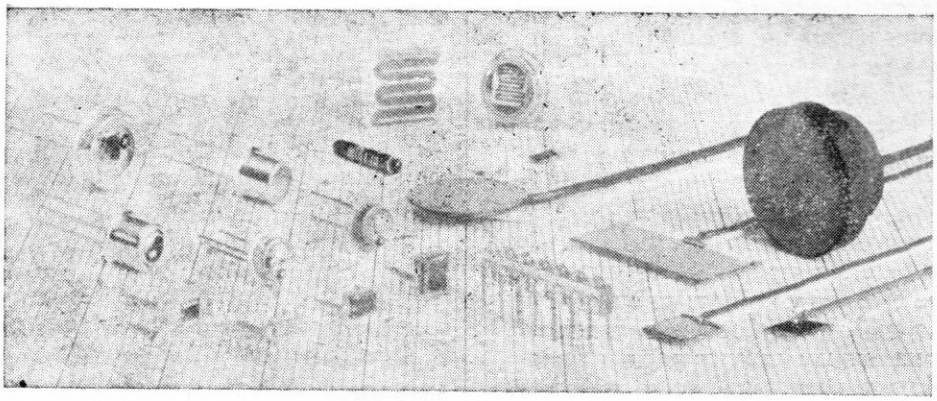
Фиг. 7.6 *а*, *б*



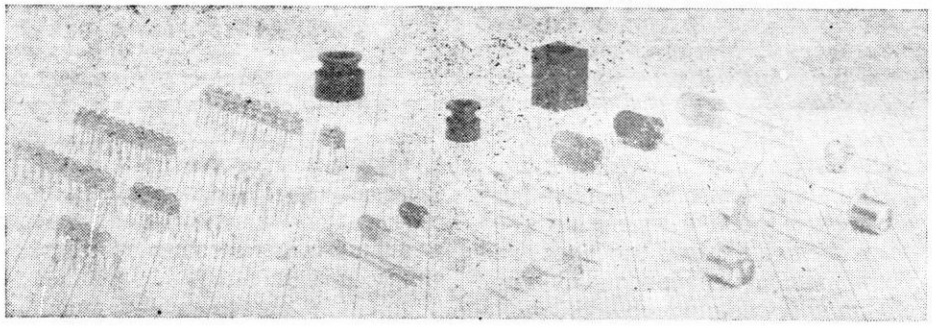
Фиг. 7.7



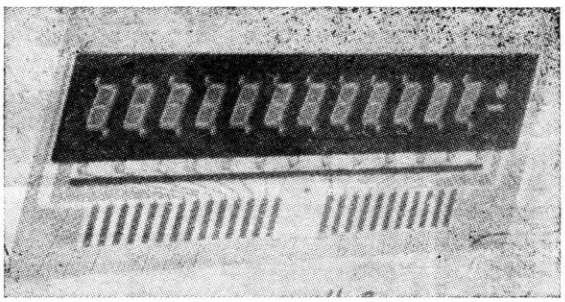
нататъшната връзка със стъклената перла. Същото се отнася и за извода, който обикновено се прави от мед. Като метална сплав, която отговаря до голяма степен на изискванията на спойката метал—стъкло, може да се избере ковар. Коварът има почти идеални параметри в това отношение и служи за изработване или изцяло на основи и капачки на метално-стъклените корпуси, или съответно на втулки, когато използуването на медта (поради нейната изключително добра топлопроводност) се налага от работния режим на прибора. Металностъклените корпуси се използуват до мощности около 150 W. Предвидени са конструкции, осигуряващи по-добро топлоподаване и по-добра диелек-



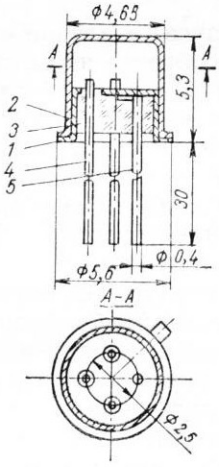
Фиг. 7.8



Фиг. 7.9



Фиг. 7.10



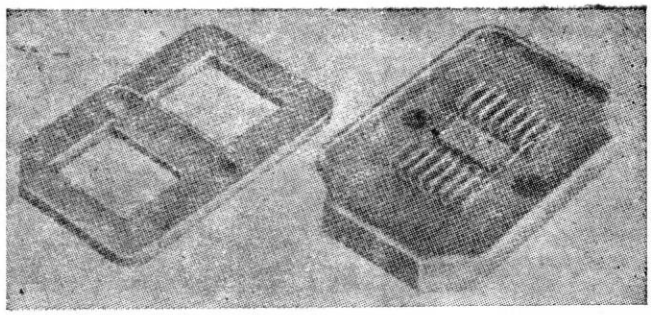
Фиг. 7.11

трична изолация чрез избор на подходящи подложки към основата между структурата и основата, т. нар. термокомпенсатори, които обикновено се изработват от молибден или волфрам.

При високоволтовите прибори за подобряване на диелектричната изолация се използува к е р а м и к а. Не съществуват особени проблеми при извършване на спойката метал—керамика. Единствената допълнителна операция е метализацията на керамиката преди извършване на спойката. За всички полупроводникови корпуси може да се приеме, че проблемите на конструирането на самия корпус са отдавна изчерпани и основното внимание на конструкторите е насочено към подобряване на връзката между структурата и корпуса, а не върху изграждането на самия корпус. Това не се отнася до някои от по-специалните конструкции като тези на оптоелектронните прибори и на някои специални интегрални схеми, както и до някои проблеми, свързани с безкорпусното изпълнение, които и сега са предмет на усилени изследвания. Метално-керамичните корпуси намират широко приложение и при монтажа на интегралните схеми, при които този монтаж има своите особености. В случая действително участвуват керамика и метал, обаче начинът на изработването на този корпус се различава принципно от създаването на обикновените ТО-корпуси. Метално-керамичните корпуси за интегрални схеми се изработват на базата на специална керамика и спа-

дат към т. нар. плоски корпуси. Освен това те могат да бъдат причислени към корпусите „дуал-инлайн", наименованието на които произлиза от конфигурацията на изводите, разположени в две успоредни линии. Растерът на изводите определя съответно и начина на монтаж на корпуса към печатната платка. Методите за изготвяне на този корпус са свързани с няколко подоперации, на първо място метализацията на керамиката. За разлика от другите метално-керамични корпуси тук тя е необходима не само за спойката между метала и керамиката, а най-вече за осъществяване на електрическа връзка между структурата и изводите. Методите за нанасянето на това метално покритие са характерни за дебелослойната технология, разглеждана в гл. 13. За херметизацията на такива корпуси, както се вижда от фиг. 7.6, се използуват метални плочки, залепени с припой или с помощта на термокомпресия. Метално-керамичният корпус осигурява по-добра защита от пластмасовия, особено по отношение на влагата.

На фиг. 7.9 са показани корпусите на различни фотоприбори и луминесцентни диоди, които заедно с тези на полупроводниковите лазери образуват групата на оптоелектронните прибори. В случая става дума за някои особености на конструкцията, свързани с осигуряването на достъп на светлина към полупроводниковата структура. Това е един голям комплекс от проблеми, свързан както с проблемите на метално-стъкления корпус и спойката метал—стъкло, така и с проблемите на метално-пластмасовите корпуси, когато за лупичка се използуват различни пластмаси. Поради голямото разнообразие на оптоелектронните прибори корпусите за тях ще бъдат разгледани отделно. Развитието на монолитните интегрални схеми изисква от конструктура не само да решава проблеми, свързани с конструирането на самата схема, а и много добре да познава възможностите, които предлага самият корпус. Интегралните схеми се затварят в три типа корпуси: традиционния металостъклен корпус ТО, наречен още кръгъл корпус с произволен брой изводи в зависимост от предназначението на схемата и с изменящ се диаметър (откъдето произлизат и различните означения), корпуса „дуал-инлайн", т. нар. плоски корпуси, характеризиращи се с много малки размери и със специален монтаж върху печатната платка (поради малките размери на носещата конструкция изводите се поемат направо от шините на печатната платка и се залепват без отвори). Растерът на изводите при корпуса „дуалинлайн" е обикновено 2,5 mm, а при плоския корпус 1,25 mm. Характерно за плоските корпуси е намаляването на напречното сечение на изводите, което достига от 0,1 до 0,3 mm. В резултат на това те стават по-чувствителни към различни механични натоварвания и изискват допълнителни мерки за предпазване от такива увреждания. На фиг. 7.12 е показан един държател за транспортиране на подобни схеми, което означава, че производството с такъв корпус е свързано с допълнителни разходи. Тези проблеми определят до голяма степен днешната схемотехника и затова трябва предварително



Фиг. 7.12

да се имат предвид от конструктора на полупроводниковия прибор.

7.2.2. Пластмасови корпуси в полупроводниковата техника

Първата операция при подготвянето на този тип корпуси е селективната обработка на метална лента, осигуряваща подходяща конфигурация на изводите и на мястото на залепване на чипа и механична якост до извършване на пресоването. Втората важна операция е шприцването или пресоването на пластмасовия материал около този метален носач.

Изработването на металния носач не представлява особена трудност за един производител при наличието на добре развита фотолитографска техника или на механично щанцуване. Първият етап включва избор на подходящ материал за носача. Обикновено се използува ковар поради неговите добри параметри — електрическа проводимост и топлопроводимост, добра адхезия с използуваните пластмаси. Върху тази коварова лента с помощта на центрофугиране или потапяне се нанася фотолак, който, засветен през съответния шаблон, поема изображението на изводите. Трябва да се има пред вид, че в случая не става дума за ецване на малки участъци от полупроводниковата повърхност, както е при обикновената фотолитография. В разтвора се развива висока температура по време на разтварянето на метала, която влияе на качеството на фотолитографското изображение. Това изисква непрекъснато охлаждане на химичната баня. Друга важна особеност е необходимостта от двустранно засветяване, което при по-дебели коварови ленти е необходимо условие за получаване на добра конфигурация на ръбовете. След получаване на конфигурацията коварът може да се никелира и позлати, за да бъде готов да поеме полупроводниковата структура чрез традиционните методи на залепване на кристала върху основата. Монтажът на изводите също не изисква особени усилия. Химичната обработка на ковара се извършва по рецепти, дадени в гл. 3.

Използуването на фотолитография (съществуват и други методи за обработка на коваровата лента) осигурява широко приложение на пластмасовите корпуси поради възможността бързо да бъдат създавани произволни конфигурации на носещата част на самия пластмасов корпус и на неговите изводи.

От големия брой известни полимерни материали най-голямо приложение за херметизиране на полупроводниковите прибори са намерили пластмасите, изградени на основата на епоксидните, фенолните и силиконовите смоли. Епоксидните смоли са слабо полярни полимерни съединения и спадат към термореактивните синтетични смоли. В изходно състояние са нискомолекулярни съединения, колофонообразни, термопластични и с голяма химична активност. В това състояние те могат да се съхраняват продължително време. Втвърдената епоксидна смола има добри адхезионни свойства към металите и другите видове пластмаси, добра изолация спрямо влагата и добри изолационни свойства. Недостатък на тази пластмаса е, че е крехка и не е подходяща за външна обвивка в пластмасовия корпус. Затова се използува главно като заливъчен компаунд. За намаляване на крехкостта на този вид пластмаси се прибавят някои пластификатори, напр. полиестерна смола, а за изравняване на коефициента на топлинно разширение с този на металите и за подобряване на топлоустойчивостта и механичната якост — пълнители от кварцов пясък, порцеланов прах, алуминиев окис и др.

В табл. 7.1 са събрани основните параметри на изброените смоли. Малко вероятно е една пластмаса да изпълни всички изисквания, предявявани към един корпус на полупроводников прибор. Ето защо за нуждите на битовата електроника се използуват комбинации от смолите, които обединяват техните предимства и взаимно намаляват техните недостатъци. Освен това известни са и допълнителни обработки, като покриване на пластмасата със слой от силициев нитрид, при което се подобрява влагоустойчивостта.

Освен тези типове пластмаси в полупроводниковата технология се използуват и други, които служат за изработка на различни детайли, като оптични лещи, рефлектори, гнезда и т. н. В това отношение предимства имат термопластичните пластмаси, които по-лесно се обработват и са по-евтини. В табл. 7.2 са показани най-важните параметри.

Изборът на конструкцията на пресформите се определя от редица фактори — конструкция на изделието, свойства на преработвания материал, както и избран метод за формуване. По метода на формуването се различават пресформи с пряко формуване, за трансферно пресуване и за шприцоване. Независимо от начина на обработка пресформата се състои от матрица и поансон. Основните детайли на матрицата са: детайли с технологично предназначение, които са в непосредствено съприкосновение с формиращата се пластмаса и участвуват в придаване на необходимата форма на детайла, като канали, резбови знаци, арматура и т. н., и детайли с конструктивно предназначение, които не участвуват непосредствено в процеса на пресуване на изделието, а служат за взаимно закрепване в определено положение на детайлите на пресформата за отваряне, затваряне, закрепване и т. н.

Към тези детайли се отнасят различните фиксатори, направляващи колони, втулки, изхвъргачи и др. При конструирането на матрицата трябва да се имат пред вид редица конструктивни параметри, както и някои технологични параметри, породени от изменението на материала по време на самата обработка. Трябва да се обръща внимание на свиването на материали, на делителната линия, т. е. повърхността, на която се разделят двете половини на пресформата, на съществуването на остри ръбове и закръгления, на дебелината на стените на детайлите и т. н.

Един от основните проблеми на изготвяните пластмасови корпуси е осигуряването на малко топлинно съпротивление. За разлика от металостъклените корпуси този параметър е доста занижен при този вид корпуси. Обикновено стойността на топлинното съпротивление за пластма-

Таблица 7.1

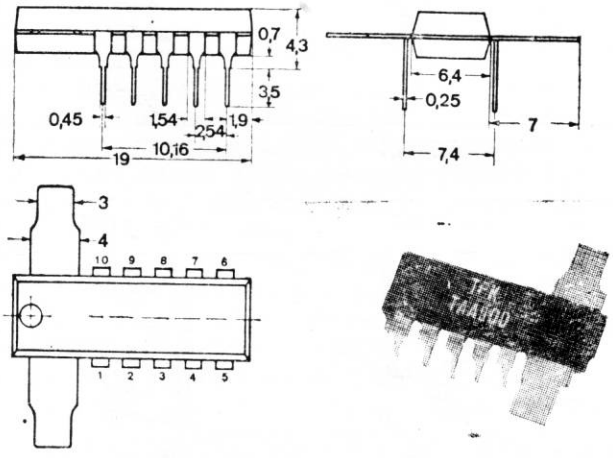
Свойства	Епоксидни смоли	Фенолни смоли	Силиконови смоли
Топлопроводност, 4,18.10⁴ W/(cm.k)	5÷20	3÷5	3÷7 до 30*
Коефициент на топлинно разширение 10^{-5}	2÷10	6÷8	2÷3* до 50
Влагопоглъщаемост, %	0,04÷0,1	0,3÷0,4	0,08÷0,09 0,2 ÷0,4
Специфично обемно съпротивление	10^{13}÷10^{16}	10^{13}	(1÷3).10^{14}
Твърдост по Роквел	85 ÷120	93 ÷120	71÷95
Топлоустойчивост, °C	120÷150	120÷150	до 350*
Диелектрична проницаемост	3,5 ÷5,0	—	2,6÷3,8
Ъгъл на загубите	0,002÷0,02	—	0,001÷0,005
Свиване при втвърдяване, %	0,5 ÷1,3	0,6 ÷1,0	0,2÷0,5
Температура на формуване, °C	170÷180	175÷185	180÷200
Налягане, Pa.10^{+5}	400÷500	250÷350	300÷700

Забележка: Със * са означени данните за силиконовата смола, произвеждана под търговското название „Dow Corning".

Таблица 7.2

Материали (търговско наименование)	Топлопроводност, $4{,}18.10^{4}$ W/(cm.k)	Коефициент на топлинно разширение, $\times 10^{-5}$	Влагоустойчивост, %, за 24h	Специфично обемно съпротивление, Ω.cm	Твърдост (по Роквел)	Топлоустойчивост, °C	Диелектрична константа, ε_r	Тъгъл на загуби, tgδ
Флуороорганични смоли:	6	8,3	0,00	$>10^{16}$	25	250	2,0	0,002
ТЕФЛОН								
Полиестер:	6	4,5÷7	0,00	10^{16}	110	100	2,8	0,1
ДИФЛОН								
Поликарбонати:	1,9÷3	7	0,08	10^{13}	70	120	4,5	0,05
МАКРОЛОН								
Акрилати:								
ПЛЕКСИГЛАС	4÷6	5÷9	0,4	10^{12}	0,7 (Бринел)	117	3,6	0,08
ПОЛИПРОПИЛЕН	2,8	8,5	0,001	10^{16}	0,7 (Бринел)	160	2,3	0,004
ПОЛИАМИД (НАЙЛОН)	1,5÷1,7	1,2÷3,2	1,1	10^{12}	1,13 (Бринел)	205	3,6	0,02

совите корпуси, без да се отчита големината на самия корпус, е около 250°C/W. Това означава, че максималната разсейвана мощност при температура на преходите от порядъка на 150°C и на околната среда от порядъка на 50°C не превишава 400 mW. За обикновените линейни интегрални схеми, разсейващи мощност от порядъка на няколко вата, в този си вид тези корпуси са неподходящи. Съществува възможност за отвеждане на топлина чрез металния носач и изводите.Разбира се, на металния носач трябва да бъде придадена съответна форма, която да гарантира извеждането на топлината. Такъв вариант е показан на фиг. 7.13. Полупроводниковият кристал е залепен върху силно разширен участък на металния носач, при който се осъществява намаляване на топлинното съпротивление до 40°C/W. Основното предимство е, че така изведеният метален носач може да бъде свързан с участък от печатната платка с произволна големина, разположен на подходящо място, който също да допринася за разсейването на топлината и по този начин да се получи по-малко съпротивление. По подходящ начин могат да бъдат пресметнати металният носач с неговото разширение и участъкът от печатната платка, за да бъде гарантирано разсейването на получената топлина.



Фиг 7.13

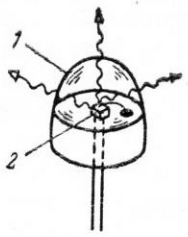
7.2.3. Корпуси за СВЧ-прибори

На фиг. 7.3 са показани някои от разновидностите на корпусите, предназначени за СВЧ-прибори. В случая се вземат пред вид особеностите на СВЧ-схемите, които са изградени обикновено с вълноводи или на принципа на слойната техника с плоски линии. Освен посочените корпуси широко приложение намират и някои хибридни корпуси, както и безкорпусното изпълнение на приборите. Съществено значение по отношение на материалите при този вид корпуси има запазването на техните параметри при високите честоти. Те са обикновено позлатени, с което се влияе на повърхностните токове. Използуват се различни типове керамика, работещи при необходимата гранична честота. Съществуват различни проблеми, свързани с връзката между полупроводниковия кристал и корпуса. В това отношение се избягват дългите меки връзки чрез контактуващи пръстени, пъпки и др. Особено интересен и перспективен е стъкленият корпус, който осигурява висока надеждност на прибора. Особеност при конструирането на корпуси за СВЧ с много изходи е необходимостта от тяхното диаметрално разполагане, осигуряването на добър контакт с масата, включително до структурата, и намаляването по този начин на паразитните капацитети. От показаните конструкции може да се преценят особеностите при конструирането на този вид прибори.

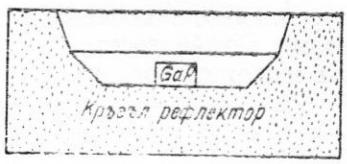
7.2.4. Корпуси за оптоелектронни прибори

Показаните на фиг. 7.8 и 7.9 различни изпълнения на корпуси на оптоелектронни прибори притежават съществена разлика спрямо другите прибори — корпусът трябва да осигурява достъп на светлина до структурата. При това съществуват и други проблеми, свързани с луминесцентните прибори или с диодите на течни кристали, при които става излъчване на светлина от структурата. Ако се абстрахираме от някои проблеми, свързани с топлоотдаването, съществуващи при мощните луминесцентни диоди и при полупроводниковите лазери, където отвеждането на топлина е толкова важен проблем за корпуса, колкото и при един силов прибор, най-важната особеност става в подаването на светлината до структурата или отвеждането на светлинния поток извън корпуса. Съществуват няколко различни варианта, изобразени на посочените фигури. При обикновените фотоприбори и при оптоелектронните двойки основният проблем е конструирането на необходимата леща, която да доведе светлината до фоточувствителната част на структурата. Както беше показано при разглеждането на пластмасите, този проблем е решен, тъй като съществуват различни пластмаси, осигуряващи изработването на такива лещи. По-важният проблем е свързан с осъществяването на херметизацията на корпуса, тъй като в случая капачката не е само от ковар. За целта е по-целесъобразно да се използуват различни видове стъкла, които позволяват да се осъществи добре известната спойка метал—стъкло. Както е показано на фиг. 7.8, съществуват различни фотосъпротивления и други датчици, при които този проблем не е от изключително значение и при които херметичността се осигурява чрез просто заливане на структурата със светлопровеждаща пластмаса или съответно стъкло. Трябва да се знае, че температурата на разтопеното стъкло в повечето случаи е по-висока от тази, която може да издържи полупроводниковата структура, без да се нарушават нейните параметри. По такъв начин пластмасите имат решаващо предимство, тъй като тяхната температура на размекване или топене е много по-ниска.

Оптичната система на корпуса на луминесцентния диод трябва да притежава спектрална характеристика, във всички случаи по-добра от тази на структурата. Най-простата конструкция е показана на фиг. 7.14. Непрекъснатият прозрачен пластмасов купол *1* подобрява условията за извеждане на излъчването от полупроводника *2*, а служи и за леща, която увеличава видимите размери на кристала. Въпреки че такава конструкция осигурява добра видимост в голям равнинен ъгъл, пълният диаметър на източника на светлина превишава само два пъти диаметъра на полупроводниковата пластина. Основното предимство при разработването на този вид корпуси е намаляването на размера на диода и увеличаването на светещата повърхност на източника с помощта на различни рефлектори. Усилията на конструкторите се свеждат до подобряване на тези параметри на корпуса,



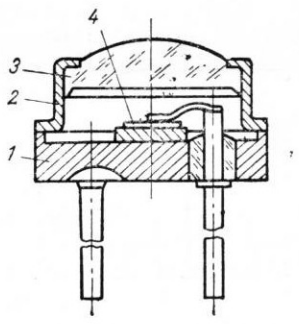
Фиг. 7.14



Фиг. 7.15

както е показано на фиг. 7.15. Поради специалната форма на рефлектора светлината се отразява от стените му във вид на тесни концентрични пръстени, чието възприемане е по-ефективно за човешкото око. На отражателя може да се предава произволна форма и в зависимост от това да се получи необходимата характеристика. За правилната работа на рефлектора е необходимо диодът да има определяща диаграма на насоченост на излъчването. То трябва да бъде еднородно във възможно по-голям ъгъл. Диоди с преки преходи, при които излъчването е концентрирано в една плоскост, не могат да се използуват толкова ефективно като диоди с непряк преход, излъчващи еднакво във всички страни. На фиг. 7.16 е показана друга конструкция на корпус на луминесцентен диод, при който оптичният прозорец *3* е изработен от стъкло, така че в голяма степен се запазва техниката на изготвяне на обикновените металностъклени корпуси.

При изработване на корпуси за буквено-цифрови индикатори се имат пред вид някои специални технологии. Както е показано на фиг. 7.10, за основа на такава индикация може да служи гетинакс или метализирана керамика, която в повечето случаи се използува и за основа на допълнителни чипове, чрез които се управлява индикацията. Метализирането на керамиката и нейното структуриране не представляват трудност и са свързани само с повишаване на цената поради увеличаване на времето за монтиране. Ето защо по-целесъобразно е да се монтират буквено-цифрови индикатори на базата на монолитни структури, при които се залепват само отделни чипове. За осъществяване на херметизацията, особено за нуждите на битовата електроника, се използуват капачки, които представляват лещи от пластмаса, разположени точно на определено място. Техните параметри се определят от параметрите на използуваната пластмаса, като се осигурява небходимата херметизация, доколкото позволява използува-

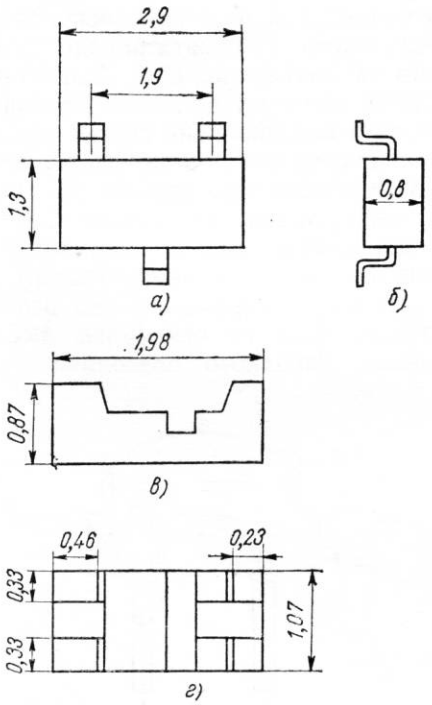


Фиг. 7.16

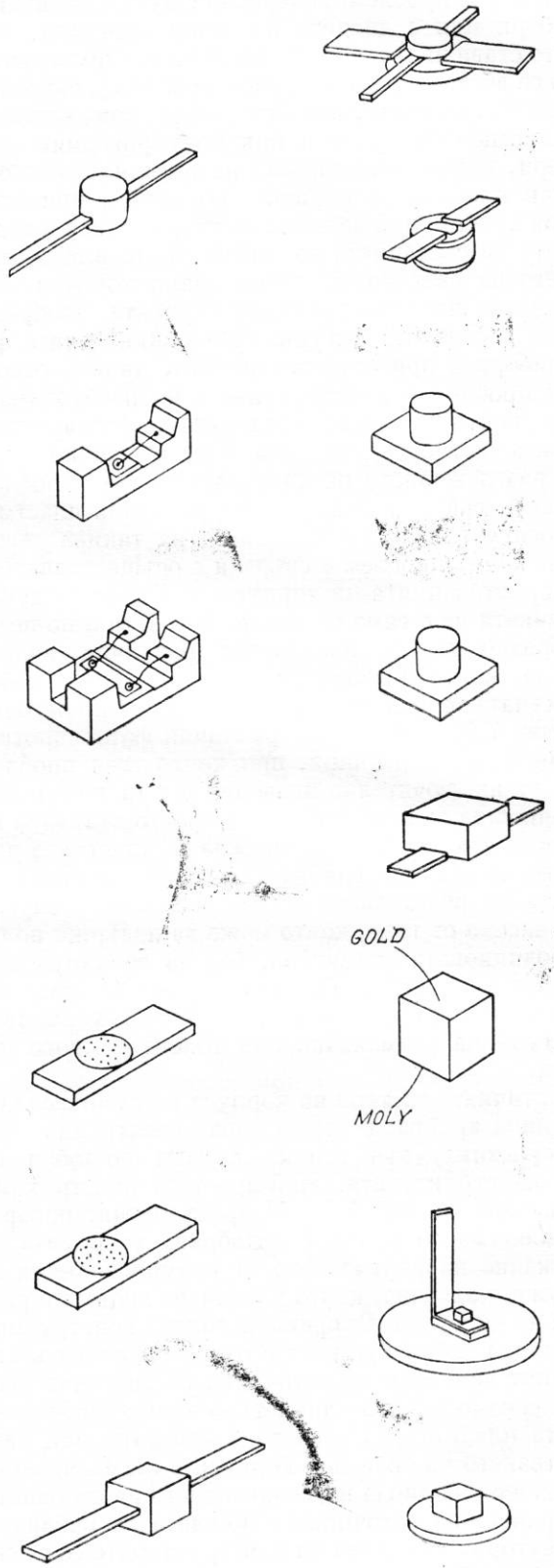
ният материал. В някои случаи се използува плоска прозрачна капачка, която може да бъде оцветена различно, така че се подобряват ъгълът на виждане, устойчивостта на удар и се постига подълъг живот на изделието.

7.2.5. Корпуси за хибридни схеми

При хибридните корпуси и въобще при хибридните елементи трябва да се различава монтажът на отделните компоненти към съответната хибридна схема от монтажа в мултичипната техника. Съществува голямо многообразие при монтирането на активните компоненти в една хибридна схема, изградена на базата на слойната техника. Първата възможност, която се предлага, е полупроводниковият прибор да се монтира в свой собствен корпус, наречен още хибриден корпус, който след това се закрепва към керамичната подложка на слойната схема. Друга възможност е активният прибор или пасивните кондензатори да се закрепят безкорпусно чрез запояване на съответното място на схемата. Съществуват и т. нар. „летящи“ чипове в една тяхна разновидност — биймлийд техниката (лъчеви изводи), при която се осъществява голяма надеждност и възможност за автоматизиране на процеса. Най-често дискретните елементи се закрепват в хибридния корпус с помощта на мек припой. При това съответните контактни места в слойната схема са подходящо разположени и с подходящи размери, за да могат да поемат корпуса. Ако в схемата трябва да се разполагат повече полупроводникови прибори, необходимо е да се спазват размерите на корпуса, за да може да се осигури място върху керамичната подложка. Препоръчва се калайдисване на контактните площадки поради възможността от разтваряне на

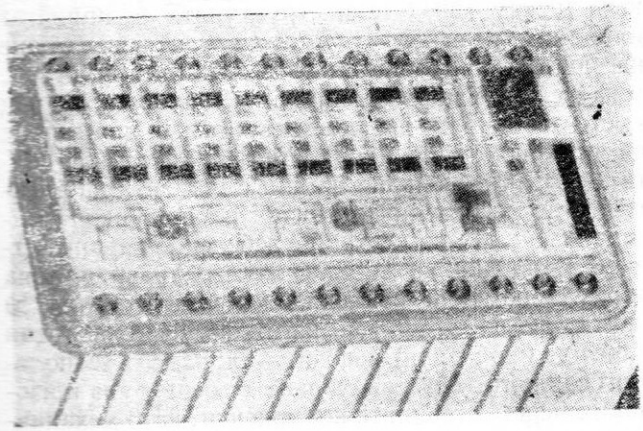


Фиг. 7.17

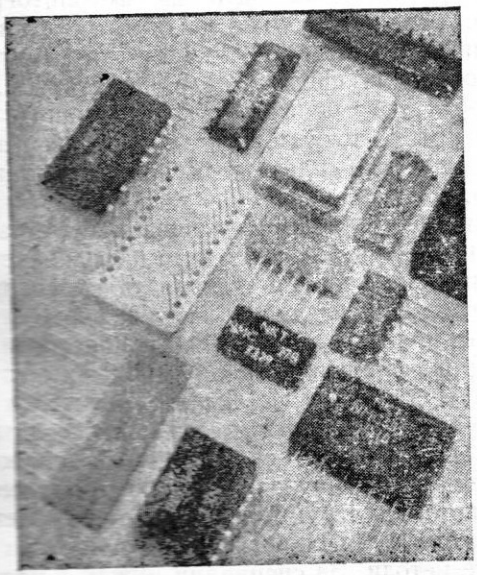


Фиг. 7.18

златото, с което обикновено са покрити контактните площадки на хибридните корпуси. Съществуват различни хибридни корпуси, някои от които са показани на фиг. 7.17. Обикновено корпусите се делят на диодни и транзисторни в зависимост от броя на изводите и са изработени от керамика с подходящи високочестотни параметри за случая на СВЧ-изпълнение [241, 244, 245]. Чипът се залепва към този корпус по традиционната техника. Тези чипове се херметизират с помощта на различни компаунди, които осигуряват надеждна защита, като се има пред вид, че цялата слойна схема след това се херметизира отново. Първата защита в самия хибриден корпус запазва и механичната якост на връзките. Произведените по този начин транзистори и диоди са доста скъпи поради многократните монтажни операции. Въпреки това, особено за нуждите на СВЧ-схемотехниката, това е един от малкото възможни варианти за конструиране на схемите. На фиг. 7.18 са показани различни възможности за безкорпусно изпълнение, при които структурата се залепва направо върху контактните площадки или на носеща подложка.



Фиг. 7.19



Фиг. 7.20

Използването на чипове води до големи предимства особено при конструирането на СВЧ-интегрални схеми.

Херметизирането на слойните схеми с разположени върху тях дискретни компоненти става по различни варианти в зависимост от използваните прибори. Широко се използува няколкоетапното заливане с пластмаса и съответна обработка, която осигурява надеждна херметизация. При използуване на чипове се налага селективно изолиране на отделните чипове с помощта на различни компаунди. Особено интересни в това отношение решения предлага мултичипната техника. Както е показано на фиг. 7.19, тя предлага големи възможности за реализиране на специфични аналогови или цифрови схеми с използуване на голям брой отделни структури. При това се повишават изискванията към корпуса, който освен с по-голяма разсейвана мощност се характеризира и с някои други специфични проблеми. Най-широко приложение са намерили пластмасовите и металнокерамичните корпуси, чрез които може да се гарантират добри качества (фиг. 7.20).

7.3. МОНТАЖЕН ПРОЦЕС

Монтажният процес започва с изработването на контактните площадки върху самата полупроводникова структура, след което продължава със закрепването на полупроводниковия кристал (чипа) към основата на използувания корпус. Следващата операция е осъществяване на връзката между контактните площадки и изводите на корпуса. Може да се счита, че монтажният процес е завършил, след като така приготвената структура бъде херметизирана. За изпълнението на всичките тези операции всяка полупроводникова структура поставя специфични изисквания. В резултат на това съществуват различни възможности и различни техники на монтаж. Характерно за първата операция — изготвянето на контакти върху полупроводниковата структура — е създаването на контактни площадки с размери от порядъка на 100×100 до 200×200 μm върху съответно диелектрично покритие. Тяхната задача е двойна — от една страна, създават електрическа връзка с няколко различни области от структурата на прибора, а от друга, поемат електрическата връзка между извода и корпуса и структурата. Ако се използуват други методи за осъществяване на електрическата връзка, като биймлийд технология или някои от вариантите на хибридното изпълнение, тези контактни площадки трябва да се изготвят по подходящ начин, осигуряващ по-нататъшната връзка с корпуса. Контактът непременно трябва да има неизправяща характеристика, да няма нелинейни явления, свързани с работния режим на структурата, да не инжектира неосновни носители, да има минимално контактно съпротивление, да осигурява добра топлопроводимост и да притежава металургична стабилност за определената система, получена върху полупроводниковата структура [37].

За нуждите на монтажа контактната площадка

трябва да има добра адхезия към полупроводниковия материал и диелектричното покритие, което е нанесено върху него, да бъде термодинамично стабилна и да не съдържа примеси, които в процеса на работа на прибора при съответните температурни режими или стареене да се отразят върху неговите електрически характеристики. Трудно може да се намери метал, който да отговаря на всички изисквания, но най-широко използуваните са алуминият, слоевете волфрам—злато и други специфични сплави. При избора на съответната контактна площадка трябва да се има пред вид необходимостта от провеждане на фотолитография, какъвто е случаят с традиционната планарна технология, или от израстване на съответни пъпки.

Изборът на съответния материал за контакт на повърхността на структурата е важен момент в технологичната схема на всяко изделие и до голяма степен се отразява на рандемана на производството. Така например изборът на алуминий предполага, че конструкторът ще отчете голямата разтворимост на алуминия и силиция един в друг при температури, които са достатъчно ниски и лесно се достигат по време на операции, включени в монтажния процес. Освен това наличието на различни разтворени метални атоми в диелектричното покритие може да доведе до изменение на неговите параметри и до влошаване на характеристиките на прибора в областите около контактните площадки. Залепването на полупроводниковата структура към основата на чипа става обикновено с помощта на евтектична сплав между златото и силиция. Чрез ултразвук допълнително се прибавя и механично усилие, в резултат на което долната част на чипа се легира, като след рекристализация той остава залепен върху основата. При залепването на чипа е необходимо да се отчете ориентацията на контактните площадки спрямо изводите на корпуса. В някои случаи се използуват и други методи за залепване на основата чрез използуване на разтворени в дейонизирана вода стъкла, които при подходяща температура се разтопяват и осъществяват добра връзка между кристала и основата. В слойната техника се използуват различни припои, характерни и за силовите прибори.

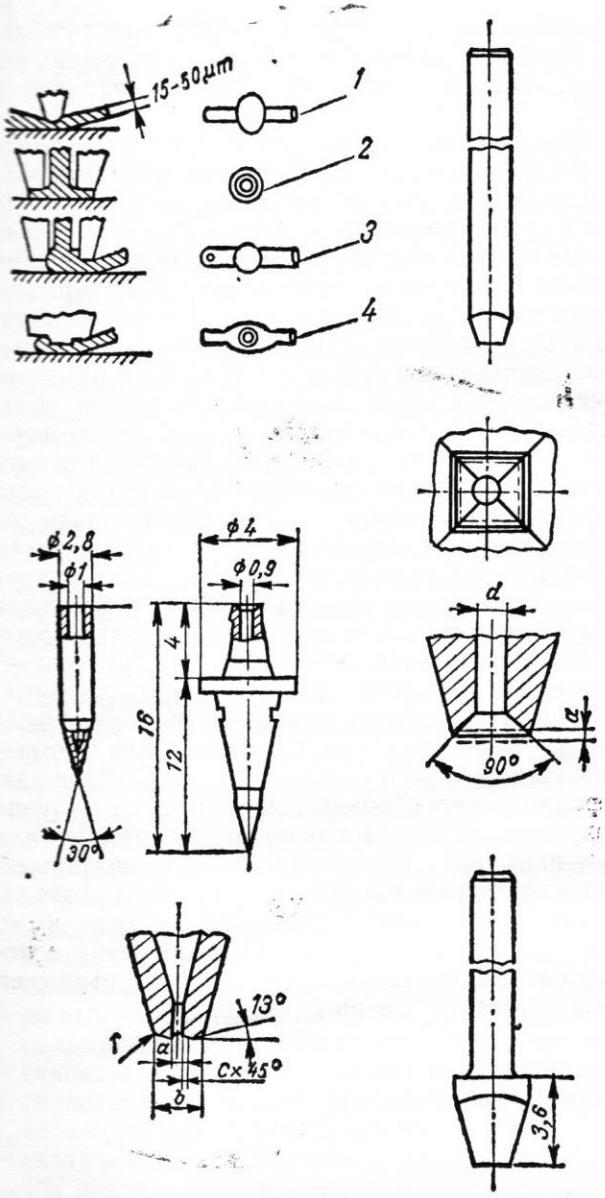
Като основна операция присъединяването на чипа може да бъде регулирано с помощта на температурата на двукомпонентната система и налягането, което се упражнява чрез съответния механизъм. Избират се режими, осигуряващи оптимално и бързо получаване на евтектична сплав, което подобрява контактното съпротивление и осигурява добро топлоотвеждане през основата на корпуса. При СВЧ-приборите и в някои случаи на хибридната техника се използува и залепване на кристала с помощта на електрически провеждащи или електрически изолиращи лепила. Те са изработени обикновено на базата на епоксидни смоли с пълнители от сребро, злато или съответно изолиращи пълнители, които и в двата случая трябва да осигуряват добра топлопроводност. Съществуват и други конструктивни възможности за подобряване на тази операция.Обикновено златото на корпусите или металните носачи не е чисто, а е примесено с германий или антимон, в резултат на което се подобрява мокренето на чипа и се понижава температурата на евтектикума.

Монтажът на връзката между контактните площадки и изводите на корпуса се осъществява с помощта на термокомпресия или ултразвук при използуване на меки връзки. При термокомпресията се отчита видът на компонентите в системата. Такъв случай например е използуването на златна жица за алуминиеви контактни площадки.Диаграмата на термично равновесие на двукомпонетната система алуминий—злато се характеризира с няколко химични съединения, притежаващи различни свойства. Проблемите се избягват чрез извършване на термокомпресията при по-ниски температури с помощта на ултразвук или чрез монтаж само с ултразвук в защитна атмосфера.

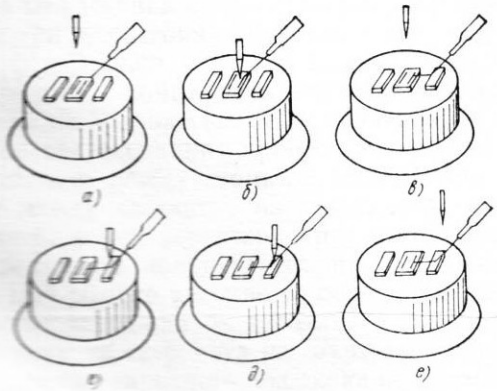
На фиг. 7.21 са показани няколко варианта за монтаж — *1*, *2*, *3*, *4*, осъществявани с различни игли. Показани са и надлъжни разрези на някои видове игли. Порядъкът на работа при използуване на златна или алуминиева жица за опроводяване е показан на фиг. 7.22.

При безжичен монтаж за изпълнение на връзката между изводите и структурата се прилагат няколко варианта (фиг. 7.23, *1*÷*9*): а) извършване на монтаж при чипове без контактни сферички; това е един от първите варианти, известни още под името „бондиране на обърнат чип“; б) монтиране на чип с помощта на контактни сферички (варианти *1*÷*5*); в) монтиране на чип с помощта на електролитно удебелени контактни площадки; г) монтиране на чип с помощта на удебеление на контактните площадки на слойната схема, разположена върху керамична подложка (варианти *6*, *7*); д) монтиране на структура, изготвена по технология с обемни (конзолни) изводи — биймлийд технология (вариант *8*); в този случай се осигурява и изолация между отделните компоненти, като механичната якост се осигурява от електролитно удебелени провеждащи шини; е) паякообразен монтаж, при който се използува метален носач върху пластмасово фолио с помощта на фотолитография, като метализацията може да бъде от мед или от алуминий (вариант *9*). Всяка от посочените разновидности има предимства и недостатъци. Конструкторът може да избере конфигурация, която да отговаря на технологичната схема на неговото изделие и да осигурява висок рандеман на производството.

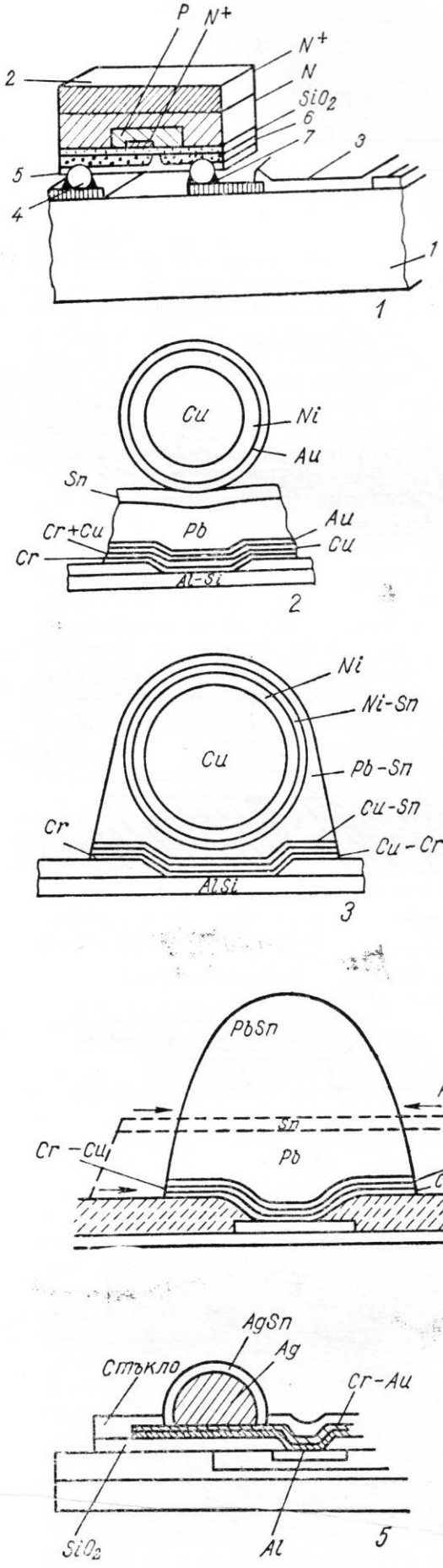
Монтажният процес завършва с херметизиране на корпуса. При безкорпусното изпълнение също се прави херметизация с помощта на специални компаунди. При използуване на метално-стъклен корпус се прилага херметизация с контактна електрозаварка, херметизация с припой, чрез студена заварка и запресоване. Същото се отнася и за метално-керамичните корпуси. Пластмасовите корпуси се херметизират с помощта на запресоване или леене с противоналягане. Важен момент от създаването на структурата е гарантирането на херметизацията на структурата с помощта на необходимите методи. За специални нужди в полупроводниковата технология се използуват методи за



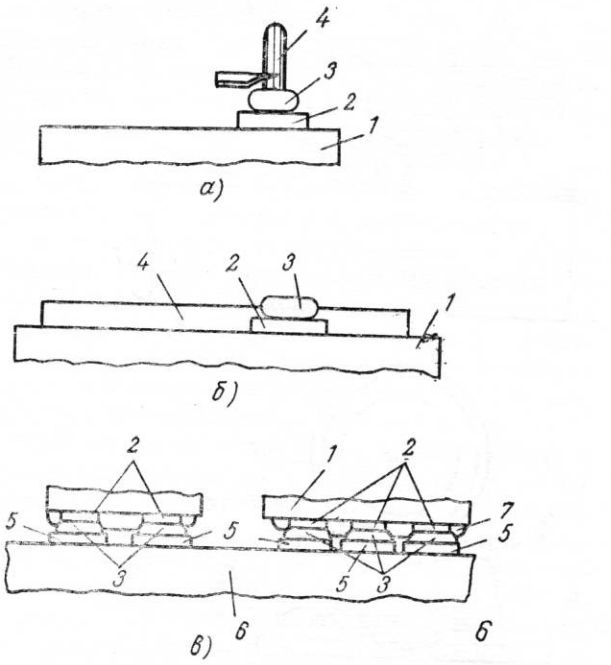
Фиг. 7.21

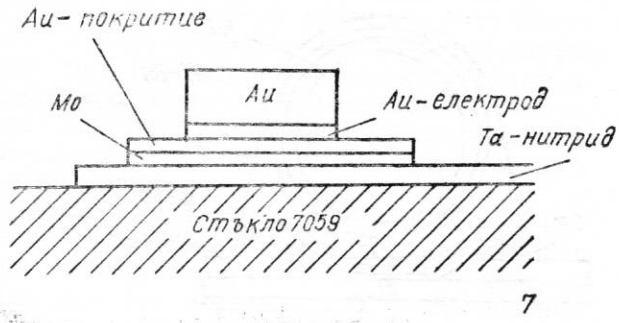


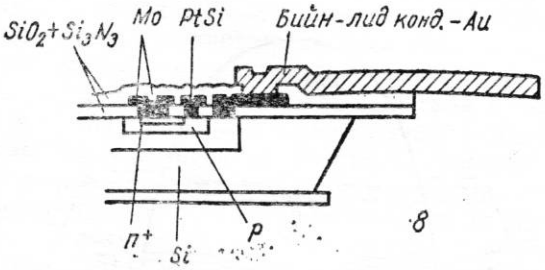
Фиг. 7.22

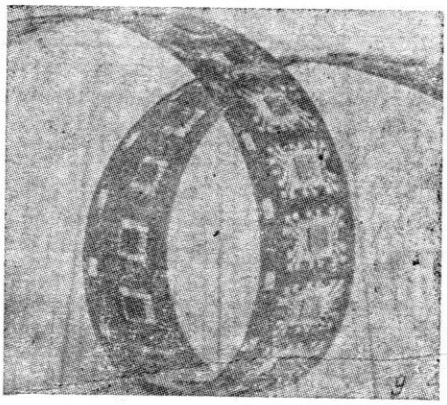


Фиг. 7.23









Фиг. 7.23

херметизация, гарантиращи работата на прибора при завишени условия на работа в космически условия, високи температури, висока влажност и т. н.

Към монтажните процеси спада и операцията **скрайбиране**. При нея полупроводниковата пластина се нарязва по размерите на чипа. За тази цел полупроводниковата пластина се надраскава с диамантено острие в предварително оставени пътечки около чипа, така че след това при лек натиск върху нея да се разчупи по посока на пътечките. При силовите прибори структурата се нарязва с помощта на ултразвук, тъй като структурите са големи и лесно се поддават на такава обработка. Диамантеното острие трябва да отговаря на повишените изисквания на операцията, тъй като всяко влошаване на параметрите на структурата се отразява съществено на рандемана поради обстоятелството, че скрайбирането е крайната операция на технологичната схема и предшествува монтажния процес. Мрежата, която се получава върху пластината, има дълбочина няколко десетки μm и зависи от дебелината ѝ. „Канавките" трябва да имат гладки стени, да нямат напуквания, които могат да доведат до разчупване и унищожаване на годни структури. С увеличаване на големината на чипа се повишават и изискванията към операцията скрайбиране. Пластината се начупва върху мека подложка с помощта на стоманен или алуминиев валяк. Обикновено скрайбираната пластина е предварително залята с лак. Това позволява чиповете да запазят своето място, независимо че пластината е разчупена. По този начин с помощта на подходящи експандери става възможен монтажът на определени чипове.

ГЛАВА 8

ЕПИТАКСИЯ

8.1. ПРЕДНАЗНАЧЕНИЕ И СЪЩНОСТ НА ЕПИТАКСИЯТА

Развитата през последните 15 години епитаксиална технология е решителна стъпка за утвърждаване на планарната технология. Спрямо по-ранни технологии епитаксията притежава редица принципни предимства, позволяващи производството на дискретни прибори и интегрални схеми. При това съществено значение има фактът, че епитаксиалната технология е била приложена не само за силиция, но и за различни други материали, като германий, галиев арсенид, галиев фосфид, силициев карбид, кадмиев сулфид. Напоследък с развитието на оптоелектронните прибори особено силно развитие получава епитаксиалното израстване на хетеропреходи ($Ga_{1-x}Al_xAs$ и $GaAs_{1-x}P_x$), получаването на които е много по-просто и по-технологично от това на чисти монокристали на съответните сложни полупроводници.

Под *епитаксия в полупроводниковата технология* [249, 250, 251] се разбира отлагане на монокристален слой от полупроводник с високи кристалографски качества и дефинирани геометрични и физични параметри върху подложка, чиято кристална решетка има еднакви или близки параметри до тези на отлагания материал (примерно сапфир и силиций). Първоначалното предназначение на епитаксията — да осигури малко колекторно съпротивление при високо пробивно напрежение, се споменава само в историческите справки. Епитаксията е един от основните методи за създаване на PN преходи или на преход в концентрацията и е единствен метод за създаване на хетеропреход.

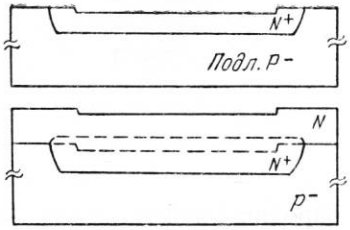
Отлагането на монокристален слой върху подложка от същия тип преминава през няколко фази, най-съществените от които са следните: образуване на зародиш, нарастване на зародиша до получаване на микроскопичен слой. Получаването на новия слой започва в микроскопични размери. При това не настъпва промяна на макроскопичните параметри на състоянието на системата. Образуването на зародиши в голяма степен е обосновано от енергията, с която разполага системата на повърхността на подложката. Това означава, че същността на епитаксиалния процес се определя от съотношението между атомните сили, които действуват между частиците на отлаганото вещество, и силите, които характеризират енергийните съотношения на повърхността на подложката.

Най-общото условие за образуване на епитаксиални зародиши се изразява в осигуряване на минимум на енергията на свързване на граничната повърхност зародиш—подложка по посока на израстване на епитаксиалния слой спрямо всяка друга посока. Тогава вероятността за образуване на устойчив зародиш е най-голяма по посока на израстване на епитаксиалния слой. При това трябва да се има пред вид, че образуването на зародишите е процес, който протича при постоянно налягане и постоянна температура. Тези параметри характеризират термодинамичната система. Създадените зародиши не са стабилни. Важно е след определено време да напуснат подложката или ако енергията, която са отдали на кристалната решетка, е била достатъчно голяма, да започнат да се движат по повърхността ѝ. При това преместването може да бъде линейно или ротационно в зависимост от анизотропията на подложката. От друга страна, епитаксиалният процес е облагоприятствуван от факта, че скоростта на изпарение на големи зародиши е по-малка от скоростта на изпарение на случайно възникнали зародиши, тъй като налягането на парите при постоянна температура трябва да бъде еднакво. Следователно получените върху повърхността по-малки групи от атоми на отлаганото вещество са по-нестабилни и в края на краищата се прихващат от по-големите, като изграждат по този начин постепенно кристалната решетка. Така се получава характерното израстване на епитаксиалното покритие, като мигриращите по повърхността на подложката атоми постепенно се захващат към растящото стъпало. Създават се моноатомни слоеве, които растат спираловидно или линейно в зависимост от формата на първоначалния зародиш.

8.2. ТЕХНОЛОГИЯ НА ЕПИТАКСИАЛНОТО ИЗРАСТВАНЕ И МЕТОДИ

8.2.1. Обща технологична схема

В съвременната полупроводникова технология са известни различни методи и приложение на епитаксиалния процес. Сега под *традиционна епитаксиална технология* се разбира изграждането на N-епитаксиален слой върху P-подложка за нуждите на интегралната технология. На фиг. 8.1 е показана стандартна технологична схема, която цели получаването на N-епитаксиален слой със следните параметри: дебелина — от един до няколко микрометъра и специфично съпротивление — от няколко десети омсантиметри до няколко десетки омсантиметри. Като легиращ материал се използува арсен, антимон или фосфор. В подложката преди епитаксията се изгражда N^+-дифундиран слой (т. нар. скрит N^+-слой), който е предназначен да подобри параметрите на получените транзисторни структури. В резултат на тази дифузия и особеността на дифузионния процес, съчетан с окисление в последната фаза, на повърхността на под-



Фиг. 8.1

ложката се получават по-силно или по-слабо изразени стъпала, които влияят върху качеството на получения епитаксиален слой.

Съвременната полупроводникова промишленост разполага със съоръжения, позволяващи химичното отлагане на епитаксиални слоеве чрез редукция във водородна среда на тетрахлорсилан или чрез пиролиза на моносилан. По отношение на разполагането на подложките съществуват следните възможности — нареждане в хоризонтална тръба (реактор), нареждане под формата на пирамида и вертикално разполагане.

Епитаксиалният процес, включен в технологичната схема на съответната интегрална схема, се характеризира със следните *параметри* — а) дебелина на слоя; б) електрически свойства, определени от типа проводимост, концентрацията и разпределението на примесите, подвижността и времето на живот на носителите; в) структурата на кристалната решетка.

Новите тенденции в полупроводниковата техника се характеризират с по-малка дебелина на епитаксиалния слой. Такива са методът за изолация чрез колекторната дифузия (CDI), методите, свързани със селективно окисление (изопланарен, PLANOX, LOCOS), методите на комбинирана изолация (полипланарен, V-ATE, VIP) и др. За реализирането им се използува епитаксия от силан, която се провежда при по-ниска температура. Това намалява възможността за автолегиране и размиване на скритите слоеве и гарантира получаването на резки PN преходи.

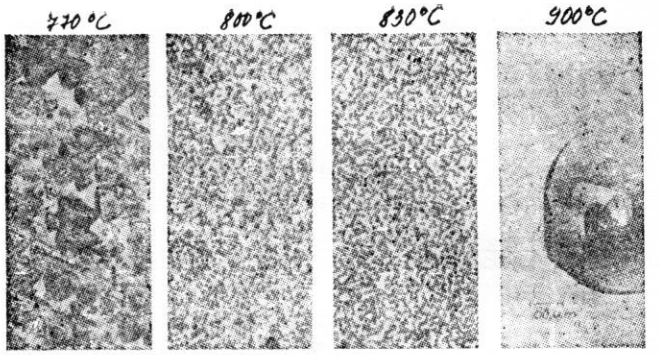
8.2.2. ЕПИТАКСИЯ НА ГЕРМАНИЙ И СИЛИЦИЙ

Основните реакции са [250, 251]:

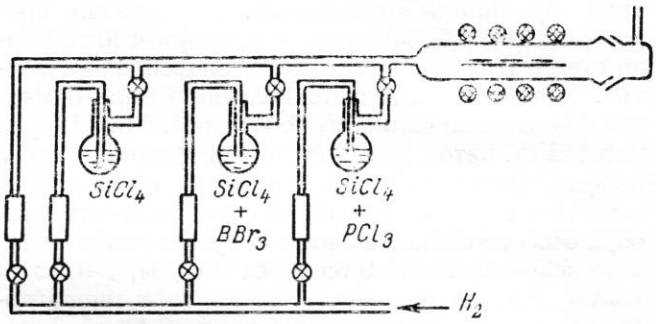
$$SiCl_4+2H_2 \rightleftarrows Si+4HCl;$$
$$GeCl_4+2H_2 \rightleftarrows Ge+4HCl. \quad (8.1)$$

Процесът зависи от температурата, съотношението на молярните съставки на водорода и германиевия или силициевия четирихлорид, от дебита на газовете.

Метод, намерил широко приложение през последните години, е *пиролизата на силана*. Епитаксиалният процес се провежда при температури между 850 и 1000°C. Тази температура, която е с около 200÷400°C по-ниска от температурата на редуциране на силициевия или германиевия четирихлорид, позволява на конструктора да гарантира резки профили и да получи по-възпроизводими резултати. Влиянието на температурата върху структурата на получения епитаксиален слой е показано с фотографии на напречни сечения на епитаксиални слоеве от германий, получени при различни температури на отлагане (фиг. 8.2). Поради голямата прилика на германия и силиция тези снимки могат да бъдат разглеждани и като нагледно доказателство за случая на силиция с отчитане на особеностите на този полупроводников материал. Температурата на отлагане при германия се различава съществено от тази при Si и е от 600 до 900°C, като за типична температура може да бъде приета 875°C. Скоростта на отлагане е почти еднаква, практикуват се скорости от порядъка на 0,5 до 1 μm/min. Съотношението на молярните съставки на компонентите е също приблизително еднакво. На фиг. 8.3 е показана принципна схема на апаратура за епитаксия на Si и Ge.



Фиг. 8.2



Фиг. 8.3

8.2.3. Епитаксия на галиев арсенид

С развитието на оптоелектронните елементи и полупроводниковите прибори за СВЧ широко развитие получава епитаксията на галиев арсенид и свързаните с него сложни хетеропреходи. При епитаксията на галиевия арсенид конструкторът трябва да избира между вакуумни методи, методи, основаващи се на транспортната реакция, и метода на течна епитаксия [257—261, 39]. Трябва да се отдаде необходимото внимание на вакуумните методи, при които различаваме методи, свързани с взривно изпарение на зърна от галиев арсенид, и отлагане от галий и арсен, намиращи се

в отделни източници. В първия случай е констатирано получаването на епитаксиални покрития с достатъчно добре дефинирани параметри. В случая става вакуумно отлагане на сложен полупроводник, чиито съставки имат различно налягане на парите. Арсенът има по-голямо налягане, поради което той е по-силно летлив и изпарението му завършва, когато в системата започва изпарението на галий. Покритието се получава чрез подходяща температура на подложката, осигуряваща голяма подвижност по повърхността ѝ. В определен момент в равновесие са зърна на галиев арсенид, намиращи се в различен стадий на разлагане. По този начин се гарантира получаването на необходимата стехиометрия. При втория вакуумен метод вниманието е съсредоточено към създаване на нестехиометрична газова фаза от двете компоненти, от която с помощта на подходяща геометрия на изпарението и температура на подложката се гарантира получаване на стехиометрично покритие.

Получаването на епитаксиални слоеве от галиев арсенид чрез транспортни реакции по аналогия с методите за силиций и германий е най-интересният метод, на който се придава и най-голямо промишлено значение. Тук се различават отворени и затворени системи. Отворените системи имат по-широко приложение. Исторически погледнато, отлагането на епитаксиални покрития чрез транспортиране на галиев арсенид е реализирано по два принципа — в системи, използуващи водни пари, и в халогенни системи [259, 262]. Транспортирането на галиев арсенид в системи с водни пари се осъществява при съвсем малко налягане на водните пари, като над източника от галиев арсенид се пропуска водород, наситен с водни пари. При това се получават галиев оксид и арсен във вид на газообразни продукти:

$$(8.2)\quad 2GaAs_{(тв)}+4H_2O\rightleftarrows 2\,Ga\,O_{2(г)}+4H_{2(г)}+As_{2(г)}.$$

Носещият газ транспортира двете компоненти към подложката и при наличие на подходящ температурен градиент се отлага Ga As.

В халогенните системи отлагането на галиевия арсенид се основава на различната стабилност на халогенните съединения — GaX. Известна е възможната обща реакция, която протича в системата

$$(8.3)\quad 2GaX_3+4GaAs\rightleftarrows 6GaX+As_4.$$

При използуването на арсенов трихлорид се получават най-добри параметри на покритията. В случая става насищане на носещия газ водород с арсенов хлорид над източника от галиев арсенид. Образувалият се при това хлороводород участвува също в транспортната реакция

$$6H_2+4AsCl_3\rightarrow 12HCl+As_4;$$

$$(8.4)$$

$$6Ga+6HCl\rightarrow 6GaCl+3H_2.$$

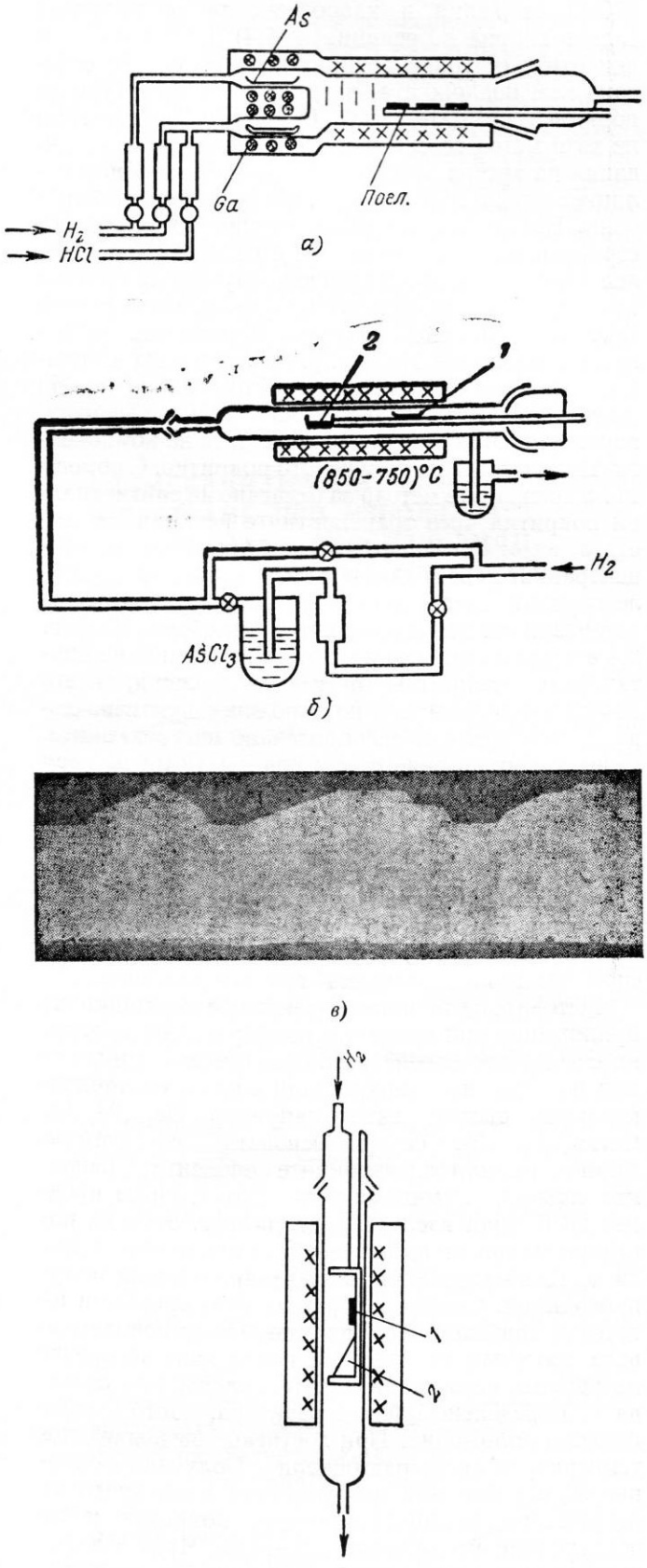
По-нататък отделните компоненти се пренасят с помощта на носещия газ и дифузията към областта, където се поддържа необходимият температурен градиент. Тук се осъществяват следните реакции:

$$6GaCl\rightleftarrows 2GaCl_2+4Ga;$$

$$(8.5)$$

$$4Ga+As_4\rightarrow 4GaAs.$$

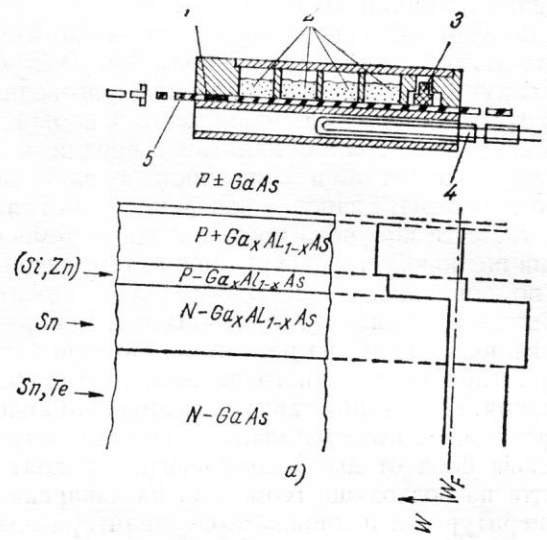
Използуват се няколко варианта на този метод, в които като източници се използуват отделни тигли с галий и арсен, както е показано на фиг. 8.4 *а*. Като носещи газове се използуват водород и хлороводород, така че общите реакции запазват своя характер. При температури 400÷600°C (източникът на арсен при 450°C, а източникът на галий при



Фиг. 8.4

600°C) от галия и хлороводорода се получава галиев хлорид по реакцията (8.4). След това компонентите се транспортират през област на смесване към подложката, загрята до температури от порядъка на 700÷750°C. Основните недостатъци на този метод са свързани с възможните замърсявания на арсена, които са главно силиций или силициев окис и които трудно могат да бъдат отстранени. Ето защо напоследък по-широко са разпространени методите, свързани с избягване на отделен източник за арсен чрез използуване на арсенов трихлорид или на арсенов анхидрид, чието разлагане осигурява необходимата компонента за изграждане на слоя. На фиг. 8.4 *б* е показана и принципната схема на получаване на това покритие. По този метод могат да бъдат осигурени най-високи параметри по отношение на чистотата на компонентите и съответно на полученото покритие. С помощта на показаните методи за отлагане на епитаксиални покрития чрез транспортните реакции се постига висока стойност на подвижността и концентрациите, които са в широк диапазон и удовлетворяват изискванията на конструкторите за най-различни полупроводникови прибори. На фиг. 8.4 *в* е дадена снимка на напречно сечение на епитаксиално покритие от галиев арсенид, което показва получаването на зародиши при неподходяща температура на протичане на реакциите. Съществено влияние върху морфологията на слоя оказват температурата на подложката и температурата на източника, които в крайна сметка водят до липса на една от двете компоненти в газовата фаза, а оттам съответно и до невъзможност от получаване на епитаксиално покритие. Ето защо оптимизирането на температурните съотношения на подложката и кинетиката на изграждането на слоя имат изключително голямо значение.

Методите на течната епитаксия намират широко приложение при сложните полупроводници, главно с получаването на различни смесени кристали или по-точно на монокристали с различен стехиометричен състав, като например $Ga_{1-x}Al_x As$, $GaAs_{1-x}P_x$. Те са в основата на изграждането на оптоелектронните елементи, например лазери, луминесцентни диоди, и са предмет на бъдещи изследвания. На фиг. 8.4 *г* са показани някои от най-известните принципни методи за течна епитаксия на различни сложни полупроводници. Според [267] основните принципи на течната епитаксия са следните. Полупроводниковият материал се смесва с подходящи легиращи материали, като калий, бисмут, олово, и се поставя на определено място в реактора, който е в наклонено положение. При достигане на подходяща температура става разтопяване. Получава се стопилка, в която има необходимите компоненти за изграждане на епитаксиалното покритие и за осигуряване на неговото легиране. Чрез завъртване на реактора стопилката покрива подложката, от която при необходимия температурен градиент започва отлагането на покритието. Съществуват различни варианти на течната епитаксия, които не са свързани непременно с въртящ се реактор. Както е показано на фиг. 8.5 *а*, същият ефект може

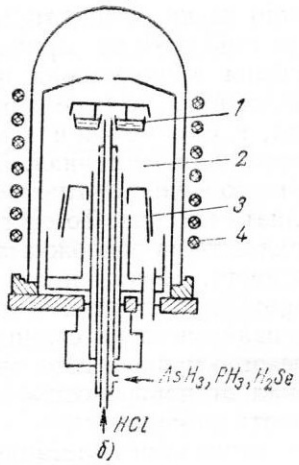


Фиг. 8.5 а

да бъде получен и чрез преместване на подложката, като по този начин се осигурява по-добра хомогенност. Възможни са и вертикални реактори, при които със съответно приспособление, подобно на апаратурата за изтегляне на монокристали, подложката се потопява в стопилката. Чрез изтегляне и подходящ температурен градиент се стига до отлагане на необходимото покритие. Течната епитаксия се характеризира с голяма простота на апаратурата, с осигуряване на голяма чистота на провежданите операции поради гетериращото действие на стопилката, както и на голяма точност на концентрационните профили, което води до гарантиране на параметрите на получените преходи. Освен това течната епитаксия гарантира получаването на равнинни PN преходи с високи стойности на параметрите. При течната епитаксия може да бъде получено също ецване на повърхността на пластината. Най-важното предимство на течната епитаксия е възможността за получаване на различни хетерпреходи, необходими на оптоелектрониката.

8.2.4. Получаване на хетеропреходи от сложни полупроводници

От 1970 г. конструкторите в полупроводниковата техника са вече в състояние да създават луминесцентни прибори, които светят в жълтия, червения, оранжевия и зеления спектър на видимата светлина, като силата на излъчването достига до 1 lm/W. Свидетели сме на бурно развитие в тази област, технологично подкрепено с възможностите за изграждане на хетеропреходи. В [267, 268] е показано, че предпоставки за получаване на хетеропреходи са: близост в химичната структура на двата материала, близко и подобно изграждане на връзките между отделните компоненти, почти идентични параметри на кристалната решетка и съвпадение в температурните коефициенти на разширение. *Хетеропреходът* е една общност на два различни монокристални материала, нанесени периодично един над друг. От това определение веднага се разбира, че става дума за използуване на различ-



б)

Фиг. 8.5 б

ни полупроводникови материали, особено от съединенията $A^{III}B^{V}$ и $A^{II}B^{VI}$, като, разбира се, трябва да се намерят подходящите компоненти по изброените по-горе закономерности. От направените изследвания най-подходящи се оказват следните системи: AlP—GaP, AlAs — GaAs, AlSb — GaSb, GaSb — InAs, AlSb — InAs.

Най-широко приложение е намерила системата галий—арсен/алуминий—арсен с използуване на фосфор.

Възможността за създаване на хетеропреходи на базата на системата GaAs—AlAs прави реално получаването на редица полупроводникови прибори, които се характеризират с принципно нови параметри, реализуеми само благодарение на развитието на епитаксиалната техника. В това отношение особено важно място заемат полупроводниковите инжекционни лазери. Подобряването на к. п. д. на лазерната структура с хетеропреход става възможно чрез получаване на оптически вълноводна структура. Тя се състои от последователно разположени слоеве по такъв начин, че активната зона (галиевият арсенид) да бъде разположена в среда $Ga_{0,8}Al_{0,2}As$, характеризираща се с по-малък коефициент на пречупване. Активната област може да бъде ограничена от двете или само от едната страна (използуване само на една хетероструктура). Разликата в коефициента на пречупване достига 5%, докато при различни хомоструктури, напр. *N*—GaAs/*P*—GaAs, отклонението в коефициента на пречупване е само 0,1%. С помощта на хетеропреходите се получава принципно ново разположение в зонната диаграма, с което се осъществява стесняване на спектъра на излъчване на лазера, а оттам подобряване на неговото действие.

На фиг. 8.5 *а* е показана една двойна хетеропреходна структура, при която се използуват няколко различни варианта на течната епитаксия. Като легиращи материали са избрани подходящи елементи, показани на фигурата. На фиг. 8.5 *б* е показана и система за получаване на епитаксиални слоеве на базата на галиев арсенид-фосфид. Това съединение е получено на базата на фосфин, арсин и галиев монохлорид върху пластини от галиев арсенид или галиев фосфид. Постъпването на отделните компоненти в кварцовия реактор е показано на фигурата, като някои от реактивите се получават чрез химични реакции — постъпващият хлороводород реагира с галий, като се получава галиев монохлорид. Съотношението в потока от арсин спрямо фосфин се избира така, че да осигурява необходимото съотношение в епитаксиалното покритие. Изборът на материала за подложката има важно значение за ефективността и за дължината на вълната на използуването — за червено излъчващ галиев арсенид-фосфид $GaAS_{1-x}P_x$, $x=0,4$ се използува подложка от галиев арсенид. Галиевият фосфид е прозрачен за червената, оранжевата, жълтата и зелената светлина независимо от типа проводимост на слоя.

8.3. МЕХАНИЗЪМ НА ЕПИТАКСИАЛНОТО ИЗРАСТВАНЕ ПРИ ИЗПОЛЗУВАНЕ НА ХИМИЧЕН ТРАНСПОРТ ИЛИ ДИРЕКТНА РЕАКЦИЯ В СИСТЕМАТА

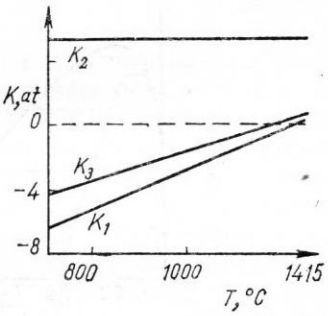
8.3.1. Термодинамична теория

За описване на механизма на най-широко разпространените епитаксиални методи се използуват няколко транспортни реакции, отчитащи характера на участвуващите компоненти [261]. В единия случай става транспортиране на твърдото вещество (силиций) чрез получаване на газообразни междинни продукти ($SiCl_2$), обогатени на твърдата компонента. Чрез подходящ температурен градиент те се довеждат до разпадане в областта на подложката. Във втория случай става направо използуване на газообразни продукти — SiH_4, $SiCl_4+H_2$, чиято редукция доставя силициеви атоми за епитаксиалното израстване (парохимичен метод).

Най-важните химични реакции за тези варианти са:

$$\begin{gathered}
Si_{(тв)}+SiCl_{4(г)} \rightleftarrows 2\,SiCl_{2(г)} \rightleftarrows Si+SiCl_4;\\
SiH_{4(г)} \rightleftarrows Si_{(тв)}+2\,H_{2(г)};\\
SiCl_{4(г)}+2\,H_{2(г)} \rightleftarrows Si_{(тв)}+4\,HCl_{(г)};\\
SiCl_{4(г)}+4\,H_{2(г)} \rightleftarrows SiH_{4(г)}+4\,HCl_{(г)};\\
SiCl_{4(г)}+H_{2(г)} \rightleftarrows SiCl_{2(г)}+2\,HCl_{(г)}.
\end{gathered} \tag{8.6}$$

Кинетиката на процеса се описва от равновесната константа K (свободната молярна енталпия) на отделните реакции. Те зависят от налягането на парите на газообразните компоненти, участвуващи в химично изравнените реакции (фиг. 8.6):



Фиг. 8.6

$$\frac{[P_{SiCl_2}(T_1)]^2}{P_{SiCl_4}(T_1)}=K_I(T_1);$$

$$\frac{[P_{SiCl_2}(T_2)]^2}{P_{SiCl_4}(T_2)}=K_I(T_2);$$

(8.7)

$$\frac{P^2_{H_2}}{P_{SiH_4}}=K_{II};$$

$$\frac{P^4_{HCl}}{P_{SiCl_4}P^2_{H_2}}=K_{III}.$$

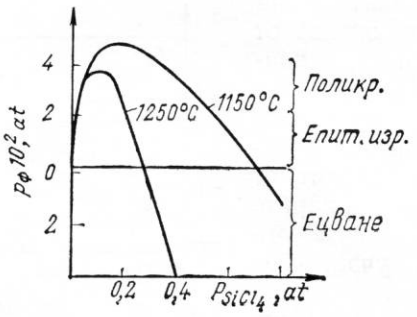
Стойността на константите изразява характера на обратимостта на реакциите при различна температура. Както е показано на фиг. 8.6, разлагането на силана (K_{II}) е стабилно за цялата област на използуваната температура. Високата стойност на K_{II} означава, че реакцията е изместена силно надясно и че скоростта на отлагане практически не зависи от температурата. Това важи особено за температури, по-високи от 1000°C, при които механизмът на разпадане е единствено определящ за епитаксиалното израстване.

Характерно за транспортните реакции е едновременното протичане на повечето от възможните реакции, което затруднява точния количествен анализ. Обикновено се дефинира едно фиктивно налягане:

$$P_ф=\frac{1}{4}P_{HCl}-\frac{1}{2}P_{SiCl_2}-P_{SiH_4}, \quad (8.8)$$

което е мярка за пренасищането на системата на силиций. За определен дебит на газовете скоростта на отлагане е пропорционална на $P_ф$. На фиг. 8.7 е показана зависимостта на $P_ф$ от парциалното налягане на $SiCl_4$ за тотално налягане от $9{,}8.10^4$ Pa (1 at) и две различни температури.

Пресечните точки на кривите с абсцисата означават „равновесните“ състояния, едната от които е обща за $P_{SiCl_2}=9{,}8.10^{-2}$ Pa (10^{-6} at). За $P_ф=0$ отлагане не се получава. Това се използува за хомогенизиране на сместа и се характеризира с протичането на обратните реакции [254]. Отлагане се получава за $P_ф>0$, и то за не много големи стойности, тъй като голямото пренасищане на системата на силиций води до структурни дефекти (поликристал). Обикновено работната точка се избира за $P_ф\approx 0$.



Фиг. 8.7

За екстремно ниски стойности, както и за екстремно високи стойности на парциалното налягане на силициевия четирихлорид налягането $P_ф$ става по-малко от нула, което е обратният случай на епитаксията, т. е. с н е м а н е от повърхността на полупроводников материал. Това е т. нар. *газово ецване*, което е едно от главните предимства на епитаксиалната техника. То осигурява почистване на повърхността на подложката преди започване на отлагането. Изчисленията показват, че при малки парциални налягания на силициевия четирихлорид налягането на силициевия двухлорид е пренебрежимо малко и изземването на силициевия материал от повърхността на пластината става под формата на силан.

При големи парциални налягания на силициевия четирихлорид равновесното състояние се премества наляво в реакцията ($P_ф<0$) поради голямото количество водород. В случая става „обратно“ транспортиране на силиция под формата на силициев двухлорид, което е зависимо от температурата и става със засиленото влияние на константата K_I спрямо константата K_{III}. Същият механизъм е характерен и за най-новите постижения на окислението, където става смесване на кислородните атоми с хлороводород по време и преди провеждане на окислителния процес.

За изясняване на термодинамиката на процеса е необходимо да се вземат пред вид и допълнителни продукти, които възникват по време на реакцията — SiH_3Cl, SiH_2Cl_2, $SiHCl_3$. В много случаи тези странични продукти, или по-точно междинни продукти, могат да бъдат пренебрегнати, тъй като продължават да участвуват в провеждането на реакцията. Към термодинамичната теория трябва да се отнесат и проблемите на легиране на епитаксиалните покрития, като най-общо може да се каже, че участието на някои допълнителни хологениди като фосфорен хлорид не изменят съществено термодинамиката на реакцията.

8.3.2. Гранични теории

От известните гранични теории, описващи механизма на епитаксията, най-широко приложение и действително добро потвърждение с експерименталните данни показват теориите, които използуват модел на граничния слой, описан на фиг. 8.8 *а* [41, 268]. Нека потокът от силициев четирихлорид към повърхността на подложката е

$$F_1=h_r(C_r-C_п), \quad (8.9)$$

където h_r е транспортната константа на газовата среда, C_r — концентрацията на силициев четирихлорид във вътрешността на газовия поток, и $C_п$ — концентрацията на силициев четирихлорид към повърхността на подложката [262÷265].

Ако подобно на разгледания при окислението механизъм приемем, че този поток трябва да бъде уравновесяван от потока F_2, характеризиращ се чрез самата химична реакция на повърхността на подложката ($F_2=K_пC_п$), и положим $F_1=F_2$, ще получим за повърхностната концентрация следния израз:

$$C_п = \frac{C_г}{1 + K_п/h_г}.$$

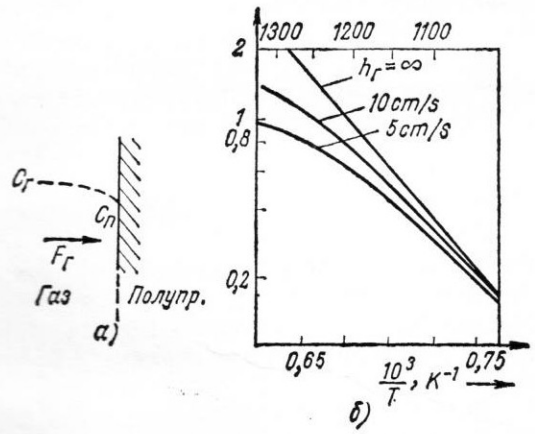
Може да се разгледат двата гранични случая $h_г \ll K_п$, $h_г \gg K_п$.

При конструирането е необходимо да се потърсят възможности за изменение и оказване на влияние върху кинетиката на процеса чрез определяне на скоростта на израстване:

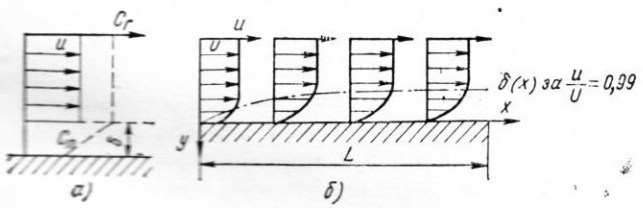
$$V = \frac{K_п h_г}{K_п + h_г} \cdot \frac{C_г}{5 \cdot 10^{22}}. \tag{8.10}$$

Зависимостта на скоростта на отлагане от температурата, която се изразява чрез константите, намерили отражение при описанието на процеса, е показана на фиг. 8.8 *б*. Най-доброто потвърждение между теорията и експериментите се получава, когато за константата $h_г$ се приеме стойност от $5 \div 10$ cm/s, за константата $K_п$—$10^7 \exp\left(-\frac{1{,}9\text{eV}}{KT}\right)$ $\frac{\text{cm}}{\text{s}}$. На практика епитаксията се осъществява винаги при достатъчно висока температура, където кинетиката на процеса се определя от материалния транспорт. Ето защо е необходимо да се разгледат по-подробно въпросите, свързани с определянето на стойността на константата $h_г$. При това съгласно фиг. 8.9 *а*, *б* се различават два случая, характеризиращи моделирането на граничния слой. При първия случай се приема, че газовата фаза се състои от две области. В първата област потокът от газ се движи с постоянна скорост и върху цялата повърхност. Втората област е изградена от неподвижен слой с дебелина δ, в който транспортирането на газовете до повърхността на подложката става за сметка на дифузията. Съответно потокът през него ще се опише с

$$F = D_г \frac{C_г - C_п}{\delta} \quad \text{т.е.} \quad h_г = \frac{D_г}{\delta}.$$



Фиг. 8.8



Фиг. 8.9

Реалните условия, които се получават на повърхността на подложката при епитаксиалното израстване, се описват по-добре, ако се приеме, че в този граничен слой също се осъществява поток на газовете с изменена скорост. В случая дебелината на слоя се дефинира за $U_{сл} = 0{,}99\ U_г$ и поради вискозитета на системата става променлив по дължината на подложката.

За стойността на $h_г$ се получават следните зависимости [41]:

$$h_г = \frac{D_г}{\delta} = \frac{3}{2} \cdot \frac{D_г}{L} - \sqrt{\text{Re}},$$

където Re е Рейнолдсовото число, характеризиращо вискозитета на системата, L — дължината на началния участък.

В заключение може да се каже, че съвременната полупроводникова технология не разполага с единна теория, която да обяснява кинетиката на израстване на епитаксиалното покритие и която да дава задоволително съвпадение между теорията и експеримента. Теориите, свързани с моделирането на граничните слоеве, показват по принцип по-добро съвпадение и намират по-широко приложение в практиката. Те дават по-добра връзка между параметрите на апаратурата и детайлите на самия реактор.

8.4. ПАРАМЕТРИ НА ЕПИТАКСИАЛНИТЕ СЛОЕВЕ

За конструиране на полупроводникови прибори най-важни параметри са дебелината и специфичното съпротивление на епитаксиалния слой. Голямо значение имат и възможните дефекти, които се получават при израстването. Дори и при идеално почистена повърхност на подложката е възможно да се получат дислокации, които могат да бъдат както продължение на дислокациите на подложката, така и нови дислокации, възникнали в резултат на особеностите на епитаксиалния процес.

На практика е много трудно да се получи идеално почистена повърхност. Много от дефектите, които могат да бъдат групирани като точкови дефекти на опаковката, се дължат именно на наличието на нарушени слоеве по повърхността на подложката. При разглеждане на химичната обработка беше вече разгледана възможността за проявяване на дефектите на опаковка. Така например наслагването на два триъгълника означава, че двата дефекта са се зародили на близко разстояние един от друг. Наличието на замърсявания на повърхността на подложката води до получаването на ями или хълмчета (пирамиди) и даже на различни поликристални области. Беше вече показано на фиг. 8.4 *в*, че причината за тези явления могат да бъдат и неправилно подбраните параметри на режима. Особено значение за гарантиране на параметрите на епитаксиалното покритие по отношение на неговата структура има и голямата кон-

центрация на примесите в слоя. Изискването за получаване на ниско легирани слоеве с голяма дебелина, което е необходимо при конструирането на силови и мощни прибори, е трудно условие за тази технологична операция. Това се дължи на факта, че плътността на дефектите расте с удължаване на времето на епитаксиалния процес. Интересно конструктивно решение е т. нар. обратна епитаксия, при която върху слабо легиран полупроводников материал се изгражда дебел слой с голяма концентрация на примесите. В този случай дефектите не оказват съществено влияние, тъй като слоят е предназначен за механична якост и обратен контакт.

ГЛАВА 9

ПОЛУЧАВАНЕ НА PN ПРЕХОД И НЕИЗПРАВЯЩ ПРЕХОД

9.1. ПРЕХОДЪТ В КОНЦЕНТРАЦИЯТА — ОСНОВЕН ЕЛЕМЕНТ В КОНСТРУКЦИЯТА НА ПОЛУПРОВОДНИКОВИЯ ПРИБОР (ИЗПРАВЯЩИ И НЕИЗПРАВЯЩИ ПРЕХОДИ)

Основен елемент в конструкцията на един полупроводников прибор е създаването на PN преход и на неизправящи преходи. Неизправящите преходи имат линейна зависимост между тока и напрежението и са от голямо значение за общото действие на прибора. В зависимост от предназначението си всеки PN преход притежава поне два контакта, изградени на базата на неизправящия преход.

Конструктивните възможности за създаване на PN преход и на неизправящ преход са няколко: сплавяне, дифузия, епитаксия и йонна имплантация. В зависимост от това, дали се създава преход в концентрацията със или без промяна на проводимостта, се получава PN преход или неизправящ преход. При всички видове технология за получаване на тези преходи трябва да се отчита компенсацията на примесите, получаващи се при използуване на дифузия, сплавяне или йонна имплантация. Само при епитаксията създаденият преход не е за сметка на компенсация. Това е предимство на този метод, тъй като компенсацията винаги е свързана с вторични ефекти, оказващи влияние върху преноса на токовите носители. Към преходите в концентрацията може да отнесем и прехода метал—полупроводник, като го разглеждаме като рязък преход. Поради факта, че проблемите на PN прехода и неговото създаване са широко известни и изучавани в многобройни курсове, тук са разгледани само основните положения, характеризиращи отделните технологии на изготвяне и особеностите в технологичните схеми на процесите.

9.2. СПЛАВЯНЕ

Сплавянето представлява взаимодействие при висока температура на два или повече елемента — метал или метална сплав и полупроводник. Както е известно от теорията на металознанието, на всяка система вещества може да се определи диаграма на състоянието, показваща системата при повишена температура. Сплавянето представлява приложение на бинарните (или по-сложни) системи за нуждите на полупроводниковата технология. Сплавянето намира приложение за получаване на сплавно-дифузионни транзистори и неизправящи контакти.

Особено важно е сплавянето за сложните полупроводници, които с развитието на полупроводниковата техника намират все по-широко приложение и за които омовите контакти все още подлежат на изследване.

9.2.1. Същност и механизъм на сплавяне

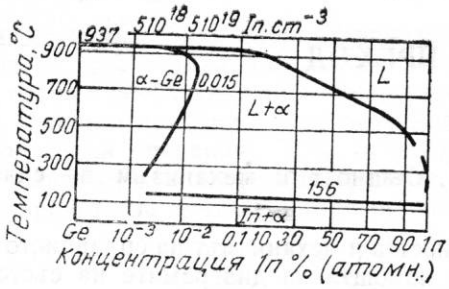
Същността и механизмът на сплавянето се изясняват с помощта на диаграмите на състоянието. За всички диаграми е характерно, че на абсцисната ос се нанасят атомните или тегловните проценти на компонентите, а на ординатната ос — температурата. За по-сложни системи се избира триъгълна форма на диаграмите или по-сложна, отчитаща особеностите на системата. Връзката между атомните и тегловните проценти се изразява с помощта на

$$(9.1) \qquad a=\frac{100\,\alpha}{\alpha+\beta\frac{B}{A}}; \qquad b=\frac{100\,\beta\frac{B}{A}}{\alpha+\beta\frac{B}{A}},$$

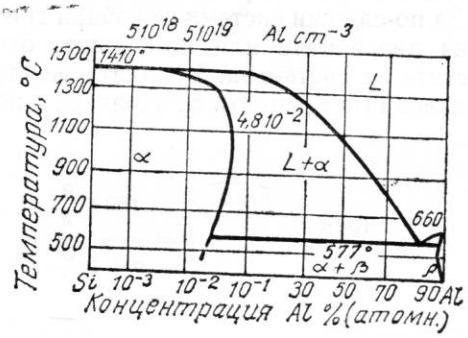
където A и B са атомните тегла, a и b — тегловни проценти, α и β-атомни проценти.

Процесът сплавяне се изразява в образуването на рекристализационен слой, който като твърд разтвор съдържа необходимия компонент при запазване на кристалната решетка на полупроводниковия материал. В този случай чрез възможните механизми на заместване в кристалната решетка или на вграждане, които всъщност изразяват механизма на получаване на промяната в типа проводимост, се получава необходимото изменение на концентрацията. На фиг. 9.1÷9.3 са показани характерни диаграми на състоянието за някои от използуваните системи. За всички омови контакти е възможно да бъдат използувани подобни диаграми на състоянието.

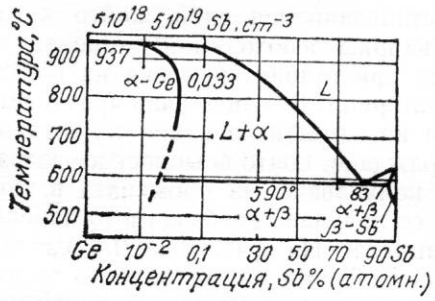
Физическите процеси, извършващи се при сплавянето, се разделят на три основни стадия: а) разтопяване на електродните елементи (сплави) и намокряне на полупроводниковата повърхност; б) разтваряне на определен обем от полупроводника, определен от диаграмата на състояние; в) образуване на рекристализационен слой чрез подходящ режим на охлаждане на системата. Геометрията на PN прехода се определя от намокрения участък на полупроводниковата повърхност и се гарантира в някои случаи чрез подходящ държател. При получаване на омови контакти сплавянето може да се извърши или върху цялата площ на пластината за получаване на обратен контакт, или локално за получаване на омов контакт в активните части на структурата, например дрейн и гейт на полеви транзистор, електроди на планарни Гънелементи и др. Дълбочината на прехода се контролира чрез обема на разтворения полупроводник, определен от диаграмата на състоянието. Концентрацията от примесните атоми, вградени в полупроводника, се изчислява с помощта на числото на Авогадро. При сплавно-дифузионните



Фиг. 9.1



Фиг. 9.2



Фиг. 9.3

транзистори в легиращата сплав се поставя допълнително необходим дифузант, който дифундира в полупроводника при температурата на сплавяне или при друга технологично определена температура.

Електродната сплав трябва да отговаря на различни изисквания: а) да осигурява необходимия тип и концентрацията на примесите; б) да има необходимото налягане на парите, гарантиращо получаването на преход, което е особено важно при създаването на локални PN преходи; в) да се обработва лесно и да може да се нанася върху полупроводниковата повърхност, т. е. да мокри добре полупроводниковата повърхност; г) да съдържа необходимите компоненти, осигуряващи висока гранична разтворимост и никакви вредни примеси за структурата. Важно конструктивно условие при сплавянето е, че времето не участвува при определяне на дълбочината и концентрацията на прехода, а има значение за хомогенизиране на прехода и за гарантиране на плоскопаралелността на неговата геометрия. Неправилният избор на режима може да доведе до изменение и влошаване на електрическите параметри на прибора.

9.2.2. Изчисляване на дълбочината на сплавяне. Видове сплавяне

Като изходна точка за изчисляване на дълбочината на преходите трябва да се считат диаграмата на състоянието и изборът на начина на сплавянето. На фиг. 9.4 *а* и *б* са скицирани геометриите на възможните варианти за получаване на локален изправящ или неизправящ преход [42]. Използуват се следните означения, необходими за извършване на изчисления:

$f(T^\circ)$ — съотношение на съставките, определено от диаграмата на състоянието;
$V_{пп}$ — обем на разтворения полупроводник;
$V_м$ — обем на разтворения метал;
δ — специфична плътност.

За геометрията на фиг. 9.4 *а* важи

$$f(T^0)=\frac{V_{пп}\,\delta_{пп}}{V_м\,\delta_м}=\frac{\frac{\pi d^2 x}{4}\,\delta_{пп}}{\frac{\pi d^2 h}{4}\,\delta_м};$$

$$x=f(T^0)\,h\,\frac{\delta_м}{\delta_{пп}};$$

$$h=\frac{x}{f(T^0)\,\frac{\delta_м}{\delta_{пп}}};\qquad f(T^0)=\frac{x\,.\,\delta_{пп}}{h\,.\,\delta_м}.$$

За случая на свободното разливане (фиг. 9.4 *б*) важат следните зависимости:

$$V_м=\frac{\pi}{6}\left(h^3+\frac{3}{4}D_1^2\,h\right);$$

$$r-h=r\cos\theta;\qquad D_1/2=r\sin\theta;$$

$$h=r(1-\cos\theta)\qquad r=D_1/2\sin\theta;$$

$$V_м=\frac{\pi}{6}\left[\frac{(1-\cos\theta)^3}{\sin^3\theta}+\frac{3(1-\cos\theta)}{\sin\theta}\right]\frac{D_1^3}{8}=$$

$$=\frac{4}{3}\cdot\frac{\pi}{8}D_0^3=\frac{\pi D_0^3}{6};$$

$$\frac{D_1}{D_0}=\frac{2}{\sqrt[3]{\frac{(1-\cos\theta)^3}{\sin^3\theta}+\frac{3(1-\cos\theta)}{\sin\theta}}};$$

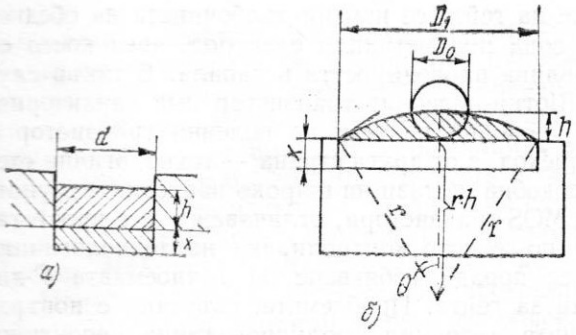
$$f(T^0)=\frac{V_{пп}\,\delta_{пп}}{V_м\,\delta_м}=\frac{3}{2}\,\frac{D_1^2\,x\,\delta_{пп}}{D_0^3\,\delta_м};$$

$$x=\frac{2}{3}f(T^0)\frac{D_0^3\,\delta_м}{D_1^2\,\delta_{пп}};\qquad D_0=\sqrt[3]{\frac{3\,xD_1^2\,\delta_{пп}}{2f(^0T)\,\delta_м}};$$

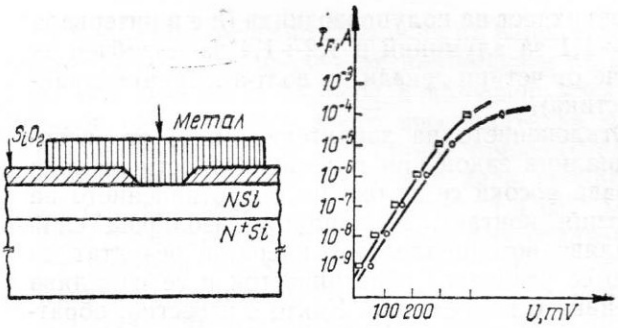
$$f(T^0)=\frac{3}{2}\,x\,\frac{D_1^2\,\delta_{пп}}{D_0^3\,\delta_м};$$

$$k=\frac{D_1}{D_0}\,[k=1{,}25\div1{,}4\quad\text{за}\quad D_0=(0{,}93-0{,}58)\ \text{mm}];$$

$$x=\frac{2}{3}f(^0T^0)\,\frac{D_0\,\delta_м}{k^2\,\delta_{пп}};\qquad D_0=\frac{3}{2}\,x\,\frac{k^2\,\delta_{пп}}{f(T^0)\,\delta_M}.$$



Фиг. 9.4



Фиг. 9.5

Към тези формули трябва да се прибави и преразпределението на примесите за случая на сплавно-дифузионния транзистор.

От гледна точка на сплавяването получаването на омови контакти в полупроводниковата технология има две разновидности — в някои случаи се използува температурна обработка под евтектичната температура на съответната система, а в други случаи, обратно — цели се именно получаване на евтектична сплав. В първия случай проблемите са твърде общи с конструктивните особености на прехода метал—полупроводник. Ето защо разглеждането на омовите контакти може да бъде разделено между сплавните преходи и прехода метал—полупроводник.

9.3. ПРЕХОД МЕТАЛ—ПОЛУПРОВОДНИК

9.3.1. Конструктивни особености

В полупроводниковата технология широко приложение намира Шотки-преходът. Исторически погледнато, Шотки-преходът предхожда много изследвания в други области на полупроводниковата технология, но поради сложността на технологичния процес и до голяма степен поради слабите познания в областта на механизма на протичането на отделните технологични операции допреди 10—15 години той не беше намерил голямо приложение при създаването на полупроводникови прибори. В съвременната полупроводникова техника Шотки-преходът намира все по-голямо приложение под формата на Шотки-диоди, Шотки-биполярни транзистори, Шотки-полеви транзистори и разнообразни омови контакти.

За стандартното производство на Шотки-диоди се използува планарно-епитаксиалната технология на базата на силициеви N^+-пластини със специфично съпротивление 0,001Ω. cm и ориентация (111) (фиг. 9.5). След израстването на епитаксиален слой с дебелина 5—6 μm, концентрация 10^{15}—10^{16} cm^{-3} пластините се окисляват. Чрез фотолитография се отваря прозорец в окиса, след което пластината се подлага на основно почистване преди отлагането на метала. Самата метализация се извършва чрез пиролитично разлагане ($MoCl_5$ за молибден) и чрез вакуумно изпарение или разпрашване (алуминий). Пиролизата се извършва по реакцията

$$2MoCl_5+5H_2\rightarrow 2Mo+10\ HCl$$

при температура между 400°C и 500°C. Скоростта на водорода в реактора е под 4 cm/s, парциалното налягане на $MoCl_5$—5.10^{-3} Torr. Времето на отлагане на слой Mo с дебелина от 0,1 μm до 0,3 μm е около 25 min. За изпарението на Al се използува алуминиева лента с чистота 5 N. Следващата операция е фотолитография, с която се структурира металният слой. Последната операция в технологичната схема е създаването на обратния контакт, след което структурите могат да бъдат монтирани в подходящ корпус. За обратен контакт при Si се използува сплавта злато-антимон или чист алуминий, а за GaAs — злато-германий.

Използуването на алуминий за Шотки-контакт има предимства поради по-изгодните металургични качества на системата Al-Si. Използуването на алуминий прави Шотки-диодите интегруеми в биполярните и MOS-интегрални схеми, където този метал се използува най-често за омови контакти. Поради отличните си шумови характеристики и малко време на превключване Шотки-диодите са приложими за СВЧ. Простата технологична схема, характеризираща се с избягване на дифузионните процеси, позволява голяма свобода при комбинирането им с останалите планарно-епитаксиални прибори. Без да се усложнява технологичният процес, само с една промяна на шаблоните се изготвят Шотки-диоди, включени успоредно на прехода колектор—база в биполярните транзистори за намаляване на времето на превключване.

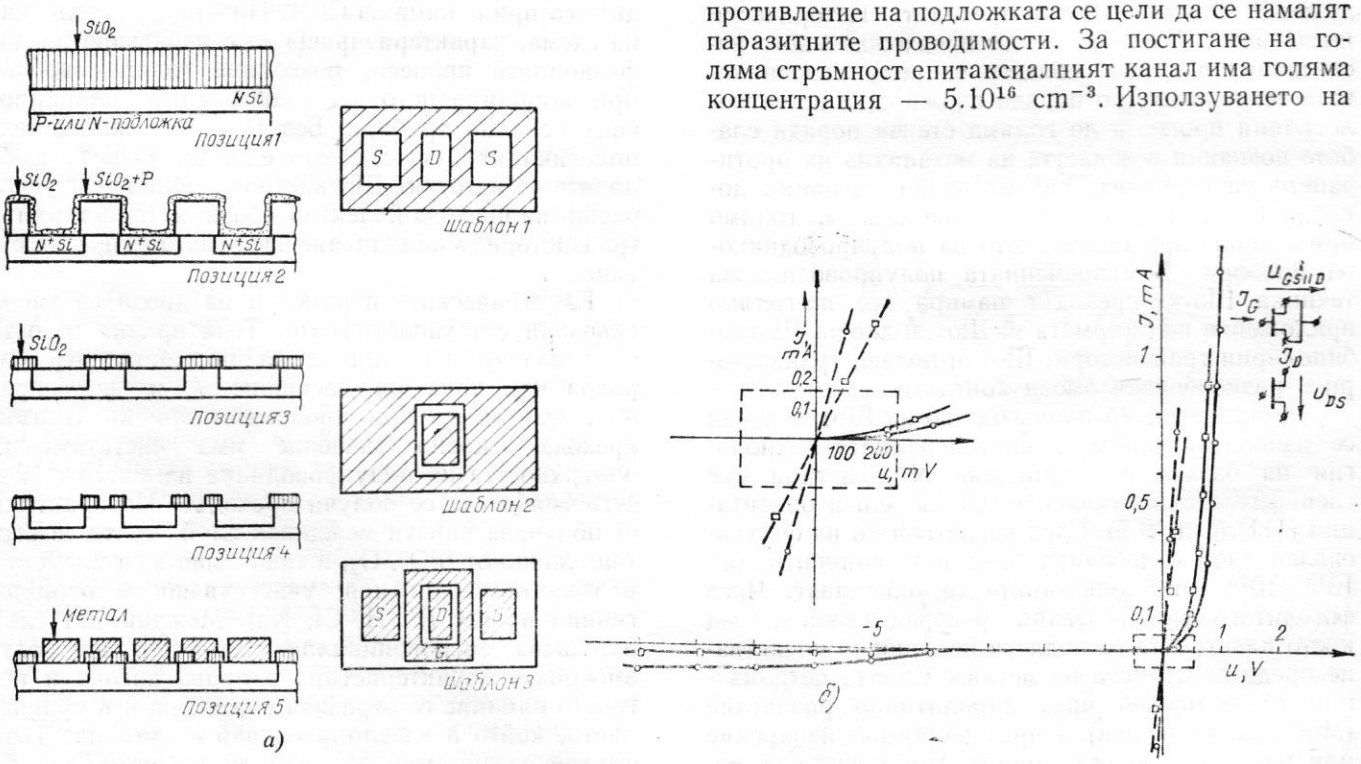
Електрическите параметри на диода са тясно свързани с технологичните. Тази връзка се осъществява от големината на потенциалната бариера Φ_B, тока на насищане I_s и коригиращия фактор n. При производството на Шотки-прехода основно значение има чистотата на повърхността на полупроводника на мястото, където трябва да се получи преходът. На практика се получава винаги междинен слой, който се състои главно от SiO_2, O_2, а така също и от елементи и техните съединения, участвуващи в технологичния процес (F, H, Cl, Na). Междинният слой нарушава експоненциалния характер на волтамперната характеристика в права посока и неговото влияние се отразява с фактора n в уравнението, който в идеалния случай е единица. Този фактор е критерий за правилното протичане на технологичния процес, т. е. получаване на чис-

та повърхност на полупроводника (n е в интервала 1,05÷1,1 за алуминий и 1,2÷1,4 за молибден за повече от четири декади на волт-амперната характеристика).

Отклонението на характеристиките от експоненциалния закон при големи плътности на тока в права посока се дължи на съпротивлението на обратния контакт. Междинният изолиращ слой намалява потенциалната бариера, в резултат на което се увеличава обратният ток и се намалява пробивното напрежение. Както е известно, обратното напрежение на прехода зависи от радиуса на закривяване на обедняната зона. При Шотки-прехода този радиус е фактически нула, в резултат на което има големи отклонения в разпределението на еквипотенциалните линии в полупроводника на краищата на металния електрод (30—40 пъти по-голяма напрегнатост на полето). В резултат на това при Шотки-прехода пробивът се получава винаги в тези области. При концентрация 10^{16} cm^{-3} пробивното напрежение теоретично е под 5 V, измерено на ниво 10 μA. Постигането на достатъчно високо пробивно напрежение при Шотки-диодите е важна задача, изискваща допълнителни технологични операции, чиято основна цел е повлияването на потенциалното разпределение на краищата на металния електрод. Въпреки това постигнатото пробивно напрежение е винаги по-ниско от теоретично възможното за един рязък PN преход.

Шотки-полевият транзистор има конструкция, подобна на тази на MOS-полевия транзистор. Основната разлика е, че между гейта и канала няма изолиращ слой, което води до получаване на Шотки-преход на това място. При прилагане на напрежение на гейта се изменя дълбочината на обедняната зона под металния електрод, чрез което се управлява проводимостта в канала. В такъв случай Шотки-полевият транзистор има характеристики, подобни на тези на полевия транзистор с PN преход, а от друга страна — технологична схема, подобна на тази на широко навлезлите в употреба MOS-транзистори, отличаваща се с простотата и по-лесното контролиране на технологичния процес поради избягване на трудоемката P-дифузия за гейта. Проблемите, свързани с повърхностните състояния в полупроводника и електричните товари в изолиращия слой, имат второстепенно значение. Областта на приложение на Шотки-полевия транзистор като дискретен елемент или елемент на интегрална схема, нискочестотен или високочестотен елемент зависи от неговите параметри, които от своя страна са отражение на геометричните размери и технологичния процес. Важно предимство на този тип транзистор е възможността да се получи голяма стръмност, която при малки дължини на канала осигурява усилване и при свръхвисоки честоти. Шотки-техниката е в състояние да измести напълно полевите транзистори с PN преход. При високи честоти транзисторите, изградени на тази основа, намират широко приложение в линейните и логическите интегрални схеми.

На фиг. 9.6 *а* е представена технологичната схема на един дискретен Шотки-полеви транзистор, характеризиращ се с едновременното изготвяне на омовите контакти сорс и дрейн с Шотки прехода на гейта. Използува се N- или P-тип подложка от Si или полуизолираща подложка от GaAs, върху която се израства епитаксиален слой с N-проводимост. Чрез избора на голямо специфично съпротивление на подложката се цели да се намалят паразитните проводимости. За постигане на голяма стръмност епитаксиалният канал има голяма концентрация — 5.10^{16} cm^{-3}. Използуването на



Фиг. 9.6

по-големи концентрации е ограничено от изискванията за големината на пробивното напрежение на гейта. Специални технологични операции се използуват за осигуряване на пробивни напрежения, по-големи от 30 V. Епитаксиалният канал има дълбочина от 0,5 до 2 μm. На местата на сорса и дрейна за Si се извършва N^+-дифузия със следните параметри: повърхностна концентрация от фосфор 10^{21} cm^{-3} и дълбочина от 0,5 до 1 μm.

Поради голямата концентрация преходите там нямат изправящ характер, което се обяснява с малката широчина на потенциалната бариера и тунелния преход през нея. По този начин съпротивлението на прехода намалява и общото съпротивление се определя от обемното съпротивление на полупроводника. На фиг. 9.6 *б* са представени волт-амперните характеристики на трите прехода (сорс и дрейн заедно).

9.3.2. Омози контакти в полупроводниковата технология

Технологично са известни два случая при изготвянето на омови контакти. В единия случай темперирането става подобно на прехода метал—полупроводник, при което целта е да се премахне междинният слой, състоящ се от различни примесни атоми, включително и окиси на полупроводника. В този случай не се забелязват съществени различия и особености при изготвянето на контактите по отношение на Шотки-прехода. Във втория случай темперирането води до легиране на полупроводника, за постигането на което системата се загрява до температура, по-висока от евтектичната. И в двата случая е необходимо да се постигне линейна VA-характеристика в двете посоки.

Физическият смисъл на линейността се състои обикновено във факта, че общият импеданс на контакта е определен от серийното съпротивление, образувано от обемната част на полупроводника, за която VA-характеристика е линейна при малка напрегнатост на електричното поле, и от импеданса на Шотки-бариерата, който е функция на концентрацията на примесите в полупроводника. Влиянието на импеданса на бариерата е много по-малко в сравнение с влиянието на обемната част на полупроводника при голяма концентрация. В този аспект теорията на омовите контакти се редуцира в изследване на условията, при които импедансът на Шотки-бариерата е малък. От теорията на приборите са известни три транспортни механизъма през такава бариера: термоемисия, термополева емисия и тунелен механизъм (*TE*, *TFE*, *FE*). Те отговарят съответно на двата възможни варианта за изготвяне на контакти: а) да бъде избран метал, който образува с полупроводника ниска потенциална бариера, или б) да се избере такава концентрация на полупроводника, че бариерата да бъде възможно най-висока и съответно най-тънка, така че да бъде осигурен тунелен механизъм.

В практиката винаги се изхожда от втория вариант, т. е. избор на повишена концентрация на примесите, особено за случая на N-полупроводник. При P-полупроводник най-ниската стойност на потенциалната бариера е получена чрез платинов силицид, при което височината на бариерата е около 0,25 eV. При стайна температура термоемисията през тази бариера дава специфично контактно съпротивление около $1{,}4.10^{-4}$ Ω/cm^2. Това е достатъчно ниска стойност за реализиране на линейна VA-характеристика. Контактите се получават чрез отлагане на метал върху полупроводника, структуриране на металния слой за получаване на метални площадки и подходящ избор на температурна обработка в зависимост от металургичните свойства на системата.

При конструирането на биполярен транзистор се получава винаги голяма концентрация на повърхностния слой на емитера, в резултат на което при този омов контакт не съществуват проблеми. В същото време при контакта на базовата област, където концентрацията е по-малка, могат да се получат по-големи контактни съпротивления.

При сложните полупроводници омовите контакти се получават обикновено чрез легиране. В зависимост от вида на материала, обемен или епитаксиален, и концентрацията на примесите се използуват различни сплави: GaAs за обемен материал (подложка)

— 250 nm In-Au (5Ω.cm GaAs—[100]), (90:10)%; 10^{-4} Ω. cm^2;

— Ge—Au (24:76)% при 380°C;

— Sn-Au (36:64)%;

за епитаксиален слой N-N^+

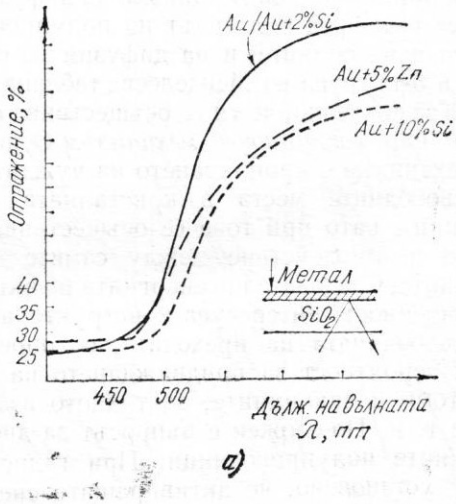
In-Au

Sn-Ag (2:98)%, 250 nm 550°C до 650°C.

$$GaP \longrightarrow Au \begin{cases} (P) - Zn,\ Cd,\ Be,\ Mg; \\ (N) - S,\ Se,\ Te,\ Si,\ Sn; \end{cases}$$

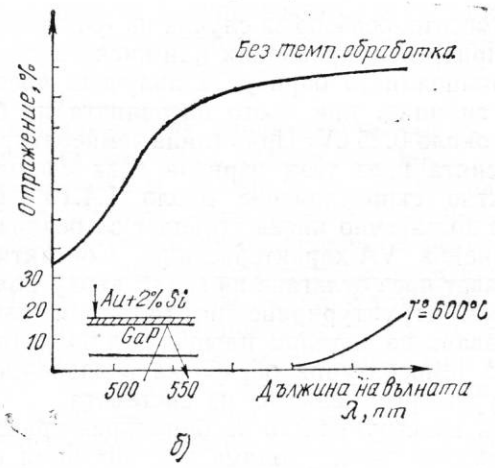
$$Ge \longrightarrow \begin{matrix} N\ Ge{:}Ag/Sb,\ 100\ nm Ag/50\ nm\ Sb/200\ nm Ag - \\ -600°C/1\ min \\ P\ Ge{:}Al - 100\ nm - 200°C \text{ и } 200\ nm - 20°C. \end{matrix}$$

Особени проблеми възникват при изготвяне на омови конкакти на някои от оптоелектронните прибори. При изготвянето на луминесцентни диоди



а)

Фиг. 9.7



Фиг. 9.7

на базата на галиев фосфид освен сложните проблеми при легирането се поставят и изисквания за получаване на по-добри оптически свойства, свързани с отражението от обратния контакт. На фиг. 9.7 *а*, *б* са показани такива възможности, реализируеми чрез изменене на съдържанието на разтворените съставки в металите, използувани за омови контакти [270, 274, 278].

9.4. ДИФУЗИЯ

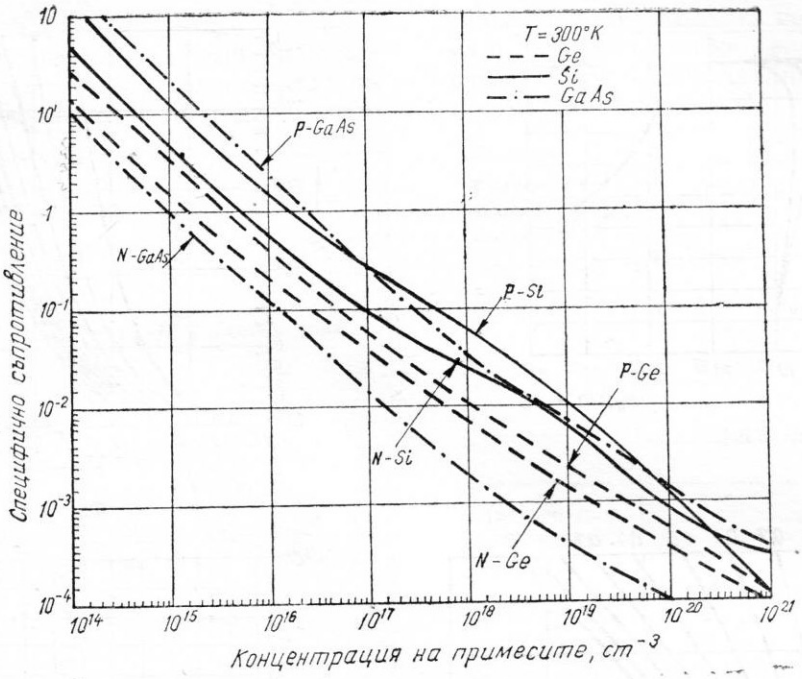
9.4.1. Механизъм на дифузията и математическо изразяване на дълбочината на преходите

Процесът дифузия е добре известен и разглеждан в много курсове. Термодинамиката на процеса се описва по начин, подобен на процесите окисление (гл.4) и епитаксия (гл. 8). За пълнота на излагания материал тук се разглеждат само основните зависимости, определящи разпределението на примесите, както и в блокова форма всички математически изрази, получени в резултат на решението на уравненията на Фик.

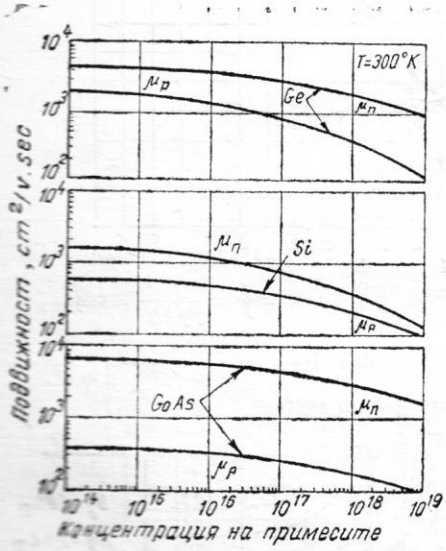
При определяне на механизма на дифузия трябва да се има пред вид видът на полупроводника. За случая на силиций и на дифузия на елементи от 3-та и 5-та група на Менделеева таблица може да се счита за доказано, че тя се осъществява с помощта на т. нар. *ваканционен механизъм*. Основата на този механизъм е проникването на чуждите атоми чрез свободните места в кристалната решетка (ваканции), като при това се осъществява непрекъснато взаимодействие между самите атоми и ваканциите. Следователно енергията на активация, която всъщност интересува конструктора и определя дълбочината на преходите, се определя от общата вероятност за придвижването на примесните атоми и ваканциите, за тяхното взаимодействие и т. н. По-сложен е въпросът за дифузията в сложните полупроводници. При галиевия арсенид е установено, че активиращата енергия за галия и арсена се различава почти два пъти. Установено е, че при дифузия на елементи в сложните полупроводници става замяна на едните или на другите атоми само в съответната част от кристалната решетка.

Голямо значение има и влиянието на различните дислокации, което е особено силно изразено при повишена плътност. В този случай напредването на дифундиращите атоми е много по-бързо, което се използува в практиката, напр. при силовите прибори. Друга особеност е влиянието на радиуса на дифундиращите примеси. Установено е [273, 274, 275], че от радиуса на атомите зависи до голяма степен дифузионният коефициент. Обяснението на това се търси в появата на вътрешни напрежения. Ако дифундират малки атоми с голяма концентрация, в кристалната решетка се получават големи напрежения. Този ефект има най-голямо значение при голяма разлика между атомния радиус и размерите на кристалната решетка. В резултат на тези вътрешни напрежения се получават дислокации, които по-нататък влияят върху характеристиките на изготвените структури.

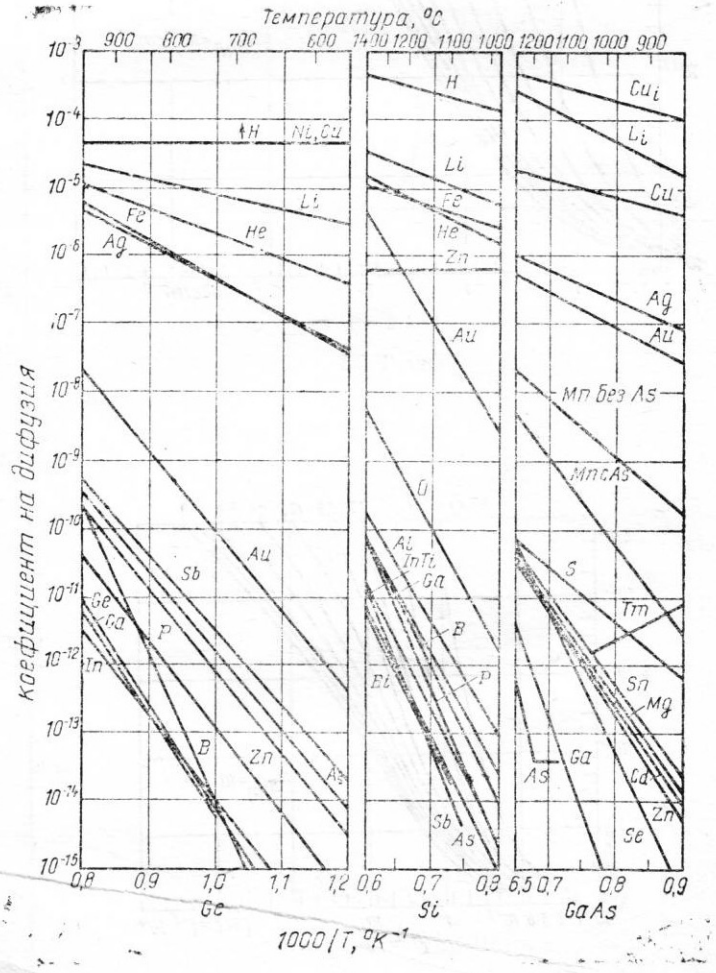
Математическото описание на дифузионния процес е известно от многобройни изследвания. Въпреки това за конструктора е трудно да избере математически апарат, описващ напълно използувания от него метод на дифузия. От една страна, трябва да се гарантира получаването на необходимата вертикална геометрия, а от друга страна, да се създадат условия за удовлетворяване на граничните условия, необходими при решаването на диференциалните уравнения. Всеки технологичен метод осигурява само с известно приближение определени гранични условия, водещи до едно или друго математическо решение. Основните математически изрази, описващи стандартните дифузионни процеси, ще бъдат дадени в блокова форма, като се използуват означенията: N — концентрация на cm^{-3}, Q — концентрация на cm^2, L_D — дифузионна дължина, x — координата, перпендикулярна на повърхността, N_0 — повърхностна концентрация, x_j, x_{EB}, x_{CB}, x_{Cn}, x_{Bmax} — дълбочина на преходи, съответстващи на максимума на разпределение в базата $\left(\frac{dN_{рез}}{dx}=0\right)$, a — градиент на разпределение, $R_s(R_0)$ — листово съпротивление, σ — средна специфична проводимост, ρ — специфично съпротивление на материала [269, 274, 276, 277]. Освен това се използуват и някои основни зависимости, както следва: [279] на фиг. 9.8.1 — $\rho(N)$ за $T=300$ K Si, Ge и GaAs (P- и N-проводимост), фиг. 9.8.2 — $\mu(N)$ за същите материали, фиг. 9.8.3 — $D(1000/T^\circ\,\mathrm{K})$ за Si, Ge и GaAs, фиг. 9.8.4 — максималната разтворимост на различни примеси в Si в зависимост от температурата. В помощ на изчисленията са фиг. 9.8.5, 9.8.6, 9.8.7 и 9.8.8, известни като криви на Ирвин, даващи възможност за определяне на зависимостта $R_\square(N)$ чрез средната специфична проводимост. Параметри са концентрацията и типът проводимост на материала, в който е извършена дифузията за случая на Гаусово разпределение. На фиг. 9.8.9 е представено изчисление на вертикалното и хоризонталното разпределение на примесите за двата случая—



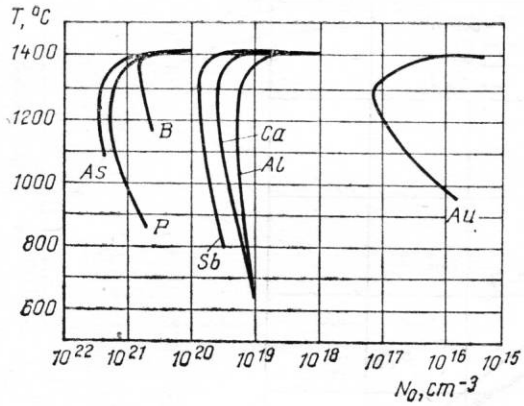
Фиг 9.8.1



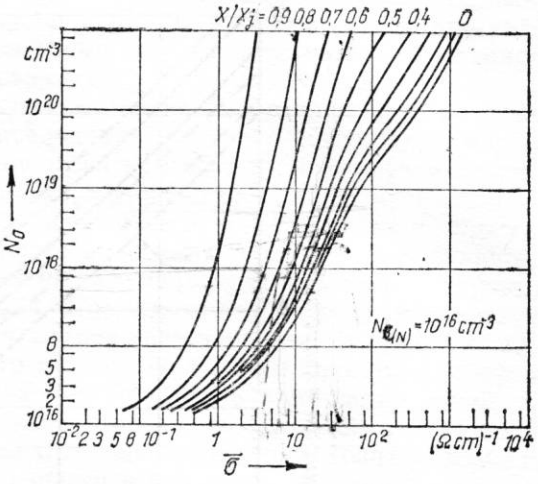
Фиг. 9.8.2



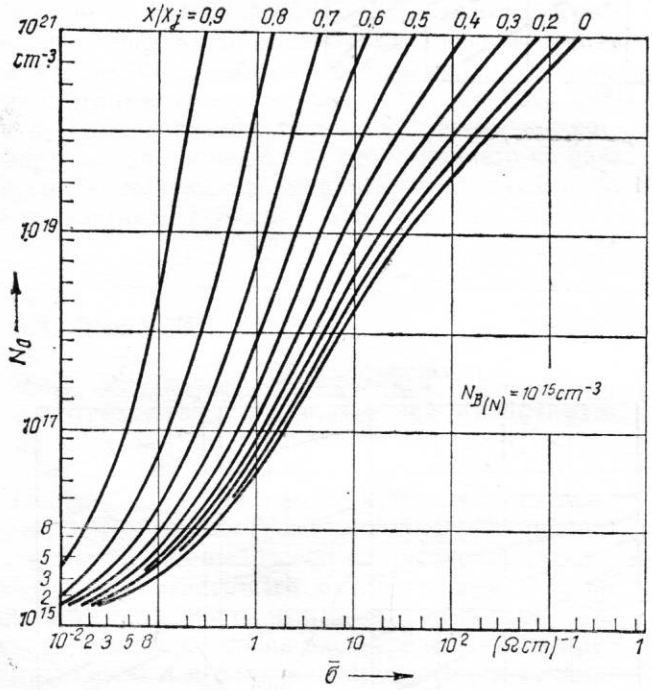
Фиг. 9.8.3



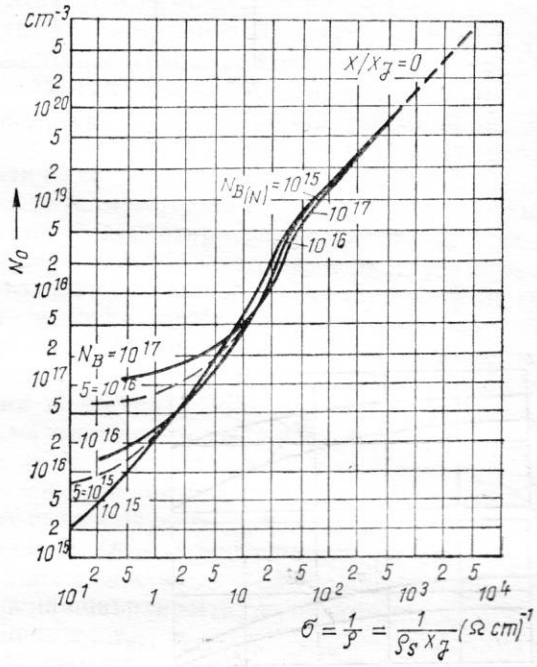
Фиг. 9.8.4



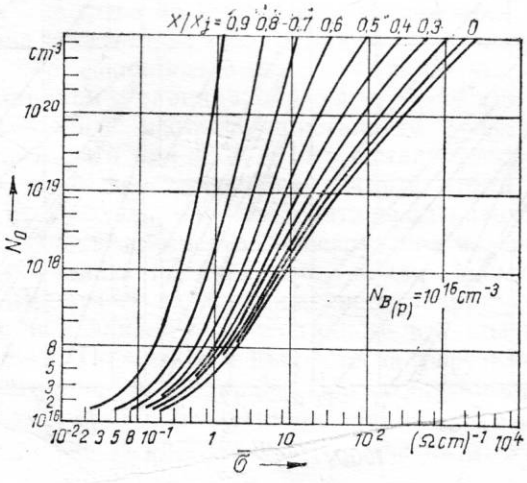
Фиг. 9.8.7



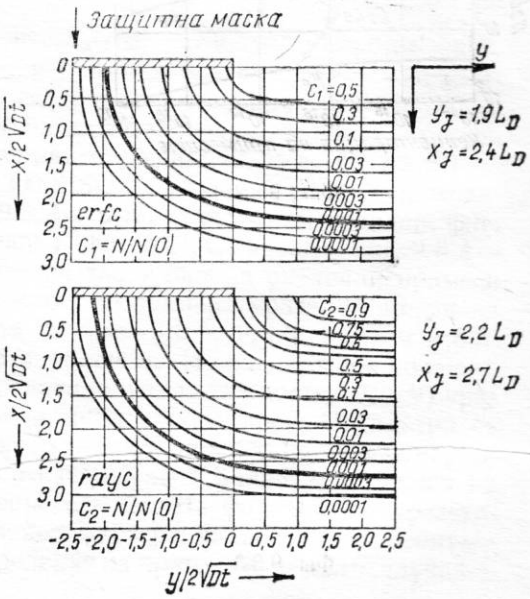
Фиг. 9.8.5



Фиг. 9.8.8



Фиг. 9.8.6



Фиг. 9.8.9

erfc и Гаус при практическото провеждане на дифузия през защитна маска от SiO_2.

От математическите изрази се вижда, че основната задача е определянето на повърхностната концентрация и на дълбочината на преходите, което е равностойно с познаването на листовото съпротивление. Представената методика за изчисляване на разпределението на примесите е в основата на изчислението на вертикалната геометрия, описано в гл. 11.

Вертикално разпределение емитер — база резултатно (сумарно) $N_E(x)$, $N_B(x)$, $N_{рез}(x)$ →

$$N_E(x)=N_{0E}\,erfc\,\frac{x}{2\sqrt{D_E t_E}}=N_{0E}\mathrm{erfc}\,\frac{x}{L_{D_E}},$$

където $L_D=2\sqrt{D\,.\,t}$, освен това

$$N_E(x)=N_{0E}\,.\exp-\left(\frac{x}{L_{D_E}}\right)^2$$

$$N_B(x)=N_{0B}\exp-\left(\frac{x}{L_{D_{B_2}}}\right)^2=\frac{Q}{\sqrt{\pi D_{B_2}t_{B_2}}}\exp-\left(\frac{x}{L_{D_{B_2}}}\right)^2$$

$$Q=2N_0\sqrt{\frac{D_{B_1}t_{B_1}}{\pi}}\ \mathrm{cm}^{-2}$$

$$N_B(x)=\frac{2N_0}{\pi}\sqrt{\frac{D_{B_1}}{D_{B_2}}\frac{t_{B_1}}{t_{B_2}}}\,.\exp-\left(\frac{x}{LD_{B_2}}\right)^2$$

$$N_{рез}(x)=N_C+N_{0E}\,erfc\,\frac{x}{L_{D_E}}-N_{0B}\exp-\left(\frac{x}{L_{D_{B_2}}}\right)^2$$

$$N_{рез}(x)=N_C+N_{0E}\exp-\left(\frac{x}{L_{D_E}}\right)^2-N_{0B}\exp-\left(\frac{x}{L_{D_{B_2}}}\right)^2$$

Дълбочина на преходите x_{EB}, x_{BC}

$x_{B_{max}}$ | $N_{B_{max}}$ | $\frac{dN}{dx}=0$ →

$$N_{0E}\,erfc\,\frac{x_{EB}}{L_{D_E}}=N_{0B}\exp-\left(\frac{x_{EB}}{L_{D_{B_2}}}\right)^2$$ → Числен метод за решение (гл. 11)

или $N_{0E}\exp-\left(\frac{x_{EB}}{L_{D_E}}\right)^2=N_{0B}\exp-\left(\frac{x_{EB}}{L_{D_{B_2}}}\right)^2$

$$x_{EB}=L_{D_{B_2}}L_{D_E}\left[\frac{\ln(N_{0E}/N_{0B})}{L^2_{D_B}-L^2_{D_E}}\right]^{1/2}$$

$$x_{BC}=L_{D_{B_2}}\sqrt{\ln\frac{N_{0B}}{N_C}}$$

$$x_{B_{max}}\ \text{за}\ N_{B_{max}}=\left(\frac{L^2_{D_{B_2}}L^2_{D_E}}{L^2_{D_E}-L^2_{D_B}}\,.\,\ln\frac{L^2_{D_E}N_{0B}}{L^2_{D_B}N_{0E}}\right)^{1/2},$$

т. е. $\frac{dN}{dx}=0$

Градиент на концентрацията a →

$$a=\frac{dN(x)}{dx}$$

за Гаусово разпределение

$$a=2\frac{x}{L_{D_{B_2}}}N_{0B}\exp-\left(\frac{x}{L_{D_{B_2}}}\right)^2-2-2\frac{x}{L^2_{D_E}}\exp-\left(\frac{x}{L_{D_E}}\right)^2$$

Листово съпротивление R_s (R_0)

$\bar{\sigma}=\frac{1}{\bar{\rho}}$ →

$$\bar{\rho}=\frac{x_j}{\int_0^{x_j}q\mu[N(x)-N_C]dx}$$

$$\bar{\sigma}=q\mu\left[\frac{1}{x_j}\int_0^{x_j}N(x)dx\right]$$

$$R_s=\frac{1}{x_j\bar{\sigma}}$$

$$\bar{\sigma}=\frac{1}{R_s x_z}=\frac{1}{R_s L_D\left(\frac{X_j}{L_D}\right)}$$

$$\bar{\sigma}=\frac{1}{x_j-x}\int_x^{x_j}\sigma(x)dx$$

9.4.2. Технологична схема на дифузионния процес

Съществуват различни варианти и методи за провеждане на дифузията. От една страна, конструкторът трябва да познава добре особеностите на структурата, а от друга страна, да познава възможностите на отделните варианти, за да може по-добре да реализира необходимото вертикално разпределение. Така например съществуват особености в дифузионния процес при биполярните прибори в сравнение с MOS приборите. Освен това между самите биполярни прибори съществуват големи различия. При силовите прибори е необходима голяма дълбочина на преходите, която изисква използуване на такива технологични схеми за дифузия, които са в състояние ефективно да осигурят необходимото разпределение. Особености съществуват и при дифузията в различните полупроводникови материали. Не е едно и също дали се прави дифузия от N- или от P-тип в силиций или галиев арсенид. При това различията не се свеждат само до различни параметри на процеса, а могат принципно да видоизменят начина на провеждане, независимо че полученото разпределение може да се описва по един и същи начин. Особеностите на дифузионните процеси са описани в гл. 11 за различните биполярни прибори, където е направено пълно изчисление на вертикалното разпределение за случая на една биполярна интегрална схема.

Особеностите на дифузионния процес, разгледани най-общо, като особености на технологичната операция могат да се сведат до: а) етапност при провеждане на дифузията; б) нанасяне или транспортиране на дифузантите; в) аномалии в разпределението на примесите. Така например общото е, че се препоръчва и предпочита дифузията да се извършва на два стадия поради възможността от по-добро контролиране на процеса и по-ниската температура на първия стадий. При едноетапната дифузия се получават гранични условия, отговарящи на *erfc*-разпределение. При двустадийната (двуетапната) дифузия в първия етап се създава тънък приповърхностен слой, богат на примеси, служещ като източник при втория стадий на дифузията. Двустадийната дифузия създава гранични условия, гарантиращи разпределението на примесите по гаусовите формули, което в много случаи е конструктивно по-изгодно от разпределението. Двустадийната дифузия е възможна при използуване на дифузия в отворена система независимо от вида на дифузанта. При сложните полупроводници отворената система не е подходяща, тъй като при тях съществуват проблеми, свързани с различното парциално налягане на съставките на сложния полупроводник, подобни на тези при епитаксията. Ето защо при тези полупроводници се използуват кварцови реактори от затворен тип, в които допълнително се поставя източник на компонента с по-голямо налягане на парите (за галиев арсенид — арсен). От направените изследвания при дифузията на цинк в галиев арсенид и галиев фосфид се забелязва [273], че се получават редица аномалии в разпределението в резултат на металургични ефекти в двукомпонентните системи.

При използуването на дифузантите са възможни няколко варианта.

Едни от най-широко разпространените методи са потапяне на подложката в разтвор на дифузанта, отлагане на дифузанта чрез вакуумно изпарение или галванична реакция, осигуряване на директен контакт между дифузанта и подложката. В тези случаи на дифузия оригиналният източник на дифузант (първичният) и локалният източник на дифузант, който се отлага на мястото върху подложката, са еднакви. При използуване на дифузия в отворена система обаче при повечето използувани методи тези източници са различни. Конструкторът трябва добре да подбира оригиналните източници на дифузант (течни, твърди или газообразни), които винаги са отделени от тази част на реактора, където се намира подложката и се провежда процесът. Обикновено транспортът се извършва чрез подходящ носещ газ. Като локални източници на дифузия се получават различни окиси на примесния елемент. Като пример може да бъде разгледана фосфорната дифузия. Източник на дифузия могат да бъдат твърдият P_2O_5 или течните фосфорен оксихлорид и фосфорен хлорид. С подходящ носещ газ и окислителен процес върху подложката като локален източник на дифузант отново ще се получи фосфорен петоокис. Могат да бъдат използувани фосфорен бромид или газообразни продукти, които направо се смесват с носещия газ без барбутьорни системи, като фосфин и някои други. Особено широко приложение при P-дифузията за силиций намира борният нитрид. При него също се осъществява депозиране на локален дифузант под формата на борен окис при подходящ температурен режим. Подложките от борен нитрид се поставят в непосредствена близост до силициевите подложки (обикновено над тях) и се загряват примерно до 1090° с подходящ температурен градиент в атмосфера от чист аргон. След необходимата температурна стабилизация на системата носещият газ се сменява с чист кислород, при което се осъществяват следните реакции:

$$BN+3\ O_2 \rightarrow 2\ B_2O_3+2\ N_2;$$
$$B_2O_3+H_2O \rightarrow 2\ HBO_2.$$

Първата реакция е основна, а втората — възможна.

От отложения борен окис по-нататък продължава същинската дифузия в силициевата подложка. Реакциите, описващи получаването на елементарен бор, са аналогични със случая на фосфорната дифузия:

$$2B_2O_3+3\ Si \rightarrow 4\ B+3\ SiO_2;$$
$$2\ HBO_2+2\ Si \rightarrow 2B+2\ SiO_2+H_2.$$

Създаването на локалните източници на дифузант върху подложката е най-критичният момент, определящ до голяма степен гарантирането на граничните условия, за които са решени уравненията на Фик. Една голяма част от аномалиите в дифузионния профил се дължат именно на от-

клонения при получаването на тези локални източници. Използуването на локални дифузанти при сложните полупроводници под формата на различни покрития намалява разликата в парциалното налягане на компонентите и гарантира подобри условия за дифузия.

Получаването на аномалии в разпределението на примесите трябва да се разглежда и като причинено от възможни отклонения в механизма на самата дифузия. Той се определя от няколко реакции, протичащи едновременно и които заедно определят резултиращото вертикално разпределение. От една страна, това е вече споменатото образуване и отлагане на локалния дифузант под формата на различни окисни покрития. По-нататък следва редукцията на тези окиси по описаните по-горе реакции, а след това същинската дифузия. В последния етап отложеното покритие играе съществена роля за гарантиране на граничното условие за едностранна дифузия. За засилване на тази му функция в този етап се провежда допълнително окисление, което винаги се практикува едновременно или непосредствено след дифузията.

При протеждане на дифузионния процес е необходимо да бъдат гарантирани следните по-важни условия — предварително насищане на кварцовия реактор, скорост на носещия газ, температура на процеса, съдържание на многокомпонентната система (носещ газ, кислород, дифузант, съдържание на остатъчни пари в носещия газ). Някои от тях са предварително известни и в такъв случай не е необходимо да се отчитат, но подценяването им може да доведе до редица аномалии.

Като причина за анормалните вертикални разпределения в полупроводниковите структури трябва да спомена и вече дискутираният проблем — създаването на механични напрежения, водещи до дислокации по време на дифузията в резултат на крайните размери на дифундиращите атоми. Освен това изследванията на някои автори показват, че напредването на атомите на дифузанта е съпроводено с тяхното йонизиране. Вследствие на това се получава електрическо поле, обосновано от по-големия коефициент на дифузия на електроните и дупките, което може сериозно да повлияе на вертикалното разпределение. Освен това известни са и някои други конструктивни проблеми, като например потъването на базата под емитера и съществуването на електрически неактивни дифундирали примеси. Потъването на базата под емитера в резултат на емитерната дифузия е резултат на изменението на дифузионния коефициент на борните примеси на базата в NPN транзистора под влияние на настъпващия фронт от фосфорни атоми. Това изменение може да бъде както за сметка на йонизирането на фосфорните атоми, така и за сметка на възникването на допълнителни механични напрежения. Във всеки случай конструктивно винаги трябва да се стремим емитерната дифузия да бъде по възможност по-къса, т. е. да се провежда при по-висока температура или на по-малка дълбочина. Това не винаги е възможно, тъй като системата от държател ладия и пластини винаги изисква определено време за постигане на равновесни условия. Някои автори считат, че в случая може да се дефинира един общ дифузионен коефициент от вида:

$$D_{\text{еф}} = \frac{N_{E_0} + N_{B_0}}{\frac{N_{E_0}}{D_B} + \frac{N_{B_0}}{D_E}},$$

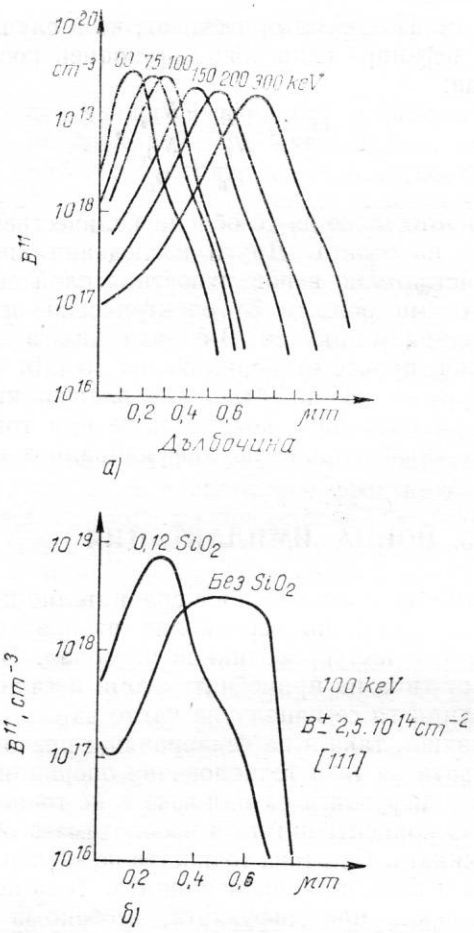
чрез който може да се обясни количествено потъването на базата. Други изследвания показват, че действително в повърхностния слой съществуват големи области от електрически неактивни дифундирали примеси. В случая помага един темперираш процес от порядъка на 10 min при температури от около 900°C във влажен кислород. Експериментално е доказано, че при това става пълно активизиране на дифундиралите примеси.

9.5. ЙОННА ИМПЛАНТАЦИЯ

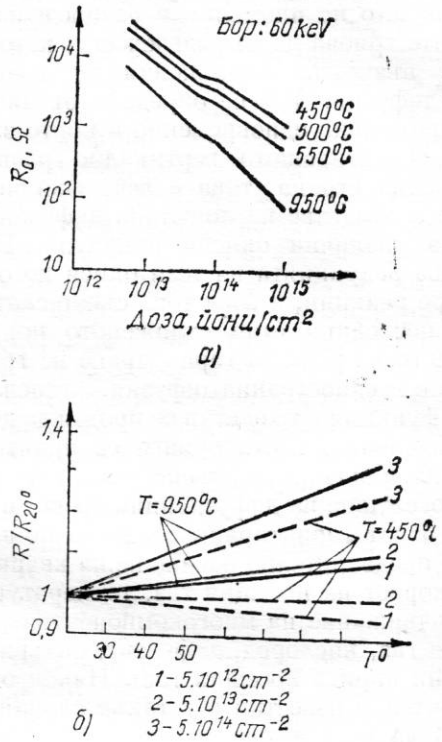
Йонната имплантация е сравнително нов метод за получаване на вертикално разпределение от примеси в полупроводников материал. В зависимост от типа на примесните атоми и тяхната концентрация тя се използува както за създаване на изправящи, така и на неизправящи преходи. Предимствата на тази технологична операция в сравнение с дифузията са най-вече в по-точното задаване на концентрацията в необходимата област на подложката. При това точността не зависи от стойността и вида на концентрацията. Това не винаги е възможно при дифузията, особено за случая, когато трябва да се получат по-малки повърхностни концентрации (P-изолиращата област в CMOS техниката или полевия транзистор с PN преход). Освен това йонната имплантация може да се извършва с екраниращи маски и през изолиращи покрития. Такава маска може да представлява гейтът на един полеви транзистор с изолиран затвор, което позволява чрез йонната имплантация да бъдат конструирани структури с нищожни капацитети от препокриване.

С помощта на йонната имплантация могат да бъдат реализирани и високоомни съпротивления. Друго важно приложение на йонната имплантация е стабилизирането на силициевия двуокис при MOS транзисторите, в резултат на което се получава структура, издръжлива на рентгеново лъчение. Това е от голямо значение за приложението ѝ за специални нужди. Известно е [271, 272, 275], че има йонна имплантация на алуминиеви йони в окиса под затвора, с което се гарантира стабилно прагово напрежение в N-каналните транзистори. Възможно е също така и имплантиране на метални йони, в областите на контактните площадки, като се избират метали, осигуряващи голяма концентрация на вграждане. Широко приложение намира йонната имплантация и при изследване на самите преходи. Чрез йонно разпрашване и спектроскопичен анализ е възможно изследването на полупроводниковата подложка в дълбочина и определянето на концентрацията на примесните елементи.

При йонната имплантация се получават кон-



Фиг. 9.9



Фиг. 9.10

центрационни профили, показани на фиг. 9.9 *а* [275]. Разпределението на атомите е по-различно от това при дифузията и се дефинира с дълбочината на максимума, с широчината му и с пълно гаусово математическо описание на разпределението. Дълбочината и широчината зависят от енергията на йоните, като те растат с увеличаване на енергията. В съвременната полупроводникова техника са известни данни за тези параметри на различни акцепторни и донорни примеси в силиций. На фиг. 9.9 *б* е показано влиянието на покритие от силициев двуокис при провеждане на йонна имплантация върху разпределението на примесите.

Съществен недостатък на йонната имплантация са големите разрушения в кристалната решетка, получавани за сметка на отдаването на кинетичната енергия от йоните. Тези механични увреждания трябва да бъдат отстранявани чрез подходящо темпериране за гарантиране на нормална подвижност. Обратно, чрез различна степен на възстановяване на последната може да бъде постигната различна стойност на листовото съпротивление на имплантираните съпротивления. На фиг. 9.10 *а* е показана такава възможност при следните параметри на йонната имплантация [271]:

Дозиране — $(5.10^{12} \div 10^{15})$ cm^{-2};
$R_{\square}$ — $100\Omega \div 35$ kΩ;
$T°$ на обработка — 450°C÷950°C.

Кривата при 950°C отговаря на конвенционалната имплантационна техника. Значението на параметрите на йонната имплантация може да се забележи и по температурния коефициент на имплантираните съпротивления. Както е известно (вж. гл. 11), дифузионните съпротивления притежават положителен температурен коефициент, силно зависещ от стойността на листовото съпротивление и геометричните размери. При йонноимплантираните съпротивления съществуват различни влияния върху температурния коефициент, който може да бъде както близък до нулата, така и отрицателен и положителен. На фиг. 9.10 *б* е показано значението на температурата на темперираща процес върху стойността на коефициента. В зависимост от енергията на йоните и температурата на термообработката може да се получи различно изменение. Подобна зависимост показва и линейността на имплантираното съпротивление, като чрез частично или пълно възстановяване на подвижността могат да бъдат реализирани различни стойности и зависимости във волт-амперната характеристика на съпротивлението.

За реализиране на Р-изолиращата област в CMOS процесите, както и за получаване на имплантирани области за сорса и дрейна, широко се използува в различни варианти йонната имплантация. Примерни режими за получаване на CMOS схеми са следните [271, 274, 275]:

— B^{11} — имплантация ($N_{\square}=3.10^{13}$ cm^{-2}, $E=65$ keV) за Р-вана, съпроводена от последваща дифузия;

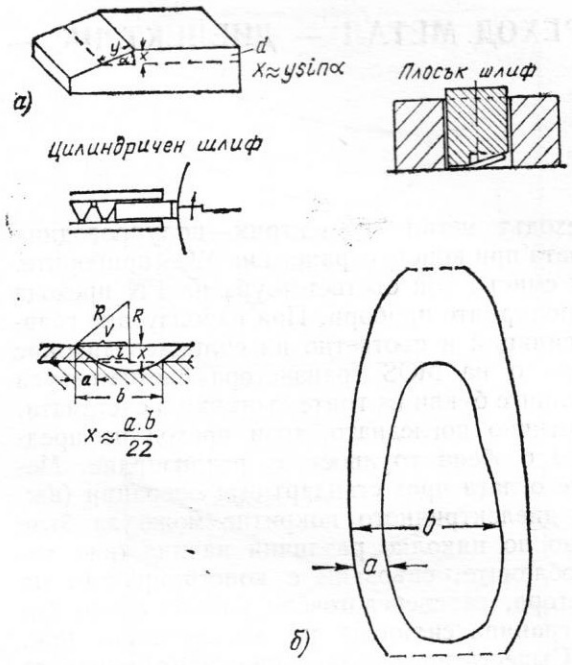
— B^{11} — имплантация за прагово напрежение

на P-каналния MOS транзистор (50 keV, $3.5.10^{12}$ cm^{-2}).

Важна особеност е комбинацията, при която имплантацията се използува като първи, а дифузията като втори стадий. По този начин се гарантира по-добра хомогенност на листовото съпротивление.

9.6. Контрол на параметрите на получените преходи

Основните параметри, необходими за конструкцията на полупроводниковата структура по отношение на преходите, са: листово съпротивление, дълбочина на преходите, странична дифузия и повърхностна концентрация. От показаните по-горе фигури и математически изрази се вижда, че тези параметри зависят силно един от друг. Важен параметър е определянето на вертикалното разпределение, за което също съществуват различни методи. На фиг. 9.11 *а*, *б* са показани различни възможности за изготвяне на шлифове, позволяващи с подходяща химична обработка (вж. гл. 3) определянето на дълбочината на преходите [270]. Такова измерване, съчетано с четирисондов метод за определяне на листовото съпротивление на повърхността на дифундирания слой, гарантира в голяма степен определянето на вертикалното разпределение на примесите. Съществуват редица алгоритми, позволяващи



Фиг. 9.11

чрез *CV*-измервания да се определи разпределението на примесите. Обикновено чрез подходящо съчетание на различните методи се постига и най-голяма увереност в точността на измерването.

ГЛАВА 10

ПРЕХОД МЕТАЛ — ДИЕЛЕКТРИК — ПОЛУПРОВОДНИК

Преходът метал—диелектрик—полупроводник е основата при конструирането на MOS приборите. В този смисъл той съответствува на PN прехода при биполярните прибори. При използуване главно на силиций и съответно на силициев двуокис означението на MOS транзистора съответствува на началните букви на трите съставки в системата. Технологично погледнато, този преход не представлява особена трудност за реализиране. Металът се отлага чрез стандартните операции (вж. гл. 6); диелектричното покритие може да бъде получено по няколко различни начина (вж. гл. 4). Проблемите, свързани с конструирането на транзистора, са съсредоточени главно около фазовата граница силициев двуокис—силиций (вж. гл. 4). Съществено значение при конструирането на прехода има реализирането на минимална плътност на повърхностните заряди на фазовата граница, минимални заряди в силициевия двуокис и използуването на поликристален силиций вместо метал за получаване на по-малка разлика в отделителната работа между метала и полупроводника. Този преход може да се използува за съхраняване на информация и конструиране на полупроводникови памети. В тези памети намират приложение всички последни достижения в областта на технологията и теорията на елементите. Нещо повече, някои от проблемите, възникнали в полупроводниковата техника и теоретично изучени с цел отстраняването на нежелани ефекти в производството, биват по-нататък развити и приложени точно в областта на паметите. Такъв е случаят с използуване на големината на електричните заряди на фазовата граница диелектрик—полупроводник. Изучаването на повърхностните явления създава предпоставки за широко приложение на полупроводниковата техника при създаване на памети.

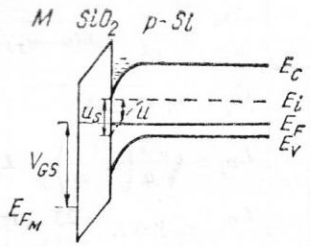
10.1. MOS КОНДЕНЗАТОР

Тъй като проблемите на полевия ефект и принципът на действие на полевите транзистори са предмет на други курсове, тук са разгледани само конструктивните особености на MOS кондензатора като основен елемент в полевия транзистор с изолиран гейт. Проблемите заедно с графичното представяне са разгледани цялостно в [280]. В математическия апарат, поместен подолу в блокова форма, са показани основните зависимости между електричните параметри на прехода метал—силициев двуокис—полупроводник и конструктивните параметри на структурата. При тези разглеждания са използувани следните означения:

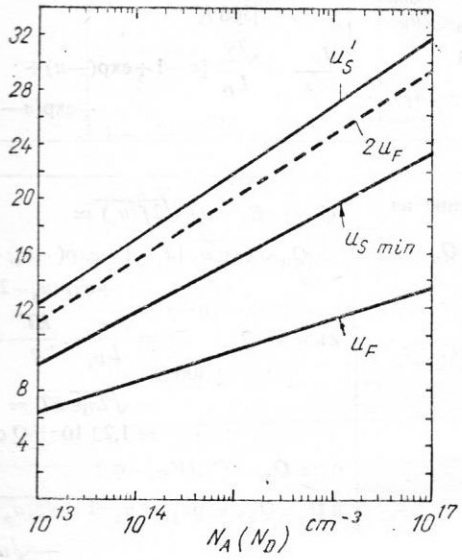
$C_{ок}$ — капацитет на изолирания слой; C_{MOS}, C — капацитет на обемния заряд в полупроводника; $C_{s\,пл\,д}$ — капацитет при плоски дъна на валентните зони; L_D, L_{Di} — дебаеви дължини; Q_0 — константа; Q_S — общ индуциран заряд; $Q_п$ — подвижни заряди в инверсния слой; $u=\frac{\varphi}{kT/q}$ — нормиран потенциал; $u_s=\frac{\varphi_s}{kT/q}$ — повърхностен потенциал; $u_F=\frac{\varphi_F}{kT/q}$ — Ферми-потенциал; V_{GS} — напрежение между гейта и подложката(полупроводника), $V_{плд}$ — напрежение между гейта и подложката при плоски дъна; X_0 — дебелина на SiO_2; $x_{инв}$, $x_{об\,з}$ — дълбочина на инверсната, съответно обедняната област; $\varphi_{м\,пол}$ — работа на излитане.

В първия блок се изчисляват потенциалните отношения в зоната с обемен заряд за случая на „идеалния“ полеви ефект. Моделът, използуван при изчислението, е показан на фиг. 10.1. За бързи конструктивни пресмятания на фиг. 10.2 са представени графично някои от зависимостите за u_s', u_{smin}, u_F. Във втория блок на базата на изчислените потенциали се задават основните зависимости, определящи зарядите Q_0, Q_s и Q_n. На фиг. 10.3 са показани нормираните отношения Q_n/Q_0 и Q_s/Q_0 в зависимост от u_s в типична област от практиката. Следваща стъпка е изчислението на капацитетите, характерни за MOS структурата. Имат се пред вид стойностите, свързани с „идеалната“ CV-характеристика. На фиг. 10.4*а*, *б*, *в* и *г* са показани графично някои от тези зависимости. Самата „идеална“ CV-крива е показана на фиг. 10.5 с плътна линия. Величините ΔV_{GI} и ΔV_{GA} зависят от концентрацията и са показани на фиг. 10.6 *а*, *б*. На нея са означени всички характерни стойности на потенциала и капацитета. В следващия блок се изчислява дълбочината на обедняната област и инверсния канал, като графично зависимостите са представени на фиг. 10.4 *б*.

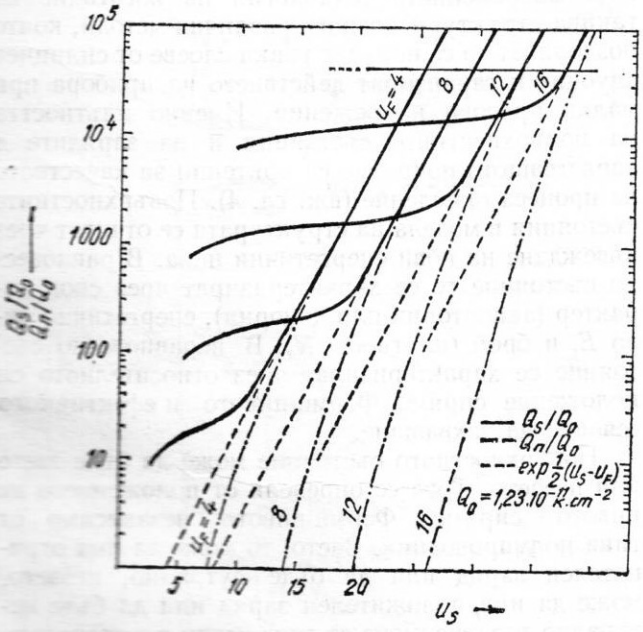
Широко разпространен метод за изучаване на електронните свойства на повърхността е измерването на реалната *CV* крива. Според дефиницията C_{MOS} може да се измери, като към постоянното напрежение V_{GS} се приложи променлива съставка. Различават се три случая: а) *Nf* — измерване с ниска честота, при което може да се отчете влиянието на подвижните заряди в инверсионния слой; б) *Hf* — измерване с висока честота, при което тези носители не могат да „реагират“; в) ⌋⌈⌊ импулсно измерване, при което се създават неравновесни условия и дълбоко обедняване. В зависимост от конструктивните параметри на MOS кондензатора, между които са зарядите в изолиращия слой и повърхностните състояния, се определя стойността



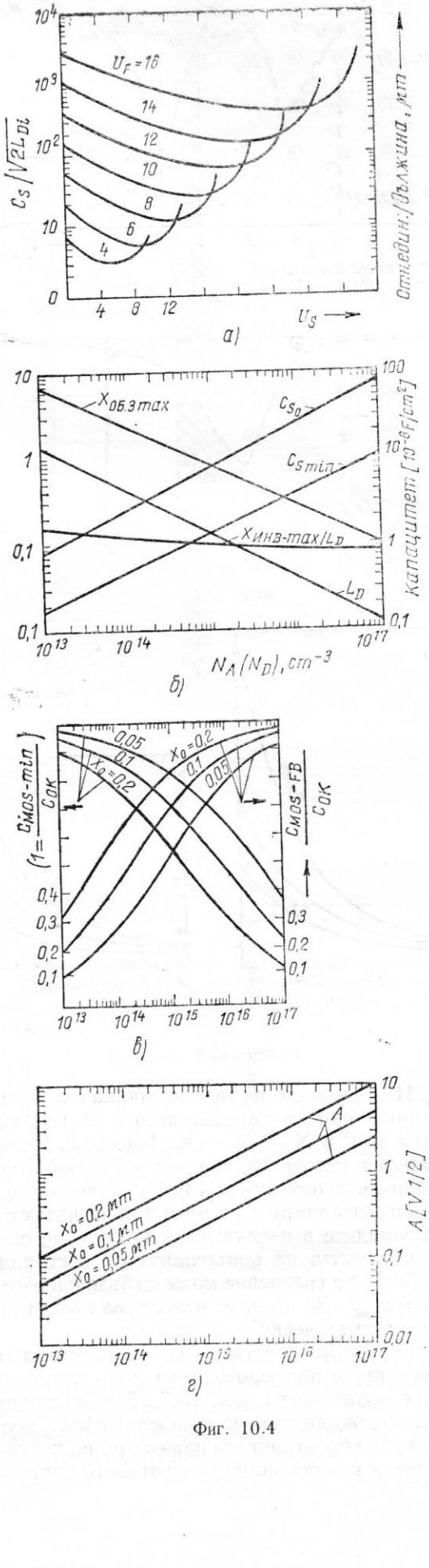
Фиг. 10.1



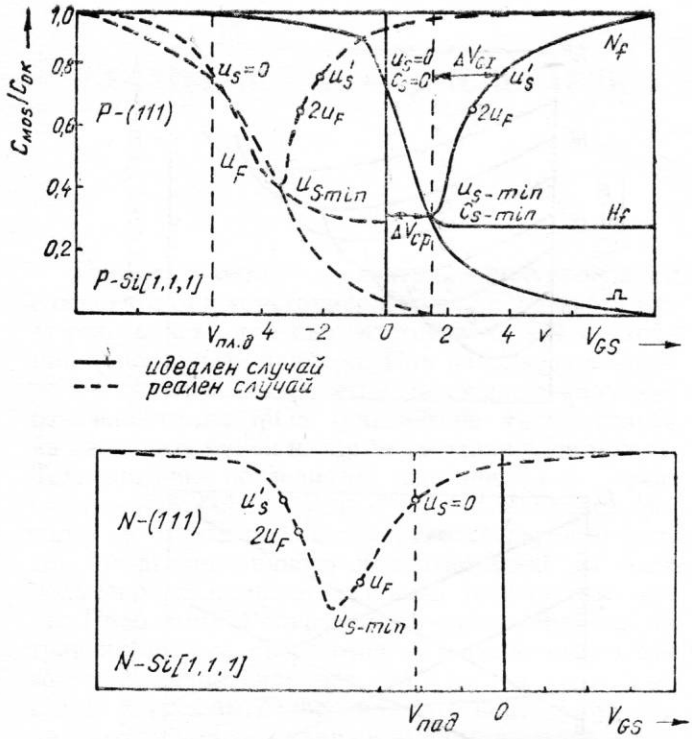
Фиг. 10.2



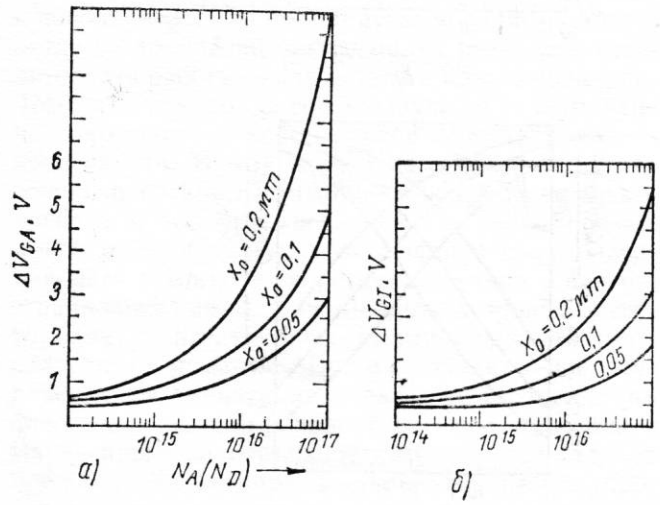
Фиг. 10.3



Фиг. 10.4



Фиг. 10.5



Фиг. 10.6

на $V_{пл\ д}$. Изчислението на тази величина е показано в последния блок, а определянето ѝ от реалните CV криви за P и N — Si — на фиг. 10.5. Самите измервателни методи са предмет на лабораторно упражнение и са описани в [43]. От сравнението на реалната и „идеалната" CV крива при позната стойност на зарядите в изолатора може да бъде определена плътността на повърхностните състояния. Най-удобно това сравнение може да бъде направено за $u_s=0$ и $u_{s\,min}$. За целта се използува последният блок от математическите зависимости.

Екраниращото действие на състоянията на повърхността на полупроводника под силициевия двуокис е показано на фиг. 10.7. Тези състояния са допълнително явление към полевия ефект, което се отразява на електричните параметри на полевия транзистор и по-специално на праговото напреже-

Потенциал в зоната с обемен заряд

$u, \frac{du}{dx}, u_{s\min}$

$u'_s \mid C_s = C_{пл\ д}$

$$\frac{d^2u}{dx} = \frac{1}{L_{D_i}^2}[\mathrm{sh}(u-u_F)+\mathrm{sh}(u_F)]$$

$$N_A = 2n_i \,\mathrm{sh}\,(u_F)$$

$$L_{D_i} = \sqrt{\frac{kT}{q}\left(\frac{\varepsilon}{2qn_i}\right)}, \quad L_D = \frac{L_{D_i}\sqrt{2}}{\sqrt{\exp u_F}}$$

$$L_{D_i} \mid_{s_i,\ 300\ K} = 23 \cdot 10^{-4}\ \mathrm{cm}$$

$$\frac{du}{dx} = \frac{kT/q}{L_{D_i}}\sqrt{2f(u)}$$

$$f(u) = \mathrm{ch}(u-u_F) - \mathrm{ch}(u_F) + u\,\mathrm{sh}(u_F)$$

$$u_F \mid_{300\ K}^{N_A \geq 10^{13}\ \mathrm{cm}^{-3}} \geqq 4$$

$u_{s\min} \rightarrow C_{s\min} \mid u_F, (N_A)$

$(2u_{s\min} - 4) \approx \approx \exp(2u_F - u_{s\min})$

$u_F < u_{s\min} < 2u_F$

$\sqrt{2u'_s - 3} \approx \approx \exp(u'_s - 2u_F)$

$$\frac{du}{dx} \approx \frac{\sqrt{2}}{L_D}[u-1+\exp(-u)+\exp(u-2u_F)]^{1/2}$$

Изчисление на заряди Q_s, Q_0, Q_n

$$Q_s = \varepsilon E_s = Q\sqrt{2f(u_s)} \approx$$

$$\approx Q_0\sqrt{\exp u_F}[u_s - 1 + \exp(-u_s) + \exp(u_s - 2u_F)]^{1/2},$$

където $Q_0 \mid_{300\ K} = \frac{\varepsilon}{L_{D_i}} \cdot \frac{kT}{q} = \sqrt{2n_i\varepsilon' kT} \approx 1{,}23\ 10^{-11} Q\ \mathrm{cm}^{-2}$

още $Q_s = C_{ок}(V_{Gs} - \varphi_s)$

и $Q_n \approx Q_0\sqrt{\exp u_F}[\sqrt{u_s - 1 + \exp(u_s - 2u_F)} - \sqrt{u_s - 1}]$

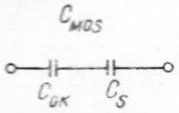
за $u_s \geqq 4$

$u_F \geqq 4$

ние. Съвременната технология на изготвяне на такива структури познава различни методи, които позволяват да се получат тънки слоеве от силициев двуокис и гарантират действието на прибора при малки прагови напрежения. Именно плътността на повърхностните състояния и на зарядите в израстващото покритие са критерии за качеството на процеса окисление (вж. гл. 4). Повърхностните състояния в модела на структурата се отчитат чрез въвеждане на нови енергетични нива. В равновесно състояние те се характеризират чрез своя характер (акцепторни или донорни), енергетично ниво E_t и брой (плътност) N_t. В неравновесно състояние се характеризират чрез относителното си положение спрямо Ферми-нивото и ефективното сечение на захващане.

Повърхностното състояние може да бъде заето или незаето. Това се определя от положението на нивото спрямо Ферми-нивото независимо от типа полупроводник. Заето, то може да има отрицателен заряд или да бъде неутрално, незаето, може да има положителен заряд или да бъде неутрално в зависимост от това, дали е акцепторно или донорно ниво (аналогично на примесните атоми). Зареденото акцепторно ниво има отрицателен, а зареденото донорно ниво — положителен

Изчисление на капацитети C_s, $C_{s\,пл\,д}$, $C_{s\,min}$, C_{mos}, $C_{ок}$, $C_{mos\,min}$ $C_{mos\,пл\,д}$



$$C_s = \frac{q}{kT} \cdot \frac{\partial \cdot Q_s}{\partial u_s} =$$

$$= \frac{\varepsilon}{\sqrt{2}\,L_{D_i}} \cdot \sqrt{\exp u_F} \cdot$$

$$\cdot \frac{1 - \exp(-u_s) + \exp(u_s - 2u_F)}{\sqrt{2[u_s - 1 + \exp(-u_s) + \exp(u_s - 2u_F)}}$$

$$C_{s\,пл\,д} = \frac{\varepsilon}{\sqrt{2}\,L_{D_i}} \sqrt{\exp u_F} = \frac{\varepsilon}{L_D}$$

$$\left.\frac{\varepsilon}{\sqrt{2}\,L_{D_i}}\right|_{S_i,\ 300\ \mathrm{k}} = 305\ \mathrm{pF \cdot cm^{-2}}$$

$$C_{MOS}^{-1} = C_{ок}^{-1} + C_s^{-1}$$

$$\frac{C_{mos\,пл\,д}}{C_{ок}} = \left(1 + \frac{C_{ок}}{C_{s\,пл\,д}}\right)^{-1}$$

$$1 - \frac{C_{mos\,min}}{C_{ок}} = \left(1 + \frac{C_{s\text{-}min}}{C_{ок}}\right)^{-1}$$

 още $V_{GS} = \dfrac{Q_s}{C_{ок}} + \varphi_s$,

където $\dfrac{Q_s}{C_{ок}} = A\sqrt{\dfrac{kT}{q}}\,[u_s - 1 +$

$+ \exp(-u_s) + \exp(u_s - 2u_F)]^{1/2}$,

$$A = \frac{Q_0}{C_{ок}} \sqrt{\frac{\exp u_F}{kT/q}} = \frac{1}{C_{ок}} \sqrt{2\varepsilon q N_A}$$

Дълбочина на обедняната зона $x_{об\,з}$ Дълбочина на инверсната зона $x_{инв}$

$$x_{об\,з} \approx L_D \sqrt{2u_s} = \sqrt{\frac{\varepsilon}{qN_A}(2\varphi_s)},$$

за $2 \leq u \leq 2u_F$ и $\dfrac{du}{\sqrt{u}} \approx \dfrac{\sqrt{2}\,dx}{L_D}$

$$\left. x_{об\,з\,max}\right|_{\varphi_3 = 2\varphi_F} = 2\sqrt{\frac{\varepsilon\varphi_F}{qN_A}} = 2L_D\sqrt{u_F}$$

$$x_{инв} \approx L_D(\sqrt{4u_F} - \sqrt{3u_F}) = 0{,}27 L_D \sqrt{u_F}$$

за $u - 2u_F \geq 2$

$$x_{инв\,max} \approx \frac{L_D}{2\sqrt{u_F}} \ln(8u_F)$$

$$\frac{x_{инв\,max}}{x_{об\,з\,max}} \approx 0{,}14 + \ln\frac{(8u_F)}{4u_F}$$

$V_{пл\,д}$ и N_t за Al—SiO_2—Si

$$\varphi_{м\,пол} = 0{,}4 \pm \varphi_F,\ \mathrm{V},$$

т. е. $\left.\varphi_{м\,пол}\right|_{p\text{—}Si} > 0$

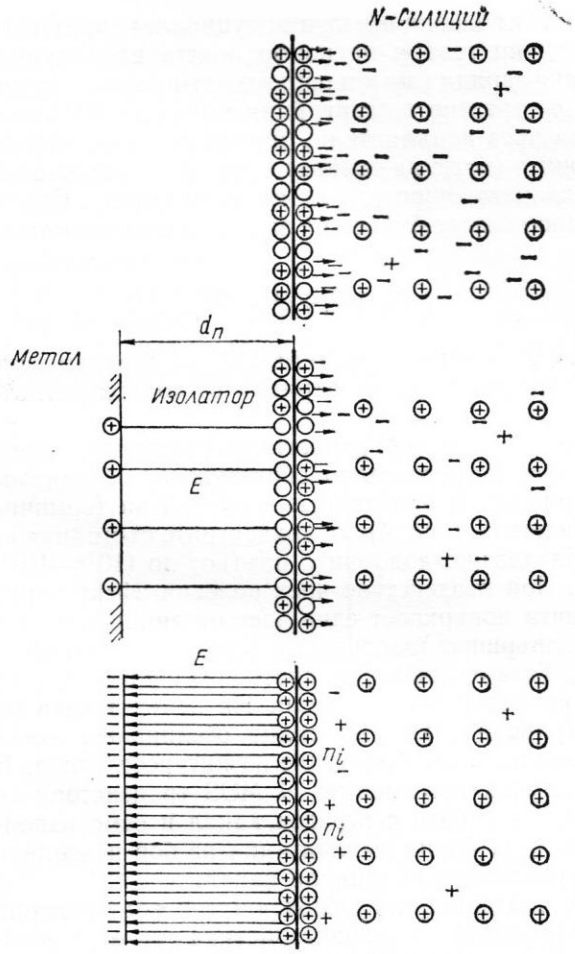
$$\left.\varphi_{м\,пол}\right|_{N\text{—}Si} \begin{matrix} > 0 \\ < 0 \end{matrix}$$

$$V_{пл\,д} = -\left[0{,}4 \pm \varphi_F + \frac{Q_{ок}}{C_{ок}} + \frac{Q_{st}}{C_{ок}}\right],$$

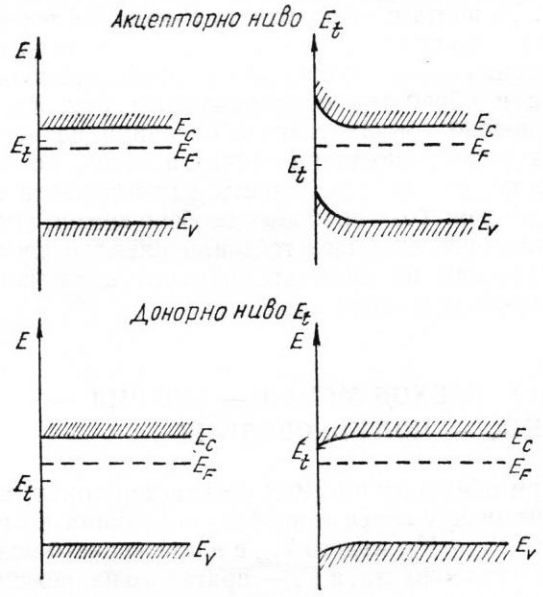
където $Q_{ок} = (3 \cdot 10^{-8} \div 5 \cdot 10^{-8})\ \mathrm{C \cdot cm^{-2}}$

и $Q_{st} = qN_t$,

т. е. $\left.V_{пл\,д}\right|_{\begin{matrix} P\text{—}Si \\ N\text{—}Si \end{matrix}} < 0$



Фиг. 10.7



Фиг. 10.8

заряд. Разликата между двете е, че акцепторното ниво е заето, а донорното не е. На фиг. 10.8 са показани дискретно-повърхностни състояния и тяхното влияние върху дъната на валентните зо-

ни. Освен полевия ефект и индуцираните чрез него електрични товари на повърхността на полупроводника заряди има и в повърхностните състояния. Това е отразено в енергийния модел на MOS системата чрез допълнително изкривяване на дъната на зоните (може да съвпада и да не съвпада с изкривяването, породено от полевия ефект). Следователно общият баланс на зарядите в системата за нулев заряд в окиса е

$$Q_M+Q_s+Q_{st}=0,$$

където Q_M е зарядът на гейта; Q_s — зарядът в полупроводника; Q_{st} — зарядът в повърхностните нива.

Зарядите в повърхностните състояния предизвикват самостоятелно обогатяване, обедняване и инверсия. В практическия случай на термично окисление (вж. гл. 4) повърхностните състояния са преобладаващо донорни с плътност до (10^{10}—10^{11}) cm^{-2}. При въздействие чрез полевия ефект върху реалната повърхност една част от линиите на полето завършват (започват) в тези състояния (фиг. 10.7). Това означава, че праговото напрежение на тази структура е по-голямо. На повърхността на P-полупроводника има силно обедняване, което може да води до образуване на инверсен канал. В този случай изградените N MOS транзистори се получават винаги с вграден канал и само използването на йонна имплантация на бор позволява да се реализира индуциран канал.

За създаване на необходимата волт-амперна (волт-фарадна) характеристика е необходимо в технологичната схема да се предвидят технологични операции, които минимизират зарядите в тези повърхностни състояния и самия окис. За целта в стандартната P-канална технология се използува стабилизиране чрез отлагане на фосфорно-силикатно стъкло или комбинирано окисление и обработка с хлороводород (вж. гл. 4). Обикновено допълнителните операции не усложняват съществено технологичната схема, но може да се твърди, че окислението е най-важната операция в нея. Този проблем е особено важен, когато се използува силициев гейт или няколко слоя от поликристал на силиция, какъвто е случаят с полупроводниковите памети.

10.2. ПРЕХОД МЕТАЛ — НИТРИД — ОКИС — ПОЛУПРОВОДНИК

При обикновения MOS транзистор токът, който тече между сорса и дрейна, е функция на разликата $V_{GS}-V_T$, където V_{GS} е напрежението между гейта и подложката, а V_T — праговото напрежение. В теорията на полевия транзистор праговото напрежение е постоянно и най-общо е функция на отделителната работа на разделителната повърхност, дебелината на диелектричния слой d_I, диелектричната константа ε_I, ефективната плътност на повърхностните електрични товари N_t и концентрацията на подложката $N_D(N_A)$:

$$V_T=f(d_I,\varepsilon_I, N_t, N_D).$$

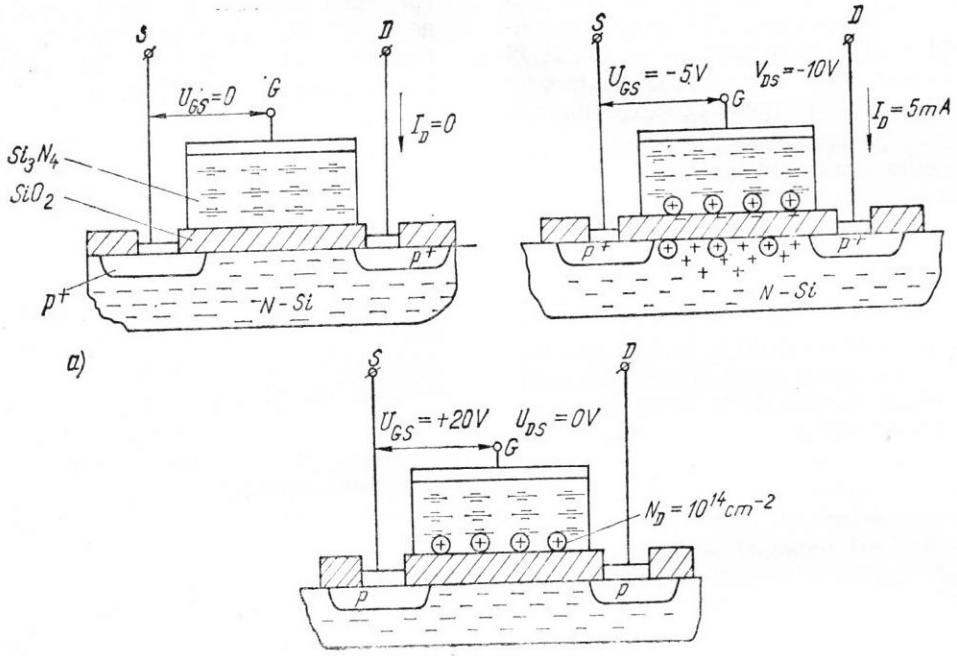
За да може да бъде използуван самостоятелно за запомняне на информация, в такъв транзистор трябва да се предвиди възможност за изменение на V_T. От споменатите по-горе величини най-подходящи за новото предназначение на транзистора са дебелината на диелектричния слой d_I и ефективната плътност на повърхностните товари. Теоретично тези възможности са добре изучени, тъй като решаването на обратната задача, а именно запазването на V_T постоянно и неговото минимизиране, беше най-трудната задача за MOS техниката. Използуването на различни диелектрични слоеве в полевите транзистори, като силициев нитрид, алуминиев окис, както и на гейт от силициев поликристал, служат за създаване на памет. Създаването на постоянна памет чрез матрици от полеви транзистори с различна дебелина на изолатора под гейта е леснореализуемо, но използуването на желана промяна на големината на електричните товари, действуващи върху полупроводниковата повърхност, е по-трудно.

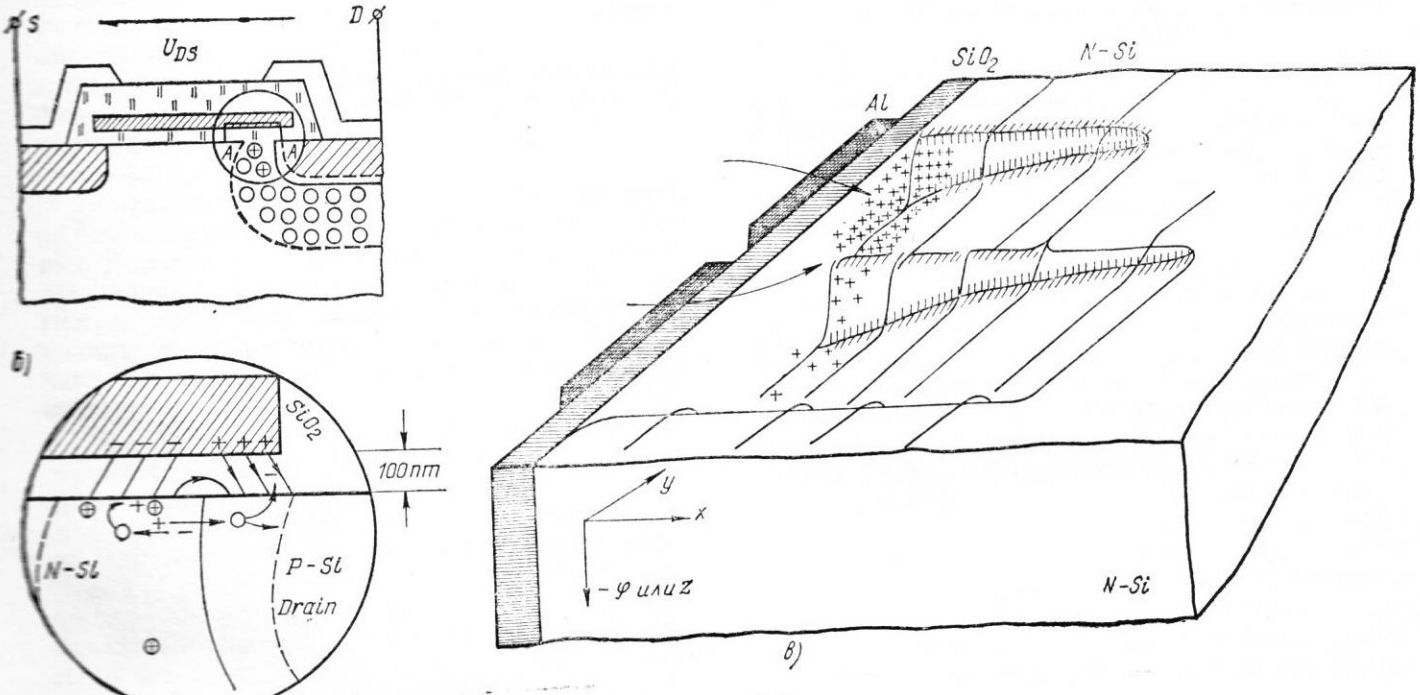
Ефективно действуващият върху повърхността електричен заряд има две съставки: една, определена от плътността на повърхностните състояния, и втора, определена от електрични заряди в изолиращия слой. Първата съставка трябва да бъде малка и постоянна. Електричният товар в изолатора зависи от големината и разпределението на обемния заряд в него. Следователно, за да се измени неговата големина, а чрез това и въздействието върху повърхността на полупроводника, трябва в изолатора да се вкарат електрони или дупки или да се получат йони. Най-добрата възможност е да се запълнят енергетичните нива или да се йонизират примесните атоми. При достатъчно голяма плътност на нивата в близост до полупроводниковата повърхност повърхностният потенциал може да се променя в широки граници, като електронните процеси протичат бързо, тъй като нивата са близко до повърхността и могат да бъдат достигнати чрез директен тунелен преход. Тази възможност за промяна на повърхностния потенциал чрез електронни процеси в изолатора или през изолатора е залегнала в теорията на полевия транзистор с двоен диелектрик, на този с потенциално плуващ гейт и в известен смисъл на зарядно свързаните MIS кондензатори.

На фиг. 10.9 *а* е показан принципът на действие на полевия транзистор с двоен диелектрик. При определено съотношение между дебелините на двата диелектрични слоя и над определено напрежение между гейта и подложката съществува възможност за протичане на ток през изолаторната система, който е много малък, но достатъчен за съхранение на информация. Характерна особеност е, че в началото токът, течащ през двата изолатора, не е еднакъв. Тъй като това противоречи на принципа на непрекъснатостта на тока в системата трябва да се получи изменение на потенциалния релеф, изразен в натрупване на електрични заряди. Това води до изменение на електричната напрегнатост в диелектричните слоеве. Важното е, че получените електрични товари, положителни или отрицателни в зависимост от

потенциалните съотношения и натрупани на фазовата граница между двата диелектрика, остават там след спиране на тока и предизвикват желаната промяна в праговото напрежение на транзистора, а това от своя страна създава възможност за получаване на повече от едно логическо ниво. Някои конструктивни и технологични данни: дебелината на окисния слой 1,5 nm, на нитридния 75 nm. Дебелината на диелектричните слоеве е отражение на оптималните съотношения между времето на записване и времето на съхранение на информацията. Особеност е необходимостта от противоположна полярност на записващия и изтриващия импулс.

Първоначално разгледаната идея за съхранение на информация е основа на теорията на полевия транзистор с потенциално плуващ гейт (фиг. 10.9*б*). Известно е, че фазовата граница поликристал—силициев двуокис е богата на уловки с акцепторен характер. Ако тези уловки се запълнят с електрони, вероятността последните да ги напуснат е много малка и зависи главно от температурата и външни йонизиращи източници. При протичане на ток между сорса и дрейна около последния се създава широка обеднена зона. Потенциалните линии са насочени така, че създават условия в зависимост от приложеното напрежение електрони да преминат





Фиг. 10.9

да се разсеят през потенциалната бариера и благодарение на свободния си пробег да достигнат до гейта и да го заредят.

Експерименталните резултати показват, че при стайна температура очакваното време за съхранение на информацията (електрични товари в гейта) е около 100 години, а при 300°C — до 10 години. Информацията може да се изтрие с ултравиолетово осветяване или рентгеново облъчване. Тези полеви транзистори могат с успех да се използуват в програмируеми постоянни памети.

Третата възможност предлагат зарядно свързаните MOS кондензатори. Особеното в случая е използуването на създадения пакет от електрически заряди. На фиг. 10.9 *в* е показана пространствено-потенциалната диаграма за случая на два MOS кондензатора. Създаденият първоначално „пакет" в първия кондензатор би се запазил само от няколко милисекунди до секунда. Разтичането на „пакета", както и причините за това са добре изяснени в теорията на полевите прибори. Ако преместим „пакета" в подходящ момент в съседния кондензатор, а след определен брой премествания го и регенерираме, ще получим възможност да го запазим. Преместването се осъществява чрез дифузия на електрически заряди, управлявана от потенциалните съотношения на гейтовете на кондензаторите. Може да се изчисли, че за преместването на един „пакет" от 10 μm широк кондензатор в друг, отстоящ на 3 μm, са необходими 10 μs. Информацията „протича" през колектор на електрически заряди. За колектор служат дрейнът и неговата верига (създадени са преместващи регистри с такт до 100 MHz и коефициент на предаване на пакетите до 99,99%).

ГЛАВА 11

КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧНИ ОСОБЕНОСТИ НА БИПОЛЯРНИТЕ ПРИБОРИ

11.1. КЛАСИФИКАЦИЯ НА БИПОЛЯРНИТЕ ПРИБОРИ

Принципът на действие на биполярните прибори почива върху използуването на електричните характеристики на един или няколко PN прехода. В някои случаи на интегралната техника този преход може да се комбинира: а) с преход метал—полупроводник (Шотки-преход) за реализиране на по-голямо бързодействие; б) с прехода метал-окис-полупроводник за получаване на полеви транзистори с изолиран затвор или MOS-конденсатори.

Главната конструкторска задача е реализирането на преходите чрез създаване на локални нехомогенности по тип проводимост и концентрационен градиент. Чрез използуване на йонна имплантация и епитаксия PN преходите могат да бъдат „вградени" в приповърхностния слой на подложката.

Първият етап в разработването е определянето на вертикалната геометрия на прибора, която задава в дълбочина разположението на преходите. Едновременно с това става и изборът на подложката (материал, тип проводимост), осигуряваща механична якост и електричен контакт към корпуса.

Следващият етап е определянето на хоризонталните размери на преходите и на всички останали участъци от структурата. На този етап от съществено значение са токът, преминаващ през преходите, и допустимата стойност на паразитните компоненти, изразяващи се в обемни съпротивления, паразитни капацитети, транзистори при интегралните схеми и др.

Обикновено конструктивната работа се дели на базата на дискретното и интегралното изпълнение. Доколкото при дискретните прибори съществуват някои специфични технологии — сплавна, силова, меза, това разделяне е обосновано. В никакъв случай обаче то не бива да се преувеличава, тъй като особеностите винаги се свеждат до отделни операции.

Чрез биполярната технология могат да се конструират диоди, транзистори, тиристори, специални прибори и интегрални схеми. Към специалните прибори се отнасят датчиците, реализирани със или без PN преход, двубазовите диоди, варикапите и др. От интегралните прибори тук са разгледани аналогови интегрални схеми и по-специално операционни усилватели, цифрови схеми със и без Шотки-диоди, конструктивно-технологичните проблеми на инжекционната логика и на някои оптоелектронни прибори.

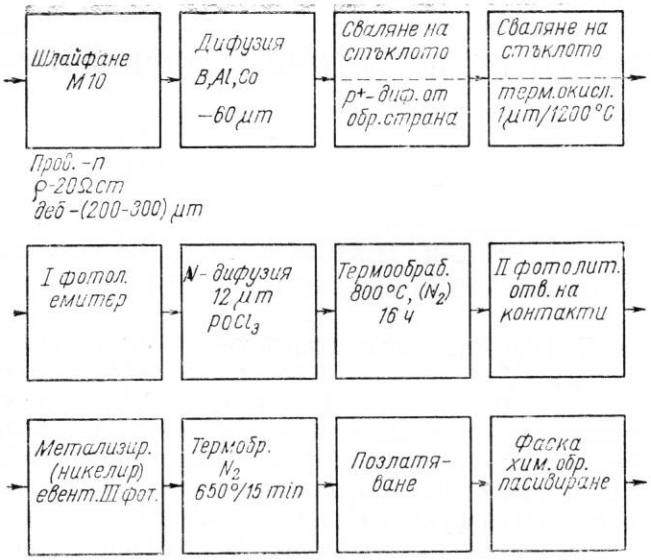
11.2. ВИДОВЕ ТЕХНОЛОГИЧНИ СХЕМИ В БИПОЛЯРНАТА ТЕХНОЛОГИЯ

При разглеждането на технологичната схема трябва да се отчетат особеностите на активните прибори. В този смисъл технологичните схеми за дискретен и интегрален планарно-епитаксиален транзистор се отличават само по операциите, свързани с изолацията. Параметрите на технологичните операции са функции на електрофизичните характеристики на транзисторите. С известни ограничения на заданието и включване на допълнителни операции стандартната планарно-епитаксиална технология може да осигури съвместимост на NPN и PNP транзистори, както и на повечето използувани в схемотехниката дискретни компоненти. Разновидностите в технологичните схеми са характерни само за групата на силовите прибори, за част от мощните прибори, изготвени на базата на мезатехнологията, и за някои по-специални прибори. Различните технологични схеми са свързани поскоро с поевтиняването на продукцията, подобряването на някои параметри, а в много случаи и с необходимостта от патентна чистота. Последният аспект придава особено голямо значение на дълбоката връзка между конструкцията и технологията в полупроводниковата техника.

Съществува голямо разнообразие в представянето на технологичните схеми. Практикува се както изразяване на последователността в промяната на вертикалната геометрия, така и изписване на реда и параметрите на операциите.

На фиг. 11.1÷11.9 са показани последователно технологичните схеми на стандартната планарно-епитаксиална технология с двойна дифузия, технологичната схема с изолация чрез колекторна дифузия *CDI*, на тримасковата технология, на изопланарната технология в съчетание с технологията *LOCOS* и *PLANOX*, на технологията „Биймлид" и технологията на изолация чрез вертикално анизотропно ецване (*V — ATE*). В сравнение със стандартната технология при последните се намалява броят на шаблоните (тримаскова) или се подобрява изолацията, или се видоизменя монтажът.

Фигурите 11.1÷11.9 са изпълнени, като е спазен възприетият цветов код: червено — P-полупроводник, синьо — N-полупроводник, жълто — SiO_2 (тънък и дебел), зелено — метализация, кафяво — силициев поликристал, оранжево — силициев нитрид. Разликата в концентрацията P-P$^+$ и N-N$^+$ е показана чрез изменение на интензивността на тона и щриховка. На всяка фигура във вертикална посока е показана последователността на операциите, изразени чрез промяната във вертикалната геометрия.



Фиг. 11.9

Стандартната схема (фиг. 11.1) има четири дифузии и осигурява изолация чрез обратно поляризиран PN преход. Същата изолация осигурява и колекторната дифузия, в случай че се използува P-епитаксиален слой (фиг. 11.2). Броят на дифузиите може да се определи по броя на създадените една в друга локални нехомогенности и изолацията. Схемата *CDI* ползува три дифузии — N^+—скрит слой, N^+—колектор и изолация, N^+—емитер. Предимствата на тази схема са спестяването на една дифузия и използуването на плитка епитаксия за базата. Още по-опростена е тримасковата технология от фиг. 11.2, специализирана за определен тип схеми и осигуряваща минимални хоризонтални размери. Специално място заема изопланарната технология. В своите разновидности тя постепенно се налага в модерната биполярна технология. Освен фиг. 11.4 *а*, където е показан принципно порядъкът на операциите, на фиг. 11.4 *б* е направено сравнение със стандартната схема. Реализирането на изолация със SiO_2 води до съществено намаление на хоризонталните размери поради липсата на страничната дифузия на изолацията. При дебелина на епитаксиалния слой 6 μm, минимален прозорец от 6×6 μm² и емитер 6×12 μm² необходимата площ на стандартния транзистор е 6100 μm², като активната площ е около 30%. Намаляването на дебелината на епитаксиалния слой до 2,5 μm води до намаление на площта до 4500 μm². Възможно е по-нататъшно редуциране на необходимата площ чрез видоизменение на емитерната дифузия и избягване на реоксидацията на емитера така, че прозорецът за дифузия и контактният прозорец да бъдат с еднакви размери. В резултат от това необходимата площ става 3500 μm². Въвеждането на изолация със SiO_2 намалява площта до 1100 μm², като 50% от нея се падат на активната част на структурата.

Известни са няколко възможности за осъществяване на изолация със SiO_2. Исторически най-стара е технологичната схема, която използува като изходен материал N-пластина. Върху него се нараства N^+-слой. Системата N^+—N се подлага на дълбоко ецване. След това получените „канавки“ се окисляват и запълват с полисилиций. Достъп до получените „островчета“ се осигурява чрез механична обработка (шлайфане и полиране) от обратната страна. В един нов вариант тази технология е развита до получаване на структурата от фиг. 11.4 *в*. Използува се *V*-образно анизотропно ецване подобно на *V-ATE*-технологията от фиг. 11.5. Изходният материал е N^+-подложка с N-епитаксиален слой. Полисилицият се отлага два пъти, като първият е високолегиран — N^+ и осигурява колекторния извод на транзистора. Сравнението с изопланарната и *V-ATE*-технологии показва, че последните са по-прости и близки до планарната технология. Основният проблем при тях е осигуряването на повърхност на равнинност на структурата в края на технологичния цикъл.

В най-новите разработки изолацията със SiO_2 се използува в епитаксиалния слой, а по-надолу се комбинира с изолация с обратно поляризиран PN преход. На фиг. 11.4 *г* са показани двете възможности за реализиране на тази комбинация. В първия случай изолацията PN преход се осигурява преди епитаксията, а във втория — след анизотропното ецване. На същата фигура са показани и различните възможни конфигурации на релефа в „канавката“ в зависимост от характера на химичната обработка. Релефът се отразява съществено върху метализацията, като полуанизотропното ецване осигурява най-оптимална конфигурация на ръбовете. В резултат на термичното окисление силицият в „канавката“ се превръща в SiO_2, което е свързано с нарастване на обема му и възстановяване на планарната геометрия.

Натрупаният опит в това отношение е довел до по-нова форма на изолация, при която се използува анодиран алуминий за изолиращ слой — A^2I. На фиг. 11.6 е показана последователността на операциите. Анодирането се извършва в сярна киселина и води до образуване на порьозен Al_2O_3 с необходимия обем за възстановяване на планарността. Скритият алуминий се използува обикновено като заземена шина. Въвеждането на анодиране при изолацията е възможно и в друг аспект. Съществуват методи за анодиране и на силиций, при което се получава порьозна област, осигуряваща 200 пъти по-голям коефициент на дифузия за фосфор и бор. Благодарение на това може да се осъществи изолация с PN преход, като се използува базовата дифузия. На фиг. 11.7 *а* е показана последователността на изпълнение. Порьозният район се създава на мястото на изолацията. Селективното анодиране се осигурява с подходящ фотолак и избор на режим.

Принципно различна е технологичната схема на технологията „Биймлид“ (фиг. 11.8). При нея също се осъществява химично ецване от обратната страна, но механичната якост се получава за сметка на дебелата метализация. Това предопределя вида на използуваните метали за гарантиране на необходимата адхезия между слоевете. В технологичната схема се налага съвместяване от обратната

страна за осъществяване на селективна химична обработка.

Намаляването на размерите на интегралните структури и на прозорците за контактуване поставя проблеми пред метализацията. Най-често използваният материал е алуминият. Добрият контакт между него и силиция се осъществява чрез температурна обработка, при което съществува реална възможност за късо съединение между базата и емитера. Напоследък се използува слой от Ti с дебелина около 0,3 μm под алуминия, който възпрепятствува взаимното разтваряне на Si и Al, като същевременно диаграмата на състояние позволява температурни обработки до 500°C. Титанът образува добър омов контакт към N^+ и P^+Si и ниска Шотки-бариера. При необходимост от висока Шотки-бариера се използува платина или паладиев силицид. Комбинацията Ti-Al е значително по-стабилна. Благодарение на добрата си адхезия към SiO_2 и Si_3N_4 алуминият продължава да се използува широко в многослойните шини. Междинната изолация от SiO_2, получен чрез разпрашване, дава добри резултати. В съвременната полупроводникова технология се използува и емитер от поликристален силиций за подобряване на ефективността на инжекцията (фиг. 11.7 *б*). В този случай N^+-дифузията се провежда през поликристала, като по този начин се постига поплитък емитер, с по-ниска концентрация и почти няма потъване на базата.

На фиг. 11.9 е показана в друг вид технологичната схема на силов прибор—тиристор. Описан е порядъкът на отделните операции. Ако се прибавят и параметрите на избрания режим, получава се съкратена технологична документация. Особеностите на тези прибори са разгледани в т. 11.7.

11.3. ПЛАНАРНО-ЕПИТАКСИАЛНИ СТРУКТУРИ

Повечето биполярни прибори, използувани в схемотехниката, са изготвени на базата на стандартната планарно-епитаксиална технология, например диодите, различните типове транзистори, датчици и интегрални схеми.

Поради голямата прилика между дискретните и интегралните структури много от конструктивно-технологичните проблеми са общи.

Съществуват различни методики за конструиране на планарно-епитаксиални прибори. В действителност не съществува някаква принципна разлика при проектирането на транзистори и диоди. Това се отнася особено за интегралните прибори, където, с изключение на допълнителните Шотки-диоди, за реализиране на диодни функции се използуват транзисторни структури. Не бива да се забравя обаче принципната разлика в начина на действие между тях и не бива формално да се смята, че транзисторът се отличава от диода само по броя на преходите.

Целесъобразно е да се разгледа методиката за конструирането на универсалния планарно-епитаксиален транзистор NPN или PNP, почиваща на базата на планарно-епитаксиалната технология (фиг. 11.1). Разделянето на приборите на високоволтови, мощни, високочестотни, бързопревключващи, нискошумящи, силови и т. н. трябва да отчита само особеностите им по отношение на някои характерни електрофизични параметри. За тяхното осигуряване може да се променят параметрите на дадена технологична операция или и методът на нейното провеждане, може да се наложи подмяна изобщо на тази операция с друга или изменение на целия технологичен ред. Това обаче не изменя общата методика на проектиране, тъй като принципът на действие на прибора винаги се запазва.

Стандартната методика за конструиране трябва да включва: а) хоризонталната геометрия (фиг. 11.10 *а*) [282, 48, 50, 51], която е изходен пункт за направата на шаблони; б) вертикалната геометрия (фиг. 11.10 *б*), която чрез листовото съпротивление, повърхностната концентрация и дълбочината на преходите определя останалите технологични операции.

За зададени параметри се избират обикновено:

$$\left.\begin{array}{l} P_{C\,max},\quad I_{C\,max},\quad V_{CB\,max},\quad V_{EB\,max} \\ f_T,\quad C_C \,\big|\, V_{CB},\quad V_{CE\,нас} \,\big|\, I_{C\,нас} = (5 \div 10)\, I_B \end{array}\right.$$

Конструктивно-технологичните параметри се определят в явен или неявен вид по следния ред [52, 53]:

N_C, ρ_N, ρ_P →

$$V_{CB_0} = 1{,}2 V_{CB_{max}}$$

$$V_{BR} = 2 V_{CB_0}$$

$$\rho_N = \frac{1}{q\mu_N N_C} \quad (\text{nP N})$$

$$\rho_P = \frac{1}{q\mu_p N_C} \quad (\text{PNP})$$

$$\left.\begin{array}{l} \mu_N \approx \mu_{N_{max}} = 1300\ \dfrac{\text{cm}^2 \cdot \text{V}}{\text{s}} \\ N \leqq 5 \cdot 10^{15}\ \text{cm}^{-3} \end{array}\right.$$

$$\mu_P \approx \mu_{P_{max}} = 450\ \frac{\text{cm}^2 \cdot \text{V}}{\text{s}}$$

x_{BC} ($d_{епит}$) →

$$x_{BC} = \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0 V_{CB_{max}}}{qN_C}} + x_{EB} + W_B$$

$V_{EB_{max}}$ →

$$V_{EB_{max}} = 0{,}8\, V_{EB_0}$$

за $R_{B_0} = (100 \div 300)\ \Omega$

$$V_{EB_0} = (5 \div 7)\ \text{V}$$

Върху определен параметър се акцентира чрез грижливо подбиране между наличните технологични операции. Да вземем за пример конструирането на планарно-епитаксиален транзистор с ниска стойност на y_{12} (за високочестотно приложение).

W_{B_0} (f_T) →

$$f_T = \frac{D_N(x_{EB}) \ln \frac{N_B(x_{EB})}{N_C}}{2\pi W_B W_{B_0}},$$

където обикновено

$$D_N(x_{EB}) \Big| \approx 7 \frac{\text{cm}^2}{\text{s}}$$

$$N_A \Big|_{x_{EB}} = 5 . 10^{18} \text{ cm}^{-3}$$

$$N_B(x_{EB}) \Big| N_C = 10^3,$$

а за квазинеутралната база W_B е изпълнено условието

$$W_B \approx 0{,}5\, W_{B_0}$$

Размери на колектора →

$$C_C = \frac{\varepsilon_r \varepsilon_0 A_C}{\Delta x_{BC}\big|_{V_{CB}}} = \frac{\varepsilon_r \varepsilon_0 A_C}{\sqrt{2\varepsilon\varepsilon_0 |V_{CB}|/qN_C}}$$

за $C_C = 0{,}8\, C_C \big|_{0V} = 0{,}8\, C_{C_0}$

$$A_C = \frac{0{,}8\, C_{C_0}}{\varepsilon_r \varepsilon_0} \sqrt{\frac{2\varepsilon_r \varepsilon_0 |V_{CB}|}{qN_C}}$$

Обикновено се избира квадрат

за $A_C = a \times a$

$$a = \sqrt{\frac{0{,}8 C_{C_0}}{\varepsilon_\gamma \varepsilon_0} \sqrt{\frac{2\varepsilon_r \varepsilon_0 |V_{CB}|}{qN_C}}},$$

където $\varepsilon_r = 12$, а $\varepsilon_0 = 8{,}85 . 10^{-14}$ F/cm

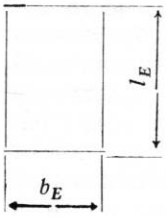
$V_{CE_{нас}}$ →

$$J_C \big| V_{CB} = 0 = (V_{CE_{\min}} - V_{EB})/\rho_C x_{BC},$$

където $V_{EB} \approx 0{,}7$ V,

а $V_{CE_{\min}} = P_{C_{\max}}/I_{C_{\max}}$

Размери на емитера →



$I_E \approx I_C$

Размерите се определят въз основа на стойността на $I_{C_{\max}}$. Има две възможности: а) определяне на площта и б) определяне на периметъра. И двата метода се използуват в практиката, като периметърът се определя от условието на Шокли — 0,16 mA/μm. Работи се винаги с необходимия запас, особено при мощните и високоволтовите транзистори. За плътността на тока се използува (400 ÷ 10 000) A/cm². Значение има и ефектът на сгъстяване на емитера, който е най-силно изразен при кръгла геометрия. Добри резултати дава и използуването на следните зависимости:

а) $I_C \Big|_{\beta_{\max}} = \frac{V_T b_E I_E}{\rho_B W_{B_0}}$ за $\frac{W_{B_0}}{l_E}(2\beta_{\max})^{1/2} > 1$;

б) $I_C \Big|_{\beta_{\max}} = V_T \frac{b_E}{\rho_B} (2\beta_{\max})^{1/2}$

за $\frac{W_{B_0}}{l_E} (2\beta_{\max})^{1/2} < 1$,

където ρ_B е средното специфично съпротивление на базата. В тези два случая изчисляването става за максималната стойност на усилването β.

При многоемитерен транзистор се използуват същите зависимости, като допълнително се отчита падът в Al-шина. За слой от 0,5 μm $R_{\square Al}$ е 0,05 Ω. Броят на емитерите и дължината им се определят от:

$$nI_{E_n} = I_E;$$

$$I_{E_n} \frac{\rho_{Al} b_E}{l_n} < V_T;$$

$$\frac{I_{E_n}}{2l_n} = \frac{I_E}{l_E}$$

$C_E \big| V_{EB} = 0$ →

$$C_{E\square} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 A_E}{\Delta x_{EB} \big| V_{EB} = 0},$$

ако $C_E > C_{E_{зад}}$, намалява се l_E и се повтарят изчисленията

Геометрия на базата → $n+1$ базови контакта (размери съобразно размерите на емитера и качеството на фотолитографията)

От теорията на прибора се знае, че y_{12} се определя главно от стойността на капацитета C_C. Обикновено базовият контакт с площ 100×100 μm² е разположен върху окиса, получен от двата високотемпературни процеса. При голямата площ на контакта се получава и голяма стойност на капацитета. За намаляване на стойността му трябва да се увеличи дебелината на изолацията. За тази цел в подконтактната площадка се извършва допълнителна операция — P-дифузия с високо листово съпротивление (50 ÷ 60) Ω, която чрез последните фотолитографии се свързва с потенциала на емитера. Този „допълнителен" екран няма ефективност като емитер, но обедняната област около него е широка при нормално работно напрежение, което намалява паразитния капацитет (фиг. 11.10 *в*).

При конструирането на мощните транзистори се използуват някои разновидности на традиционната планарно-епитаксиална технология [55, 285].

[illegible] геометрия има следните три

В първия случай се използува хомогенна база от P-материал, като емитерът и колекторът са дифундирани от двете страни поотделно. Тъй като в хомогенната база няма ускоряващо поле за инжектираните носители, става по-добро разпределение на тока, защото времето за преминаване през базата е по-дълго. В резултат се подобряват характеристиките по отношение на вторичния пробив, а за варианта с дифундирана база — до няколко MHz. Дори и с подходяща фаска напрежението V_{CE} остава ≤ 150 V.

Във втория случай върху N^+-материал се изгражда P-тип епитаксиален слой, в който се дифундира N-тип емитерна област. Тази технология позволява изготвянето на NPN- и PNP-транзистори. Ускоряващо поле не съществува и в това отношение има известна прилика с първия вариант. Резкият преход колектор—база ограничава работното напрежение.

Третият вариант се отличава с провеждането на три дифузии. Изходният материал е N-силиций, подбран съгласно определеното пробивно напрежение. Чрез N^+-дифузия се осъществява нискоомният участък от колектора, който намалява серийното съпротивление. Предната страна на пластината се шлифова, така че P-дифузията за базата се провежда в първоначалния N-материал. Следва селективна емитерна N-дифузия. Окончателната геометрия се получава чрез химично меза-ецване. Тази технология осигурява ниско $V_{CBнас}$, висока гранична честота (до 15 MHz), високо пробивно напрежение V_{CB_0} (< 1000 V), както и избягване на вторичния пробив при подходяща хоризонтална геометрия (фиг. 11.14*а*).

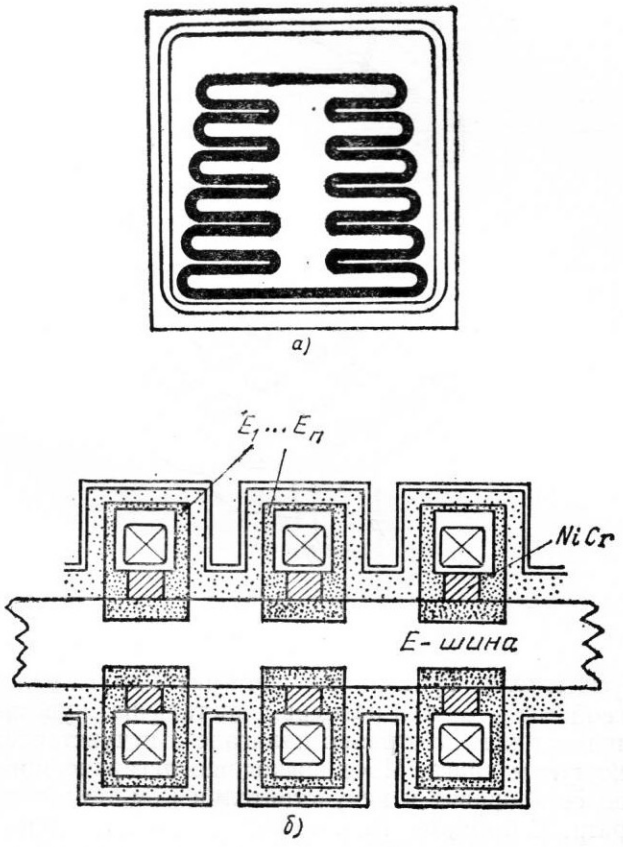
Вторичният пробив в мощните транзистори е също добър пример за демонстриране на измененията в структурната техника с цел осигуряване на определен параметър.

В единия случай беше изменена вертикалната геометрия. Друга възможност предлага мултиемитерната структура (фиг. 11.14*б*). Съчетана с технологията на тройната дифузия, тя осигурява гранична честота до 100 MHz със същата сигурност срещу настъпване на вторичен пробив както обикновената топология при 10 MHz. Емитерът се разделя на много емитерни клетки, които са свързани с общата шина чрез микросъпротивления от никел-хром. Едно такова съпротивление в нормален режим е стабилизатор за съответния емитер, в резултат на което вторичен пробив настъпва по-трудно. От друга страна, дори и да настъпи, слоят никел-хром се разрушава и „пробитият" емитер се самоизключва от шината. Поради големия брой клетки общите волт-амперни характеристики само слабо се променят дори когато броят на повредените емитери достига 10% от общия.

Трябва добре да се разграничава случаят на многоемитерен транзистор при стандартната планарно-епитаксиална техника, включително интегралната и този при мощните транзистори поради различните принципи на проектиране.

При високоволтовите транзистори основният проблем е гарантирането на обемните пробивни напрежения на повърхността. Това важи особено за прехода колектор—база. Значението на повърхността и нейното влияние върху параметрите е описано в гл. 4. Освен това някои от проблемите са характерни и за силовите прибори.

Основният конструктивен метод е изготвянето на допълнителен P-пръстен на ръба на прехода колектор—база на NPN-транзистора. Той се прави малко по-дълбок, така че кривината му да осигурява желаното пробивно напрежение и в същото време да не води до съществено увеличаване на



Фиг. 11.14

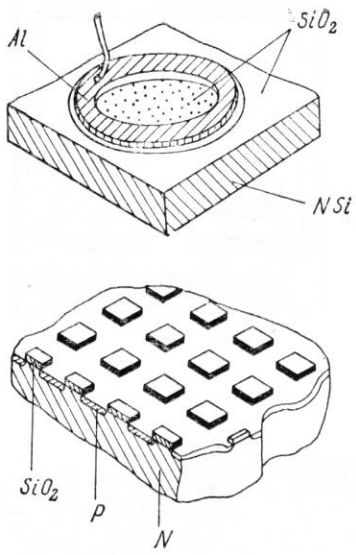
дълбочината на епитаксиалния канал. Технологично този метод води до допълнителна фотолитография и дифузия (извън стандартната технологична схема), поради което оскъпява изделието.

Ето защо се практикува разновидност на този метод, при който пръстенът се изготвя по стандартната базова дифузия, но отместен от базата на известно разстояние. Този пръстен е потенциално плуващ до момента, в който обеднената област на прехода колектор—база достигне до него.

Характерно е, че разстоянието до пръстена трябва да се избира съобразно дълбочината на дифузията. Максимален ефект осигурява дълбочина на дифузията около 30% от разстоянието до пръстена. Използуват се и P-стопиращи пръстени с метален електрод. По този начин се прекъсва повърхностният канал около и в близост до прехода. Използуването на йонната имплантация осигурява високоефективно, локално изменение на концентрацията на ръба на преходите, поради което се прилага все по-широко.

Използуването на прибори със или без PN преходи като преобразуватели на механични напрежения и деформации или на други физични величини зависи от присъщите им свойства — тип проводимост, форма на VA характеристика, конструктивни особености, чувствителност към влага и температура, фотоефект, Холефект и т.н.

Например при тунелните диоди наличието на област с отрицателно съпротивление във VA характеристика позволява да се изготвят преобразуватели на налягане във вид на генератори или



Фиг. 11.15

усилватели. Тунелните диоди имат и други важни свойства — малки размери, достатъчна чувствителност към всестранно налягане и нечувствителност към влага. Чрез подходящо легиране могат да се направят и нечувствителни към температурата. С формата на волт-амперната характеристика е свързано максималното изменение на напрежението. Изходната мощност може да се увеличи, като се използуват диоди с голям пиков ток, т.е. диоди с относително голяма площ на прехода.

Обикновените силициеви диоди и транзистори, използувани като преобразуватели на механично напрежение в електрически сигнали, притежават редица предимства в сравнение с останалите тензодатчици. Електромеханичното преобразуване при тях е най-ефективно, когато възбуждащото острие е поставено така, че да действува перпендикулярно на равнината на PN прехода. За да се преодолее тази трудност, може да се използува мрежовидният пиезодиод (тензодатчик). Основната конструкция на прибора е представена на фиг. 11.15.

Окислената повърхност на N-слоя се обработва чрез фотолитография и ецване. В резултат се получават множество малки острови от силициев окис. След ецването се осъществява дълбока P-дифузия, като P-слоят приема формата на мрежа от тесни каналчета. По този начин се увеличава площта на най-чувствителната вертикална част на прехода. При тази конструкция може да се използува сравнително широко острие, което в контакт с окисните повърхности осигурява механичното съпротивление да се приложи към най-чувствителните части на прехода.

11.4. АНАЛОГОВИ ИНТЕГРАЛНИ СХЕМИ (АИС)

Гамата на произвежданите в света АИС е широка и многообразна. Конструктивно-технологичните проблеми на този вид схеми ще бъдат разгледани на базата на операционните усилватели като техни най-универсални представители.

Развитието на *операционния усилвател* е отражение на прогреса на биполярната технология, характеризираща се с непрекъснато нарастващи възможности в конструктивно-технологичен аспект.

Разширяването на възможностите в този смисъл позволява разнообразяване на схемните решения. Въпреки това трябва добре да се разбира, че все още произволното интегриране на структури, изготвени по обща технологична схема с осигуряване на техните дискретни параметри, е невъзможно. От друга страна, интегралната схемотехника разполага със структури, които не се използуват в дискретно изпълнение.

Основа на всеки конструктивно-технологичен проект е постояннотоковият анализ на схемата. Негова цел е определянето на електрически параметри на отделните елементи в зависимост от предназначението им и избрания режим на работа на схемата. Обикновено конструкторът се нуждае от доста приближен анализ, поради което е възможно въвеждането на редица опростявания.

11.4.1. Технологична схема

Като пример за конструиране на вертикалната геометрия ще служи ОУ 1М 108. След направения постояннотоков анализ проектирането започва с избор на подложката. Вертикалната геометрия трябва да бъде реализирана въз основа на стандартната планарно-епитаксиална технологична схема (фиг. 11.1) с отчитане на особеностите на схемата. Обикновено се избира силиций с малко изходни дефекти. Дори и при най-чисти монокристали още при първото окисление възникват дефекти, които при следващите технологични операции се увеличават многократно. За изследователски цели може да се използува обикновена P-тип Si-пластина с дебелина $d=300$ μm, специфично съпротивление $\rho=10$ Ω.cm.

А. Получаване на N^+-скрит слой. Най-важното изискване към скрития слой е да не дифундира по време на следващите високотемпературни процеси. При формиране на N^+-слоя за транзистори със свръхвисоко усилване се извършва дифузия на Sb, който има по-малка гранична разтворимост в Si от As и почти еднакъв коефициент на дифузия. С това се цели да се регулира дълбочината на скрития слой, като дифузията се извършва за по-дълго време и процесът е по-лесно регулируем. От значение е постигането на съвсем точни стойности на листовото съпротивление, което при използуване на Sb е по-лесно. За осъществяване на дифузията е необходимо:

1. Цялостно окисление на подложката за създаване на възможност за селективна дифузия на Sb. Минималната необходима дебелина на слоя SiO_2 за защита на Si от дифузията на Sb зависи от времето на дифузия и от температурата, при която се провежда. Окислението се извършва на

три етапа — редуващо се сухо—влажно—сухо окисление.

2. След получаване на този слой с фотолитография се правят прозорци за дифузия на Sb за N^+-скрития слой.

3. Дифузия. Началната концентрация на Sb може да се намери, като се знае, че листовото съпротивление на скрития слой е избрано $R_{Sc_п}=20\Omega/\square$. Дебелината на слоя е $x_{jc_п}\approx 7$ μm. При изпълнение на горните условия средното специфично съпротивление е

$$\bar{\rho}_{cc}=R_{scc}\,x_{cc}=20\,.\,7\,.\,10^{-4}=1{,}4\,.\,10^{-2}\ \Omega.\text{cm}.$$

На фиг. 9.8.5÷9.8.9 са дадени графики, които позволяват при известна средна специфична проводимост на слоя $\bar{\sigma}=\frac{1}{\bar{\rho}_{Cп}}=0{,}071.10^{3}\Omega^{-1}.\text{cm}^{-1}$ и начална концентрация на примесите в подложката да се изчисли необходимата повърхностна концентрация. Според така изчислената средна специфична проводимост повърхностната концентрация е $N_{0_{Cп}}=1{,}5.10^{19}$ cm^{-3}. Тъй като скритият слой ще се разпространи при епитаксиалния процес, необходимо е да бъде избрана малко по-висока концентрация. Граничната разтворимост, която може да се отчете от фиг. 9.8.4, е 7.10^{19} cm^{-3}. Избира се начална концентрация $N_0=5.10^{19}\text{cm}^{-3}$.

Дифузията е едноетапна от неограничен източник. Параметрите на процеса са: $T=1100^0$C; $N_0=5.10^{19}\text{cm}^{-3}$, дебелината на слоя само в подложката $x_{N^+}=1{,}5$ μm. От фиг. 9.8.3 се отчита коефициентът на дифузия на Sb в Si при 1100^0C. Разпределението на примесите е erfc от неограничен източник. За да се получи времето за дифузия, трябва да се положи текущата концентрация $N(x,t)$, равна на концентрацията на примесите в подложката:

$$N(x_{N^+}\,t)=N_п=N_o\,\text{erfc}\left(\frac{x_{N^+}}{2\sqrt{D_{Sb}\,t}}\right);$$

$$5.10^{15}=5.10^{19}\,\text{erfc}\left(\frac{1{,}5\,.\,10^{-4}}{2\sqrt{3\,.\,10^{-13}\,t}}\right)=5\,.\,10^{19}\,\text{erfc}\,(y);$$

$$\text{erfc}\,(y)=\frac{N_п}{N_0}=\frac{5\,.\,10^{15}}{5\,.\,10^{19}}=10^{-4}.$$

От фиг. 11.16, илюстрираща erfc разпределение на примесите, се отчита за $\text{erfc}(y)=10^{-4}$, $y=2{,}8$. Тогава от

$$\frac{1{,}5\,.\,10^{-4}}{2\sqrt{3\,.\,10^{-13}\,.\,t}}=2{,}8.$$

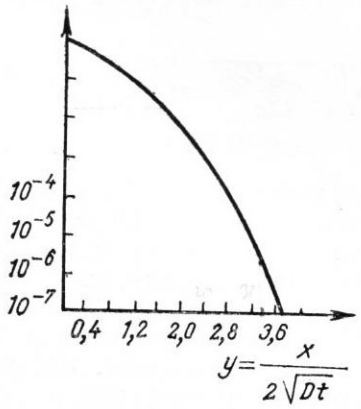
Следва, че

$$t=\left(\frac{1{,}5\,.\,10^{-4}}{2\,.\,2{,}8}\right)^2/3\,.\,10^{-13}=2380\ \text{s}=39\ \text{min и}\ 54\ \text{s}.$$

По време на следващите високотемпературни процеси продължава дифузията на Sb от слой с крайна дебелина.

Изчислява се

$$(Dt)_{\text{eff}}=(D_p'\,t_p')_{965^\circ}+(D_p''\,t_p'')_{1210^\circ}+(D_B'\,t_B')_{1000^\circ}+$$
$$+(D_B''\,t_B'')_{1100^\circ}+(D_E'\,t_E')_{900^\circ}+(D_E''\,t_E'')_{1200^\circ}+(D_E'''\,t_E''')_{1100^\circ};$$



Фиг. 11.16

$$(Dt)_{\text{eff}}=(2\,.\,10^{-14}\,.\,20\,.\,60)+(3\,.\,10^{-12}\,.\,23\,800)+$$
$$+(4\,.\,10^{-13}\,.\,20\,.\,60)+(4\,.\,10^{-13}\,.\,4365)+$$
$$+(1\,.\,10^{-14}\,.\,20\,.\,60)+(4\,.\,10^{-12}\,.\,900)+$$
$$+(4\,.\,10^{-13}\,5300)=7{,}93\,.\,10^{-8}.$$

За дълбочината на проникване на примесите в подложката може да се запише

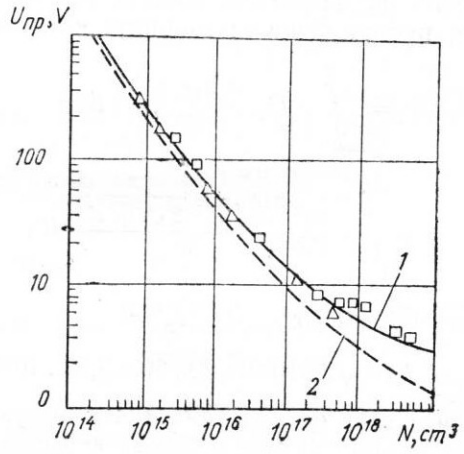
$$N_п=N_0\,\text{erfc}\left(\frac{x_{N+п}}{2\sqrt{(Dt)_{\text{eff}}}}\right);\ 5.10^{15}=5.10^{19}\,\text{erfc}\left(\frac{x_{N+п}}{1{,}8.10^{-4}}\right);$$

$$\text{erfc}\,(y)=\frac{N_п}{N_0}=10^{-4};\ y=2{,}8;\ x_{N+п}=2{,}8.1{,}8.10^{-4}=$$
$$=5{,}04\ \mu\text{m}.$$

В случая е използувано erfc-разпределение по аналогия с по-горните изисквания, въпреки че практическият случай е по-близък до гаусово разпределение.

Б. Определяне на параметрите на епитаксиалния слой. По технологични съображения, свързани с проектирането на супер-β-транзисторите, е избрано $V_{CB_{BR}}=120$ V. Тази стойност е необходима за определяне на концентрацията на епитаксиалния слой. От фиг. 11.17 и фиг. 9.8.1 следва: $N_C=8.10^{14}\text{cm}^{-3}$ и $\rho_C=6\ \Omega.\text{cm}$. Дебелината на епитаксиалния слой може да се намери, като се знае, че

$$l_{\text{епит}}=L_C\,(V_{CB_0})+\Delta\,l=x_{c_п}.$$



Фиг. 11.17

Широчината на колекторния преход $L_C(U_{CB0})$ е равна на

$$L_C=\sqrt{\frac{2\varepsilon_r\varepsilon_0 V_{CB0}}{qN_C}}=\sqrt{\frac{2.12.8.10^{-14}.60}{1{,}6.10^{-19}.8.10^{14}}}=$$

$$=9{,}97\ \mu m\approx 10\ \mu m.$$

Δl е запасът, който се прибавя за дълбочината на базата (обикновено $\Delta l=5\div10$ μm).Тъй като при проектирането на супер-β-транзистори се извършва дълбока базова дифузия, взема се запас $\Delta l=$ $=7$ μm и $l_{епит}=L_C+\Delta l=9{,}97+7\approx17$ μm$=x_{сп}$.

В. Изолация. Избираме изолация с PN преход, т.е. необходима е P^+-дифузия. Извършва се дифузия на бор на дълбочина, равна или по-голяма от дълбочината на епитаксиалния слой.

Етапи: 1. Окисление за маска на разделителната дифузия. Извършва се по реда сухо—влажно—сухо окисление. 2. Фотолитография. 3. Преддифузия на бор при температура 965°C.

Граничната разтворимост в Si при тази температура е $N_{0B}=6.10^{20}$ cm^{-3}. От фиг. 9.8.3 се отчита коефициентът на дифузия на B в Si: при $T=965$°C $D_B=2.10^{-14}$ cm^2/s. За да се получи дълбочината на проникване на примесите при преддифузията, трябва да се приравни текущата концентрация $N(x,t)$ на концентрацията на примесите в епитаксиалния слой:

$$N(x,\ t)=N_C=N_{0_B}\operatorname{erfc}(x/2\sqrt{D_B t_B}).$$

Времето за извършване на преддифузията може да се приеме според съществуващата стандартна технология $t_B\approx20$ min:

$$8.10^{14}=6.10^{20}\operatorname{erfc}(x/2\sqrt{2.10^{-14}.20.60};$$

$$\operatorname{erfc}(y)=\frac{N_c}{N_0}=\frac{8.10^{14}}{6.10^{20}}=1{,}33.10^{-6}.$$

От фиг. 11.16 се отчита стойността на $\operatorname{erfc}(y)=3{,}6$ и

$$y=\frac{x}{2\sqrt{D_B t}}=\frac{x}{11{,}6.10^{-6}}=3{,}6.$$

$x=0{,}42.10^{-4}=0{,}42$ μm е дълбочината на повърхностния слой, създаден през първия етап. За изчисляване на количеството примесни атоми Q_P в създадения повърхностен слой се използува формулата, произтичаща от законите на Фик:

$$Q_P=\int_{t=0}^{t_1}-D_P\left.\frac{\partial N(x,\ t)}{\partial x}\right|_{x=0}dt=$$

$$=\int_0^{t_1}-D_P\left.\frac{\partial\left(N_0\operatorname{erfc}\dfrac{x}{2\sqrt{D_P' t'}}\right)}{\partial x}\right|_{x=0}dt;$$

$$Q_P=1{,}13\,N_0\sqrt{D_P' t_P'}=$$

$$=1{,}13.6.10^{20}\sqrt{2.10^{-14}.20.60}=3{,}32.10^{15}\ \text{cm}^{-2}.$$

4. Вторият етап на разделителната дифузия протича както при същинска базова дифузия. Получава се разпределение от вида

$$N(x,\ t)=\frac{Q_P}{\sqrt{\pi D_P'' t_P''}}\exp\left(-\frac{x_P^2}{4D_P'' t_P''}\right).$$

Известните параметри на процеса са: $T=1210$°C, дълбочина на проникване на примесите $x_P=x_{сп}-x$, където $x_{сп}$ е дълбочината на колекторния епитаксиален слой, а x — дълбочината на повърхностния слой примесни атоми, създадени при преддифузията. Стойността на коефициента на дифузия на бор в Si при 1210°C е 3.10^{-12} cm/s. Неизвестен параметър е времето за дифузия t_P'',което може да се изчисли от условието за съществуване на PN преход. Приравнява се текущата концентрация на дифундиращия B с концентрацията на примесите в епитаксиалния слой на мястото на прехода

$$N(x,\ t)=\frac{Q_P}{\sqrt{\pi D_P'' t_P''}}\exp\left(-\frac{x_P^2}{4D_P'' t_P''}\right)=N_C;$$

$$\frac{3{,}32.10^{15}}{\sqrt{\pi.4{,}3.10^{-12}t_P''}}\exp\left[-\frac{(16{,}58.10^{-4})^2}{4.3.10^{-12}t_P''}\right]=8.10^{14}.$$

Относно t_P'' се получава нелинейното уравнение

$$5{,}1.10^5-33{,}8\,t_P''+t_P''\ln t_P''=0.$$

То може да бъде решено по метода на тангентите:

за $t=0$ $\quad f(t)>0;$

$t=10\,000$ $f(t)>0;$

$t=20\,000$ $f(t)>0;$

$t=30\,000$ $f(t)<0.$

Очевидно решението е между 20 000 и 30 000 s. Методът е сходящ и има смисъл за точките, при които $f(t).f''(t)>0$, т.е. когато $f(t)$ и $f''(t)$ имат еднакъв знак:

$$f'(t)=-33{,}8+\ln t+1;$$

$$f''(t)=\frac{1}{t},\ \text{т.е. } f''(t)>0 \text{ за всяко } t.$$

Работи се по формулата $t_1=t_0-\dfrac{f(t_0)}{f'(t_0)}$

за $t_0=20\,000$ $t_1=20\,000-\dfrac{0{,}82.10^4}{-33{,}8+9{,}9+1}=23\,700$ s;

$$t_2=23\,700-\frac{0{,}02.10^5}{-32{,}8+10{,}1+1}=23\,830\ \text{s}.$$

Уравнението се удовлетворява за $t=23\,800$ s $=$ $=$ 6h 36 min 30 s. По време на същинската дифузия за формиране на изолиращата P-област се извършва окисление за базовата дифузия. Окислителният процес протича на три етапа: сухо — влажно—сухо окисление.

Г. Формиране на базовата област. За избраната интегрална схема, включваща микрорежимни транзистори със свръхвисоко усилване, избираме листово съпротивление $R_S=150\ \Omega/\square$ при дълбочина на базата 4,5 μm. Средното специфично съпротивление на базовата област е

$$\bar{\rho}_B=R_{SB}\,x_{BC}=150.4.10^{-4}=6.10^{-2}\ \Omega.\text{cm}.$$

Началната повърхностна концентрация, съответствуваща на $\frac{1}{\rho_B}$ (фиг. 9.8.5), е $N_{O_B}=10^{18}\,\text{cm}^{-3}$. За по-точното регулиране на параметрите на процеса базовата дифузия се извършва на два етапа. По време на първия етап на повърхността на пластината се създава чрез дифузия от неорганичен източник на В тънък слой с определена повърхностна концентрация. През втория етап се спира притокът на дифузант и се продухва кварцовата тръба с O_2 (влажен—сух) при висока температура, при което продължава дифузията на бор в обема на пластината. Едновременно с това се извършва окисление на повърхността ѝ, необходимо за селективна дифузия на Р за емитерната област. Процесът продължава до достигането на примесите до необходимата дълбочина на прехода база—колектор.

1. Преддифузия. Задават се параметри на процеса: $T^0=1030^0$C, $N_{OB}=10^{18}\text{cm}^{-3}$ — начална концентрация на примесите. Време за провеждане на дифузията $t'_B=20$ min. За тази температура коефициентът на дифузия на бор в Si е $D_B=4.10^{-14}$ cm²/s. Разпределението на примесите е по закона erfc. Дълбочината на повърхностния слой, създаден при преддифузията с тези параметри, се намира, като се положи текущата концентрация на дифундиращите примеси, равна на концентрацията на примесите на повърхността на пластината (епитаксиалния слой).

$$N(x,\ t)=N_C=N_{OB}\,\text{erfc}\,(x_B'/2\sqrt{D_B'\,t_B'});$$

$$\text{erfc}\,(y)=\text{erfc}\,\frac{x_B'}{2\sqrt{D_B'\,t_B'}}=\frac{N_c}{N_{OB}}=\frac{8\,.\,10^{14}}{10^{18}}=8\,.\,10^{-4};$$

$$\text{erfc}\,\frac{x_B'}{2\sqrt{4\,.\,10^{-14}\,.\,20\,.\,60}}=8\,.\,10^{-4}.$$

От фиг. 11.16: за $\text{erfc}(y)=8.10^{-4}$, $y=2{,}6$;

т.е. $x_B'\approx 0{,}179$ μm.

Количеството примеси в създадения тънък повърхностен слой е

$$Q_B=1{,}13\,N_{OB}\sqrt{D_B'\,t_B'}=3{,}9\,.\,10^{12}\ \text{cm}^{-2}.$$

2. Същинска дифузия. Зададените параметри са: $T^0=1140^0$C, $x_{BC}=4$ μm. За тази температура коефициентът на дифузия на бор е 5.10^{-13} cm²/s. Разпределението на примесите е гаусово. Времето за дифузия t_B'' се намира от уравнението, изразяващо равенството на концентрацията на примесите на колекторната и базовата област в мястото на прехода колектор—база.

$$N(x,\ t)=N_C-\frac{Q_B}{\sqrt{\pi D_B''\,t_B''}}\exp\left(-\frac{x_{BC}^2}{4\,D_B''\,t_B''}\right)=0;$$

$$8\,.\,10^{14}-\frac{3\,.\,10^{12}}{\sqrt{\pi\,5\,.\,10^{-13}\,t_B''}}\exp\left[-\frac{(4\,.\,10^{-4})^2}{4\,.\,5\,.\,10^{-13}\,t_B''}\right]=0.$$

Относно t_B'' се получава уравнението

$$8\,.\,10^4-18{,}8\,t_B''+t_B''\ln t_B''=0;$$

за $t_B''=0$ $\quad f(t)>0$;

$t_B''=8000$ $\quad f(t)>0$;

$t_B''=9000$ $\quad f(t)>0$;

$$t_1=t_0-\frac{f(t_0)}{f'(t_0)};\qquad f'(t_0)=-18{,}8+\ln t_B''+1;$$

$$t_{1B}''=9000-\frac{2218}{-8{,}8}=9252\ \text{s};$$

$$t_{2B}''=9252-\frac{1617}{-8{,}67}=9438\ \text{s}.$$

Уравнението се удовлетворява за $t_B''=9438$ s = =2h37 min 12 s.

Д. Формиране на емитерната област на транзисторите със свръхголямо усилване. Известни са няколко метода, използуващи йонна имплантация, дифузия от легирани окиси или многоетапна дифузия. В този пример е избрана двойна емитерна дифузия, позволяваща увеличаването на дълбочината на емитерната област да се извърши на етапи и за по-продължително време. Описанието на този метод е по-богато на изчисления, които са необходими за по-добро изясняване на проблемите на преразпределението на примесите.

Легирането с фосфор протича на три етапа, като първите два са подобни на базовата дифузия. Този цикъл се осъществява само за транзисторите със свръхголямо усилване.

1. Преддифузия. В създадения по време на базовата дифузия окисен слой се отваря прозорец за дифузия на фосфор от неорганичен източник. Този фотошаблон е само за емитерите на супер-β-транзисторите. Нека повърхностната концентрация да бъде $N_{OE}=5.10^{20}\text{cm}^{-3}$. Максималната разтворимост на Р в Si е близка до тази стойност при температура 900°C (фиг. 9.8.4). Това определя и температурния режим на легирането с фосфор. При 900°C коефициентът на дифузия е $D_P=10^{-14}$ cm²/s. Средното специфично съпротивление на слоя е $\rho_E=R_{S_E}x_{E_B}=0{,}108.10^{-2}\Omega\text{cm}$. Листово съпротивление на емитерната област $R_{SE}=3\ \Omega/\square$ и дълбочина на прехода емитер—база $x_{EB}=3{,}8$ μm. Разпределението на примесите се описва по допълнителната функция на грешката erfc. От условието за равенство на проникващия в полупроводника фосфор и повърхностната концентрация на базовата област за време $t=20$ min следва

$$N_{SB}=N_{OE}\,\text{erfc}\left(\frac{x_E'}{2\sqrt{D_E'\,t_E'}}\right);$$

$$\text{erfc}\,(y)=\text{erfc}\left(\frac{x_E'}{2\sqrt{10^{-14}\,20\,.\,60}}\right)=\frac{N_{SB}}{N_{OE}}=2\,.\,10^{-3}.$$

От фиг. 11.16 за $\text{erfc}(y)=2.10^{-3}$ се отчита $y=2{,}4$;

$x_E'=0{,}166$ μm.

Количеството примеси в тънкия повърхностен слой е

$$Q_E=1{,}13\,N_{OE}\sqrt{D_E'\,t_E'}=1{,}13\,.\,5\,.\,10^{20}\sqrt{10^{-14}\,.\,1200}=$$

$$=1{,}95\,.\,10^{15}\ \text{cm}^{-2}.$$

За разлика от нормалните транзистори при супер-β-транзисторите вторият етап протича при

$T=1200^0$C. Изборът на такава температура позволява да се намали ефектът на „стеснение на базата“ ($T=1200^0$C и $D_p=4.10^{-12}$ cm^2/s). В израза за гаусовото разпределение се полага

$$x=x''_{EB}-x'_E=1{,}8-0{,}166=1{,}634\ \mu m$$

за дълбочината на прехода емитер—база за втория етап от емитерната дифузия. Концентрацията на примесите в Р-областта на дълбочина 1,8 μm се намира от израза за разпределение на примесите на базата

$$N_B(x''_{EB})=\frac{Q_B}{\sqrt{\pi D''_B t''_B}}\exp[-(x''_{EB})^2/4 D''_B t''_B];$$

$$N_B(x''_{EB})=\frac{3.10^{12}}{\sqrt{\pi 5.10^{-13}.9438}}\exp[-$$

$$-(1{,}8.10^{-4})^2/4.5.10^{-13}.9438]=4.10^{16}.$$

Времето за този етап може да се изчисли от уравнението, изразяващо условието за равенство на концентрацията на примесите в емитерната и базовата област в мястото на прехода:

$$N_B(x''_{EB})=\frac{Q_E}{\sqrt{\pi D''_E t''_E}}\exp[-(x''_{EB})^2/4 D''_E t''_E];$$

$$4.10^{16}=\frac{1{,}95.10^{15}}{\sqrt{\pi.4.10^{-12}t''_E}}\exp[-(1{,}64.10^{-4})^2/4D''_E t''_E].$$

Уравнението се решава по метода на тангентата аналогично на предните уравнения. След неколкократни изчисления се получава $t_E''=800$ s. По време на този етап и след него се извършва окисление, служещо като маска за третия етап на емитерната дифузия, който продължава при температура 1100°C, както при дифузията за емитерната област на всички нормални транзистори. Другите параметри на процеса са $x_{EB}'''=3{,}8$ μm и $D_{P_{1100^\circ}}=5.10^{-13}$ cm^2/s. За намиране на времето на дифузия е необходимо да се изчисли концентрацията на примесите в базовата област на дълбочина 3,8 μm.

$$N_B(3{,}8)=\frac{Q_B}{\sqrt{\pi D''_B t''_B}}\exp[-(x'''_{EB})^2/4 D''_B t''_B];$$

$$x'''_{EB}=3{,}8-x'_B=3{,}8-0{,}179=3{,}621\ \mu m;$$

$$N_B(3{,}8)=\frac{3.10^{12}}{\sqrt{\pi.5.10^{-13}.9438}}\exp$$

$$[-(3{,}62.10^{-4})^2/4.5.10^{-13}.9438]=5{,}2.10^{15}\ cm^{-3}.$$

Тъй като фосфорът при последния етап на дифузията дифундира и през първоначално създадения легиран емитерен слой, условието за прехода се изразява с уравнението

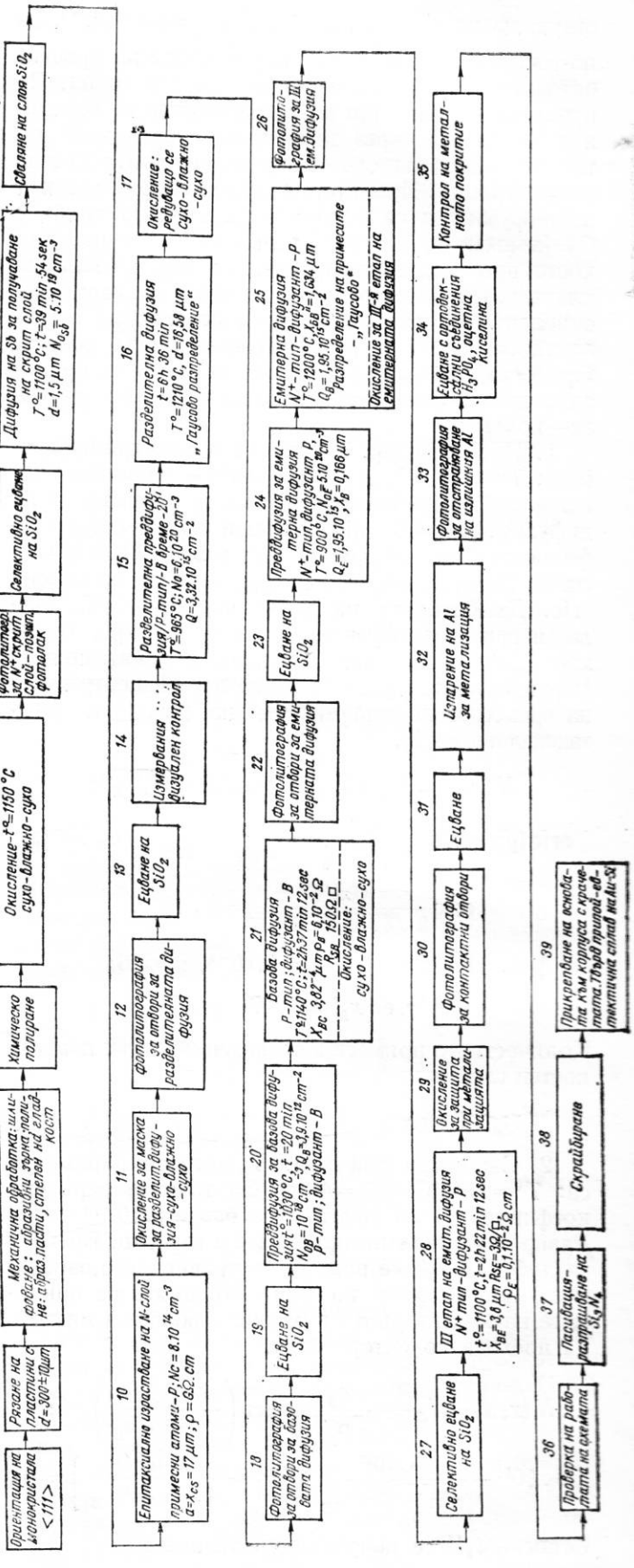
$$\frac{Q_E}{\sqrt{\pi D'''_E (t''_E+\Delta t_E)}}\exp[-(x'''_{EB})^2/4 D'''_E (t''_E+\Delta t_E)]+$$

$$+N_B(x'''_{EB})+N_B(x''_{EB})=0,$$

където $N_B(x_{EB}'')$ е концентрацията на примесите в базовата област на дълбочина 1,8 μm. $N_B(x_{EB}''')$ е концентрация на примесите на дълбочина 3,8 μm. За t_E''' се получава уравнението

$$5{,}5.10^4-10{,}4\,t'''_E+t'''_E\ln\sqrt{t'''_E}=0,$$

което се решава по метода на тангентите. След



Фиг. 11.20

неколкократни пресмятания се установява, че методът е сходящ за $8000 < t_E''' < 9000$. Точното решение на уравнението е

$$t_E''' = 8560 \text{ s} = 2 \text{ h } 22 \text{ min } 12 \text{ s};$$

като

$$\Delta t_E = t_E''' - t_E'' = 8560 - 800 = 7760 \text{ s}$$

е времето, през което P дифундира през третия етап само в базовата област от 1,8 до 3,8 μm. Сумарното време на емитерната дифузия за супер-β-транзисторите е значително по-голямо от времето на дифузия при нормалните транзистори. По-дългото време на дифузия на третия етап при по-ниска температура от тази на втория етап позволява да бъде изравнен по-точно дифузионният фронт на желаната дълбочина и да се предотврати неговото размиване. През време на третия етап се извършва ново окисление. При следващата фотолитография се отварят прозорци за всички контакти. Следват метализация с Al, структуриране на металните шини, пасивация, сондов контрол и т.н. Окончателното вертикално разпределение на концентрацията на примесите е показано на фиг. 11.18. На фиг. 11.19 е показана мащабно общата вертикална геометрия за всички активни компоненти, а на фиг. 11.20 — технологичната схема с параметрите на операциите.

11.4.2. Топологично проектиране (хоризонтална геометрия). Видове структури

Конструирането на интегрални схеми е сложен и многоетапен процес. Основен завършващ етап в процеса на конструирането на интегрални схеми е синтезът на топологията и нейната оптимизация. Топологичният метод трябва да отчита следните особености [58, 59, 61]:

— всички схемни елементи се формират с голяма плътност в обема на обща подложка (това води до увеличаване на паразитните влияния, на топлообмена между елементите и на собствените шумове);

— всички елементи на интегралната схема се изработват в рамките на един технологичен цикъл, а това изключва предварителния подбор и отделянето на дефектните елементи.

Затова изискванията към точността на конструкторския процес са много големи. Синтезирането на топологията протича на няколко етапа:

— проектиране и уточняване на конструкцията на схемните елементи;

— разполагане на елементите на повърхността и в обема на подложката;

— проектиране на връзките (метализацията);

— провеждане на контролни операции, проверяващи правилността или оптималността на вече построената топологична схема.

Между тези етапи на синтеза има силна обратна връзка, която пречи на строгата еднопосочност на проектирането. Тази обратна връзка се определя от големия брой технологични, конструктивни и експлоатационни ограничения. Първият етап на проектирането се явява уточняване на конструкцията на схемните елементи и на тяхното изчисляване. Това обикновено се прави при синтеза на електрическия модел на интегралната схема. Изходните данни са:

— принципната електрическа схема (взаимната връзка между елементите), номиналните стойности на параметрите, допустимите отклонения на тези параметри;

— предварителният избор на конструктивно-технологичния тип на интегралната схема, на материала за подложката;

— желаният или допустим размер на чипа, видът на корпуса, херметизацията, захранващото напрежение.

Оразмеряването на отделните елементи на схемата трябва да отчита не само параметрите на един елемент, но и неговото влияние върху останалите елементи от подложката: паразитни капацитети, отделена топлина, зависимост на характеристиките от технологията. Например, ако в схемата се използуват транзистори, включени паралелно, за предпочитане е да се избере конфигурация с общ колектор в една изолирана област. Ако схемата трябва да работи с голяма скорост на превключване, избират се елементи с малки геометрични размери.

Следващият важен етап при конструирането на топологията е разположението на елементите на повърхността и в обема на подложката. За целта е необходимо да се определи броят на изолираните области и тяхното разположение върху подложката, като се отчитат паразитните елементи, които неизбежно възникват. Количеството на изолираните области зависи от броя на елементите и свързването им. Дифузионните резистори от P-тип могат да бъдат поместени в една обща изолирана област или в отделни, ако това улеснява метализацията. Такива резистори имат паразитен PNP транзистор, свързан с подложката. Този паразитен елемент може да бъде изолиран, като изолираната област на резистора (базата на паразитния транзистор) се свърже с най-положителния потенциал на схемата, т.е. към колекторното захранване. Затова всеки емитерен повторител в схемата може да бъде разположен в обща изолирана област с резистори, тъй като неговият колектор е непосредствено свързан с колекторното захранване.

За по-голяма част от транзисторите е необходима отделна изолираща област. Транзистор, чийто колекторен потенциал се изменя в зависимост от приложеното напрежение, трябва да бъде в самостоятелна област. Това не се отнася за емитерни повторители и транзистори с общи колектори. Желателно е площите на изолираните области да бъдат минимални. Намаляване на паразитните капацитети се получава и от подаването на отрицателен потенциал на подложката, за да се осъществи обратно поляризиране на прехода колектор—подложка.

Дифузионните резистори, защитени от окисния слой, не се влияят от метализацията, преминаваща над тях. Затова тяхното разположение не е критично, с изключение на два случая: а) ако два или повече резистори трябва да бъдат с много близки номинални стойности (или да бъде спазено

точно съотношението между тях), те трябва да са близко един до друг и да имат еднаква широчина; б) ако резисторите разсейват сравнително голяма мощност, трябва да се разполагат в центъра на чипа, за да се намали броят на местата с локално нагряване, което може да окаже неблагоприятно влияние на близките активни елементи.

Мястото на кондензаторите в интегралните схеми (дифузионни и диелектрични) зависи само от площта, която заемат. Площта на кондензатори с голям капацитет се увеличава много и това ограничава тяхното приложение в монолитните интегрални схеми.

Последната част от топологичното проектиране е метализацията — разположението на съединителните шини. В големите интегрални схеми с голяма степен на интеграция този въпрос създава сериозни проблеми, защото конфигурацията на метализацията зависи изцяло от разположението на елементите, което от своя страна зависи от много други принципи и съображения. Задължително условие е токопровеждащите части да не се пресичат в една равнина. Друго важно изискване е те да бъдат с минимална дължина. Когато се налага да се пресекат метални шини, това става на две нива. На мястото на въображаемото пресичане едната шина се прекъсва и на етапа на емитерната дифузия се изготвя N^+-област, която служи за връзка между двете прекъснати части. Може да се наложи тази дифузия да се извършва в отделна изолирана област, която внася допълнителен паразитен капацитет и затова пресичането на токопровеждащите части трябва да се избягва. Възможността всички метални връзки да се разположат в една равнина зависи от оптимизацията на разположението на елементите и от възможностите на фотолитографския процес.

На съвременния етап проектирането на топологията на интегрални схеми се извършва с помощта на електронноизчислителни машини, тъй като сложността на проблема (при по-сложни схеми) превишава възможностите на група специалисти.

Преди да разгледаме видовете структури в операционните усилватели, нека се спрем на общите принципи при оразмеряването. В интегралните схеми всеки транзистор има строго определена функция, на която трябва да отговарят характеристиките му. Тъй като технологичният процес е максимално опростен, вертикалната геометрия на транзисторите от един чип е еднаква, т.е. преходите емитер—база и колектор—база са на еднаква дълбочина, разпределението на примесите и концентрациите в отделните области също са еднакви. За да се получат транзистори с различни електрически параметри, решаващо значение има хоризонталната геометрия. При избора на геометрия се вземат под внимание необходимите стойности на емитерния ток, капацитетите на преходите и обемното базово съпротивление.

Максималният ток, който може да се получи при дадена геометрия, е пропорционален на ефективната дължина на емитера. Важно е да се отбележи, че минималните размери на транзисторните области зависят от възможностите на фотолитографския процес. Минималният размер на емитерната област се определя от приетите стандартни стойности за най-малко разстояние (a) между две успоредни линии, за минимален размер на контактите (b) и минималното разстояние между тях и за дифузионните фронтове. Площта на базовата област се определя от условието за получаване на минимален капацитет на прехода колектор—база. Колекторният капацитет може да се намали с намаляване на топологичната площ на базовата област. Обемното базово съпротивление се намалява главно чрез промяна на геометрията. Например при двуконтактна базова структура то намалява, тъй като инжекцията от емитера е предимно периферна и съпротивлението на частта от базата, която е под емитера, може да се пренебрегне. При оразмеряването на колекторната област трябва да се отчитат следните две съображения:

— увеличаването на площта води до увеличаване на паразитния капацитет колектор—подложка;

— намаляването на тази площ може да доведе до съединяване на изолиращия P^+-канал с високолегираната N^+-контактна област на колектора или с базовата област поради изотропността на дифузията. Затова разстоянието от края на колекторната област до колекторния контакт трябва да бъде по-голямо от дебелината на епитаксиалния слой.

При средномощни и мощни транзистори с големи емитерни токове, за да се получи възможно най-голям ток от малка площ, се използува гребеновидна форма на емитера. Между „зъбите“ на базовия контакт се поставят „зъбите“ на емитерната област. В този случай активният периметър може да се промени чрез изменение на дължината и широчината на „зъбите“. Ако приемем максималната плътност на тока $J_{max}=1000$ A/cm^2 и дебелината на епитаксиалния слой $x_{СП}=10$ μm съгласно фиг. 11.21*а*, можем да пресметнем по следния начин площта на транзистора:

$$A_{тр}=(x_p+28\,a+4\,b)\,(x_p+18\,a+l_E),$$

$$A_E=2\,(a+b)\,l_E=\frac{I_E}{J_{max}},\quad l_E=\frac{I_E}{2\,(a+b)\,J_{max}}.$$

Нов елемент е дължината (периметърът) на емитера l_E. Тя се определя от големината на емитерния ток и максималната допустима плътност на тока за силиция (вж. 11.3). По същия начин може да бъде изчислена и площта на транзистора с два извода на базата съгласно фиг. 11.21*б*. В най-общия случай получаваме

$$A_{тр}=(x_P+22{,}5\,a+4\,b)\left[\frac{I_E}{2\,(2\,a+b)\,J_{max}}+x_P+14{,}5\,a\right].$$

Особеностите на интегралния NPN-транзистор се състоят в следното: а) NPN-транзисторът заедно с подложката образува четирислойна структура N^+PNP, т.е. освен работния транзистор съществува и паразитен, при който ролята на емитер играе базовият слой; б) ако паразитният транзистор е запушен, т.е. ако двата му прехода са включени в обратна посока, към колектора на работ-

ния NPN транзистор се включва паразитният капацитет на прехода С—П; в) неизбежен е утечният ток през прехода С—П. В силициевите NPN преходи този ток, определен от термогенерациите на носителите, зависи от напрежението и може да бъде характеризиран с някакво утечно съпротивление; г) всички PN преходи имат две части — хоризонтална и вертикална. Особеното за вертикалните е това, че те са части от дъга. Поради изотропността на дифузията концентрацията на примеси намалява от повърхността към дълбочината на слоя. Това обстоятелство трябва да се вземе пред вид при изчисляване на параметри като коефициента на инжекция, капацитета на преходите и съпротивлението на слоевете. За да се изключи възможността за инверсен активен режим в PNP транзистора, необходимо е да се осигури отрицателен потенциал на подложката спрямо колектора на NPN транзистора при всеки режим на работа. Следователно при еднополярни захранващи източници подложката трябва да се заземи, а при двуполярни — да се включи към шината на отрицателния захранващ източник.

В процеса на изготвяне на NPN структури са съвместими три вида PNP структури:

А. Изолирана структура с вертикална инжекция (вертикален PNP).

Б. Хоризонтален транзистор.

В. Вертикален транзистор, получен с участието на подложката.

Вертикален PNP транзистор. Тази конструкция има усложнена технология, защото възникват допълнителни дифузии и фотолитографии, поради което няма голямо практическо приложение. При точен дифузионен процес обаче транзисторите се получават с близки по стойност параметри.

Хоризонтален PNP транзистор. Най-често използуваната конфигурация за PNP транзистори е хоризонталната, която се характеризира със странична инжекция на неосновните носители. При тези транзистори емитерът и колекторът се получават на етапа на базовата дифузия, а омовите контакти на базата — на етапа на емитерната дифузия. Дебелината на базата на хоризонталния PNP транзистор зависи от възможностите на фотолитографския процес. Тя не може да се направи много малка. Затова коефициентът на усилване е малък $\beta \simeq 1 \div 10$. Ниска е и граничната честота ($1 \div 10$ MHz) — (T_1, T_2 и T_4 в μA 740 — вж. Приложение 11.1).

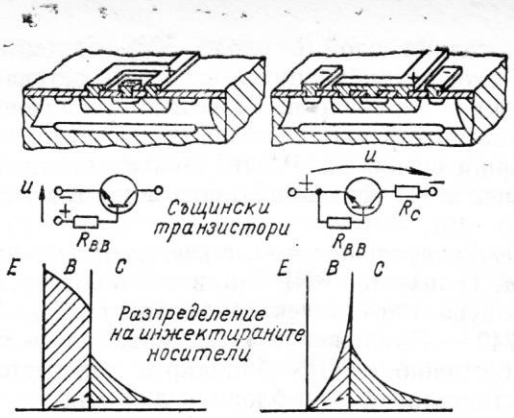
Разработени са много варианти на хоризонтални транзистори, но най-оптимална е затворената кръгова геометрия. Типовото разстояние между емитера и колектора е 10 μm при дебелина на базата 2 μm. Увеличаването на разстоянието води до намаляване на коефициента на усилване по ток, а намаляването му — до снижаване на пробивното напрежение. Една от възможностите за увеличаване на коефициента на усилване е използуването на N^+ скрит слой. С включването на N^+ скрития слой се увеличава концентрацията на примеси в дъното и се създава поле, спиращо за дупките. Почти напълно се отстранява токът, попадащ в подложката, който в структури без допълнителния слой е около 50% от емитерния ток, като рекомбинацията на базата остава практически непроменена. Известно увеличение на параметрите β и f_T може да се постигне, като се извърши специална P^+-дифузия на емитера (коефициентът на усилване по постоянен ток нараства до 20—40).

Структура, получена с участието на подложката. Транзистор PNP тип, в който подложката се използува като колекторна област (T_{34}, T_{35} от μA 740 — Приложение 11.1), може да се получи едновременно с NPN биполярен транзистор без допълнителни фотошаблони и дифузии.

Колекторната област се формира в подложка P-тип, обща с останалата схема и винаги заземена по постоянен ток. Следователно този транзистор може да се използува само в схеми на емитерен повторител. Усилването по ток и честотните му свойства се ограничават от относително голямата широчина на базата и относително малкия коефициент на инжекция на емитера.

Особености при проектирането на супер-β-транзистори. Използуването на транзистори със свръхусилване (супер-β) с $\beta = 1500—5000$ в режим на микротокове позволява значително да се намали входният и остатъчният входен ток на диференциалното стъпало, без да се влошават другите параметри. Намаляването на входните токове и изравняването на базовите токове на транзисторите позволява да бъде намалена тяхната разлика и в резултат да се намали температурният дрейф.

При работа в микрорежим тези транзистори имат много по-малък температурен дрейф от полевите транзистори с управляващ PN преход, но на даденото ниво на производство все още не се получават супер-β-транзистори с големи пробивни напрежения. Това изисква специална схема на включване, където тези транзистори да работят при нулево напрежение колектор—база. β се увеличава с намаляване на широчината на базата. Съществуват обаче граници, под които W_B не трябва да се намалява. Ограничението за широчината на базата се налага от обемното ѝ съпротивление $r_{BB'}$, което се увеличава при нейното намаляване. Най-важният фактор, който ограничава широчината на базата, е „ефектът на слепване“ между емитер и колектор. Ефектът се състои в това, че в случай на тънка база (0,2 μm) областта на обемния заряд на колекторния преход се допира с този на емитерния преход и се създават условия за непосредствен преход от обедненатa област на емитера в обедненатa област на колектора. Освен това работата на транзисторите в микрорежим се съпровожда с достатъчно голяма съставка на повърхностната рекомбинация на неосновните носители в базата на нормалния планарен транзистор. За намаляването ѝ дифузията на бор в базата се провежда на дълбочина 4 μm. Намаляването на периметъра на базовия преход намалява относителния дял на съставката на повърхностната рекомбинация на неосновните носители в пълния базов ток. Необходимо е да се контролира съвсем точно стойността на листовото съпротивление R_{SB}. Експериментално е доказано, че то тряб-



Пробивни напрежения:
7-8V(E-B-преход) >30V(C-B-преход)
Капацитет:
2pF(C_{SE}+C_{SC}) fpF(C_{SC})
Време на възстановяване:
100 ns 10 ns

Фиг. 11.22

ва да бъде 150Ω/□. При увеличаване на R_S до 200Ω/□ при същата дълбочина на дифузията се изменя температурната зависимост на R_{BB}'.

Интегрални диоди. Стремежът е интегралните диоди да се изработват без допълнителни технологични операции, т.е. да се използуват тези слоеве, които се получават при интегралните транзистори. В диодната структура един от транзисторните слоеве се оказва „излишен". Той може да се остави свободен или да се съедини с един от другите слоеве. Съществуват пет възможни варианта на диодно включване, най-използуваните от които са показани на фиг. 11.22.

При използуване на прехода E—B (с пробивно напрежение приблизително 6—7 V) колекторът е даден накъсо в такъв смисъл, че през базата тече ток $I_B \approx I_D/\beta$, т.е. $I_B \ll I_D$. Като такъв диод може да се разглежда NPN транзистор, за който $U_{CB}=0$. Преходът C—B има пробивно напрежение, по-голямо от 7 V. Този диод се използува само в обратно включване, тъй като в противен случай паразитният PNP транзистор през подложката има съществено влияние.

За нуждите на линейните интегрални схеми се налага да се конструират и интегрални ценерови диоди. При опорни напрежения от около 6,3 V преход E—B при даден накъсо преход C—B има

$$\frac{\Delta U_z}{\Delta T} \approx +2{,}3 \text{ mV/°C}.$$

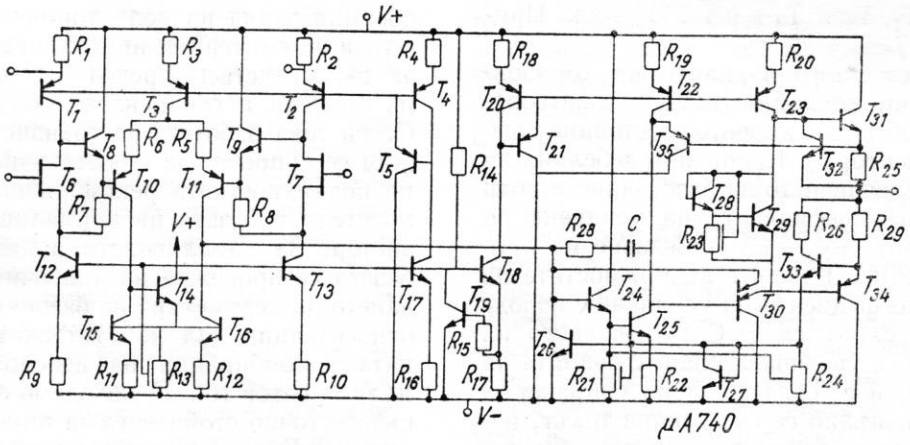
Този положителен коефициент може да бъде компенсиран от друг преход E—B, включен в права посока, с отрицателен коефициент от същия порядък. При много тънка база се получава ефект на слепване между зоните с обемния заряд на двата прехода. Конструктивно по този начин също могат да се реализират ценерови диоди в обхвата (1—6) V.

Във всички случаи на интегрални диоди при изолация с PN преход нерядко се налага да се отчита влиянието на паразитния PNP транзистор. От всички възможни интегрални диоди това влияние отсъствува само при варианта BC—E, при който емитерният преход на паразитния транзистор е даден накъсо. При всички други случаи е необходимо да се отчита полярността на приложеното върху диода напрежение.

11.4.3. Топология на ОУ μA 740 и LM 108

А. В схемата на *операционен усилвател* μA *740* (*фиг. 11.23*) елементите от входното стъпало заемат лявата част на чипа, като симетричните елементи се разполагат един до друг по известни вече съображения. Резисторите на входното стъпало R_1, R_2, R_3, R_4, R_5, R_6, R_7, R_8, R_9, R_{10}, R_{11} и R_{12} се изготвят в обща изолирана област с транзисторите T_8 и T_9. За пинчрезистора R_{13} се предвижда отделна област. В обща изолирана област са T_1, T_2, T_3, T_4, а в отделни — T_5, T_6, T_7, T_{10}, T_{11}, T_{12}, T_{13}, T_{15}, T_{16} и T_{17}. Съпротивлението с най-голяма стойност, респективно с най-голяма отделена мощност, R_{14} заедно с резисторите R_{15} и R_{16} се създават в обща изолирана област в средата на схемата. Под тази област е предвидено място за кондензатора.

В дясната част на схемата са разположени елементите от крайното стъпало. В отделни изолирани



Фиг. 11.23

области се изготвят T_{18}, T_{19}, T_{21}, T_{25}, T_{26}, T_{27}, T_{30}, T_{32}, T_{33}, T_{34} и T_{35}. В обща област са хоризонталните T_{20}, T_{22}, T_{23}. Транзисторите T_{28} и T_{29} заедно с R_{23} заемат една изолирана зона в горната част над R_{14}. В десния край на схемата са проектирани R_{18}, R_{19}, R_{20}, R_{25}, R_{26}, R_{29} и T_{31}. За пинчрезисторите R_{21}, R_{24} и резистора R_{22} е предвиден отделен изолиран сектор. Предвидено е едно изолирано поле за пресичане на два проводника с помощта на пасаж. Друг подобен „тунел" е изпълнен с дифузионната област на резистора R_{14} поради факта, че потенциалите в двата му края са високи и се приближават до E_1. По този начин преходът P^+N не е достигнал още до напрежението на отпушване 0,7 V. Трети пасаж е изпълнен в област на разделителната дифузия и неговото запушване е осигурено.

Повечето от транзисторите в този операционен усилвател работят с много малки токове от порядъка на микроампери (Приложение 11.1). За тях се избира конфигурация с един базов контакт и минимална емитерна област. Такива транзистори в μA 740 са T_{15} и T_{16}, които работят с ток 200 μA.

Над T_{18} не преминава допълнителен проводник и затова размерите на колекторната област могат да бъдат намалени. Той има същата конфигурация както T_{15} и T_{16}. Такава геометрия имат още T_{19} и T_{26}. Разликата в конфигурацията на T_{19} и T_{15} е, че емитерът му е между базовия и колекторния контакт. T_{26} обикновено е запушен, но когато се задейства защитата, през него протича ток от порядъка на 40 μA.

В нормално състояние T_{32} също е запушен. При задействуване на защитата той се отпушва и през него протича ток около 200 μA. При това условие той може също да се оразмери с минимална площ на емитера.

Транзисторите T_{12} и T_{13} работят с колекторен ток 400 μA и могат да се изпълнят с минимална емитерна площ. Те са NPN тип. От схемотехнични съображения обаче при тях се налага разстоянието между колекторните и базовите им изводи да е по-голямо, за да може да премине още една свързваща шина.

През T_{25} тече ток от порядъка на 700 μA и той има същата конфигурация както T_{12} и T_{13}.

T_{14} е NPN транзистор с колектор, свързан с източника на положително напрежение. По тази причина той може да бъде изпълнен в изолираната област на дифузионните резистори. Транзисторът работи с малък ток и се изготвя с минимална площ на емитера.

Конфигурацията на T_{24}, който е NPN тип и работи с колекторен ток 54 μA, е идентична с тази на T_{14}.

T_9 и T_8 също се изпълняват в една област с дифузионните резистори, тъй като и техните колектори са свързани с източника на положително напрежение. Токът през тях е 200 μA, което позволява да се използува конфигурация с минимална площ на емитера. За да се избегне пресичането между два проводника, разстоянието между техните емитерни и базови контакти е по-голямо.

T_{31} е един от крайните транзистори, тип NPN. В работен режим през него протича ток около 600 μA. При задействуване на защитата този ток може да нарасне до около 26 mA. T_{31} трябва да се оразмери при тези условия с известен коефициент на запас. При конфигурация с два базови извода $P_{E31}=2.70=140$ μm, $I=P_{E31}J_E=140.0{,}4=56$ mA. Колекторът му е свързан с положителния източник, поради което може да се изпълни в обща изолационна област с дифузионните резистори.

Транзисторите T_{28} и T_{29} са от NPN тип. Техните колектори са свързани и затова те могат да се изпълнят в обща изолирана област. Тъй като работят с малки токове, те могат да се изпълнят с минимална емитерна площ. T_{28} е включен като диод, чийто емитер е свързан с базата на T_{29}. Това позволява размерите да бъдат намалени още повече.

T_{27} работи в диодно свързване и през него протича малък ток — 40 μA. Размерите му са намалени поради характерното свързване.

Транзистори тип PNP. T_1, T_2, T_3 и T_4 са хоризонтални транзистори. Техните базови контакти са свързани с обща шина, което позволява те да бъдат проектирани в обща базова област. Колекторните им токове не превишават 400 μA. Следователно може да се използува конфигурация с минимална площ на емитера. Тъй като изводът от базата не се намира в близост с емитерната област, техните размери могат да намалят ще повече. Същото се отнася и за колекторната област.

T_5 е също PNP транзистор с колекторна област, свързана с източника на отрицателно напрежение. Неговият ток е 20 μA, което позволява той да се изпълни с минимални размери. За да се намали дебелината на неговата база, той се изготвя като хоризонтален. За да се осъществи връзката между колектора на T_5 и източника на отрицателно напрежение, се прави P-дифузия в N-областта, която свързва страничните стени на изолационната дифузия. Така се получава извод от подложката.

T_{21} работи с колекторен ток около 20 μA. Има идентични размери и конфигурация с тази на T_5.

T_{10} и T_{11} са хоризонтални PNP транзистори. Техните токове са около 200 μA, което позволява да бъдат изпълнени според конфигурацията с минимални размери на емитерната област.

T_{33} участвува във веригата на защитата. В нормално състояние е запушен. Когато се отпуши, през него протича ток 35 μA. Това позволява да бъде оразмерен като транзистор с минимален периметър на емитерната област. Размерите и конфигурацията му са както на T_{10} и T_{11}.

Транзисторите T_{20}, T_{22} и T_{43} са хоризонтални PNP тип. Те имат обща базова шина, следователно могат да се изпълнят в обща изолирана област. Участвуват в крайното стъпало и са свързани с веригата за защита от късо съединение, поради което те трябва да бъдат преоразмерени. Нормалните токове през тях са до около 700 μA, но при задействуване на защитата те могат да нараснат. Трите транзистора се изготвят с еднакви размери, за да се губи по-малко време при проектирането и

създаването на шаблоните. За сигурност се използува колекторната област с два извода. Само единият от тях (T_{20}) поради топологични затруднения се проектира с един колекторен извод. Базовият контакт е N^+ и се изготвя като N^+-област между трите транзистора.

T_{30} е с два емитера. Единият от тях се използува като обратна връзка при включване на защитата. През него протича много малък ток и той може да бъде с минимални размери. През другия емитер протича работният ток на драйверната група и базовият ток на крайния транзистор. В нормален режим неговият ток е малък и може да изпълнява ролята си с минимален по площ емитер. При късо съединение на изхода базовият ток на T_{34} нараства много. Затова е необходимо този емитер да се преоразмери. При активен периметър P_E=180 μm емитерната област може да пропусне ток 72 mA.

При най-тежки условия работи T_{34}. В нормално състояние през него тече ток 700 μA. При задействуване на схемата за защита от късо съединение токът през него може да достигне до около 50 mA и да се установи до 24 mA. Възприема се конфигурация с три емитерни области и с два базови контакта. Колекторът на този транзистор е свързан с източника на отрицателно напрежение. Следователно необходимо е да се осигури връзка с подложката.

T_{35} работи само при включване на защитата. Той е PNP тип с колектор, свързан с отрицателния източник, т.е. с подложката. Поради неголемия ток, който тече през него, той може да бъде с минимална конфигурация на емитерната област.

Входните транзистори от полеви тип с управляващ PN преход са T_6 и T_7. При тях може да се провери дали работят в предписания режим при избрани размери на канала. Това остава, като се намери токът на насищане (вж. гл. 12).

Б. Топологични особености на *транзисторите със свръхвисоко усилване (супер β) в LM 108 (CM 208)* — фиг. 11.24. Транзистори T_1 и T_2 са входни за операционен усилвател LM-108. В топологията им има няколко особености, които се дължат на факта, че тяхната технологична схема и специфичните им електрически характеристики се различават от тези на останалите структури в схемата. Транзисторите работят с колекторен ток от порядъка на 1÷3 μA и максимално допустимо напрежение между колектор и емитер U_{CE}=1÷2 V при статичен коефициент на усилване по ток β=2000÷÷6000.

За намаляване на стойността на повърхностната рекомбинация, която влошава коефициента на усилване по ток, е необходимо да се намали периферията на базовия преход. При транзисторите с тънка база периметърът на базовата област е 200 μm (60×40 μm). Използуват се кръгови емитери с диаметър 35 μm, което позволява увеличаване на ефективната площ на емитера и същевременно спомага за подобряване идентичността на входните характеристики.

11.4.4. Оразмеряване на пасивни компоненти

В монолитните интегрални схеми се използуват два вида *резистори* — полупроводникови и тънкослойни. Полупроводниковите могат да се изготвят едновременно с останалите елементи на схемата без допълнителни обработки. Те обаче не са идеални елементи на схемата и имат лоши температурният и честотни характеристики. Напротив, тънкослойните резистори притежават добри електрически характеристики, но изискват допълнителни технологични процеси.

В зависимост от това, коя част от структурата и какъв метод на изготвяне са използувани, полупроводниковите резистори се делят на четири групи — дифузионни, части от епитаксиален слой, канални (пинч) резистори и йонно имплантирани.

Основа на дифузионния резистор е един от дифузионните слоеве (базовият или емитерният), разположен в изолирано „островче", снабден с два омови контакта. На фиг. 11.25 е представен типичният вид и напречното сечение на дифузионния резистор P-тип, получен чрез P-базова дифузия в двете форми на изготвяне — права ивица и меандър. За схемно използуване на резистори с такава структура е необходимо към изолиращия PN преход да се приложи запушващо напрежение, равно на сумата от захранващите напрежения $\pm U_{захр}$.

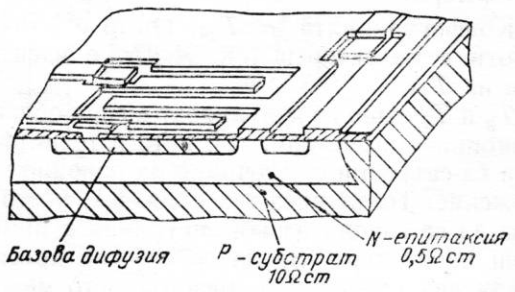
Съпротивлението на дифузионния резистор без отчитане на контактните площадки и завоите на меандрите може да се напише във вида $R=R_{\square}L/b$, където L е дължината, а b — широчината на резистора. За случая $L=nв$ R се определя от броя на квадратчетата n.

За ивично съпротивление $L=b\frac{R}{RS}\left(\mu m\frac{\Omega}{\Omega/\square}=\mu m\right)$. Широчината на отделните ивици се изменя между 10 и 50 μm. Тя зависи от възможностите на фотолитографията и разсейваната мощност в съпротивлението. Ако в областта, където е извършена базова дифузия, бъде изпълнена и емитерна дифузия, получава се т.нар. скрито съпротивление. Като типични стойности на листово съпротивление на отделните видове дифузии могат да се използуват следните стойности:

R_S за емитерната дифузия — 5 $\Omega/\square$;

R_S за базовата дифузия — 200 $\Omega/\square$.

При двойното използуване на дифузиите, т.е. при т.нар. скрити съпротивления, листовото съпротивление може да бъде 700 $\Omega/\square$.

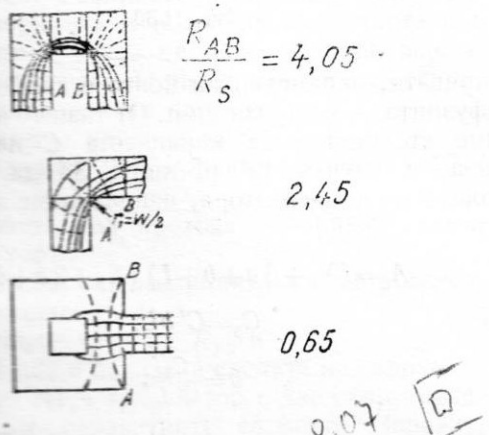


Фиг. 11.25

Колкото е по-голямо листовото съпротивление, толкова е по-силна температурната зависимост на изготвяните дифузионни съпротивления. Типични стойности на температурния коефициент на съпротивлението са (0,5—1).10^{-3}/°C за емитерната дифузия, 2.10^{-3}/°C за останалите видове дифузионни съпротивления. В основата на тези зависимости е функцията $\mu(T)$. Основно правило при определянето на топологията е да се избере минималната възможна широчина на дифузионната област. Например за един резистор със стойност 10 kΩ, изготвен чрез базова дифузия при широчина на ивицата 15 μm и дължина 750 μm, е необходима площ 11 000 μm²; докато за един транзистор са необходими средно 750 μm².

Като пример за оразмеряване ще разгледаме топологията на едно интегрално съпротивление с форма на меандър, показано на фиг. 11.26. Ако дълбочината на базовата дифузия е 2 μm, концентрацията на примесите в епитаксиалния слой 10^{16} cm^{-3} и повърхностната концентрация 10^{19} cm^{-3}, с помощта на кривите на Ирвин (фиг. 9.8.5) отчитаме средната специфична проводимост, за случая $x=0$ (резистор, изготвен чрез базовата дифузия). След това изчисляваме листовото съпротивление. Стойността на съпротивлението получаваме чрез преброяване на броя на квадратчетата, като контактните места и извивките на меандъра отчитаме съгласно таблицата на фиг. 11.27.

Когато е необходимо да се оразмери един резистор по зададена стойност, постъпваме по обратния ред. Освен стойността на съпротивлението от голямо значение е изчисляването на необходимата площ за него, която зависи главно от геометричната форма, стойността на съпротивлението, листовото съпротивление R_S, максимално допустимата разсейвана мощност P_{max} и тока I, който тече през съпротивлението. Изчисленията показват, че резистор, изготвен във форма на меандър, има обикновено три пъти по-малка площ от същото съпротивление, изготвено във формата на права отсечка. При това оптималният брой извивки на меандъра трябва да бъде избран така, че общата форма на „островчето“ в епитаксиалния слой да бъде близка до квадрат.



Фиг. 11 27

За изчисляване на площта и геометричните размери на резисторите се използуват следните уравнения:

$$P=I^2R=I^2R_{\square}\frac{Lb}{b^2}; \quad P_{max}=\frac{I^2R_{\square}}{b^2}; \quad b_{min}=\sqrt{\frac{I^2R_{\square}}{P_{max}}}.$$

От фиг. 11.26 и 11.27 следва:

$$A_{R_{ивица}}=\left(b\frac{R-1{,}3R_{\square}}{R_{\square}}+4b+15a+x_p\right)(b+11a+x_p)$$ — в случай на самостоятелно „островче“;

$$A_{R_{меандър}}=(L^*+8a)[5b+n(b+5a)+a],$$
$$L=n(L^*+5a),$$

$$A_{R_{меандър}}=\left(\frac{bR}{nR_{\square}}+3a\right)[5b+n(b+5a)+a]$$ — за показания участък на фиг. 11.26.

От $\frac{dA_R}{dn}\Big|_{n=n_{opt}}=0$ може да се определи оптималният брой извивки в меандъра.

Тъй като стойността на R е функция на $R_{\square}$, тя е силно зависима от толерансите на технологичния процес. Обикновено $R_{\square}$ се изготвя с точност до ±20%, което би трябвало да се приеме и за R. От друга страна, поради едновременното изготвяне на всички съпротивления отношението между стойностите се поддържа с много по-голяма точност, която зависи само от толерансите на фотолитографията — до ±2%. Колкото е по-малка стойността на съпротивлението, толкова по-големи трябва да са размерите на квадрата, в който се изготвя.

Пинчрезисторите имат по-големи възможности за увеличаване на стойността на съпротивлението. Методът, с който се постига това, се базира на увеличаване на специфичното съпротивление на полупроводниковия слой по пътя на намаление на ефективната площ на неговото напречно сечение. На фиг. 11.28 е изобразена резисторна структура, формирана с помощта на емитерна дифузия N^+-тип в горната част на дифузионния резистор P-тип. Емитерната дифузия съществено намалява ефективната площ на напречното сечение на P-резистора и следователно увеличава листовото съпротивление на слоя:

$$R_{\square}=\frac{\rho}{X_{BC}-X_{EB}}=\frac{\rho}{W_B}.$$

Структурата на този вид резистор може да се отъждестви с тази на полевия транзистор. Работният участък от вертикалната геометрия е P-тип и съответствува на канала на транзистора.

Този слой е на дълбочината на емитерната дифузия и се характеризира с по-малка средна концентрация на акцепторите, следователно с по-голямо листово съпротивление (2—5 kΩ/□).С помощта на тези резистори може да се реализира съпротивление до 80—100 kΩ, R_S=(3—10) kΩ.Техните качества могат да бъдат оценени по волтамперната им характеристика, която е нелинейна. Изменението на съпротивлението е линейно само в областта на малките напрежения (по-ниски от

праговото). При достатъчно големи напрежения обемните заряди в близост до отрицателния електрод, разширявайки се, препокриват канала, което води до насищане на тока. Пробив настъпва при напрежение върху резистора 6÷8 V, съответстващо на пробивното напрежение на емитерния преход.

Статичното съпротивление на един такъв резистор може да се намери, като се знае обемът и специфичното съпротивление на канала и напрежението, приложено върху него.

Ако между двата му края се подаде напрежение, по-голямо от праговото, през резистора протича ток със стойност, близка до тока на насищане.

При това положение стойността на съпротивлението расте с увеличаване на пада върху него за напрежения, по-ниски от пробивното. Това съпротивление има особено висока стойност като динамичен товар.

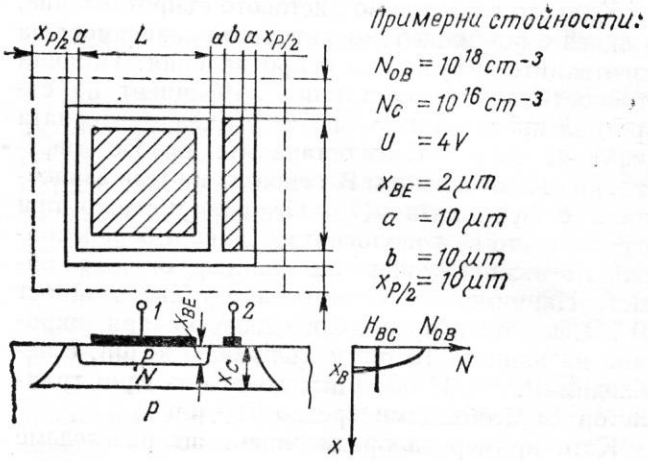
Очевидно приложението на пинчрезисторите е свързано с редица конструктивни ограничения, на първо място, споменатото пробивно напрежение V_{EB0}, което ограничава пада върху него. На второ място е температурната зависимост на съпротивлението — 0,6%/°C. На трето място, възможните отклонения в номиналната стойност в резултат на размиването на дифузионните слоеве.

Особено важни са и повишените паразитни капацитети поради наличието на два прехода, включени в обратна посока PN и PN^+.

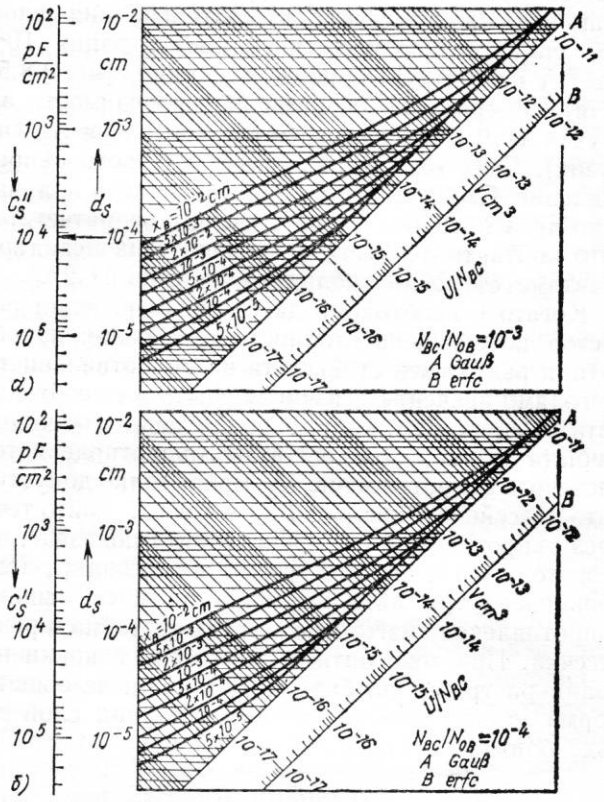
Съществува възможност за конструиране на подобен резистор чрез използване на P-базовата дифузия и епитаксиалния канал. Избягва се ниското пробивно напрежение на прехода емитер—база и в същото време се реализират стойности 20÷300 kΩ.

Като *кондензатор* в интегралните схеми се използва капацитетът на обратно включения PN преход, както и капацитетът на една MOS-структура. Характерно е, че дори малки стойности на капацитетите, например 10 pF, изискват площ, голяма колкото тази на един транзистор. Разликата между двата вида структури е, че кондензаторът, използуващ PN преход, винаги е поляризиран и стойността на неговия капацитет зависи от приложеното напрежение. На фиг. 11.29 е показана хоризонталната и вертикалната геометрия на един кондензатор с PN преход.

Зададените стойности отговарят на случаи от практиката и могат да послужат за изчисляване на капацитета за единица площ и на площта, необходима за изготвяне на този кондензатор. Изчисляването на капацитета за единица площ C_0 става с помощта на фиг. 11.30. От приложеното напрежение 4 V и използуваната концентрация на епитаксиалния канал 10^{16} cm^{-3} намираме стойността върху правата линия, в случая 4.10^{16} cm^{-3}. Правата B отговаря на разпределение erfc, а правата A — на Гаусово разпределение на примесите. Тъй като базовата дифузия се изпълнява от ограничен източник, нейното разпределение е Гаусово. Следователно стойността 4.10^{-16} отчитаме по правата A. След това търсим пресечната точка



Фиг. 11.29



Фиг. 11.30

с кривата, параметър на която е дълбочината на дифузията — в случая 2μm. От тази точка определяме стойността на капацитета C на единица площ, в случая 120 pF/mm². За да изчислим площта на кондензатора, използуваме зависимостите

$$A_C = (X_p + 3a + b + L)\,(X_p + 2a + b),$$

$$C_S = C'\,bL,$$

$$b = \frac{C_S}{C'\,L},$$

$$A_C = (X_p + 3a + b + L)\left(X_p + 2a + \frac{C_S}{C'\,L}\right),$$

$C'=120$ pF/mm² (фиг. 11.30).

Оптимална конфигурация се търси за

$$\left.\frac{dA_C}{dL}\right|_{L=L_{opt}}=0,$$

$$\left(\frac{b}{L}\right)_{opt}=\frac{C_S}{C'L_{opt}^2}=\frac{X_p+2a}{X_p+3a+b}.$$

На фиг. 11.31 е показана структурата на кондензатор, използуващ капацитета на системата метал—силициев двуокис—полупроводник. MOS-кондензаторът притежава това предимство, че неговият капацитет не зависи от приложеното напрежение.

Кондензаторът C_1 от μA 740 е MOS със стойност 30 pF. Като диелектрик се използува силициев двуокис, получен по пиролитичен път. За изготвяне на кондензатора е необходима специална маска, която се създава отделно от останалите шаблони. Дебелината на окисния слой е 0,2 μm. Специфичното съпротивление ρ е $10^{16}\Omega$.cm. Диелектричната константа е 3,8 до 4. При тези условия по формулата $C_o=\frac{\varepsilon\varepsilon_{ox}}{d_{ox}}$ получаваме специфичен капацитет 180 pF/mm². Кондензаторът се оразмерява по следния начин:

$$C=C_0 bL=C_0 A_C,\quad A_C=\frac{C'}{C_0}=0{,}166\ \text{mm}^2,$$

$$b=L=\sqrt{A_C}=410\ \mu\text{m}.$$

11.4.5. Изчисляване на „паразитните“ елементи при интегралните структури

Едни от най-важните конструктивно-технологични проблеми при интегралните схеми са свързани с паразитните елементи. Тяхното присъствие се определя от конструкцията на схемите, главно от вида на изолацията и разположението на изводите от едната страна на подложката. Съвременната полупроводникова техника разполага с нови технологични схеми (фиг. 11.4, 11.6, 11.7), които до голяма степен елиминират проблема за изолацията. Това не се отнася само за прехода колектор—подложка. Разликата в тока на утечка достига 6÷7 порядъка в полза на изолацията със SiO_2. Вторият проблем не може да бъде решен, тъй като е характерен за интегралните структури.

Основните паразитни елементи са:

а) капацитетът на прехода *СП*;

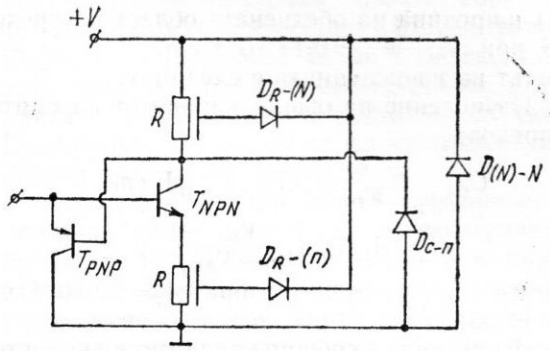
б) паразитният PNP транзистор към NPN транзистора;

в) капацитетът на прехода в хоризонталните PNP транзистори;

г) капацитетът на изолацията на „островчетата“ на съпротивленията;

д) съпротивленията на R_{BB} и R_{CC}.

На фиг. 11.32 е показана схемата на свързване на интегрален NPN транзистор с две съпротивления с някои от „паразитните“ елементи. Паразитният PNP транзистор е запушен при активен режим на NPN транзистора. Неговото отпушване е



Фиг. 11.32

възможно само в наситено състояние на главния транзистор. Паразитният PNP транзистор оказва съществено влияние само когато се създават електрически условия за отпушване на прехода *B—C* на NPN транзистора. Възможна е допълнителна технологична обработка за намаляване на β_{PNP} чрез дифузия на злато, при което се намалява времето на живот на неосновните носители.

Потенциалът на островчето със съпротивленията е обикновено максимално положителен. Показаните на фиг. 11.32 диоди са винаги обратно включени. За паразитния капацитет между съпротивлението и островчето се получава

C[pF]$=2.10^{-4}\ b^2$ [μm²] $R[\Omega]/\rho_{\square}$ [Ω], т.е. за $\rho_{\square}=150\Omega$ и $b=10$ μm $C=0{,}14$ pF/kΩ, а за $b=7$ μm $C=0{,}07$pF/kΩ.

Капацитетът между „островчето“ и подложката може да бъде доста голям поради голямата площ. Този диод е обратно поляризиран със сумата ±V на приложеното напрежение, като стойността на капацитета може да достигне 50÷100 pF/mm².

Съществено значение за работата на ИС имат паразитните капацитети, свързани с металните шини. При дебелина на слоя от SiO^2 0,5 μm се получава до 80 pF/mm². Нормално контактната площадка е с площ до 10 000 μm², при което между извод и подложка се получава капацитет 0,5 pF.

Изясняването на останалите паразитни елементи ще стане на базата на структури от ОУ μA 740. На фиг. 11.33 (*а÷г*) са показани хоризонталната геометрия на NPN транзистор с два контакта на базата, неговата вертикална геометрия, конфигурацията на базовата област за определяне на R_{BB} и избраният метод за изчисляване на R_{CC}. Заедно с паразитните елементи ще бъдат изчислени и някои важни параметри на транзисторите. Необходимите конструктивни параметри, които са общи за всички транзистори от схемата, са:

а) подложка — P⁻Si, $\rho_N=10\Omega$.cm, $N_A=10^{15}$ cm^{-3}, дебелина $x_п=150.10^{-4}$ cm;

б) епитаксиален слой — N-Si, $\rho_C=0{,}5\Omega$.cm, $N_D=10^{16}$ cm^{-3}, $x_{СП}=25.10^{-4}$ cm;

в) базова дифузия (емитерна за PNP транзистори) — $\rho_B=(0{,}04\div0{,}2)$ Ω.cm, $N_{OB}=10^{18}$ cm^{-3}, $x_{BC}=2{,}1.10^{-4}$ cm;

г) емитерна дифузия — $\rho_{E\square}=10\Omega$, $N_{OE}=10^{20}$ cm^{-3}, $x_{EB}=1{,}2.10^{-4}$ cm;

д) градиент на примесите—$a/_{x_{EB}}=3.10^{22}$ cm^{-4};

е) дифузионно напрежение — $V_D=0{,}86$ V;

ж) широчина на обедняната област на прехода $E-B$ при $V_D-W_{oj}=0{,}14.10^{-4}$ cm.

Редът на изчисленията е следният:

1. Изчисление на общия капацитет на емитерния преход:

$$C_{OE}|_{V_D}=\frac{\varepsilon}{W_{oj}}=0{,}75\cdot 10^5\ \text{pF/cm}^2;$$

$$C_E=A_E C_{OE}\left(\frac{V_D}{V_D-V_{BE}}\right)^{1/3},$$

например $C_E/_{0{,}7\text{V}}=2{,}89$ pF при $A_E=22.10^{-6}$ cm^2 (фиг. 11.33).

2. Изчисление на общия капацитет на колекторния преход:

$$C_C=A_C C_{0C}/_{10\text{ v}}\left(\frac{10}{V_{CB}\,[\text{v}]}\right)^{1/2}=0{,}51\left(\frac{10}{V_{CB}}\right)^{1/2}$$

за $A_C=0{,}685\cdot 10^{-4}$ cm^2,

например $C_C|_{10\text{V}}=0{,}51$ pF.

3. Изчисление на изолационния капацитет: $C_{\text{и}}=C_{\text{и дъно}}+C_{\text{и страна}}$.

Изчислява се за рязък преход нормализирано върху капацитета за $V_{C\text{п}}=10$ V. За $A_{\text{и дъно}}=4{,}3.10^{-4}$ cm^2, $A_{\text{и страна}}=2{,}1.10^{-4}$ cm^2 и $V_{D\text{и}}=V_T \ln\frac{N_A N_D}{n_i^2}=0{,}624$ V;

$$C_0\Big|_{V_{D\text{и}}}=0{,}13\ \text{pF/cm}\ \text{ и }\ C\Big|_{10\text{ v}}=C_0\left(\frac{V_{D\text{и}}}{V_{D\text{и}}+10}\right)^{1/2}.$$

Следва, че $C_{\text{и дъно}}=A_{\text{и дъно}}\,3{,}47\cdot 10^3\left(\frac{10}{V_{C\text{п}}}\right)^{1/2}$ pF

и

$$C_{\text{и страна}}=A_{\text{и страна}}\,1{,}01\cdot 10^4\left(\frac{10}{V_{C\text{п}}}\right)^{1/2}\text{pF};$$

или $C_{\text{и дъно}}=1{,}49\left(\frac{10}{V_{C\text{п}}}\right)^{1/2}$ и $C_{\text{и страна}}=2{,}1\left(\frac{10}{V_{C\text{п}}}\right)^{1/2}$.

Тогава $C_{\text{и}}=3{,}59\left(\frac{10}{V_{C\text{п}}}\right)^{1/2}$ pF и за $V_{C\text{п}}=10$ v $C_{\text{и}}|_{10\text{ v}}=3{,}59$ pF.

4. Изчисление на базовото съпротивление R_{BB}. За конфигурацията от фиг. 11.33*в* следва $R_{BB}=\frac{1}{2}\left[\frac{1}{3}\cdot\frac{\rho_{B\text{ дъно}}}{lW_B}+\frac{\rho_{B\text{ страна}}}{l_1 X_{BC}}\right]$. В случая структурата е симетрична с два извода — $l_1=l_2$. Коефициентът $^1/_3$ пред съставката под емитера определя ефективната част на това базово съпротивление [11]. Така определеното R_{BB} важи за малка инжекция. При големи стойности на тока в резултат на стесняването на емитера и концентриране на тока по периферията R_{BB} се определя главно от страничната съставка. За $\rho_{B\text{дъно}}=0{,}2$ Ω.cm и $\rho_{B\text{страна}}=0{,}04$ Ω.cm следва $R_{BB}=38$ Ω и $R_{BB}|_{\text{голям ток}}=4{,}3$ Ω.

5. Изчисление на колекторното съпротивление R_{CC}. При различна конфигурация на областите трябва да се използуват различни формули. При правоъгълна геометрия в зависимост от броя на изводите на колектора R_{CC} се намира чрез съпротивленията на няколко трапеца, включени паралелно. От фиг. 11.33 *г* определяме

$$R_{CC}=R_1//R_2=$$

$$=\rho_C\frac{2a_1}{(x_{C\text{п}}-x_{BC})(l_1+l_{E_1})}//\rho_C\frac{2a_2}{(x_{C\text{п}}-x_{BC})(l_2+l_{E_2})};$$

за $\rho_C=0{,}5$ Ω.cm и $X_{C\text{п}}-X_{BC}=22\cdot 9\cdot 10^{-4}$ cm следва $R_{CC}=52$ Ω.

При кръгла геометрия се получава

$$R_{CC}=\frac{\rho_C}{2\pi(X_{C\text{п}}-X_{BC})}\ln\frac{l_{CC}}{l_B},$$

където l_{CC} е обиколката на колектора, а l_B — на базата.

Използуваните досега зависимости са за случая, когато липсва скрит слой. В негово присъствие

$$R_{CC}\approx\rho\left(\frac{X_{C\text{п}}-X_{BC}-\Delta X_{N^+}}{A_E}+\frac{X_{C\text{п}}-X_{BC}-\Delta X_{N^+}}{A_C}\right).$$

6. Изчисление на колекторния ток при β_{max}. За $P_E=2l_E=2{,}2.10^{-2}$ cm и $\rho_{1\text{-страна}}=0{,}04$ Ω.cm при $\beta_{max}=50$ следва $\frac{W_B}{b_E}(2\beta_{max})^{1/2}<1$. Тогава $I_C/_{\beta max}=143$ mA (вж. 11.3).

7. Изчисление на f_T. Използува се $\frac{1}{f_T}=2\pi(\tau_E+\tau_B+\tau_{CC}+\tau_C)$, където τ_E и τ_C са времеконстантите, свързани съответно с емитерния и колекторния капацитет; τ_{CC} — транзитното време в обедняната колекторна област, , а τ_B — транзитното време в базата. За тези времена важат следните зависимости: $\tau_E=\frac{V_T}{I_E}C_E$; за $I_E\approx I_C=5$ mA следва $\tau_E=14{,}7$ ps; $\tau_B=\frac{W_B^2}{2{,}43\,D_P}$,

където D_P е коефициент на дифузия на токовите носители в базата, а $W_B(V_{CB})$ е широчината на базата в зависимост от приложеното напрежение V_{CB}. За $W_B|_{V\,CB}=10$ v $=0{,}67.10^{-4}$ cm следва $\tau_B=142$ ps.

$\tau_{CC}=\frac{\Delta x_{BC}}{2v_{SC}}$, където Δx_{BC} е обедняната област на колектора, а v_{SC} — скоростта на пренасяне. За $\Delta X_{BC}=10^{-4}$ cm и $v_{SC}=8.10^{-6}$ cm/s следва $\tau_{CC}=6$ ps,

$\tau_C=R_{BC}(C_C+C_{\text{и}})$; за изчислените стойности $\tau_C=213$ ps.

Следователно $f_T=423$ MHz.

Интересно е да се направи сравнение с един вертикален PNP транзистор с използуване на подложката, получен по същата технологична схема. На фиг. 11.34($a\div в$) са показани хоризонталната и вертикалната геометрия и начинът на изчисление на R_{BB}.

1. За C_E се използуват същите формули. Съответно $C_E/V_{BE=0{,}7\text{ V}}=0{,}87$ pF.

При изчислението на C_C се прилагат зависимостите за $C_{\text{и дъно}}$ и $C_{\text{и страна}}$, съответно $C_C=2{,}88\left(\frac{10}{V_{CB}}\right)^{1/2}$ pF.

2. За изчисляване на R_{BB} се използуват същите зависимости, като в този случай концентрацията в базата е постоянна (епитаксиален слой на колектора на NPN транзистора). Съгласно фиг. 11.34*в* за два контакта на базата $R_{BB}=9\,\Omega$, а при стеснение на емитера $R_{BB}|_{\text{голям ток}}=5{,}3$ Ω.

3. Изчисление на R_{CC}. За вертикалния PNP транзистор с участие на подложката $R_{CC}=\frac{\rho_{\text{п}}X_{\text{п}}}{A_C}$ или $R_{CC}=408$ Ω за $\rho_{\text{п}}=10$ Ω.cm, $X_{\text{п}}=125\cdot 10^{-4}$ cm и $A_C=3{,}05\cdot 10^{-4}$ cm^2.

4. Изчисление на f_T. При изчислението се използуват същите зависимости, като се заместват

$I_E \approx I_C = 5$ mA, $C_E = 0{,}87$ pF, $W_B = 10 \cdot 10^{-4}$ cm, $D_{nB} = 36$ cm²/s, $\Delta X_{BC}|_{V_{BCPN}} = 2{,}94 \cdot 10^{-4}$ cm, $C_C = 2{,}88$ pF.

Следва $f_T = \frac{10^{12}}{6{,}28\,(4{,}4+11400+18+1175)} = 12{,}64$ MHz.

11.5. ЦИФРОВИ ИНТЕГРАЛНИ СХЕМИ

Съвременната полупроводникова технология позволява реализирането на няколко типа биполярни логически схеми. Класификацията им може да се извърши по няколко признака, отнасящи се до логическите възможности и функционирането им, а така също и до тяхната схема.

ECL—емитерно свързана логика. Тези схеми имат редица предимства — повишени логически възможности и стабилност, много голямо бързодействие. Най-важният недостатък е голямата консумирана мощност. Това ги прави неподходящи за изпълнение с голяма степен на интеграция. Характерни са малките логически амплитуди на напрежението (изменят се главно токовете). Оттук идва и второто наименование на тези интегрални логически елементи — токови превключватели.

DTL — диодно-транзисторна логика. При тези схеми общият брой на диодите обикновено е с два повече, отколкото е броят на входовете, като по два диода се използуват за надеждно запушване на транзистора. *DTL* схемите са със средно бързодействие и сравнително малка разсейвана мощност при добра шумоустойчивост.

TTL — транзисторно-транзисторна логика. Тези схеми са напълно пригодна за интегрално изпълнение модификация на *DTL* схемите.Те имат значително по-голямо бързодействие и малко по-малка шумоустойчивост. Входните и отместващите диоди са заменени с една характерна интегрална структура — многоемитерен транзистор. *TTL* схемите се използуват и в паметите. Основната статична запомняща клетка е изпълнена с многоемитерни транзистори. Адресната и информационните шини са общи за определен брой клетки в зависимост от организацията на паметта. Характерно е, че се използува съпротивлението на епитаксиалния канал за конструиране на товарните резистори.

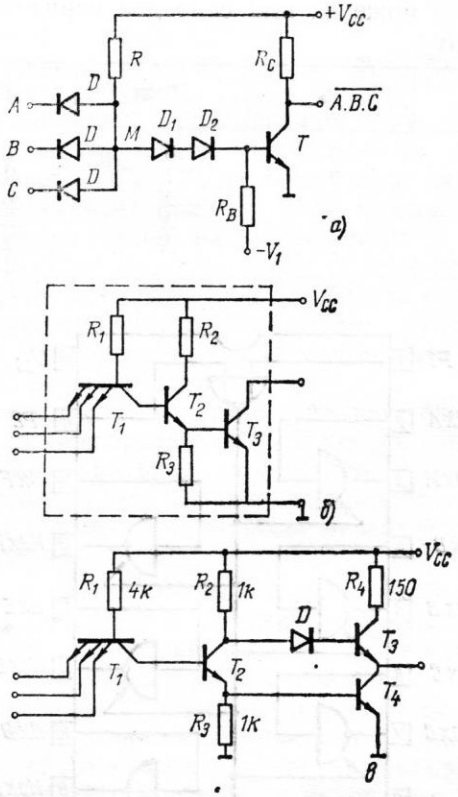
Известни са няколко ключови схеми в TTL-сериите: SUHL1, MTTL1, RAY1, HLTTL1, 54/74, 9000, SUHL2, 54H/74H, HLTT 2, 54L/74L, 54S/74S. С изключение на последната, различията в схемните решения не се отразяват съществено върху конструкцията и технологичната схема .

Схемите с индекс S са най-бързодействуващи. Средното време на превключване е 3,5 ns, а консумацията — около 19 mW. Бързодействието се постига чрез въвеждане на нелинейна отрицателна обратна връзка между колектора и базата на транзистора (с диод на Шотки), като по този начин се избягва пълното му насищане, т.е. почти липсва натрупване на заряди в базата. Това означава, че транзисторите се заместват с Шотки-транзистори. Съществува междинна серия с индекс *LS*. Средното време на превключване е 9,5 ns, а консумацията — 2 mW. Като недостатък на схемите с Шотки-транзистори може да се отбележи по-високото ниво на изходната нула.

Основният принцип при конструирането на биполярни схеми може да се формулира така: броят на PN преходите, които при определено състояние на схемата са запушени, трябва да бъде с един повече от тези, които са отпушени (към тях се брои и логическата нула). По такъв начин се осигурява сигурно запушване на необходимите транзистори. Това правило е изпълнено в схемата на фиг. 11.35*а*. При подадена логическа нула на входа е отпушен входният диод, т. е. отляво на точка M има един отпушен PN преход и една логическа нула, свързани последователно, а отдясно — последователно три PN прехода (два диода и един преход база — емитер). Така транзисторът е сигурно запушен, защото напрежението база — емитер е

$$V_{BE} = V_{вх}^{0} + V_D - V_{D_1} - V_{D_2} \approx 0.$$

Използуването на диоди ограничава бързодействието поради голямото време за възстановяване (>10 ns). Затова диодите се сменят с транзистори. На фиг. 11.35*б* е показан прост инвертор. За повишаване на товароспособността се използуват схеми със сложен инвертор (фиг. 11.35*в*). Тук диодът D е поставен за сигурно запушване на транзистора T_3 при наситени T_2 и T_4. Напре-



Фиг. 11.35

жението база—емитер на T_3 съгласно основното правило е

$$V_{BE_3}=V_{BE_4}+V_{CE\,2\,\text{НАС}}-V_D-V_{CE4\,НАС}\approx 0.$$

Като пример за конструиране на биполярна логическа схема ще бъде разгледан един нов клас логически схеми — *интерфейсните* (ХС6886, ХС8Т96). Самото им наименование показва и областта на приложение. Най-често те служат за осъществяване на връзка между процесора и останалите схеми към него (памет, управление и др.). Това означава, че интерфейсните интегрални схеми (ИИС) са управляем буфер, за който могат да се поставят най-общо следните изисквания:

а) висок входен логически импеданс — по такъв начин не се натоварват шините;

б) голяма скорост на операциите — увеличава се общото бързодействие на процесора;

в) съвместимост с другите логики — свързано е с универсалността на схемата.

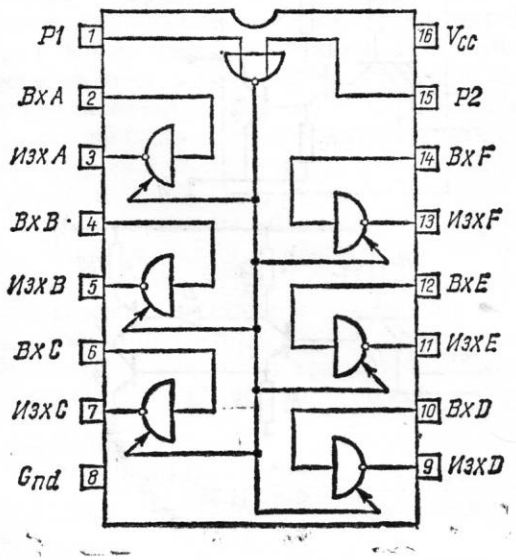
За този клас схеми е характерно наличието на три възможни състояния, т.е. освен двете показани състояния (логическа нула и логическа единица) се използува и едно трето, наречено в и с о к о и м п е д а н с н о. Това състояние е свързано с натоварването на шините и консумацията, като в него информация не се предава.

Управлението става или директно отвън, или чрез междинни управляващи логически елементи, формирани на един чип с буферите.

Блоковият вид на една ИИС се различава от обикновените логически ИС само по наличието на управляващ елемент (фиг. 11.36).

За да се синтезира схемата, трябва да се състави таблицата, описваща начина на действие. В случая тя може да има само два варианта. Поуместният е

P_1	P_2	Вход	Изход
0	0	0	1
0	0	1	0
0	1	X	Z
1	0	X	Z
1	1	X	Z



Фиг. 11.36

където 0 е логическа нула (ниско логическо ниво);

1 — логическа единица (високо логическо ниво);

X — произволно логическо ниво;

Z — висок импеданс (отворена верига).

Преди да се пристъпи към етапа проектиране, трябва да се зададат следните електрически параметри:

Параметър	Символ	Min	Тур	Max
Входна логическа единица, V	$U^1_{\text{вх}}$	2	—	—
Входна логическа нула, V	$U^0_{\text{вх}}$	—	—	0,8
Входен ток ,μA, при $U^0_{\text{вх}}=0{,}5$ V	$I^0_{\text{вх}}$		—	—400
Изходна логическа единица, V	$U^1_{\text{изх}}$	2,4	—	
Изходна логическа нула, V, при $I_{\text{изх}}=50$ mA	$U^0_{\text{изх}}$	—	—	0,5
Изходен ток на късо съединение (за кратко време), mA	$I_{\text{изх}\,\text{кс}}$	—	80	—
Захранващо напрежение, V	V_{CC}	4,75	5	5,75

В динамичните характеристики влизат следните времена:

закъснение между вход и изход — $t_{з\,10}$, $t_{з\,01}$;

закъснение между вход „Р“ и изход —

$$t_{з\,1z}(P),\ t_{з\,0z}(P),\ t_{з\,z1}(P),\ t_{з\,z0}(P).$$

За първите две времена $t_{з\,10}$ и $t_{з\,01}$ може да се приеме стойност между 5 и 10 ns, а за останалите — между 10 и 15 ns.

Тези стойности са характерни за бързодействуващите логически схеми. Има ИИС, при които закъснението между вход и изход надминава 50 ns (обикновено са на основата на DTL).

От по-горе изброените условия първото се изпълнява най-добре от DTL схеми, но бързодействието е малко. Едно възможно ново решение е заместването на входните диоди с PNP транзистор.

Условие (*б*) се постига чрез легиране със злато или чрез Шотки-технология. При първия метод атомите на златото действуват като центрове на рекомбинация и времето на живот на неосновните носители намалява. За съжаление дифузията на злато в преходите предизвиква редица нежелани ефекти (увеличени утечки в преходите, понижен коефициент на усилване по ток, силна температурна зависимост). Освен това методът е неселективен и технологично трудноконтролируем.

С втория метод не само че се увеличава още повече бързодействието, но и се избягват горните

недостатъци. Трябва да се отбележи обаче, че нивото на логическата нула нараства до 0,5 V. Чрез Шотки-технологията DTL схемите се изравняват по бързодействие с TTL.

Проектирането ще бъде направено при условие, че се използуват Шотки-елементи. За определен ток напрежението в права посока на Шотки-диода е с 0,2 до 0,3 V по-ниско, отколкото на диода с PN преход. Втора важна разлика е времето за разсейване на заряда, което при Шотки-диода практически е равно на 0, при PN диод, легиран със злато — 6 ns и при обикновен PN диод — 30 ns.

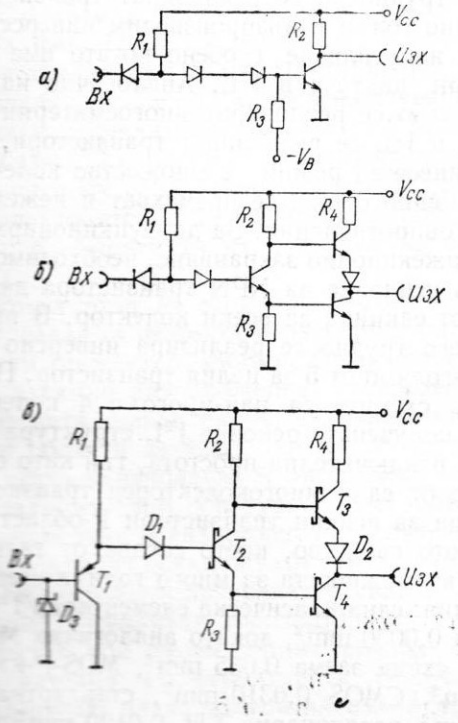
За да се получи Шотки-транзистор, достатъчно е базовият контакт да се разшири извън границите на базовата област и частично да „се разположи" върху колекторната област. За да се предотврати възникването на силно краево поле, постъпва се по един от двата метода:

с разширен електрод (фиг. 11.37 *а*) или със защитен пръстен (фиг. 11.37 *б*).

Шотки-транзисторите имат време за разсейване на заряда, практически равно на 0, докато за NPN транзистор без легиране със злато то е до 34 ns, а за NPN легиран транзистор — до 7 ns. Освен това този параметър при Шотки-транзистора слабо зависи от температурата дори и при температура 125°C (остава под 1 ns), докато при легираните със злато транзистори стига до 15 ns.

1. Съставяне на електрическата схема (ключова схема НЕ). Изходен пункт е основната ключова схема на DTL, като се обединят предимствата ѝ с TTL чрез входен PNP транзистор и Шотки-технология.

На фиг. 11.38 са показани основните етапи от синтезирането на схемата. Ролята на диода $Д_3$ се



Фиг 11.38

свежда до шунтиране на отрицателните отскоци във входния сигнал, с което се допринася и за общото повишаване на бързодействието на схемата. Времето за превключване на Шотки-транзисторите е под 1 ns. Същото се отнася и за T_1, който е също Шотки-транзистор, разгледан заедно с $Д_3$. Остава да се провери влиянието на диодите $Д_1$ и $Д_2$.

$Д_1$ трябва да има по-голямо време за разсейване от T_2 и T_4, така че зарядът в последните да може да се разсее по-бързо. Следователно $Д_1$ трябва да бъде PN диод. Времето за разсейване на неосновните токоносители в най-добрия случай е около 10 ns, като напрежението върху диода се изменя от 0,7 до около 0,08 V.

В първия момент след подаване на логическа нула на входа и отпушването на T_1 $U_{D1} \approx 0{,}7$ V. В същото време $U_{E1} = U^0_{вх} + U_{BE1} \approx 1{,}3$ V и понеже това напрежение се разделя между $Д_1$, от една страна, и BE_2 и BE_4, от друга, за последните два прехода остава $U_{BE2} = U_{BE4} = 0{,}3$ V. При достигане на стационарен режим се изпълнява условието $U_{D1} = U_{BE2} = U_{BE4} = U_{E1}/3$. По същия начин $Д_2$ допринася за по-бързото запушване на T_3.

Сега остава да се определят приблизителните закъснения на ключовата схема НЕ:

$$t_{з_{10}} = \sqrt{t^2_{з01(1)} + t^2_{з_{вкл}(D_1)} + t^2_{з01(2)} + t^2_{з10(1)}} =$$

$$= \sqrt{1^2 + 3^2 + 1^2 + 1^2} \approx 3{,}5 \text{ ns},$$

$$t_{з_{01}} = \sqrt{t^2_{з10(1)} + t^2_{з_{изкл}(D_1)} + t^2_{з01(2)} + t^2_{з10(3)} + t^2_{з_{вкл}(D_2)}} =$$

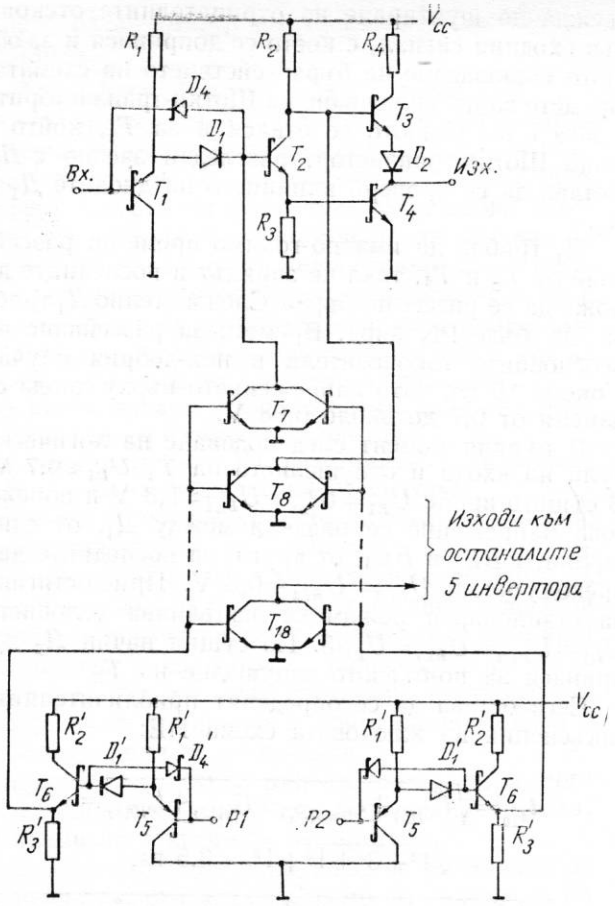
$$= \sqrt{1^2 + 3^2 + 1^2 + 1^2 + 3^2} \approx 4{,}6 \text{ ns}.$$

Тук не е отчетено влиянието на паразитните елементи, които са неизбежни. По тази причина времената ще нараснат.

Дотук схемата е двустационарна. За получаване на високоимпедансно състояние на изхода трябва базите на T_3 и T_4 да се шунтират на маса. Шунтиращ елемент може да бъде транзисторът, представляващ изход на управляващата схема ИЛИ—НЕ. Този изход не може да бъде общ за всички схеми НЕ, защото би дал базите на крайните транзистори накъсо. Така се стига до извода, че ИЛИ—НЕ трябва да има 12 независими изхода, по два за всеки елемент НЕ.

Вече може да се начертае и пълната електрическа схема на избраната ИИС. В нея допълнително е прибавен диодът $Д_1$ за директно „атакуване" на базата на T_2 при подаване на логическа нула на входа, с което се повишава бързодействието (фиг. 11.39).

2. Технологични и топологични особености. Шотки -технологията е напълно съвместима със стандартната технология, още повече, че като метал може да се използува алуминий (фиг. 11.40). Единствените различия са температурната обработка за получаване на Шотки-прехода — пластината се подгрява за кратко време при температура от 350 до 500°C (вж. гл. 9), и някои особености на фотолитографията.



Фиг. 11.39

Колекторът на T_1 е даден към маса, което означава, че може да се използува вертикален PNP транзистор. Възможно е да се използува и хоризонтален Шотки-транзистор (фиг. 11.40).

За гарантиране на пробивното напрежение на Шотки-прехода металният електрод се изтегля върху окисния слой.

Шотки-NPN транзисторът се получава, като базовият контакт се разшири върху част от колекторната област.

При определяне на технологичната схема и топологията се спазват общите принципи, описани при разглеждането на аналоговите схеми. Особеностите са свързани единствено с разполагането на Шотки-диодите. На фиг. 11.41 е показана част от топологията от фиг. 11.39. Допълнително на фиг. 11.42*а÷в* са показани електрическите схеми и примерни топологии на основните вентили в ECL, DTL и TTL технологии.

11.6. КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧНИ ОСОБЕНОСТИ В ИНЖЕКЦИОННАТА ЛОГИКА

Интегралната инжекционна логика не представлява нова технология във физикохимичния смисъл на термина. Тя е по-скоро нова възможност за използуване на биполярния транзистор, реализиран с помощта на стандартните технологии. Нейните създатели са искали да направят основна клетка на логическа схема, която да бъде възможно най-проста по структура и технология. Основните конструктивни и технологични проблеми са изложени подробно в [119]. Най-простата логическа функция — инверсията, се реализира от един транзистор в класическо свързване. За съжаление за реализирането на това свързване са необходими поне две съпротивления — едното в базата, а другото в колектора. Интегрирането на съпротивления, особено с голяма стойност, е нежелателно по технологични съображения, тъй като те заемат голяма площ и трябва да имат сравнително малки толеранси, а това изисква точен контрол при дифузията.

Оптимално решение е да се премахнат съпротивленията. Тогава базата може да се поляризира чрез допълнителен транзистор, който лесно може да се направи интегрален. Ако главният транзистор е NPN, един хоризонтален PNP транзистор, свързан в схема обща база, може лесно да се интегрира, като се предвиди маската за базовата P-дифузия да има допълнителен прозорец до всеки NPN транзистор. Тази простота обаче води до един недостатък на схемата. Вертикалният разрез на така получената структура (фиг. 11.43) показва, че базата на поляризиращия транзистор или на „инжектора“ B_2 е свързана с колектора C_1 на главния транзистор, а не с емитера му, както е необходимо, за да се получи поляризация. Това изисква, за да функционира схемата, главният транзистор да работи в инверсен режим.

Точно това е направено в схемите с инжекционно захранване. Това е причината те да получат широко разпространение едва през 1975 г. — много е трудно да се реализират транзистори с достатъчно голям и възпроизводим инверсен коефициент на усилване особено когато има много колектори, както е в I^2L. Аналогично на TTL, където лесно се реализират многоемитерни транзистори, в I^2L се реализират транзистори, работещи в инверсен режим с множество колектори. Едновременно с това се премахват и нежеланите товарни съпротивления. За да функционират схемите с инжекционно захранване, необходимо е инверсното усилване на NPN транзистора да е поголямо от единица за всеки колектор. В практиката много трудно се реализира инверсно усилване, по-голямо от 5 за целия транзистор. Поради това I^2L схемите са най-много с 4 колектора.

Така получената основна I^2L структура се отличава с изключителна простота, тъй като се състои само от един многоколекторен транзистор и една обща за всички транзистори P-област.

Първото свойство, което следва от тази простота, е възможността за много голяма степен на интеграция: една класическа елементарна I^2L схема заема 0,0030 mm², докато аналогична MOS-N-канална схема заема 0,035 mm², MOS-P-канална 0,066 mm², CMOS 0,0310 mm², стандартна TTL 0,0330 mm², изопланарна TTL 0,0120 mm². Освен

това за реализиране на I^2L и MOS-P-канални схеми са необходими само четири маски, докато за CMOS са необходими шест, а за TTL — седем.

Простотата на I^2L структурата позволява да се използува малък брой дифузии — само две, докато CMOS и MOS-N-каналните схеми изискват три дифузии, TTL — четири, а MOS-P-каналните — само една.

Второ свойство, в което I^2L има безспорно предимство, е консумацията. Ако няма високи изисквания към бързодействието, инжекционният ток за една структура може да бъде намален до по-малко от 10 nA. Важен факт е, че тази консумация не зависи от честотата на функциониране на схемата, като това важи до около стотина микроампера.

За съжаление, ако е необходимо добро бързодействие, трябва да се поляризират преходите така, че паразитните капацитети да не оказват влияние. Това означава, че трябва да се използува инжекционен ток, доста по-голям от минималния. Първите схеми, реализирани в производствени условия, са показали при лабораторни изследвания време на закъснение около 50 ns при консумация около 40 μA на структура. Качественият фактор е по-малък от 2 pJ. По-сериозен недостатък е слабата шумоустойчивост на I^2L-схемите, която не може да се подобри, ако трябва да се запази технологичната простота.

11.6.1. Вертикална геометрия

Технологичната реализация на ИС с инжекционно захранване малко се отличава от тази на обикновените биполярни схеми. Основните разлики са свързани с конструкцията на многоколекторните транзистори [119]. Един от важните въпроси е изборът на структурата им, осигуряваща електрическите параметри по минимална площ и висок рандеман.

На фиг. 11.44 са показани напречен разрез (*а*) и поглед отгоре (*б*) на I^2L структура, при която за разлика от фиг. 11.43 са използувани N^+-подложка и разделителни N^+-области между отделните бази. С *1* е отбелязан инжекторът, с *2* — металзацията му, с *3* — една от базите, с *4* — един от колекторите, с *5* — разделителната N^+-дифузия, с *6* — контактният прозорец на показаната база.

Структурата на многоелектродния транзистор се определя от формата и размерите на основните области (инжектор, емитер, база, колектор), тяхното взаимно разположение, разпределението на примесната концентрация, наличието на допълнителни области за изолация на елементите и др.

Когато се използува N^+-подложка, тя и N-епитаксиалният слой образуват обща емитерна област за всички транзистори. Разделителните области заобикалят всяка база от три страни (освен откъм инжектора) и възпрепятствуват взаимното им влияние, намаляват хоризонталната съставка на дупчестия ток на емитерния преход [345, 119]. Следователно I^2L-структурата се отличава от стандартната планарно-епитаксиална структура по подложката и по разделителните N^+-области, които изискват допълнителна дифузия. Използува се ивичен мрежест инжектор. При първия тип базовите области се разполагат с тесните страни към инжектора (фиг. 11.45*а*).

На фиг. 11.45*б* е показана друга структура с мрежест инжектор — *1*, емитер — *2*, база — *3*, колектор — *4*.

Мрежестият инжектор заобикаля всяка базова област от всички страни. Избягва се разделителната N^+-област, но площта се увеличава. Увеличава се коефициентът на емитерния преход. Важна особеност е и понижаването на омовото съпротивление на инжекторната област.

Използуването на окисна изолация (изопланар) позволява значително да се намали площта на транзистора и да се подобрят неговите електрически параметри. На фиг. 11.46 е съпоставена конструкцията на структури, изготвени по обикновената планарно-епитаксиална технология (*а*) и по изопланарната технология I^3L (*б*). Тук *1*, *2* и *3* са контактни прозорци за колектора, базата и инжектора, *4* — слой силициев двуокис. Площта се намалява за сметка на намаляването на размера на колектора.

При това топологичните размери и допуски остават неизменни. Намаляват се също така и капацитетите на емитерния и колекторния преход и работата на превключване.

Възможностите се разширяват и при използуване на йонно легиране. То позволява да се създаде транзисторна структура с оптимално разпределение на примесите. При това се премахва спиращото поле в базовата област и няколко пъти се повишава коефициентът на усилване и бързодействието на транзистора.

Оригинална модификация на инжекционните схеми с „мрежест" инжектор е *самосъвместената „свръхинжекционна" логика* S^2L — Self — Aligned Super Injection Logic [346], основната структура на която е показана на фиг. 11.47. Тя се изпълнява в епитаксиален слой от P-тип с дебелина 3 μm и концентрация на акцепторните примеси 5.10^{16} cm^{-3}, реализиран на N^+-подложка със специфично съпротивление 0,01 Ω.cm. Широчината на базата на PNP транзистора, получена чрез последователна дифузия на фосфор и бор в един и същи прозорец в силициев нитрид, се измерва с части от микрометъра и лесно се контролира при осигурена висока степен на точност за разлика от инжекционните структури с хоризонтални транзистори. Това води до големи стойности на коефициента $\alpha_N{}^P = 0{,}9$. Високоомната активна база на превключващите транзистори в S^2L-структурите осигурява стойности на $\beta_N{}^n = 30—100$ и следователно голяма товарна способност. Намаляване на последователното съпротивление на базите на NPN транзисторите, обхванати от всички страни от инжектор, и отстраняване на натрупването на електрони в пасивната част на базата се постигат чрез силно легираните P^+-области при базовите контакти. Минималното време на закъснение в експерименталните образци е 5 ns при мощност 60 μW. Разглежданата технология има много общи черти с метода на изолация чрез колекторна дифузия.

Друг вариант на основната I^2L-структура е логика *със захранваща подложка* (SFL-Substrate Fed Logic) [348]. Традиционната I^2L използува хоризонтален PNP транзистор за инжектиране на заряди директно в базата на вертикалния *NPN* транзистор. При този вариант PNP инжекторите са вертикални VIL и са разположени в една линия с NPN транзисторите. В резултат структурата изисква два епитаксиални слоя, но има значително подобър качествен фактор и степен на интеграция [347]. Възможно е намаляване на броя на елементите до 75%, тъй като SFL позволява изключително гъвкави логически реализации. Освен това се получава автоматично разположение на всички NPN транзистори на еднакви разстояния от инжектора, което позволява много гъвкаво комплектуване на транзисторите. Повечето съвременни реализации имат качествен фактор 0,07 pJ и закъснение 8,8 ns.

На фиг. 11.48 е направено сравнение на напречните разрези на I^2L и на VIL. Инжекторът е формиран от P^+-областта, а широчината на базата на PNP транзистора се контролира чрез дълбочината на външната P-дифузия. Тази структура е удобна, ако трябва електрически да се изолират част от елементите. Освен това нейната технология е близка до стандартната.

В други случаи изводът на инжектора може да бъде разположен отдолу на кристала. Тогава върху P^+-подложка се създава тънък епитаксиален слой (фиг. 11.49*а*). Плътността на елементите се повишава, тъй като на горната повърхност няма инжекторни области и захранваща шина. Хоризонталният N^+-слой намалява съпротивлението на общата емитерна област. Сравнение на двата варианта на VIL е показано на фиг. 11.49*а* и *б*.

11.6.2. Разновидности на I^2L структури

При увеличаване тока на инжектора I до определена стойност средното време на закъснение τ намалява до минимална стойност и след това отново нараства. Последното нарастване е свързано с натрупването на голям излишен заряд в активните области и на първо място в епитаксиалния слой, който е общ за емитерите на превключващите транзистори в I^2L-структурите с „класическа" конфигурация. При малки токове бързодействието на инжекционните схеми се определя от времето на презареждане на паразитните капацитети и капацитетите на преходите. В този случай качественият фактор е

$$P\tau = CE\Delta V/\alpha_N{}^P$$

и е постоянна величина. Тук E е захранващото напрежение, ΔV — размахът на логическата амплитуда. Например за $E=\Delta V\approx 1$ V, $\alpha_N{}^P=0{,}1$ и $C=0{,}1$ pF качественият фактор е 1pJ. За намаляване на капацитетите е необходимо да се намалят размерите на структурите, да се използува странична и пълна диелектрична изолация и др. До намаляване на времето на закъснение води и намаляването на времето на живот на неравновесните носители при запазване на големи стойности на $\beta_N{}^P$ и $\alpha_N{}^P$.

Повишаването на бързодействието обаче може да се осигури също и чрез намаляване на логическата разлика за сметка на последователно включване на Шотки-диоди между изходите на една структура и входовете на друга. При това ΔV намалява от 700—800 mV до 150—350 mV. Шотки диодите могат да се реализират в колекторната (фиг. 11.50) или в базовата (фиг. 11.51) област на превключващия NPN транзистор. Високоомната N^--колекторна област може да се формира чрез йонно легиране с бор с нарастваща концентрация в дълбочината на епитаксиалния слой (създаване на обратен тип проводимост).

От показаните на фиг. 11.50 структури ще разгледаме по-общата — 11.50*а*. Тя е с N^+-емитер *1* на базата на подложката, *2* — база, *3*—P^+-област за създаване на базов контакт, *4* — колектор, *5* — инжектор, *6* — аноди на Шотки-диодите. Инжекторната P^+-област отдолу граничи с N^+-емитера. Поради това инжекцията на дупки е само настрани, в слабо легираната N^--област между инжектора и базата. Това повишава коефициента на усилване по ток $\alpha_N{}^P$. Дупките се събират от P^+-областта *3*, служеща за създаване на контакт с високоомната P-област на базата *2*. Инжекция от емитера *1* в базата *2* има само в този участък от емитерния преход, който граничи с високоомната базова област и който е ограничен от едната страна от P^--областта *3*, от другата — от окисен слой. Площта на този участък е равна на площта на колекторния преход и е значително по-малка, отколкото структурата, показана на фиг. 11.44, където площта на емитерния преход дори и за едноколекторен транзистор е няколко пъти по-голяма от площта на колекторния преход. На повърхността на високоомната колекторна област *4* са създадени Шотки-преходите. По този начин се получават няколко електрически развързвани изхода, така че структурата изпълнява същата функция, както и многоколекторният транзистор.

Напрежението на изходите на тази структура в отпушено състояние е по-високо със стойността на пада върху Шотки-диодите, отколкото в структурата, показана на фиг. 11.44. Със същата стойност се намалява и логическата амплитуда: от 0,6—0,7 V на 0,15—0,30 V. Благодарение на това бързодействието на логическите схеми расте 3—5 пъти при малки токове на инжектора, когато закъснението е пропорционално на транзисторните капацитети и стойността на логическата амплитуда. В режим на насищане обаче има натрупване на значителен заряд от неосновни носители във високоомната колекторна област. Затова времето за разнасяне на зарядите в транзистора не намалява в сравнение със структурата на фиг. 11.44. Това не позволява да се достигне голямо бързодействие при големи токове на инжектора, когато закъснението се определя от времето на закъснение.

На фиг. 11.51 е показан вариант за реализация на входни базови Шотки-диоди с общ анод, чрез контакта метал—високоомна P^-—база. Особеността е силно легираната P^+-подложка ($N_A=$

$=5.10^{18}$ cm^{-3}).На нея е реализиран чрез епитаксиално нарастване N-слой с дебелина 3 μm($N_D=$ $=3.10^{15}$ cm^{-3}). Тези слоеве служат за емитер и база на превключващия транзистор. Повърхностният слой е легиран чрез йонно внедряване на бор през защитния слой окис. Колекторите са образувани чрез плитки N^+-области. За разделянето на базовите области на NPN транзистора се използува дълбока N^+-дифузия, създаваща и контакт на емитера.

За по-нататъшно намаляване на времето на закъснение е необходимо да се понижава насищането на превключващите транзистори с цел намаляване на времето за разсейване на излишните заряди. Твърде перспективно за създаването на бързодействуващи I^2L-схеми и запомнящи устройства е съчетанието на технологията на самосъвместения инжектор с изопланарната технология (с използуването на P^+-епитаксиален слой и P-подложка с общ N^+-скрит слой).

Бързодействието може да се повиши и чрез използуване на превключващи Шотки-транзистори, изпълнени на основата на NPN-транзистори, колекторният преход на които е шунтиран с Шотки-диод.

Шунтиращи и развързващи Шотки диоди от двата типа се използуват в I^2L-схеми на допълващи се транзистори, наричани още *комплементарна логика с превключване по постоянен ток* (C^3L — Complementary Constant Current Logic) [349]. C^3L-схемите фактически представляват усъвършенстване на едно от първите семейства ИС—диодно-транзисторната логика. За разлика от I^2L схемите тук PNP транзисторът работи в нормален режим подобно на TTL схемите и е изолиран от токозадаващия PNP транзистор, което позволява да се изготви Шотки-диод непосредствено в колекторната област на предния превключващ NPN транзистор. За осигуряване на работа на PNP транзистора в активен режим се използуват опорни диоди или допълнително преднапрежение на техните бази подобно на моделите на инжекционните схеми на дискретни силициеви транзистори и техните прототипи.

Конструкцията на инжекционна схема с два типа Шотки-диоди (фиг. 11.52, 11.53) може да се реализира с по-усложнена технология. Превключващият PNP транзистор има метален колектор MIL [119, 350], който е образуван от контакта метал—полупроводник върху базата на превключващия транзистор. За инжекционно захранване на схемата се използува NPN транзистор. Такава структура осигурява много голяма степен на интеграция.

Транзисторът с метален колектор има $\alpha_I^n=0$, затова в него не трябва да се създава повече от един колектор.

За общ катод на Шотки-диодите служи N^--областта *1*, а за аноди — металните области *3*. До анодите на диодите не трябва да достигат дупките, инжектирани в N-областта от емитерния преход, иначе диодите ще имат големи обратни токове. Затова N-областта *1* е отделена отстрани от базовата област чрез окисен слой, а отдолу от емитера чрез скрит слой *2*, в който няма инжекции на дупки. В структурите се използуват PNP транзистори и N-инжектори, понеже Шотки-преходи се създават по-лесно с N^--области. Затова полярността на напрежението на захранващия източник и на изходните напрежения при тези структури е противоположна.

Конструкцията на същата структура с инжектор отгоре е показана на фиг. 11.53. Най-съвършена от известните е структурата, създадена с използуването на двойна епитаксия и йонно легиране, в която Шотки-диодите се образуват между метал и полупроводник. Всеки транзистор може да има няколко диода на Шотки в базовата област, позволяващи реализация на функцията И, а така също и няколко колектора. Инжекционните схеми с два типа Шотки-диоди и пълна диелектрична изолация могат да се разглеждат като перспективна елементна база за свръхбързодействуващи интегрални схеми в субнаносекундния диапазон.

Недостатък на I^2L-схемите без базови Шотки-диоди е наличието само на един вход за всяка схема. Този недостатък се отстранява в логическите схеми с прехващане на тока, които могат да наричат още *колекторно-управлявана логика* (CHL — Current Hogging Logic) [350]. Работата на такива схеми е основана на прехващането на тока на основния (изходния) колектор C_0 от управляващите колектори (при подаване на тях на съответни сигнали), които се разполагат между емитера и основния колектор на хоризонталния PNP транзистор (фиг. 11.54*а*).

CHL структурата се реализира по обикновената технология в изолирана с помощта на разделителна дифузия област от епитаксиалния N-слой, израснал върху P^--подложка. Емитерът и колекторът се формират чрез P-дифузия. Под тях се разполага N^+-скритият слой.

За усилване на тока се използува инвертиращ NPN транзистор (разположен в отделна област в първите варианти на CHL схемите), едновременно преобразуващ линейната предавателна характеристика в прагова. Ако управляващите колектори са разположени надлъжно между емитера и основния колектор на PNP транзистора, реализира се функцията ИЛИ—НЕ. При напречно разположение на колекторите се реализира функцията И—НЕ.

Предимство на CHL схемите са високата им статистическа и динамична шумоустойчивост, възможността за работа в широк температурен диапазон (от —30 до +150°C) и голямата степен на интеграция. Последната се осигурява чрез много проста реализация на логическите функции. Недостатък на разглежданите схеми е малкото бързодействие и следователно голямата стойност на качествения фактор — около 100 pJ при захранващо напрежение 1 v.

Повишаване на бързодействието и увеличаване на функционалната плътност могат да се осигурят за сметка на създаване на колектори с „уловка“, използуване на елементи от изопланарната и самосъвместяваща се технология, както и за сметка на обединяване на изходния колектор на CHL структурата с базата на инвертиращия инжекцио-

нен транзистор. Такива модифицирани инжекторно- управляващи схеми (CHIL — current hogging injection logic) [351] имат няколко входа и няколко изхода във всяка структура. Ако променливи величини са токовете, показаната на фиг. 11.54*б*, *в* структура CHIL реализира функцията ИЛИ—НЕ. Ако променливи са напреженията, тя реализира функцията И—НЕ. Ниско изходно напрежение, съответстващо на логическа нула, има само при логически единици на двата входа на схемата.

По-нататъшните пътища за „свръхинтеграция" се основават на по-пълно използуване на свойствата на транзисторните структури и обемните свойства на полупроводника. При това освен новите физически ефекти твърде перспективно е използуването на нежелателното за TTL, ECL и някои I^2L-схеми „паразитно" взаимодействие между транзистори, изпълнени в обща изолационна област. Именно това взаимодействие с успех се използува в различните варианти ИС на *активно свързана логика* (*АСЛ*).

Независимо от бистабилния или моностабилния режим на работа и постоянното или импулсното захранване АСЛ схеми се разделят на два основни типа — логически схеми с плазмено управление (ЛСПУ) и логически схеми с превключване на плазмата (ЛСПП). В схемите от първия тип връзката, водеща до намаляване на напрежението на включване на съседните прибори при включването на един от тях, е определена от дифузия на неосновни носители или от галванична връзка (т.е. от дрейфа на основните носители).

По-перспективни са ЛСПП структурите, в които активната връзка е определена от дрейф на неосновните носители в електрическото поле между изключени и включени прибори. Те се реализират на модулационни транзистори, включени в схема с общ „заземен" емитер. Бързодействието на опитни образци превишава с два порядъка граничното бързодействие на CHL схемите с аналогична структура [352, 353]. В табл. 11.1 е направено сравнение на основните типове структури по някои характерни параметри.

За схеми с инжекционно захранване са пригодени методите за разработка на топология, използувани при MOS ИС, както и при биполярни ИС с голяма степен на интеграция. В помощ на конструктивно-технологичните разработки на фиг. 11.55 ÷11.63 са показани някои характерни топологии, избрани главно от [119], както и от [355, 356, 357, 358, 359].

Фиг. 11.55*а* представлява тактуван *D*-тригер (информационен вход *D* и тактуван вход *T*). Отбелязани са освен това изходите *Q* и $\overline{Q}$.

Фиг. 11.55*б* показва топологията на двувходов едноразреден суматор; отбелязани са инжекторът и входовете и изходите.

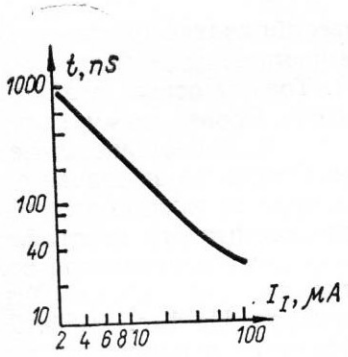
На фиг. 11.56 и 11.57 са показани топологиите на *JK*-тригер за технологията на самосъвместен инжектор и преместващ регистър. Последният ползува топологията на статични *RS*-тригери за динамичен пренос на заряди между колекторните капацитети на превключващите транзистори.

На фиг. 11.58 е показана топологията на тривходов дешифратор. Особеност представлява до

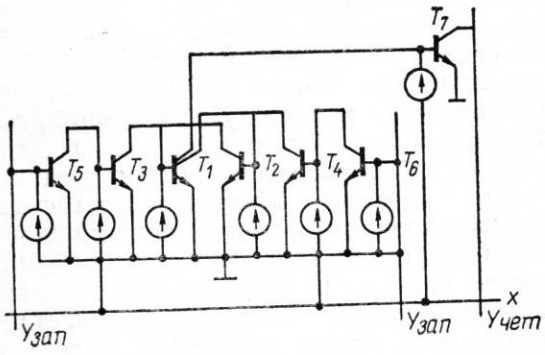
Таблица 11.1

Видове структури	Площ, $\mu m^2 \times 10^3$	Степен на интеграция, стр/mm²	Маски, брой	Качествен фактор, pJ	Минимално закъснение, ns	Сравнение по шумоустойчивост
1. TTL	25—50	20—40	6—7	75—120	8—15	++
2. TTL с Шотки-диоди	13—20	50—80	6—8	10—25	5—15	++
3. C^3L	6,7—17	60—150	7—9	1,5—2,5	1,5—3	+
4. CHL	5—10	100—200	6	100	$1—3.10^3$	++
5. CHIL	2,5—4,5	200—400	4*	0,1—1,5	20—100	—
6. ЛСПУ на тиристори	1—2	0,5—1	5—6	0,1—1	0,5—1	++
7. ЛСПУ на модулационни транзистори	2—3	300—500	4*	1—10	100—300	+++
8. ЛСПП на модулационни транзистори	3,5—8	120—300	5—7	0,01—0,1	1—10	++
9. I^2L без Шотки-диоди	3—6	160—300	4*	0,1—1	15—50	—
10. I^2L с инжектор подложка и входни Шотки-диоди	1,5—5	200—600	4—5	$1—5,10^{-2}$	5—10	+
11. I^2L с метален колектор (MTL)	1—2	$5—10,10^2$	6—9	0,1—1	1—3	—

* — Без изолация.



Фиг. 11.61



Фиг. 11.62

пълнителната N^+-област по продължение на базата за изравняване на потенциала (фиг. 11.59).

В областта на запомнящите устройства има интересни решения. Елементарна запомняща клетка на RAM на базата на I^2L е показана на фиг. 11.60. Клетката се състои от два транзистора, подходящо свързани, за да образуват тригер. На две клетки е достатъчен един инжектор, който е свързан към шината X, която е едновременно и захранваща. Изборът и записът или четенето се извършват чрез различни колектори на транзистора.

Фиг. 11.61 показва зависимостта на времето за запис от тока на инжектора. Обикновено се избира I_I=100 μA, което определя време 40 ns за дадения образец.

На фиг. 11.62 и 11.63 са дадени еквивалентната схема и топологията на друга запомняща клетка. Транзисторите T_1 и T_2 образуват тригер. $T_3 \div T_6$ подават сигналите за запис по шината $Y_{зап}$, а T_7 извежда информация в шината $Y_{чет}$. T_1, T_2, T_5 и T_6 се захранват от един инжектор. Освен това има и други инжектори, съединени с шината X, които обслужват T_3, T_4 и T_7. Тези транзистори са отделени от останалите с екраниращa област за неосновните носители, постъпващи от инжектора.

11.7. КОНСТРУИРАНЕ НА СИЛОВИ И МОЩНИ ПРИБОРИ

Особеностите на технологията при силовите прибори започват още с избора на основните материали [79, 80, 81, 82]. Това е леснообяснимо, като се има пред вид неоднородността на полупроводниковия материал. Установено е, че и двата известни метода за изтегляне на монокристали — на Чохралски и чрез зонно стапяне, притежават както предимства, така и недостатъци по отношение на определени параметри на структурите. Основните параметри, които се гарантират от производителите на силиций, са специфично съпротивление, плътност на дислокациите и време на живот на неосновните носители.

Времето на живот е показател за съвършенство и еднородност, за степента на прекомпенсация и наличие на примеси с дълбоки нива на захващане. Известно е, че времето на живот намалява при термообработка. Това може да се дължи на допълнителни замърсявания, навлезли в силиция по време на термообработката, особено на кислородни атоми, разтворени по време на изтеглянето. Обикновено по метода на Чохралски се разтваря повече кислород — до $(3.10^{17} \div 10^{18})$ cm^{-3} срещу 10^{16} cm^{-3} по метода на зонното стапяне. При всеки високотемпературен процес кислородът образува сложен донорен комплекс Si_mO_n, чието съдържание зависи от температурата на процеса и първоначалната концентрация на кислород. Възможно е този донорен комплекс да взаимодействува с дислокациите, като в места с високо съдържание на кислород да се натрупат тежки метали. В резултат се получава нехомогенност, която би могла да доведе до деградация на параметрите на монокристала. При промяна времето на живот в малки граници в рамките на една партида причината трябва да се търси в дифузията на външни примеси. Кристалите, изтеглени по метода на Чохралски, имат нееднакво разпределение на дислокациите по напречното сечение на кристала. По периферията броят им е много голям и може да се изравни с този при метода на зонното стапяне. Това означава, че за мощни прибори с голяма площ монокристалът изгубва това си предимство, тъй като големият брой дислокации по периферията води до голям механичен брак.

Времето на живот определя динамичните параметри на силовите прибори, пада в права посока V_T и тока на управление I_{GT}. Тъй като времето на живот има противоречиво влияние върху изброените параметри, конструкторът е изправен винаги пред проблема да оптимизира неговата стойност за изготвения прибор. Намаляването на времето на живот в резултат на високотемпературните процеси налага включването на операции, водещи до възстановяване на една определена стойност. Разбира се, при необходимост трябва да съществуват и възможности за контролируемо намаляване на времето на живот.

Съществуват различни методи, с които конструкторът може да постигне тези цели, от които важни и добре усвоени са следните [78]:

а) добавяне на кобалтов нитрид — употребява се в технологията на силовите вентили;

б) бавно охлаждане след високотемпературните процеси;

в) термообработка при ниски температури.

При първия метод се забелязват неповторяеми резултати и промяна на специфичното съпротивление на материала. При втория метод се прилага подходящ градиент, примерно 2°/min, при понижаване на температурата до около 600°C (т.е. около 5—6 h). При третия метод термообработката се извършва при 800°C в подходяща атмосфера за 14—16 h.

Резултатите са близки и може да се спори кой от последните два метода е по-технологичен, тъй като и едновременната, и разделената по време термообработка има своите предимства. Във всеки случай степента на възстановяването и стойността на времето на живот τ е мярка за чистотата, спазвана по време на технологичния процес и за качеството на използувания полупроводников материал. Възстановяването се извършва след всеки високотемпературен процес или само след последния в технологичната схема.

За случаите, когато се налага контролируемо намаляване на τ, се използува дифузия на злато [288, 289, 92]. Златото се нанася върху повърхността на пластината чрез изпарение или чрез спиртен разтвор на златен хлорид, нанесен капковидно. При тиристор Т180 например от страната на анодната област се капват няколко капки флуороводородна киселина. След тяхното изсъхване се капват 2 капки от спиртния разтвор, при което в резултат на реакцията се отлага тънък слой злато. Може и да не се използува флуороводородна киселина, като дифузията се провежда направо от отложената на повърхността сол на златото. Самата дифузия се извършва при 800—850°C за 30 min, последвана от принудително охлаждане. По този начин времето на живот може да се намали значително до 2—3 μs, но конструкторът трябва винаги да знае началната му стойност.

При конструирането на силовите прибори се използуват методите за получаване на PN преход, които са разгледани в гл. 9. Производството на елементи с голяма надеждност, например високоволтови диоди и тиристори, изисква да се получат преходи, за които се гарантира голяма прецизност и равномерност върху площ, която може да достигне няколко квадратни сантиметра. Това е една съществена разлика в сравнение с планарните прибори. За да може да се постигне това, всеки от използуваните процеси — легиране, дифузия или епитаксия — трябва да бъде осъществяван с необходимата повторяемост и точност на параметрите. Днес полупроводниковата техника позволява дори и с легиране да се произвеждат преходи на голяма площ с еднороден характер и с дълбочина, контролирана до няколко микрона. Обикновено легирането позволява да се получават резки преходи, които особено за катодния извод на тиристора позволяват да се подобрят параметрите в права посока [83, 84].

Съвременното състояние на дифузните и епитаксиалните процеси е вече такова, че дава възможност да се контролират параметри като температура, време и други в границите до 1%. В същото време поради голямата площ на дифузните PN преходи съществува опасност в тях да бъдат включени известни количества тежки метали (мед, желязо), при което се изменят електрическите характеристики. Това се отнася особено за пробивните напрежения. Поради голямата площ е почти невъзможно да се изключи присъствието на нежелани примеси. Специално за силовите прибори са разработени методи за тяхното отстраняване, които позволяват постигането на дълбоки преходи с голяма еднородност и равномерност. По такъв начин се постига лавинен пробив, гарантиращ параметрите на прибора. На фиг. 11.64*а,б* са показани междинните етапи и начинът за изготвяне на PN преход за случаите на силовата техника.

Характерна особеност се явява необходимостта от голяма дълбочина на дифузионните слоеве — до десетки μm. Това означава продължителни дифузионни процеси при високи температури. Обикновено основният материал е с N-тип проводимост. Като P-дифузанти се използуват алуминий, галий или бор. Трудно може да се определи кои от тези елементи са най-използувани. Голямо предимство при борната дифузия е образуването на защитно борно силикатно стъкло, което при липса на чисти флуиди и кварц е от решаващо значение. Галият притежава най-голяма разтворимост в силиций. В сравнение с планарната или със сплавната технология борът и алуминият имат това предимство, че са по-познати на производителите [78].

За N-дифузия се използува предимно фосфор.

По отношение на методите и обзавеждането съществуват няколко възможности. Всяка от тях носи особеностите на силовото производство. Съществува тенденция да се преминава към тръбни пещи с голям диаметър, което представлява придвижване на силовата техника напред към планарната.

Усвоена е дифузия на въздух, т.е. използуват се камерни пещи, при които основното предимство е отпадането на скъпия кварц. Друго предимство е възможността температурата да достигне стойности около 1300—1350°C, което означава ускоряване на процеса. За големите дълбочини на дифузия, които се желаят при P-дифузия, това е от съществено значение. За голямата дълбочина допринася и използуването на шлифовани пластини (с абразив М10), в които дифузията се извършва с по-голяма скорост, отколкото при полирана повърхност. За борно-алуминиевата дифузия се използува водно-спиртен разтвор на борна киселина, алуминиев нитрат и кобалтов нитрат (нанасяне на капка върху пластината на въздух). При високата температура на процеса от окислението на силиция и от разлагането на борната киселина се образува борно-силикатно стъкло. От алуминиевия нитрад след разлагане се получава алуминиев окис, който обаче не образува обща фаза със силициевия двуокис и практически служи за източник на алуминий за дифузията. По време на дифузията примесните атоми са едновременно борни и алуминиеви. В този случай е важен дифузионният коефициент на двата примеса. Тъй като алуминият дифундира по-бързо, градиентът на прехода се определя само от концентрацията на алуминиевите атоми. Образува-

ното борно-силикатно стъкло служи като защитна маска особено когато се използуват недостатъчно пречистени флуиди и химикали. Промяна в стойността на повърхностното съпротивление настъпва при изменение на количеството борна киселина в състава на дифузанта. За нуждите на силовата технология се извършва и P^+-дифузия, при което върху пластините се нанася капка от водно-спиртен разтвор само на борна киселина. Концентрацията на повърхността на пластината се получава от порядъка на 10^{19} cm^{-3}. В резултат на Р-дифузията се образува борно-силикатно стъкло, което преди следващите операции трябва да бъде свалено.

При осъществяване на N-дифузията съществува голямо разнообразие на методи и източници на дифузант. При силовите прибори са усвоени следните методи на фосфорна дифузия:

а) дифузия от ортофосфорна киселина, нанесена на повърхността с помощта на тампон;

б) дифузия от амониев фосфат;

в) дифузия от фосфорен оксихлорид;

г) дифузия от отложен никелов слой.

Първият и вторият метод не осигуряват достатъчна равномерност на повърхността на пластината. Те се използуват в производството на вентили и средно мощни тиристори. Дифузията от амониев фосфат се извършва подобно на преддифузията, в случая на Р-дифузия при планарните прибори. При този метод могат да се използуват камерни пещи с минимален разход на кварц и фактически без разход на флуиди. Методът е изследван и са констатирани 10% разсейване в дълбочината на слоевете и до 20% в листовото съпротивление. При температури в интервала 1090÷1250°С за около 60—90 min се получават дълбочини в границите от 5 до 15 μm и листово съпротивление от 0,2÷26 Ω.

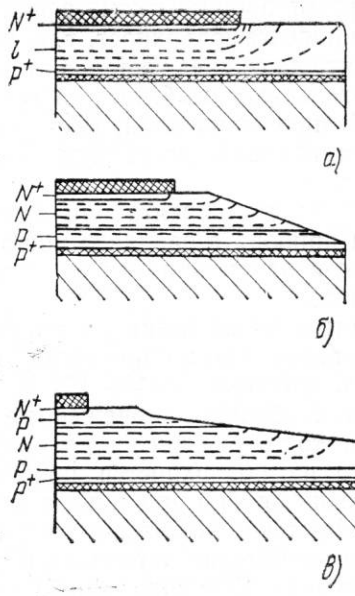
Дифузията от фосфорен оксихлорид е добре отработена, тъй като почти всеки производител я прилага при производството на планарни прибори. За разлика обаче от планарната технология тук дълбочините са много по-големи. Обикновено дифузията от фосфорен оксихлорид е двустадийна, като в първия етап с продължителност от около 50 min се регулира повърхностното съпротивление, а във втория — дълбочината на слоя. Характерна особеност на дифузионните процеси при силовите прибори е дифузията от отложен никелов слой. Избира се никелов слой със съдържание 7—15% фосфор [78, 82]. При температурата на дифузия се образува стопилка от никел, фосфор и силиций, която служи за източник на дифузията. Резултатите от работата на много автори сочат, че при провеждане на дифузията от рекристализирал слой се получават добри и възпроизводими параметри. За тази дифузия се препоръчва провеждане в два етапа. При първия стадий с времетраене 15 min при температура 1220° започва процесът. Вторият етап е с времетраене 60 min при 1250°. Пещта е камерна, без разход на кварц и флуиди, разсейването на параметрите е до 10% за дълбочината и само 1—2% за повърхностното съпротивление. Особеност на този вид дифузия е, че фосфорът прониква само в никелираната част на силициевата повърхност, т. е. не е необходимо дифузията да се предшествува от фотолитография. Втората важна особеност са гетериращите свойства на никеловия слой, което води до запазване и възстановяване до голяма степен на времето на живот.

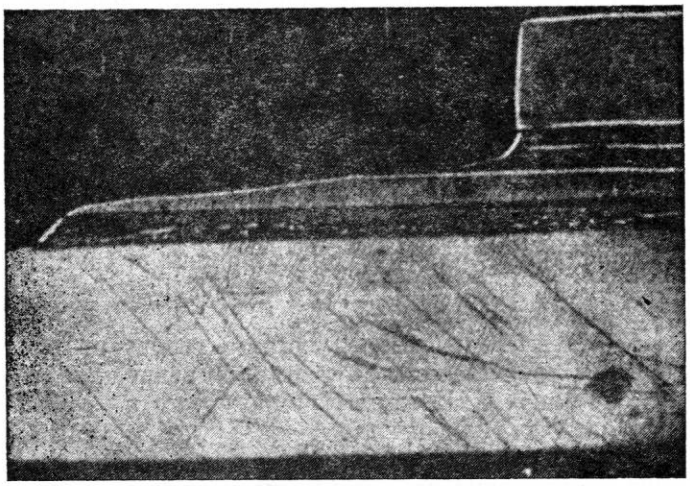
Използуването на епитаксията при производството на силови прибори е навлязло широко, но създадените по този начин прибори са много по-скъпи от останалите.

Повърхностният слой на всеки полупроводников кристал се характеризира с намалена диелектрична якост. На практика, когато PN преходът е свързан обратно, пробивното напрежение е много по-ниско от това, което е изчислено теоретично, поради наличието на повърхностен пробив. На повърхността на един прибор при голяма площ на прехода могат да протекат значителни токове, които да доведат до значително затопляне и разрушаване на структурата. Ето защо обработката на краищата на прехода и пасивирането на повърхността е от голямо значение при силовите прибори. На фиг. 11.65 са показани няколко възможности. Полето на повърхността трябва във всеки случай да бъде по-ниско от полето в обема на прехода, което логично ще направи пробива обемен, а не повърхностен. Отлагането на слой с голяма диелектрична якост, например силициев двуокис или силициев нитрид, позволява получаването на добра защита спрямо външни влияния, но не изменя потенциалната картина на ръба на прехода и повърхността.

Изменението на повърхностната геометрия на прибора представлява друг път за разрешаване на този проблем. Чрез него напрегнатостта на полето намалява значително [84]. Както се вижда от фиг. 11.65*б*, този процес се свежда до скосяване на повърхността, при което намалението на напрегнатостта на полето е в зависимост от ъгъла на фаската. По този начин могат да се конструират диоди и тиристори за високи напрежения. Ъгълът на скосяването се избира в зависимост от специфичното съпротивление на полупроводниковия материал. Има случаи обаче, както е показано на фиг. 11.65 *в* за тиристора, когато различната концентрация на отделните преходи изисква различен ъгъл за всеки от тях. Най-напред се определя полето в обема, след което от графическите зависимости на фиг. 11.66 се отчита ъгълът на скосяването за определеното пробивно напрежение на структурата. На практика по-лесно е фаските на двата прехода на тиристора да се правят от едната страна, при което за анодния преход скосяването се получава от страна на по-ниско легирания към по-високо легирания материал, а за катодния от по-високо легирания към по-ниско легирания. Първият случай се нарича обратна фаска, а вторият — права фаска. Колкото е по-малък ъгълът на скосяването, толкова по-голяма е загубата на площ и съответно толкова по-малък е номиналният ток през структурата.

Същността на скосяването се състои в механично сваляне на полупроводниковия материал. Ме-



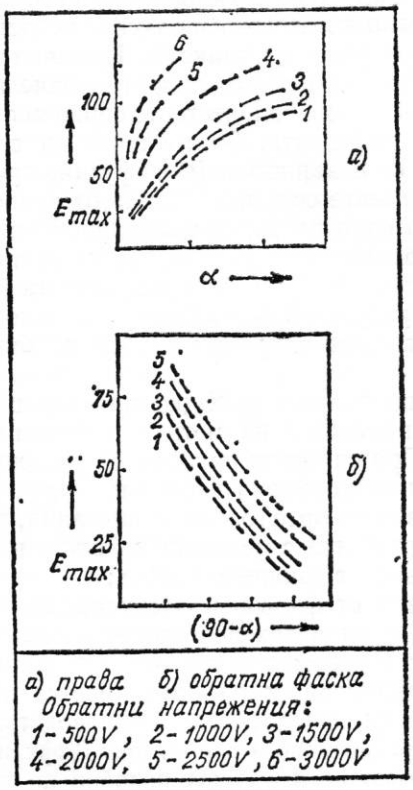


г)

Фиг. 11.65

тодите, които се използуват, са ултразвуково рязане, пневмопесъкоструен метод, сваляне с чугунена полусфера и мезаецване.

Повърхността на фаската се подлага на химична обработка — киселинна или основна — в зависимост от метализацията на структурата и вида на термокомпенсатора, на който обикновено са монтирани силовите прибори. Обработката в основни разтвори се използува по-рядко поради присъствие на алкални йони. Химичната обработка изменя ъгъла на фаската, което от своя страна означава промяна на електрофизичните параметри на прехода — обратен ток, пробивно напрежение и т.н. В [78] се съобщава, че увеличението на α до 60^0 не се отразява съществено на пробивното и блокиращото напрежение. Големината на обратните токове обаче е силно зависима, което се обяснява с голямата стойност на тока на утечка, който фактически зависи само от състоянието на повърхността. Като потвърждение на това се сочат малките стойности на обратните токове при пневмопясъчния метод, където на повърхността

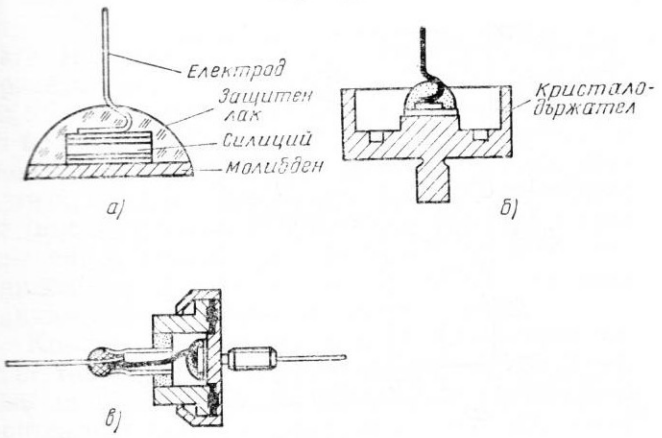


Фиг. 11.66

има най-малки механични повреди. Върху вида на обратната характеристика (по-твърд или по-мек пробив) съществено влияние оказват и механичните повреди по термокомпенсатора, получени в резултат на скосяването и неговата химична обработка. По-резкият пробив в обратната характеристика се получава при незасегнат от фаската термокомпенсатор.

След скосяването преходите се защищават с органични лакове — КО-97 и КЛТ-30.

Силициевата пластина, използувана за изготвяне на един силов прибор, трябва да бъде в много добър термоконтакт с корпуса, в който е монтирана. Тъй като при силовите прибори става голямо разсейване на топлина и топлинният капацитет на пластината е много малък, температурата се променя много бързо, в резултат на което се получава голям температурен градиент между силиция и подложката на корпуса. Поради съществуващата разлика в коефициентите на топлинно разширение силициевата пластина може да се счупи. За да се предотврати това, тя се монтира върху термокомпенсатор, чийто топлинен коефициент на разширение е близък до този на силиция (например молибден или волфрам). По-нататък в монтажния цикъл се обработва термокомпенсаторът, който се залепва към кристален държател. По този начин механичните напрежения в резултат на топлината не са вече между структурата и корпуса. Съществуват различни методи за залепване на термокомпенсатора към кристалодържателя и за присъединяване на металните електроди към структурата. Обикновено се използуват твърди



Фиг. 11.68

спойки, като се има пред вид, че температурата на всяка следваща спойка трябва да бъде по-ниска от тази на предишната. Тъй като механичните напрежения растат с квадрата на диаметъра на структурата, необходимо е тя да бъде охлаждана и от двете страни. Поради тази причина за силови прибори, конструирани за токове над 300—400 А, се използуват технологични устройства, позволяващи контактуване под натиск. За добър топлинен контакт са необходими налягания от порядъка на $2 \div 5.10^6$Pa. На фиг. 11.67 е показан начинът за монтиране на металните електроди към структурата. Както и при планарната технология, всеки извод на структурата трябва да бъде предварително метализиран. Широко разпространен метод при силовите прибори е метализацията посредством електрохимично никелиране.

Съществуват някои особености при никелирането. Те са свързани с неедаквата скорост на отлагане върху N- и P-слоя. Върху P-слой никеловото покритие е винаги по-тънко особено когато pH на банята е извън границите 7÷9. Контролирането на концентрацията на компонентите в никеловата баня е важно условие за осигуряване на качествено покритие.

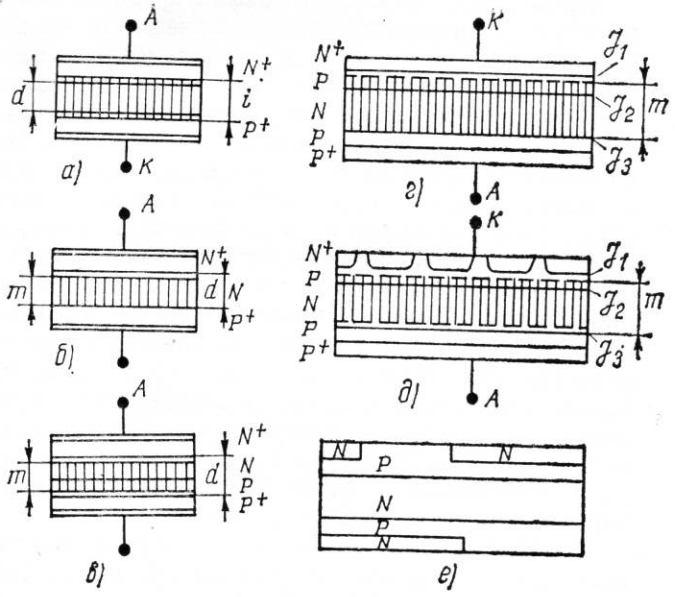
Вторият комплекс от проблеми е свързан с променящите се свойства на никеловите контакти при термообработка [78, 95, 292]. Като се има пред вид, че монтажът се извършва при повишена температура, при което последователно се залепват термокомпенсаторът, кристалодържателят, електродите и изводите, логично е да се очакват промени в свойствата на никеловите контакти, което от своя страна води до промени в електрофизичните параметри на структурата (например ток на управление при тиристорите). Всяка термообработка увеличава тока на управление на тиристорите. Фактически при взаимното разтваряне на силиций и никел, изглежда, се образува нелинеен преход, който е нестабилен и предизвиква промени. Разбира се, метализацията чрез никелиране не е единственият възможен начин. Могат да се използуват всички характерни за планарната технология възможности като изпарение и разпрашване. В този случай метализацията не е селективна и се налага допълнителна фотолитография.

Проблемите на фотолитографията при силовите прибори са свързани главно с качеството на защитната маска и с факта, че повърхността на пластините е само шлифована, а не полирана, както е в планарната технология. Голямата дълбочина на дифузия изисква дебели защитни покрития. Това означава продължително време на ецване при фотолитографията, при което борно-силикатното стъкло, израснало при първата дифузия, притежава скорост на ецване, различна от тази на SiO_2. Освен това продължителното време на ецване излиза извън рамките на устойчивостта на фотолака спрямо химикали и влошава качеството на фотолитографията. Възможно е пълното сваляне на борно-силикатното стъкло, последвано от чисто окисление, както е при тиристорите. Разбира се, това е нов високотемпературен процес и усложнява технологичната схема, като се отразява и на параметрите на структурата.

Известна е необходимостта от полирана повърхност при провеждане на фотолитографията. Тъй като при силовите прибори повърхността е само шлифована, лаковото покритие се получава с различна дебелина. Това изисква различно време за експониране и проявяване. Един от възможните пътища за гарантиране на минимална дебелина на покритието е увеличаването на вискозитета на лака или неколкократното му нанасяне съответно с намаляване на ъгловата честота на центрофугата. Стандартните фотолакове са разработени за нуждите на планарната технология. Някои от тях като ФП383 са с повишена адхезия и са подходящи за провеждане на фотолитография върху шлифована повърхност. Този лак осигурява дебелина на покритието от 4÷8 μm при честота на въртене около 3000 s^{-1},като издържа до 40 min на стандартно ецване [78, 291]. Голямата дебелина на фотолака затруднява съвместяването и изисква до пълнителни усилия у работещия.

Проблемите при конструирането на един силов вентил са подобни на тези при тиристора. Затова по-голямата тежест на разглеждането е логично да се прехвърли към него. На фиг. 11.68 ($a \div e$) са показани вертикалните геометрии на различни видове вентили и тиристори, като m е дълбочината на обедняната област, а d — дълбочината на високоомната област.

Ако проследим развитието на силовите прибори, трябва да започнем със структурата a. От двете страни на една пластина с голямо специфично съпротивление (I-зона) са конструирани една P^+- и една N^+-зона с малко специфично съпротивление. Създадената по този начин структура има добра проводимост в права посока благодарение на голямата инжекция на токоносителите съответно от N^+- и P^+-областта в I-областта. В същото време голямото специфично съпротивление на I-областта осигурява високо пробивно напрежение. Недостатък на тази структура е, че не може да се осъществи скосяване. Този факт не позволява да се конструират прибори с пробивни напрежения от порядъка на няколко киловолта и голяма разсейвана мощност. За постигане на такива параметри се използува друга конструкция. В този случай

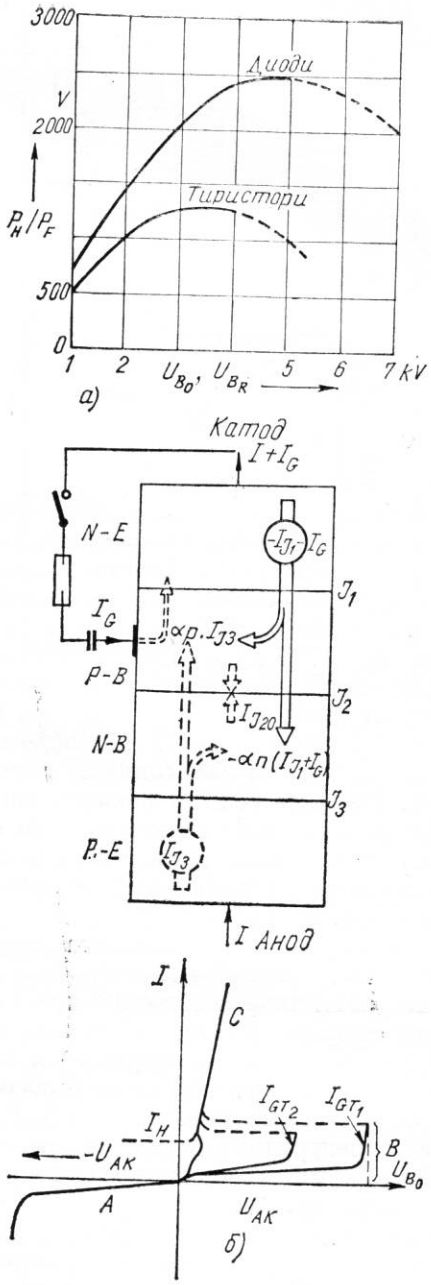


Фиг. 11.68

I-областта е заместена с една N-област (или P-област), която има някаква средна стойност на специфичното съпротивление (фиг. 11.68*б*). Пробивното напрежение на вентила се определя от специфичното съпротивление на тази област. Това е вярно само за случая, когато дебелината на този слой е достатъчна, за да събере цялата обеднена област. Реализираните по този начин вентили от типа P^+NN^+ или P^+PN задоволяват изискванията както в права, така и в обратна посока.

За да се оптимизират функциите на диода в права и обратна посока, е предложена структура P^+PNN^+. Идеята е да се разделят конструктивно частите на диода, които определят обратните характеристики, от тези, които определят поведението на диода в права посока. В случая вътрешният PN преход определя обратната характеристика, а външните преходи P^+P и NN^+ определят параметрите в права посока. Структурата на този диод е показана на фиг. 11.68*в*.

Обратното напрежение,което един силициев диод със структура P^+IN^+ и дебелина на *I*-областта от порядъка на 200 μm може да издържи, теоретично е около 4—5 kV. В този диод има големи повърхностни токове, които ограничават максималната стойност на обратното напрежение до около 2000 V. Преходите P^+N или PN^+ или асиметричният PN преход позволяват да се намали напрегнатостта на полето на повърхността и по този начин да се достигнат по-високи пробивни напрежения. В същото време обаче трябва да се има пред вид, че с увеличаване на пробивното напрежение се влошават параметрите на диода в права посока, което се изразява в увеличаване на съпротивлението в права посока и оттам увеличаване на отделената върху прехода мощност. Зависимостта на отношението на номиналната мощност към разсейваната мощност от пробивното напрежение (фиг. 11.69) има максимум. Той зависи от площта на прехода. При тиристорите вместо пробивното



Фиг. 11.69

напрежение V_{BR} се използува блокиращото напрежение V_{B_0}.

Номиналният ток на един вентил и максималният възможен ток през него могат да бъдат повишени чрез използуване на полупроводникови кристали с по-голям диаметър и по-голямо специфично съпротивление. В същото време трябва да се отчете, че произволното увеличаване на площта на прехода води до нови проблеми. Поради технически или икономически причини те ограничават тока, който може да бъде постигнат. На практика колкото по-голям по площ е един преход, толкова по-голяма е вероятността за получаване на нехомогенност на примесите. Тъй като локалният пробив дори само на едно място е достатъчен структурата да стане негодна, ясно е, че с увеличаване на площта на прехода расте и цената на структу-

рата. Например за вентили и тиристори, конструирани за напрежение от 700 до 1000 V, разходите по изготвянето им нарастват за номинални токове от 600 A за диодите и 400 A за тиристорите. При приборите, конструирани за контактуване чрез натиск, номиналните токове са до 50% по-големи от тези, при които монтажът се осъществява чрез припой. Друго, което трябва да бъде взето под внимание, е, че увеличаването на площта влошава динамичните параметри на структурата.

Конструктивното развитие на силициевите мощни тиристори е показано на фиг. 11.68 (*г*÷*е*). Още от създаването на тиристорите структурите притежават дълбоко дифундирани преходи, които удовлетворяват обратните характеристики и блокиращата характеристика на тиристора и по дълбочина неколкократно превишават преходите от планарната технология. При тиристорите има два възможни механизма на включване — чрез превишаване на блокиращото напрежение и достигане на лавинен пробив и чрез превишаване на блокиращото напрежение и слепване на преходите. В първия случай обедняната област около блокиращия преход не достига другия преход до момента на настъпване на лавинния пробив. Във втория обедняната област достига другия PN преход, при което инжекцията на дупки от P-областта предизвиква включването на тиристора. Модерните тиристори за високи напрежения се конструират главно по първия начин. Фиг. 11.68*е* показва т.нар. симетричен тиристор, който и в двете посоки има еднакви характеристики. Структури като тази достигат напрежения над 400 V и токове 50 A. На фиг. 11.69*б* е показано напречното сечение на един тиристор и неговите статични волтамперни характеристики (*A* — обратна посока, *B* — блокираща характеристика, *C* — права посока, $I_н$ — задържащ ток).

За по-добро конструиране на тиристора е необходимо да се изясни предназначението на всеки от преходите. Когато тиристорът е запушен, преходите J_1 и J_3 са обратно поляризирани, а вътрешният преход J_2 е включен в права посока. Това означава, че цялото обратно напрежение между анода и катода на тиристора е разпределено между преходите J_1 и J_3. Тъй като преходът от страната на катода (емитера) J_1 е много по-нискоомен от прехода J_3, може да се приеме, че цялото обратно напрежение е приложено върху прехода J_3. Това означава, че обратната характеристика на тиристора се определя от обратната характеристика на прехода J_3. Когато върху анода на тиристора е приложено положително напрежение спрямо катода, тиристорът се намира в блокирано състояние. В този случай само преходът J_2 е включен в обратна посока. Това означава, че блокиращата характеристика на тиристора се определя от обратната характеристика на прехода J_2.

Важното за конструктора е, че на всяка част от характеристиката отговарят различни конструктивни части от структурата. Параметрите на тиристора в права посока се определят от коефициентите на инжекция на двата прехода и от средната специфична проводимост на прехода J_2. Концентрацията (специфичното съпротивление) на базата определя пробивното напрежение на тиристора. Тъй като за формиране на преходите се използуват дифузии, необходимо е да се изчислят градиентите на концентрацията в мястото на прехода J_3. Следователно изборът на основния материал, в който ще бъде конструирана структурата на тиристора, става в зависимост от пробивното напрежение. След като се определи концентрацията на примесите, се изчислява широчината на обемния заряд (забранената зона), която пък от своя страна предопределя дебелините на дифузионните области. Дълбочината на дифузията и широчината на базата определят дебелината на изходната полупроводникова пластина. Блокиращото напрежение се определя от прехода J_2, откъдето следва, че градиентът в мястото на прехода J_2, получен в резултат на N-дифузията, трябва да осигури зададеното напрежение на структурата. Обикновено се избира блокиращото напрежение да бъде равно на напрежението на лавинен пробив на прехода. Конструктивният анализ използува основното уравнение на тиристора:

$$I=I_{J_3}\alpha_P+I_{J_{20}}+\alpha_N(I_{J_1}+I_{GT}),$$

където I е общият ток през структурата, I_{J1}, I_{J2} и I_{J3} са токовете през преходите, I_{J20} е обратният ток през J_2, а J_{GT} — токът на управление.

При равенство на токовете следва

$$I_{J_{20}}=I[1-(\alpha_N+\alpha_P)]-I_{GT}\alpha_N.$$

Оптимални ключови свойства има тиристорна структура, при която стойностите на α за двата съставни транзистора са малки при големи токове. При средномощните и мощните тиристори най-често се реализира случаят на високо ниво на инжекции в базата N и на ниско ниво и базата P. От основното уравнение на тиристора следва условието за включване — $\alpha_P+\alpha_N>1$. Чрез заместване се получава

$$\frac{b+1}{b}\operatorname{sech}\frac{W_P}{L_N}+\operatorname{sech}\frac{W_N}{L}>1,$$

където $b=\frac{\mu_N}{\mu_P}$, $L=\sqrt{\frac{2b}{b+1}}\sqrt{D_P\tau_P}$, W_P и W_N са съответните широчини на базите.

При достатъчно големи стойности на

$$B_N=\operatorname{sech}\frac{W_P}{L_N}$$ е в сила $$\frac{b+1}{b}\operatorname{sech}\frac{W_P}{L^N}>1$$

за всякакви стойности на β_P [78, 90]. Когато обаче β_P е малко, за високо ниво на инжекция е необходимо протичане на по-голям ток, което означава по-големи стойности за тока на включване I_{GT} и за удържащия ток $I_н$. Следователно условието за включване придобива вида

$$\beta_N>\frac{b}{b+1}.$$

Да вземем следния пример: за конструктивното пресмятане избираме

$\gamma=1$, $\mu_P=500\ \frac{cm^2}{V.s}$, $\mu_N=1400\ \frac{cm^2}{V.s}$, което означава, че $\beta_N > 0{,}73$. Следва

$$\operatorname{sech}\frac{W_P}{L_N} > 0{,}73 \quad (\text{за } \Delta L_P=0).$$

Тъй като стойността на параметъра $\tau_N(L_N)$ се определя от изискванията на динамичните параметри, остава да се избере W_P. Интересно е да се отбележи, че съществува стойност W_{P0}, за която това условие е винаги изпълнено. Тези стойности са ограничени от широчината на обемния заряд в базата P. За определяне на дебелината на базата N, а оттам и на цялата пластина освен казаното по-горе можем да използуваме осигуряването на условието $\gamma_P=1$, т.е.

$$\operatorname{sech}\frac{W_N-\Delta l_N}{L_P}\cdot\frac{1}{1-\left(\frac{U_{BO}}{U_{AV}}\right)^4}\approx 1.$$

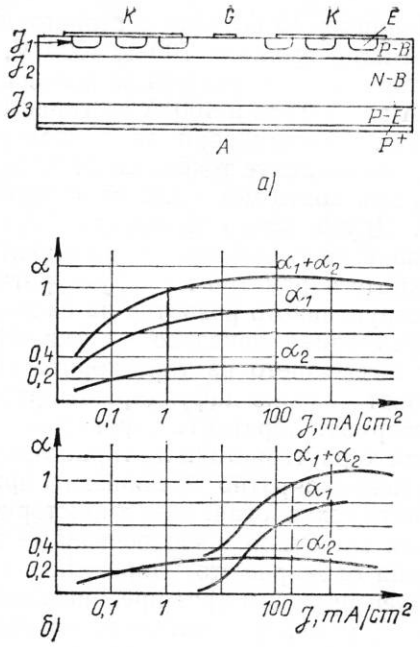
В този израз вече са известни Δl_N, L_P и U_{AV}, т.е. $\frac{U_{B0}}{U_{AV}}(W_N)$, където U_{BO} е блокиращото напрежение. Избира се стойност, за която $U_{BO}/U_{AV}\approx 1$.

Процесът на превключване на тиристора и динамичните му характеристики са тясно свързани [87, 88]. Процесът на превключване е преходът между статичните и динамичните характеристики при конструиране.

Ако потенциалът на управляващия електрод спрямо катода е отрицателен, преходът откъм страната на катода поне в една област около управляващия електрод е включен в обратна посока. Частите на блокиращия ток I_{J20} и токът $\alpha_p I_{J3}$ се отклоняват към управляващия електрод (вж. фиг. 11.69*б*). Това означава, че е необходим по-голям ток, протичащ през структурата, отколкото в предния случай. На практика това означава да бъдат повишени блокиращото напрежение или температурата, за да се стигне до включване на тиристора. Влиянието на отрицателното управляващо напрежение върху температурната стабилност на блокиращото напрежение зависи от вида и разположението на управляващия електрод и от големината на отрицателния потенциал.

Подобно действие може да бъде получено чрез даване накъсо на отделни части от емитера. Както е показано на фиг. 11.70, чрез подходящи фотошаблони областта на емитера може да бъде „надупчена" (шунтирана) така, че катодът да достига до P-базата. На тези места P-базата има същия потенциал както N-емитера. Чрез тези области една част от дупчестия ток отива директно към отрицателния катод и по този начин не участвува във включването на тиристора. Това означава, че блокиращият ток трябва да достигне по-голяма стойност, за да може преходът J_2 да бъде включен в права посока, а оттам и целият тиристор. Така по конструктивен път е възможна промяна на блокиращото напрежение, а заедно с него и на други параметри на тиристора.

На фиг. 11.70*б* са показани зависимостите на коефициентите на усилване по ток на двата съставни транзистора и на тяхната сума от стойността на плътността на тока в права посока горе без шунтиране на емитера, долу — за случая на „шунтиран" емитер. Вижда се, че сумата достига стойност единица при плътност на тока от около 1 mA/cm². Това означава, че е необходимо да се осигури тази стойност на плътността на тока, за да се включи тиристорът. Разбира се, тиристорът може да се включи и от един микропробив на повърхността, който също би осигурил тази плътност на тока. Това неудобство може да се заобиколи, като изкуствено се намалят стойностите на α при малките стойности на плътността на тока. И това е именно смисълът на късите съединения на прехода J_1. Резултатът от тази конструктивна мярка, показан на същата фигура, е, че сумата на двата коефициента достига стойност единица едва при плътност на тока от 200 mA/cm². По този начин даже и при високи температури се създава възможност за осигуряване на високи блокиращи напрежения. Тази конструктивна мярка влияе и на други параметри на тиристора, като номиналния ток на тиристора или удължаващия ток. Ето защо изборът на оптималната геометрия е труден проблем.

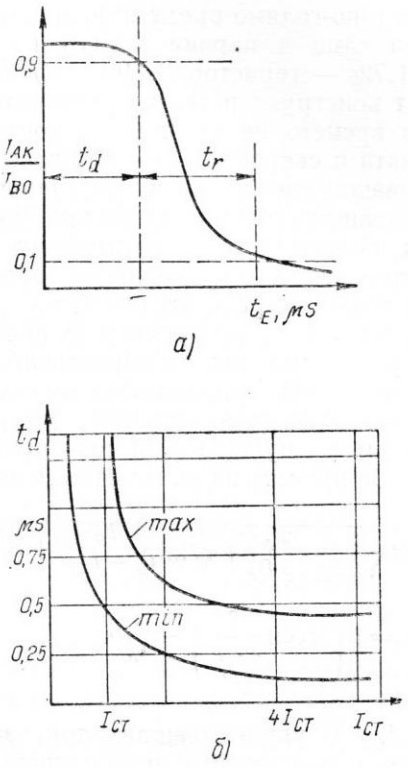


Фиг. 11.70

Конструкторът гарантира стойностите на три параметъра, които характеризират включването на тиристора. Първият параметър е токът на включване I_{GT}. Неговата стойност се създава възможно най-голямата за дадения клас тиристори. Действителният ток на включване може да се окаже по-малък. Вторият параметър е напрежението на включване U_{GT}. То съответствува на тока на включване и тъй като тиристорът се включва винаги от токов генератор, този параметър не е толкова важен. Третият параметър е напрежението U_{GD}, дефинирано като най-голямата стойност на включващото напрежение, при което все още се запазва блокираното състояние на тиристора. Този параметър се гарантира конструктивно за мак-

симална температура на прехода и е във връзка с гарантираната стойност за dU/dt, тъй като чувствителността към нарастването на напрежението може да се окаже по-важна от напрежението U_{GD}.

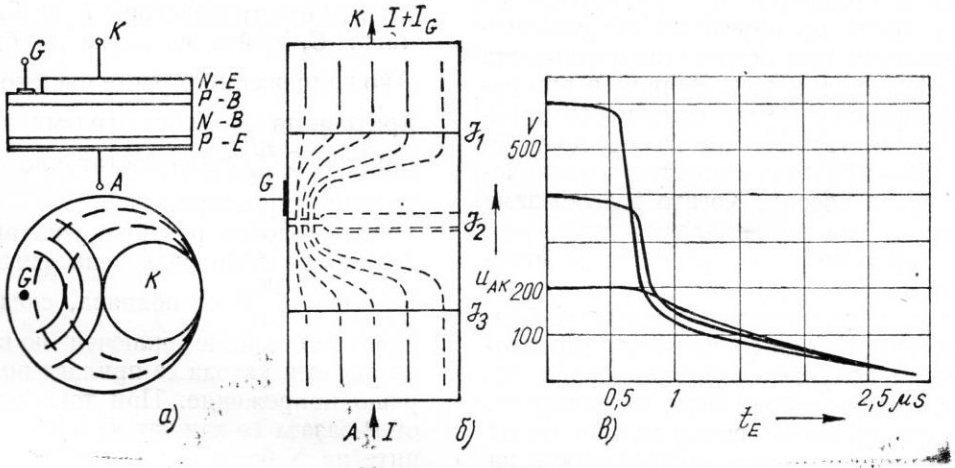
При динамичните параметри, характеризиращи процеса на включване, най-важни са времето на включване t_E и времето на изключване t_q. Времето на включване се дефинира като сума от две съставки. Първата съставка характеризира закъснението спрямо командния импулс на управляващия електрод. Втората съставка е времето за нарастване, определено от управляващия електрод. Разделянето на времето на включване на две съставки е условно, като в действителност на всяка една от съставките отговарят различни процеси, които протичат в структурата. Първата съставка t_d е един интервал от време, което протича от момента, в който управляващият електрод започва да инжектира токови носители, до момента, когато тиристорът започва да се включва, т.е. когато започва компенсирането на обемния заряд на прехода J_2. Това време зависи много от стойността на тока на включване и, разбира се, от нарастването на тока на включване. От друга страна, то зависи по-малко от напрежението между анода и катода на тиристора. Примерна стойност за тази съставка на времето на включване би могла да бъде от 0,2 μs за малките тиристори до 5 μs за най-мощните. На фиг. 11.71 е показана диаграмата на включване на тиристора (*а*) и примерна зависимост на първата съставка t_d от тока на управление I_{GT} — (б).



Фиг. 11.71

През втората съставка на времето на включване t_r през тиристора постепенно започва да протича ток. Това време зависи изключително от тока през прибора, с други думи, от начина, по който расте токът през тиристора.

Конструктивно тиристорът не е едномерна структура (чиповете имат диаметър до 30 mm и повече). Както е показано на фиг. 11.72, управляващият електрод е разположен така, че в хоризонтална посока тиристорът не се включва изведнъж. Това означава, че в началото на превключващия процес през една малка част от повърхността на катода може да премине голям ток, при което структурата може да се разруши. Ето защо конструктивно, а и при употребата на този прибор трябва да се вземат мерки за ограничаване на скоростта на нарастване на тока в тиристора. Примерни стойности за скоростта на нарастване са 20—200 A/μs в зависимост от конструкцията на структурата. В същност възможностите на една тиристорна структура по отношение на този параметър се определят до голяма степен от големината на тока на управление и от неговата стръмност на нарастване. При повечето конструирани тиристори трудно може да се определи зависимостта на втората съставка на времето на включване t_r от тока на управление. Влиянието на



Фиг. 11.72

този ток е по-голямо върху първата съставка и се отразява само в първия момент на включване (фиг. 11.72*в* — тиристор 2N690 за $dI/dt=50$ A/μs). Добрият конструктор задава условията за измерване на времето на включване, които включват големината и скоростта на нарастване на тока на управляващия електрод, анодното напрежение преди включването, големината на тока през тиристора след включването, гарантираната конструктивно стръмност на нарастване на тока през тиристора и температурата на прехода.

За изчисляване на времето за включване някои автори правят редица опростявания. Приема се включване чрез управляващ импулс в базата P, първоначални стойности за γ_P и γ_N, приблизително равни на нула, а след това приблизително единица. За времето на включване се дава изразът

$$t_E=0{,}2\sqrt{\frac{W_P^2}{2D_N}\cdot\frac{W_N^2}{2D_P}}+\tau_0\ln\frac{I_G}{I_G-I_{GT}}+\tau_0\ln\frac{0{,}9\,I_a}{0{,}1\,I_a},$$

където $\tau_0=1\Big/\left(\operatorname{arcch}\frac{2}{2\frac{W_P^2}{2D_N}}\right)^2-\frac{1}{\tau_N}$.

Тук I_{GT} е управляващият ток, зависещ от приложеното напрежение между анода и катода, а I_G е токът в управляващата верига. Токът I_{GT} зависи силно от проводимостта на базата P и от нейната дълбочина W_P. При големи стойности на σ_{PB} и „изтощен“ емитер, т.е. намалено време на живот τ_E. Поради шлифованата повърхност на пластините γ_N започва съществено да се отличава от 1, което води до нарушаване на условието за компенсиране на обемния заряд в прехода J_2 на тиристора и в нарастване на тока на управление. Същото се отнася и за пада в права посока, който нараства при „недобре“ включения преход J_2. От друга страна, намаляването на σ_{PB} под определена стойност води до увеличаване на напрежението на включване U_{GT}. Например за $R_S=150\ \Omega$, $X_{l_1}=15$ μm, $X_{l_2}=55$ μm следва $\sigma_{PB}=0{,}9\ \Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$. Тази стойност осигурява $U_T\leq 2$ V, $\frac{dU}{dt}\geq 500.10^6$ V/s и т.н. [78].

От съществено значение при определянето на тези параметри е стойността на градиентите на разпределение, които се определят от параметрите на дифузионния процес и технологичността на избрания дифузионен метод. Например при извършване на фосфорна дифузия от отложен никелов слой се допуска увеличаване на σ_{PB} до стойности на $R_S\approx(50—100)\Omega$ без съществено увеличение на пада в права посока. Когато разглеждаме този параметър, може да се върнем към фиг. 11.69, където е изобразена зависимостта на отношението на номиналната мощност към разсейваната мощност в един тиристор от максималното блокиращо напрежение. Вижда се, че между тиристорите и диодите се получава разлика поради по-големия пад в права посока при тиристорите. Падът в права посока зависи силно от времето на живот. Математическият израз за определяне на пада в права посока е

$$U_F=U_T\left(\delta\exp\frac{W_N}{L}+\ln\frac{I}{I_S}\right),$$

където

$$I_S\Big|_{J_3}=\frac{2qD_P P_N}{L_P};\quad \delta\approx 1{,}8.$$

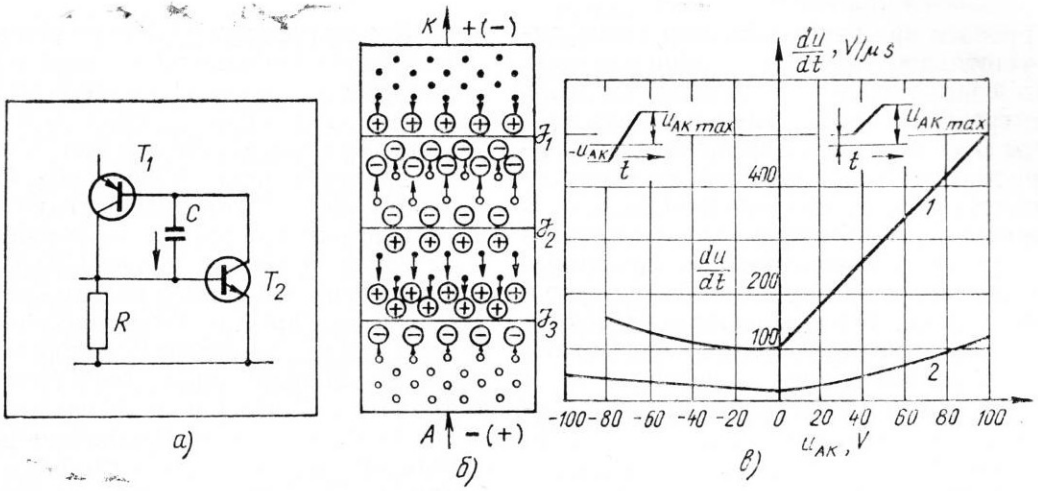
Както се вижда от този израз, падът в права посока е обратно пропорционален на времето на живот в базата P. За постигане на постоянен пад в права посока е необходимо технологично и конструктивно гарантиране на времето на живот на токоносителите в базата [78, 290]. Средната стойност на времето на живот е между 4—10 μs. Това означава, че максимумът на функциите на фиг. 11.69 зависи от времето на живот. Ако например при диодите максимумът се премести от 5 kV на 10 kV, времето на живот би трябвало да се измени 4 пъти, за да може да се изпълни условието $d/\sqrt{D\tau}=\text{const}$. Увеличаването на времето на живот е свързано и с увеличаване на времето на изключване на тиристора, т.е. с друг динамичен параметър на структурата. За времето на изключване може да се използува изразът

$$t_q=\tau_P\ln\frac{I}{I_H}.$$

За случая $\frac{I}{I_H}=10^4$ следва $t_q\approx 9{,}2\ \tau_P$. Това означава, че изменението на времето на живот τ_P веднага се отразява на времето на изключване на тиристора. В този смисъл времето на изключване и падът в права посока са противоречиви параметри. Друг конструктивен метод за намаляване на времето на изключване е увеличаването на задържащия ток I_H. За постигане на високо блокиращо напрежение се извършва конструктивно шунтиране на прехода J_1. Това практически води до увеличаване на задържащия ток и в същото време до намаляване на времето на изключване.

Третият важен динамичен параметър на един тиристор, на който трябва да се обърне особено внимание при конструирането, е критичната скорост на нарастване на блокиращото напрежение. Когато скоростта на нарастване за дадената структура бъде превишена, тиристорът може да се включи преждевременно. На фиг. 11.73*а,б,в* е показана еквивалентната схема на тиристора. Между съставните транзистори T_1 и T_2 се явява капацитетът C, който не може да бъде пренебрегнат. Ако напрежението расте със скорост $\frac{dU}{dt}$ и превиши критичната стойност, големината на капацитивния ток $C\frac{dU}{dt}$ става достатъчно голяма и може да включи тиристора.

За по-добро разбиране на проблемите е необходимо да бъде разяснена физиката на процеса. Ефектът „$\frac{dU}{dt}$“ се появява, след като тиристорът е бил в състояние „включен“ по време, когато между анода и катода се прилага положително блокиращо напрежение. При това положение дупките от P-базата се движат към прехода J_1, а електроните на N-базата към прехода J_3, тъй като тези два прехода са включени в права посока. От на-

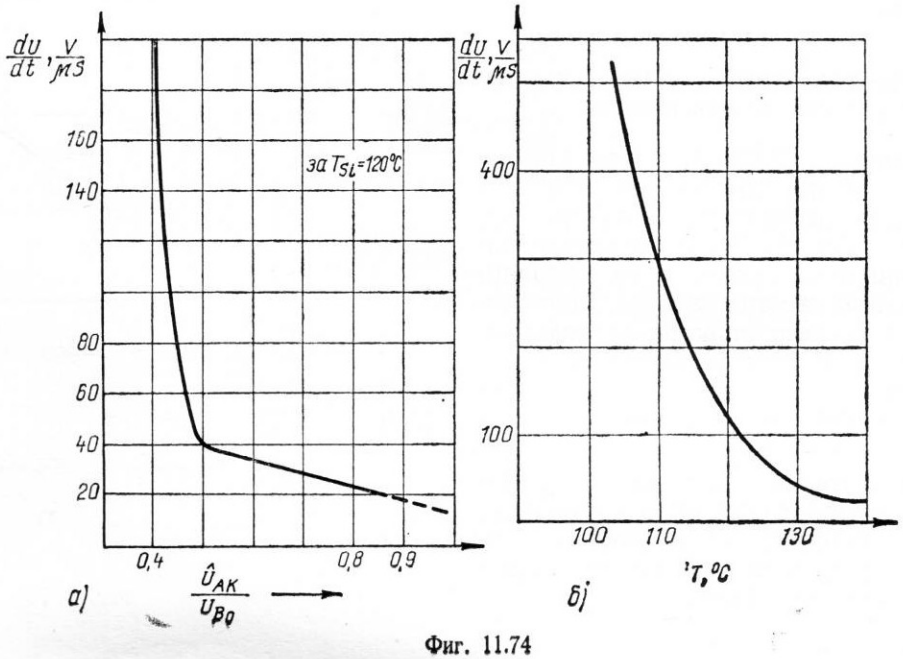


Фиг. 11.73

трупването на дупки около прехода J_1 потенциалът на P-базата се повишава, а потенциалът на N-базата се намалява. Това води до „усилване" на включеното състояние на двата прехода, което от своя страна увеличава потока от токови носители към прехода J_2. Това съответствува на повишено напрежение между анода и катода и създава условия за включване на тиристора. Именно опразването на обедняната област около прехода J_2 чрез движение на дупките към катода и на електроните към анода представлява физическият смисъл на капацитивния ток, при което количеството на изтеглените токови носители зависи от скоростта на нарастване на положителното напрежение.

Ако нарастването е малко, идващите към прехода J_2 токови носители рекомбинират, при което коефициентите на усилване на съставните транзистори остават малки и тиристорът остава в блокирано състояние. Това означава, че тиристорът може да издържи само ограничена скорост на нарастване на блокиращото напрежение. Това е показано и на фиг. 11.73*в* в зависимост от приложеното напрежение между анода и катода (*1* — „шунтиран" емитер, *2*—„нешунтиран" емитер). Качествата на тиристора по отношение на този параметър могат да бъдат подобрени чрез подаване на отрицателно напрежение на управляващия електрод, при което част от капацитивния ток се насочва към управляващия електрод.

Конструктивно до същите резултати може да се стигне чрез шунтиране на емитера. Както е показано на фиг. 11.73*в*, параметърът $\frac{dU}{dt}$ зависи освен от положителното или отрицателно напрежение между катода и анода и от отношението на това напрежение към блокиращото напрежение на структурата. На фиг. 11.74*а,б* е показана зависимостта на параметъра $\frac{dU}{dt}$ от отношението на двете напрежения и от температурата. При малките тиристори осъществяването на голяма стойност на параметъра $\frac{dU}{dt}$ може да се изпълни конструктивно, като между управляващия електрод и катода се включи едно съпротивление, както е показано на фиг. 11.73. Практически това съпротивление е еквивалентно на шунтирането на емитера при мощни тиристори.



Фиг. 11.74

Важен проблем при конструирането е осигуряването на устойчивост срещу паразитни влияния. Обикновено един тиристор е толкова по-добре гарантиран срещу паразитно влияние, колкото е по-трудно да бъде включен. Стремежът да се направят тиристорите по-чувствителни е за сметка на устойчивостта срещу паразитни напрежения. В този смисъл конструкторът трябва да избере структура, която удовлетворява най-добре проектираните параметри, но да не забравя, че тиристорът е ключов елемент, т.е. той трябва да издържа на високо комутиращо напрежение и да бъде малко чувствителен към паразитните смущения, идващи от схемата на анода или на управляващия електрод.

11.8. ОПТОЕЛЕКТРОННИ ПРИБОРИ

При конструирането на оптоелектронни прибори се изхожда от вида и предназначението на структурата. При приборите, преобразуващи светлината в електрически сигнал, основните параметри са отношението сигнал/шум и граничната честота. Приборите, преобразуващи директно светлинната енергия в електрическа (фотоелементи), се характеризират с коефициент на полезно действие.

Основна роля при преобразуването на електроенергията в светлинна играе излъчването при рекомбинация. Различаваме спонтанна и стимулирана емисия, при това излъчването е кохерентно само във втория случай.

Съществени конструктивни особености са наличието или отсъствието на PN преходи, броят на преходите, видът на материала, който определя абсорбционната характеристика, разсейваната мощност, видът на оптичната система и т.н.

Не всички оптоелектронни прибори са полупроводникови. С развитието на интегралната оптика широко приложение при конструирането намира слойната техника (вж. гл. 13). Освен това широко приложение имат и индикаторите на базата на течни кристали.

11.8.1. Фотоприбори, преобразуващи светлината в електрически сигнал или енергия

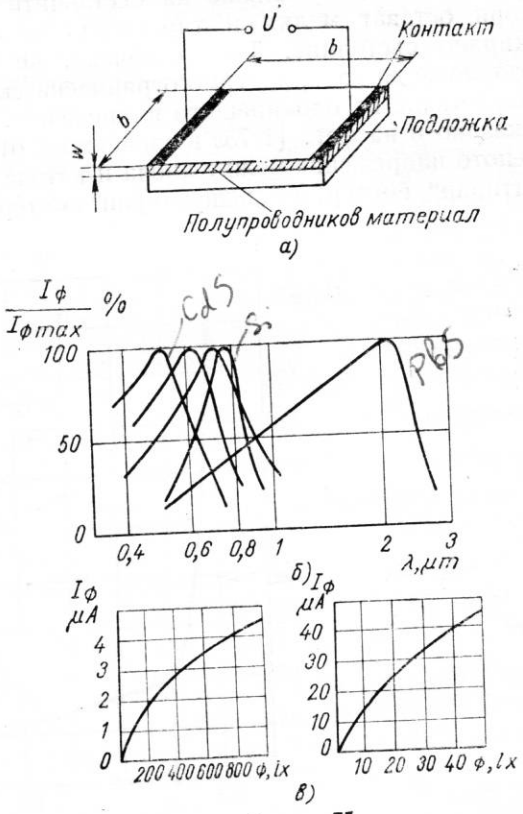
Тук са разгледани прибори, реагиращи на светлината обемно (фоторезистор) или чрез PN преход (фотодиод, фототранзистор, фототиристор, фотоелемент, фотоматрици). Всички основни конструктивно-технологични проблеми на биполярните прибори запазват своето значение. Допълнително се явяват оптичните свойства на полупроводниковия материал и фоточувствителността на PN прехода. Всеки прибор е разгледан във връзка с основните си конструктивно-технологични параметри [97, 293].

Фоторезистор. Като материали за фоторезистори се използуват тънки слоеве от селен, кадмий, олово и полупроводникови пластини (предимно силиций). Тези материали се обработват с традиционните технологични операции.

Конструирането на фоторезистора започва с определяне на основното изискване към него в зависимост от предназначението му. Примерно за ключов елемент се изисква голяма стръмност и малка прагова чувствителност, а за преобразувателен фоторезистор — линейност. Според използуваната светлина от спектралната характеристика се определя материалът на фоторезистора. Типът материал определя съпротивлението на тъмно, обикновено от няколко килоома до няколко мегаома, и максимално допустимата разсейвана мощност. Последната зависи и от избрания корпус. Обикновено хоризонталната геометрия се избира във формата на меандър и за изчисляване на стойността се използуват традиционните методи, описани при дифузионните и слойните резистори. На фиг. 11.75*а* е показан най-общ случай на конфигурация на фоторезистор с дължина l и широчина b. Фоточувствителният материал е нанесен върху изолационна подложка. Показани са и спектралните характеристики в зависимост от материала. Максимумът на поглъщане се определя от зависимостта между дължината на вълната λ и широчината на забранената зона ΔE на използувания материал $\lambda_{гр}=\frac{1,24}{\Delta E}$.

Следващият важен параметър е дебелината на слоя W. Тя оказва влияние на погълнатия спектър, като при голяма стойност се поглъща и подълговълновият обхват. От уравнението на поглъщане

$$\Phi=\Phi_0 \exp(-\alpha x),$$



Фиг. 75

където Φ_0 е потокът на повърхността;

α — коефициент на поглъщане за материала;

x — координатата;

следва, че дълбочината на проникване се определя от e пъти отслабване на потока. Чрез подбиране на дебелината на слоя може да се изменя видът на спектралната характеристика — по-силно или по-слабо избирателна.

От избрания материал може да се определи очакваната фоточувствителност по емпиричната зависимост $I_ф = K\Phi^x$, където $I_ф$ е фототокът, K е коефициент на пропорционалност, който е функция на α, ρ и коефициент на отражение R [$K = k(1-R)\alpha\rho$], а x—степен, променяща се от 0 до 1. За $x=0{,}5$ $\frac{dI_ф}{d\Phi} = \frac{K}{2\sqrt{\Phi}}$.

Необходимата хоризонтална геометрия се определя от стойността на зададения фототок и допустимата плътност на тока. От съществено значение е и стойността на съпротивлението на тъмно, която се използува за определяне на дължината на съпротивлението.

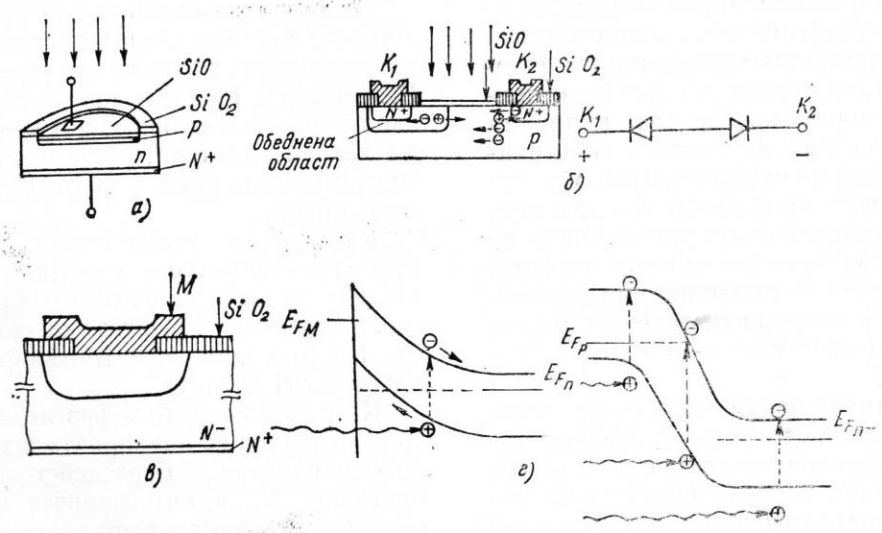
От пробивното напрежение на материала се определя максималното допустимо работно напрежение. Обикновено се използува $U_{max} = \frac{l}{b} U_{BR}$.

Следващата стъпка е определянето на топлинния шум и праговата чувствителност. Последната се избира за светлинен поток, предизвикващ фототок, три пъти по-голям от топлинния шум.

Корпус се избира в зависимост от максимално допустимата и постигнатата разсейвана мощност (вж. гл. 7). На фиг. 11.75*в* са показани типични светлинни характеристики на фоторезистори. Допълнително изискване към тях е линейността на характеристиката, дефинирана за промени в потока до 5%.

Фотодиод, фототранзистор и фототиристор. Тези прибори са известни като фотоприемни устройства. Те могат да бъдат използувани поотделно или групово във фотоприемни матрици. При тях се различават структури, изготвени чрез дифузия, йонна инплантация или използуване на Шотки-преход. Допълнително към конструкцията се явяват проблемите, свързани с достъпа на светлина до необходимия PN преход и с антирефлекторното покритие. На фиг. 11.76 *а,б* са показани основните конструкции на фотодиод с един или с два прехода. Те отразяват основните варианти — осигуряването на голямо бързодействие *а* или на голяма чувствителност *б*. Зависимостите между конструктивно-технологичните параметри ще бъдат показани на базата на сравнение на фотодиод с PN преход и фотодиод с Шотки-преход.

Металът се нанася под формата на тънък слой чрез вакуумно изпарение или чрез катодно разпрашване върху повърхността на полупроводника. Той изпълнява функцията на P-областта на обикновения PN преход, като дебелината му не оказва влияние върху височината на потенциалната бариера. При Шотки-фотодиода се избягва високотемпературният процес дифузия, необходим за създаване на P-областта за случая на PN диода, което облекчава технологичния процес. На фиг. 11.76*в,г* са показани напречен разрез на фотодиода и съответната зонна диаграма, както и зонната диаграма на PN (PIN) диод. Присъствието на P-дифузионния слой на повърхността на полупроводника при PN диода води до електрофизически особености, свързани с наличието на висока концентрация на примесни атоми на пътя на светлината. Тази концентрация е необходима за компенсиране на основните примесни атоми и за създаване на нискоомен P-слой. За PN диода обедненатa зона се получава под P-слоя в N-полупроводника, докато за случая на Шотки-прехода тя е под материала на самата повърхност. Поглъщането в дълбочина на фотоните зависи от дължината на вълната. В областта на по-късите вълни, където абсорбционният коефициент α е голям, примерно 2.10^3 cm^{-1} за $\lambda=0{,}7$ μm и $\alpha=5.10^4$ cm^{-1} за $\lambda=0{,}4$ μm, всички фотони биват абсорбирани на дълбочина от 1 до 5 μm, т.е. практически на повърхността на полупроводника. За Шотки-прехода тази повърхност



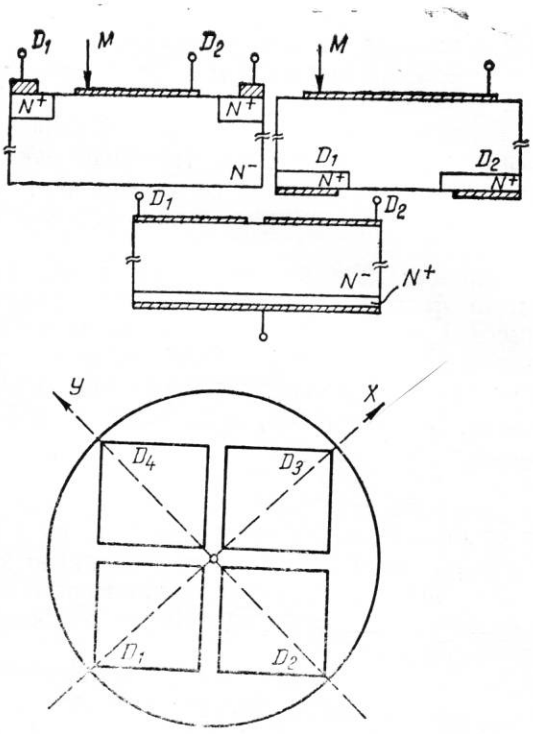
Фиг. 11 76

е обеднена, т.е. генерацията и отнасянето на токоносителите към контактите става най-ефективно и най-бързо, докато при PN диода високата концентрация на примесите намалява ефективността при събирането и отнасянето. Това е причината за по-големия коефициент на фоточувствителност на Шотки-фотодиода, както и за по-равномерната спектрална характеристика. Едно конструктивно решение, при което също се реализира широка обеднена област, е PIN диодът. Той се отличава с високоомен I-слой, при което P-слоят може да има по-ниска концентрация. Осъществяването на тези конструктивни особености обаче изисква дифузия с малка повърхностна концентрация и специални материали. Известно е, че за $\lambda=0{,}8$ μm обикновено използуваните метални покрития (злато, алуминий и никел-хром) имат относително голям коефициент на отражение — около 30%. Това относително намаляване на „прозрачността" на прехода води до заобляне на спектралната характеристика и до липсата на изявен максимум. За отстраняване на този нежелан ефект се използува антирефлекторно покритие под формата на тънък диелектричен слой върху метала.

При избора на специфичното съпротивление на полупроводниковия материал се държи сметка за широчината на обедняната област. От теорията на фотоприборите е известно, че токовите носители, генерирани в обедняната зона, се отнасят към контактите чрез дрейф, а тези, генерирани в P- или N-областта, се отнасят чрез дифузия до границата на обедняната област и после чрез дрейф до контактите. Тъй като дрейфът е по-бърз от дифузията, за по-висока гранична честота е необходимо генерацията да се извършва изключително в обедняната зона. В спектралната област от 0,4 до 1 μm абсорбционният коефициент α се движи в границите от 7.10^4 до 10^2 cm^{-1}, което означава поглъщане на светлината в слой с дебелина до 10 μm. Следователно при Шотки-фотодиодите наред с равномерната спектрална характеристика се постига и по-висока гранична честота, обоснована от наличието на обеднена зона на самата полупроводникова повърхност.

На фиг. 11.77 са показани някои особености на хоризонталния Шотки-фотодиод. Хоризонтален или страничен фотодиод има тогава, когато фототокът се разделя на две или четири съставки, протичащи в срещуположни посоки във външната електрическа верига. Това се постига конструктивно чрез използуване на съответен брой обратни контакти. Предимството на този вид фотодиоди е, че за нулево съвместяване фототокът е равен на нула, което увеличава чувствителността на фотоприемника, а освен това по големината на съответните фотонапрежения може да се определи местоположението на един обект в едно- или двукоординатна система.

Важни конструктивни параметри в еквивалентната схема са C_s — капацитетът на обедняната област, R_i — вътрешното съпротивление и R_s — серийното съпротивление, което се образува от необедняната част на полупроводника и омовия контакт. Колкото обедняната област е по-близо до



Фиг. 11.77

омовия контакт, толкова R_s е по-малко. За определена дебелина на полупроводниковата пластина това означава дебела обеднена зона, голямо специфично съпротивление и високо обратно напрежение. Серийното съпротивление намалява чувствителността на прибора. Дебелината на обедняната зона е във връзка с друг параметър на диода — времето за нарастване на фототока или времето за получаване на фотоотговор. Определяща съставка на това време е времеконстантата $\tau=R_sC_s$, тъй като времето за прелитане на токовите носители през обедняната зона (4ps/μm) за практическата дебелина на полупроводника 300—400 μm е много малко, а времето за презареждане на уловките е още по-малко. По отношение на този параметър се изисква R_s да бъде минимално, а за голяма чувствителност се изисква максимален товар.

От теорията на Шотки-прехода е известно, че неговите шумови характеристики поради липсата на неосновни носители са по-добри от тези на PN прехода. Тъй като при фотодиодите шумовите характеристики се определят както от генерацията на токови носители, така и от инжекцията, за Шотки-прехода трябва да се очаква по-малко шумово число.

Капацитетът на обедняната зона зависи както от вертикалната геометрия, така и от топологията. Промяната на приложеното обратно напрежение се отразява на елементите от еквивалентната схема. По този параметър Шотки-фотодиодите са еднакви с PN диодите.

Като пример ще бъде разгледано конструирането на фотодиод по планарната технология със следните параметри — бързодействие τ, работно напрежение U_R и интензивност на светлината за определена дължина на вълната λ. Редът на работа е следният:

1. Избор на материал с максимум на поглъщне в областта на λ.

2. Определяне на интегралната чувствителност K за определено отражение R и коефициент на събиране Q ($K=\frac{(1-R)Q\lambda}{1{,}24}$). Коефициентът на събиране, дефиниран като отношение на обработените токови носители към целия брой генерирани носители, зависи силно от конструктивните и технологични параметри. На първо място това е дебелината на базата W, която изпълнява условието $W \geq W_1=\frac{1}{\alpha}$, където W_1 е дълбочината на проникване на светлината. Освен това Q зависи от скоростта на повърхностна рекомбинация S и дифузионната дължина L_D, като Q расте, когато S намалява, и Q расте, когато L_D расте.

3. Изчисляване на времето на прелитане, времеконстантата на структурата и преразглеждане на вертикалната геометрия и площта. За кръгла структура съпротивлението на базата е $R_B=\frac{1}{8\pi}\cdot\frac{\rho}{W}$.

4. Определяне на интегралната чувствителност на единица площ и избор на хоризонтална геометрия.

5. Определяне на пробивното напрежение според работното (обикновено се избира $U_R=\frac{U_{BR}}{2}$) и стойността на ρ.

6. Определяне праговата чувствителност от

$$P=\frac{[2e(I_S+I_{\Phi_0})]^{1/2}}{K},$$

където I_s е токът на тъмно;

I_Φ — фототокът.

7. Определяне на очакваната нелинейност на фотохарактеристиката от

$$I_\Phi=\frac{K\Phi}{1+\frac{R_s}{R_i}}.$$

За малка осветленост $Ri\to\infty$, $I_\Phi=K_\Phi$, (Ф е светлинният поток).

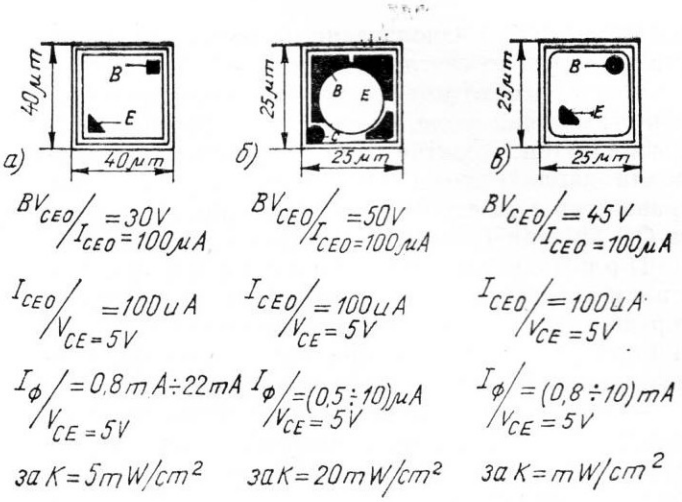
8. Избор на корпус и оптична система в зависимост от изискванията на пеленгационната характеристика.

При конструирането на PIN диоди или Шоткидиоди коефициентът на събиране Q се определя изцяло от дрейфа в обедняната зона:
$Q=1-\exp(-\alpha\, d_{\text{об. обл}})$ [98, 99, 294].

За фототранзистора се дефинират същите параметри и характеристики както при обикновения транзистор. Съществуват два типа фототранзистори — безбазови и базови. Поради това тук са дадени онези параметри, които ги отличават от обикновените.

Колекторният ток се дефинира при дадена осветленост. Например за ОР 500 при осветленост $H=20$ mW/cm^2 — $I_C=1$ mA.

Токът на тъмно е еднозначен на обратния колекторен ток на неосветлен фототранзистор и е от няколко десетки до стотици nA. За ОР 500 той е 25 nA, а за ОРІ 120—100 nA.



Фиг. 11.78

Напрежението на насищане се дава при определена осветленост и колекторен ток. За повечето фототранзистори то е по-малко от 1 V.

За безбазовите транзистори коефициент на усилване на базовия ток не се дефинира. При базовите той е от порядъка на няколко десетки до няколко стотици. За МСТ 200 $h_{FE}=400$.

При безбазовия фототранзистор няма извод за базата. Осветляването на базовата област предизвиква натрупване на обемен заряд, еквивалентен на определено базово напрежение. Следователно безбазовият фототранзистор може да се разглежда като фотодиод, но с по-голяма интегрална чувствителност. Поради същите причини той се използува в ключови схеми.

Ако се разглежда колекторният преход като фотодиод с чувствителност K, уравнението на транзистора придобива вида

$$I_C=K_{\text{тр}}\Phi+I_{CEO},$$

където $K_{\text{тр}}$ е чувствителността на фототранзистора, като $K_{\text{тр}}=K\beta\xi$. където β е коефициентът на усилване на базовия ток, а ξ— коефициентът на влияние на емитерния преход, изменящ се от 0,6 до 0,7.

При разглеждането на базовия транзистор колекторният преход отново се разглежда като фотодиод. Наличието на базов извод позволява да се работи в по-линеен режим и при малки стойности на осветляването. Това е резултат от обратното включване на колекторния преход и намаляване на влиянието на емитера. Уравнението за колекторния ток се получава

$$I_c=K_{\text{тр}}\Phi+\beta I_B+I_{CEO}.$$

След като се отчете изискването за колекторния преход, разгледан като фотодиод, останалите изчисления и оразмерявания се извършват както за класическия транзистор.

На фиг. 11.78 са показани някои видове конфигурации на фототранзистори и основните параметри, постигнати с тях. Фототранзисторите *а* и *в* имат колекторен извод от долната страна на чипа. За фототранзистора *б* е характерна кръговата форма на осветляваната повърхност. Тя поз-

волява по-добро използуване на оптичните лещи, даващи кръгово светлинно петно [293].

Ако е необходима по-голяма чувствителност при ограничена площ, се използува структура фотодарлингтон. Практически той представлява нормална дарлингтонова двойка, в която единият транзистор е заменен с фототранзистор. Например за ОР 305 при $H=1$ mW/cm^2 токът е 40 mA.

Примерно изчисление на фототранзистор. Да се разработи фототранзистор за оптронна двойка с бързодействие τ, интензивност на източника B при дължина на светлинната вълна λ с площ, по-малка от A:

— извършва се ориентировъчно изчисление за чувствителността, като в зависимост от получената стойност се избира транзистор или дарлингтонова двойка;

— определят се параметрите на колекторния преход, разгледан като фотодиод за дадена дължина на вълната λ;

— избира се площ и технология за емитерния преход;

— изчисляват се параметрите на фототранзистора;

— ако не е получено необходимото бързодействие, проверява се дали се постига при 50% от допустимото колекторно напрежение; ако е възможно достигането му, конструира се базов фототранзистор;

— при невъзможност за постигане на необходимото бързодействие се извършва оптимизация;

— след постигане на зададените параметри се избира корпус и тип на монтажа.

Фототиристор — основни параметри. Освен параметрите за обикновен тиристор при фототиристора се дефинират още два параметъра:

— напрежението на включване при дадена осветленост — показва спадането на VA характеристика при осветляване;

— управляващ ток при дадена осветленост — показва необходимия ток на включване при отчитане на фототока.

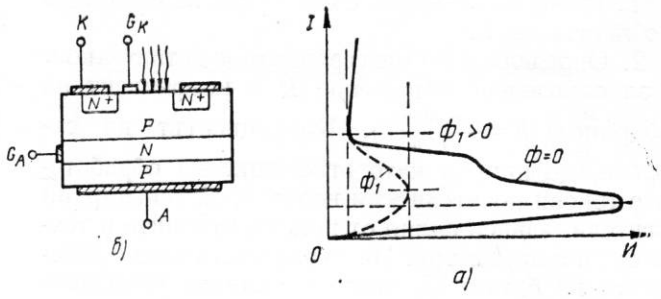
Изменението на VA характеристики при осветляване е показано на фиг. 11.79*а,б*. Основното при фототиристора е сравнително голямата чувствителност и значителните комутирани токове. Обикновено фототокът е недостатъчен за пълното управление на фототиристора и затова се използува съвместно управление с електрически сигнал. Определянето на фототока се извършва чрез разглеждането на колекторния преход като фотодиод, като се отчитат светлинните загуби при преминаване на светлината през емитерния преход. Загубите могат да се намалят чрез подходящо конструктивно оформление.

Изчисляването на фототиристора се извършва в следния ред:

— на базата на обикновен тиристор, осигуряващ протичането на дадения ток, се прави изчислението за необходимия фототок;

— проверява се възможно ли е неговото получаване при определена осветеност;

— ако не е възможно, се увеличава фоточувствителната площ;



Фиг. 11.79

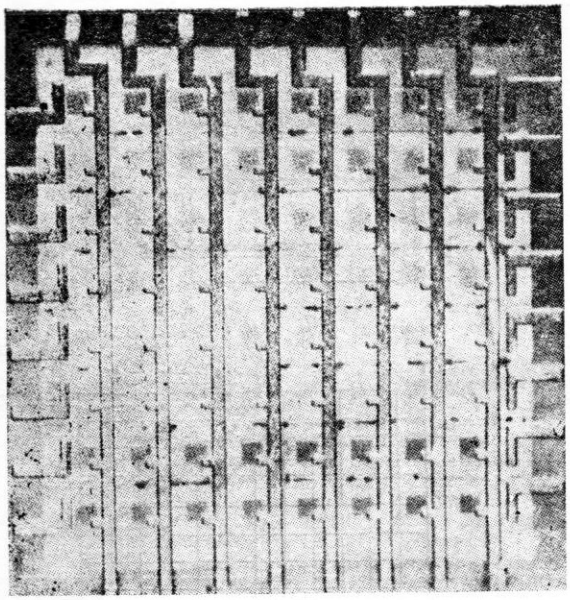
— ако и това се окаже недостатъчно, се провежда оптимизация: а) промяна на дебелината на катодния слой и изчисление на тиристора; б) ако това не дава резултат, се увеличава колекторната повърхност и се променя геометрията;

— провеждат се пълни изчисления за получения фототиристор.

Фотоприемни матрици. Като елементи на фотоматриците могат да бъдат използувани различни фотодиоди и фототранзистори. Изискванията към тях са — бързодействие, по-добро от 10 ns, и чувствителност около 0,5 A/W. PIN диодите и Шотки-диодите осигуряват голямо бързодействие и по-голяма чувствителност във видимата и близката инфрачервена област на спектъра. Основен проблем е осигуряването на голям изходен сигнал. В съвременната полупроводникова техника това се решава с помощта на допълнителен ОУ с ниско ниво на шума [100, 101].

Особен интерес представляват фотоприемните матрици за разчитане на холографски записи. Конструктивно те представляват масив от N фотоприемника, върху който се прожектира N-битова информация. Фотоматрицата се придружава от допълнителни системи за записване и развивка. Еталонната холографска страница съдържа 64×64 логически единици, разположени в блокове от 64 бита. Всеки блок попада на масив от 64 фотоприемника, образуващи отделна ИС. Фотоматрицата се изгражда от 64 такива схеми. Друго експлоатационно условие, което намира отражение в конструкцията, е едновременното възстановяване на всички битове поради определеното предимство от оптичното прожектиране на цялата страница. Това създава условия за натрупване на генерираните носители, тъй като паралелното разчитане практически не е възможно. Разчитането става по думи или по блокове от думи. На фиг. 11.80 е показан блок от 64 фотоприемника с размери на всеки от тях 100×100 μm. Този блок съответствува на аналогичен блок с 64-битова информация в еталонната страница. Матрицата е изготвена чрез биймлид технология.

Конструирането на фотоматрицата е в тясна връзка с параметрите на запомнящата матрица, с която тя изгражда холографската памет (фиг. 11.81*а,б*). За изчисляване на взаимната връзка ще бъде разгледана запомняща матрица с диагонал D и общ капацитет на запомняне N. Тя съдържа определен брой кръгли холограми с радиус a (фиг. 11.82*а*) [294, 295]. Всяка холограма е за-



Фиг. 11.80

обиколена с окръжност с радиус $\bar{a}$ за повишаване на сигурността. Сумарната запомняща площ, т.е. сумата от площите на всички холограми, е отбелязана чрез H, а общата площ на запомнящата матрица, която действува като ефективна площ — чрез $H_{eff}=D^2/2$:

$$H=\gamma^2 H_{eff},$$

където $0\leq\gamma^2\leq 1$.

Коефициентът на запълване γ^2 зависи от разположението на холограмите и разстоянието за сигурност. При

$$a=\varkappa\bar{a},$$

където $0\leq\varkappa\leq 1$, получаваме за квадратното нареждане на фиг. 11.81*б* и за хексагоналната подредба на фиг. 11.81*а* следните резултати:

квадратично разположение $\gamma^2_{sq}=\pi\varkappa^2/4$;

хексагонално разположение $\gamma^2_{hex}=(2/\sqrt{3})\gamma^2_{sq}$.

Реалната стойност за практиката е $\gamma^2=1/2$.

Детекторната матрица, необходима за прочитане на всичките холограми от запомнящата матрица, трябва да се състои от двумерен квадратен масив с m × m фоточувствителни детектори (фиг. 11.81*в*).

Ако отбележим разстоянието между центровете на два съседни детектора с q, за диагонала M на матрицата получаваме $M=\sqrt{2}mq$. Плътността на запомняне по отношение на отделната холограма е $n=N/H=m^2/\pi a^2$. Ефективната плътност на запомняне по отношение на цялата запомняща матрица е $n_{eff}=N/H_{eff}=\gamma^2 n$, а общият капацитет на запомняне е $N=\gamma^2(\pi D^2/2)=\gamma^2(m^2D^2/2\pi a^2)$.

От геометричните и дифракционни граници на образа могат да се определят условията, на които трябва да отговаря приемната матрица. Разположението на детекторите може да се избере така, че центровете на два съседни детектора да са отдалечени на разстояние $q=\beta b_a$, където b_0 е диаметърът на полученото светлинно петно — $b_0\approx 1{,}22(\lambda/a)L_D$, а β — геометричен коефициент.

За $\beta=1$ съседните петна от централната холограма се допират. Действителната стойност за технически приложения е $\beta=2$. Пространственият ъгъл, съответствуващ на един бит, е $2v_0\approx 2\beta v_0$ (фиг. 11.82), а за цялата информация — $\theta_0=\operatorname{arctg}(M/2L_0)$. Тогава капацитетът на запомняне е $E(N)^{1/2}=(0{,}23\gamma/\beta)(MD/\lambda L_0)$. Този израз посочва, че капацитетът на запомняне се увеличава с нарастване на стойността MD/L_0, т.е. отразява влиянието на геометрията на конструкцията. Друга важна величина, характеризираща конструкцията, е $z(D+M)/2L_0$. Ако се замести в израза за капацитета на запомняне, се получава

$$(N)^{\frac{1}{2}}=\frac{0{,}23\gamma}{\beta}\cdot\frac{M}{\lambda}\left[2z-\left(\frac{M}{L_0}\right)\right].$$

Величината z се приема обикновено за дадена и изразява максимално допустимото разстояние между запомнящата и детекторната площ. От последния израз се получават следните конструктивни уравнения:

$$L_0=\frac{M}{2z-(\beta\lambda\sqrt{N}/0{,}23\gamma M)};$$

$$D=\frac{\beta\lambda\sqrt{N}}{0{,}23\gamma}\cdot\frac{1}{2z-(\beta\lambda\sqrt{N}/0{,}23\gamma M)};$$

$$q=M/\sqrt{2}m;\quad a=1{,}22\sqrt{2}\cdot\frac{2\lambda m}{2z-\beta\lambda\sqrt{N}/0{,}23\gamma M}.$$

За $\sqrt{N}>0$ и $0<L<\infty$ $(\beta\lambda\sqrt{N}/2.0{,}23\gamma z)<M<2.zL_0$.

Това неравенство ограничава избора на диагонала на детектиращата матрица при зададени капацитет на запомняне и величината z. От $dN/dM=0$ следва оптималният конструктивен вариант, който се характеризира със $z=M/L_0$ или $M=D$, т.е. диагоналите на двете матрици да бъдат равни. За този случай написаните по-горе уравнения придобиват вида:

$$\sqrt{N}=0{,}23\gamma zM/\beta\lambda;\qquad L_0=\beta\lambda\sqrt{N}/0{,}23\gamma z^2;$$

$$D=M=\beta\lambda\sqrt{N}/0{,}23\gamma z;\quad n=(\sqrt{2}\,.\,0{,}23z/\beta\lambda)^2;$$

$$q=\beta\lambda\sqrt{N}/(\sqrt{2}.0{,}23\gamma zm);$$

$$a=1{,}22\,.\,\sqrt{2}\,(\beta\lambda m/z).$$

За някои случаи е допустимо използуването на неоптимална геометрия, но полученото по-горе неравенство трябва винаги да е изпълнено. Такива случаи се получават при голям капацитет на запомняне N.

Необходимият режим на натрупване може да се осъществи с различни фотоструктури. На фиг. 11.83*а* са показани някои видове фоточувствителни масиви. Фотодиод, свързан последователно с ключов MOS транзистор, е подходяща комбинация за линеен масив. Начинът на включване е показан на фиг. 11.83*б*. Фиг. 11.83*в* посочва разпределението на елементите в линеен масив, работещ разпределено във времето. Диодът при сорса действува като фоточувствителен елемент. Тази конфигурация не е подходяща за двумерен масив поради двустранна проводимост на MOS транзисто-

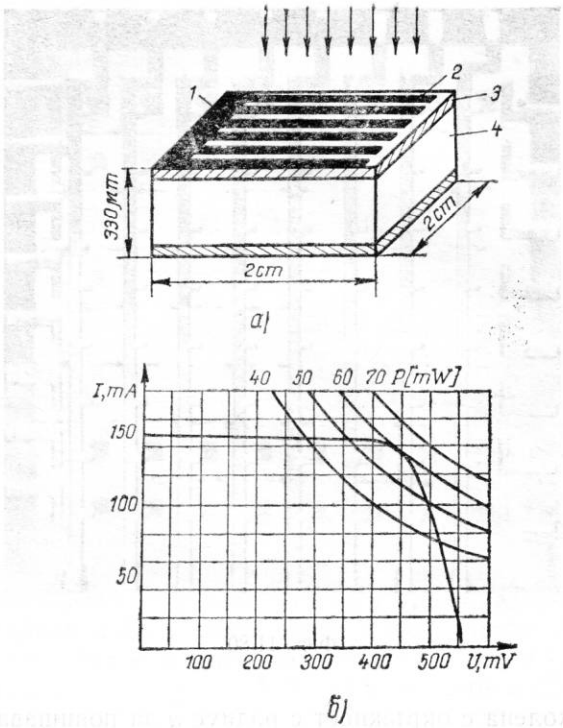
ра и използуването на сорса за фоточувствителен елемент. Такава функция може да изпълни клетката *б* от фиг. 11.83*а* или усложнената конструкция *b*, при която двата MOS транзистора са ключови. Увеличаване на чувствителността се получава при използуване на фототранзистор. Обратно включеният колекторен преход служи за фоточувствителен елемент, а емитерният — като ключ. Съществува и възможност за използуване на фотосъпротивленията като фоточувствителни елементи в матрица.

Разновидност на този принцип е използуването на един и същи диод като фоточувствителен елемент и като ключ. Основната схема се състои от фотодиод и серийно свързан капацитет, който е голям в сравнение със собствения капацитет на диода (фиг. 11.84*а*). На фиг. 11.84*б* е показана конструкцията на двукапацитивен фотодиоден масив. Капацитетите са реализирани чрез разполагане на адресните шини върху фотодиодите. Размерът на отделния елемент е 25 μm.

Едно от главните изисквания за холографските запомнящи устройства е осигуряване на възможността за организация по думи . На фиг. 11.85*а,б* е показана такава фотоматрица, като масивът се състои от разредни проводници, които свързват общите точки на PIN фотодетектиращите диоди, и от числови шини, състоящи се от серийно свързани PIN комутиращи диоди. Използуването на капацитети в допълнителна числова шина позволява да се увеличи бързодействието. Технологичната схема на показания масив може лесно да бъде съставена по показаната вертикална геометрия. За нейното реализиране е удобно да се използува дифузия от локален източник, което позволява едновременното провеждане на P- и N-дифузия.

Друга интересна разновидност е показана на фиг. 11.86*а,б*. В този случай детекторната матрица е снабдена с вградена памет. Фотодиодът е разположен в средата на структурата, като за капацитет от 2.10^7 бита са използувани 144×128 фотодетектори с диаметър 100 μm на разстояние 200 μm един от друг. За постигане на висок рандеман матрицата се изготвя от чипове от по 8×8 елемента, които след това се монтират заедно. За сорса, дрейна и емитера на фотодиода се използува една и съща борна дифузия.

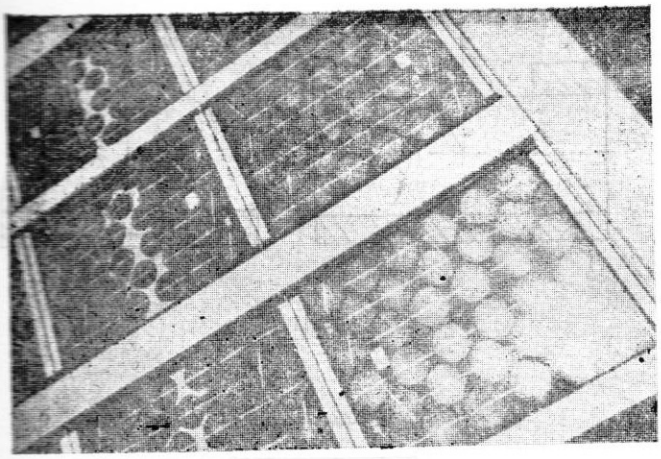
Фотоелементи (*соларни клетки*). При фотоелементите слънчевата енергия се преобразува в електрическа. Стандартната конструкция е показана на фиг. 11.87*а*. Конфигурацията на горния контакт е показана с позиции *1* и *2*. Материалът е P—Si с ρ=10 Ω.cm — позиция *4*. PN преходът е формиран чрез N^+ област (*3*), която се прави обикновено тънка — под 1 μm. Обратният контакт е върху цялата повърхност. Типичните електрофизични параметри са: ток на късо съединение $I_k \geq 140$ mA, напрежение при отворена верига $V_0 \geq 545$ mV, максимална мощност 59±2 mW (фиг. 11.87*б*). Спектралната чувствителност за силициеви фотоелементи е в обхвата 0,4—1,1 μm с максимум при 0,8 μm. Хоризонталната геометрия на фотоелемента се избира в зависимост от електрофизичните параметри. Големите слънчеви батерии се изграждат чрез паралелно или серийно включване на елементарни клетки с размер 2×2 cm или 2×6 cm, или други конфигурации. Могат да бъдат използувани и цели полупроводникови пластини (фиг. 11.88) — при серийно свързване до 700 mA на 180 V, при паралелно свързване 11 A на 15,5 V [298, 297].



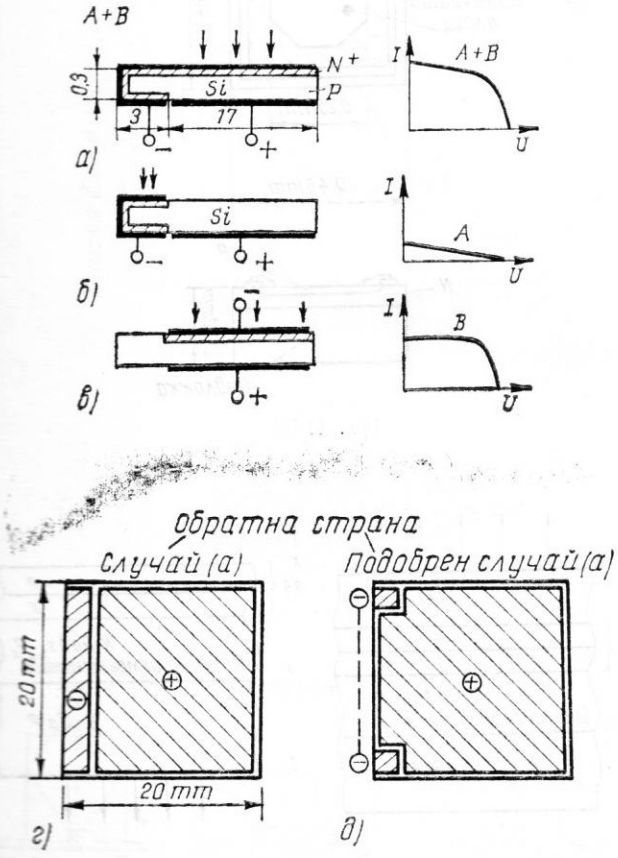
Фиг. 11.87

Конструктивно-технологичните проблеми при създаването на фотоелементи с традиционния коефициент на полезно действие от около 10% са подобни на проблемите при планарноепитаксиалната технология. По-особено внимание се отделя на конструиране на контактите, които особено в космически условия трябва да издържат на продължителни температурни цикли. Това поставя големи изисквания както към материалите за контактите, така и към тяхната геометрия. Използуват се корозионно устойчиви комбинации от Ti/Ag или Ti(Pd)Ag и подходящи монтажни методи. На фиг. 11.89 е показана примерна конструкция на контактите. Традиционният случай и съответстващата му VA характеристика е показана на фиг. 11.89*в*. Той се характеризира с това, че контактните изводи са от двете страни на пластината, което не е технологично при изготвянето на слънчеви батерии. Ако в единия край на структурата се изтегли горният контакт до обратната страна, ще се получи участък с високо серийно съпротивление, който изменя характеристиката (фиг. 11.89*а*). За намаляването на този участък е необходимо да се измени геометрията на контактите, като се намали серийното съпротивление и се запази възможността за контактуване от едната страна. Това подобрение е показано на фиг. 11.89*д*.

Важно изискване е технологията за направата



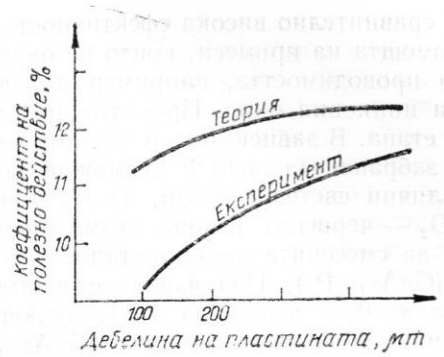
Фиг. 11.88



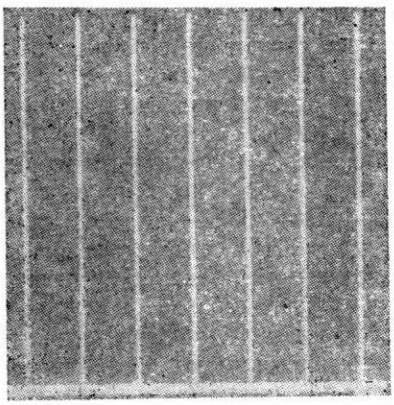
Фиг. 11.89

на фотоелементи да гарантира запазването на времето на живот на неосновните носители. На фиг. 11.90 е показана зависимостта на коефициента на полезно действие от дебелината на пластината. Разликата в теоретичната и експерименталната крива се дължи на намаляването на времето на живот в резултат на високотемпературните процеси.

При използуването на SiO като антирефлекторно покритие се постига 90% поглъщане на падащата светлина. Още по-добри резултати се постигат при използуването на материал за антирефлекторен слой с коефициент на пречупване $n=2{,}4(n_{SiO}=$



Фиг. 11.90



Фиг. 11.91

$=1{,}8$). Може да бъде използуван разпрашен TiO_2. На фиг. 11.91 е показана лицевата страна на промишлено изготвен фотоелемент, а обратната му страна е показана на фиг. 11.89*д*.

При конструирането на слънчевата клетка се изхожда от изискванията към нея. Те определят избора на материала. Следва определяне на чувствителността и необходимата площ на елемента. Избира се дебелината на подложката и се определя съпротивлението на слоевете. Конструират се контактните площадки и се определя токът на късо съединение. Ако той не е достатъчен, извършва се оптимизация.

11.8.2. Други оптоелектронни прибори

Светодиоди. Изпълняват се по два конструктивни принципа — луминесцентни диоди и индикации на базата на течни кристали.

В гл. 8 са разгледани основните технологични възможности при изготвянето на луминесцентни диоди, свързани с методите на епитаксията. От условието, определящо честотата на излъчените фотони, $hf \leq E_g$, следва, че за излъчване във видимата част на спектъра е необходима забранена зона с широчина $E_g \geq 1{,}8$ V. Другата особеност по отношение на материалите е свързана с вида на прехода при рекомбинацията. От направените разглеждания следва, че GaAs е подходящ за диоди в инфрачервената област с квантова ефективност до 28%. Независимо от индиректния преход при GaP с този материал също е възможно да се по-

стигне сравнително висока ефективност. Това става с помощта на примеси, които не оказват влияние на проводимостта, например молекулите на азота и цинковия окис. Преходът чрез тях става на два етапа. В зависимост от тяхното разположение в забранената зона е възможно получаване на различни светещи диоди, за N_2 — жълти, за Zn и O_2 — червени. Такава възможност съществува и за смесените монокристали, разгледани в гл. 8 ($GaAs_{1-x}P_x$). Получават се цветовете червено за $x=0{,}3$, зелено за $x=1$, включително с примеси на азот за жълт цвят ($GaAs_{0,15}P_{0,85}$:N). Интерес предизвиква и използуването на GaN с $E_g=3{,}5$ e V за получаване на синя светлина чрез реализиран PN преход. Използуването на MOS преход дава много малка ефективност.

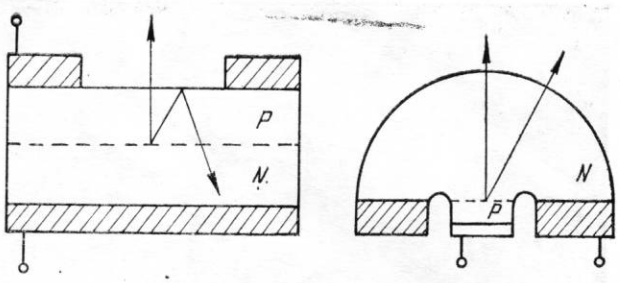
Планарната структура е основната за този тип прибори (фиг. 11.92). Използува се полусферичната форма за подобряване на оптичните характеристики [304, 300].

При избора на конструкцията трябва да се отчита коефициентът на поглъщане на материала. В това отношение GaAs и GaP се различават много: $\alpha_{GaAs/\lambda_{изл}}=3.10^3\ cm^{-1}$, а $\alpha_{GaP/\lambda_{изл}}=3\ cm^{-1}$. Конструктивно това означава, че излъчващият преход при GaAs трябва да бъде съвсем близо до повърхността. От друга страна, колкото преходът е по-близо до повърхността, толкова по-силно става влиянието на повърхностните нива.

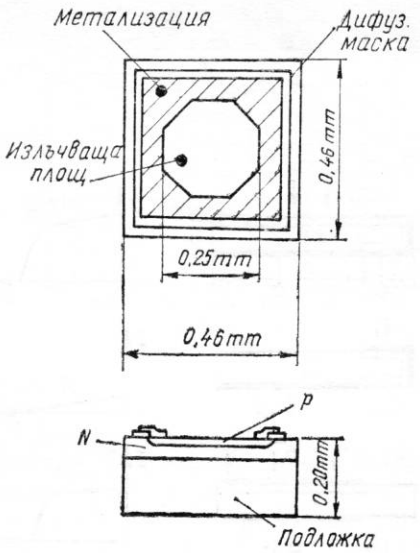
Другият фактор, който също трябва да се отчита, е коефициентът на вътрешно отражение. Обикновено се счита, че в GaAs се губи около 90% от излъчената светлина при използуване на планарна структура. Едно възможно решение е намерено в използуването на Si като легиращ материал. В този случай емисията става на вълна, за която $\alpha_{GaAs}=1\ cm^{-1}$, а това значително улеснява конструкцията. На фиг. 11.93 е показана хоризонталната и вертикалната геометрия на промишлено изготвен луминесцентен диод. Преходът се създава чрез епитаксия или чрез дифузия. Диелектричните покрития могат да бъдат Al_2O_3 или Si_3N_4, нанесени чрез високочестотно разпрашване.

Течната епитаксия предлага и други възможности за създаване на вертикална геометрия, които се отличават с включване на проводими за излъчваната светлина области, както е показано на фиг. 11.94. Става дума за целенасочено изменение на състава на сложния полупроводник, с което се достига желаната промяна на коефициента на пречупване на материала и насочване на светлинния поток. Чрез това се увеличава ефективността на прибора.

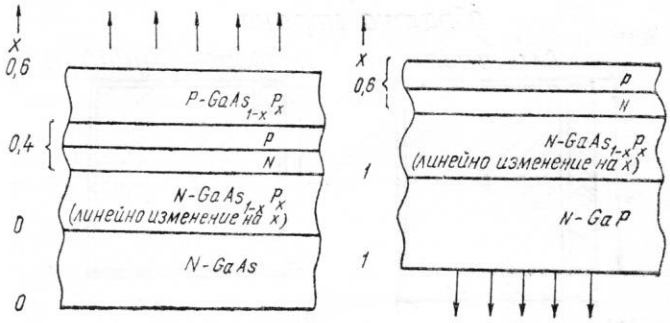
Процесът дифузия е свързан обикновено със създаване на P-проводимост. Най-често се използува Zn. На фиг. 11.95*а* са показани вертикални разпределения от практиката за два различни случая — само цинк и цинк плюс фосфор. Дифузията в сложните полупроводници е свързана с големи трудности при осигуряването на състава им. Сложни са и диаграмите на състоянията на системите. На фиг. 11.95*б* са показани такива резултати за различно светещи диоди — за GaP:N и $GaAs_{0,15}P_{0,85}$ структури, дифузията е провеждана



Фиг. 11.92



Фиг. 11.93

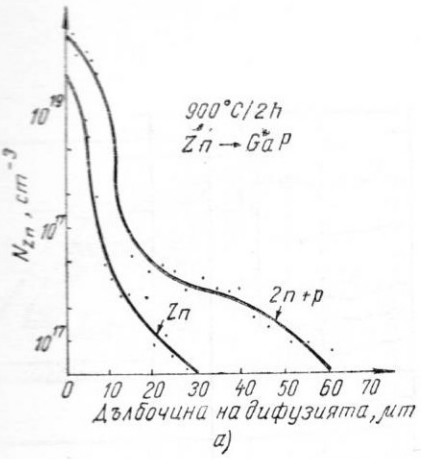


Фиг. 11.94

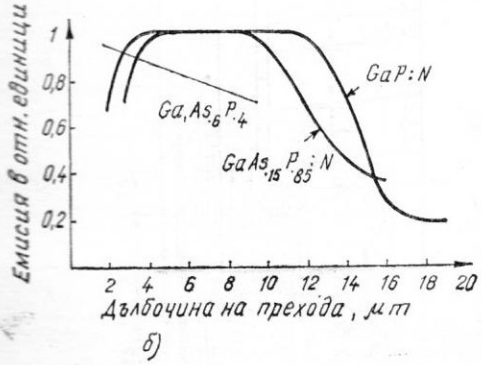
при 750°C, а за червените $GaAs_{0,6}P_{0,4}$ диоди — при 650°C. Зависимостта на ефективността от дълбочината на прехода може да бъде обяснена чрез различния коефициент на поглъщане за P-материала, чрез влиянието на повърхностните състояния при плитки преходи или намаляване на концентрацията на азота в дълбочина.

Изборът на омовите контакти зависи, както и при другите прибори, от повърхностните условия и концентрацията (вж. гл. 7).

Максималните параметри, получени за самостоятелни луминесцентни диоди, са: червени — 660 nm до 125 lm/W и 635 nm със 180 lm/W (с до-

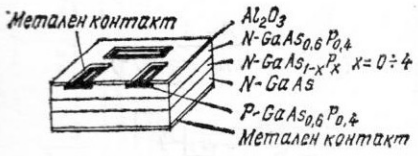


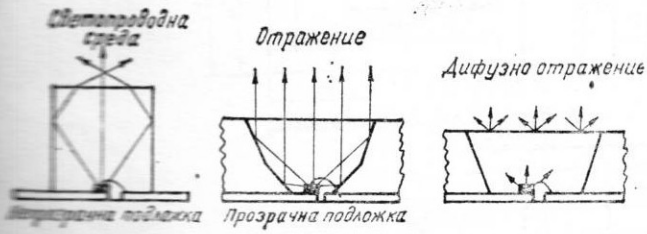
а)



б)

Фиг. 11.95





Фиг. 11.96

пълнение на N_2), оранжеви — $GaAs_{1-x}P_x$, $x=0,7$ — 620 nm и без N_2, за $x=0,5$ — до 240 lm/W, жълти — $GaAs_{0,15}P_{0,85}$ до 360 lm/W и зелени — до 150 lm/W.

Освен като самостоятелни индикатори луминесцентните диоди служат за изготвяне на индикаторни матрици. Конструктивно се различават два варианта — монолитни и хибридни индикации. На фиг. 11.96 е показана монолитната индикация, която се изгражда от седем индикаторни сегмента. Като подложка се използува GaAs, който осигурява достатъчно затихване на излъчването от включен сегмент към друг невключен сегмент. Ако се използува GaP като подложка, който е прозрачен, за избягване на този ефект се създават допълнително оптически изолирани места за отделните сегменти. Монолитните дисплеи се изграждат обикновено с малки размери на цифрите (до 3 mm), което налага използуването на увеличителни оптически системи. Възможности за това са показани на фиг. 11.96, като избраният вариант е в зависимост от вида на подложката — поглъщаща или провеждаща. Широко приложение намира пластмасова среда с дифузно отражение, която се използува при всякаква подложка.

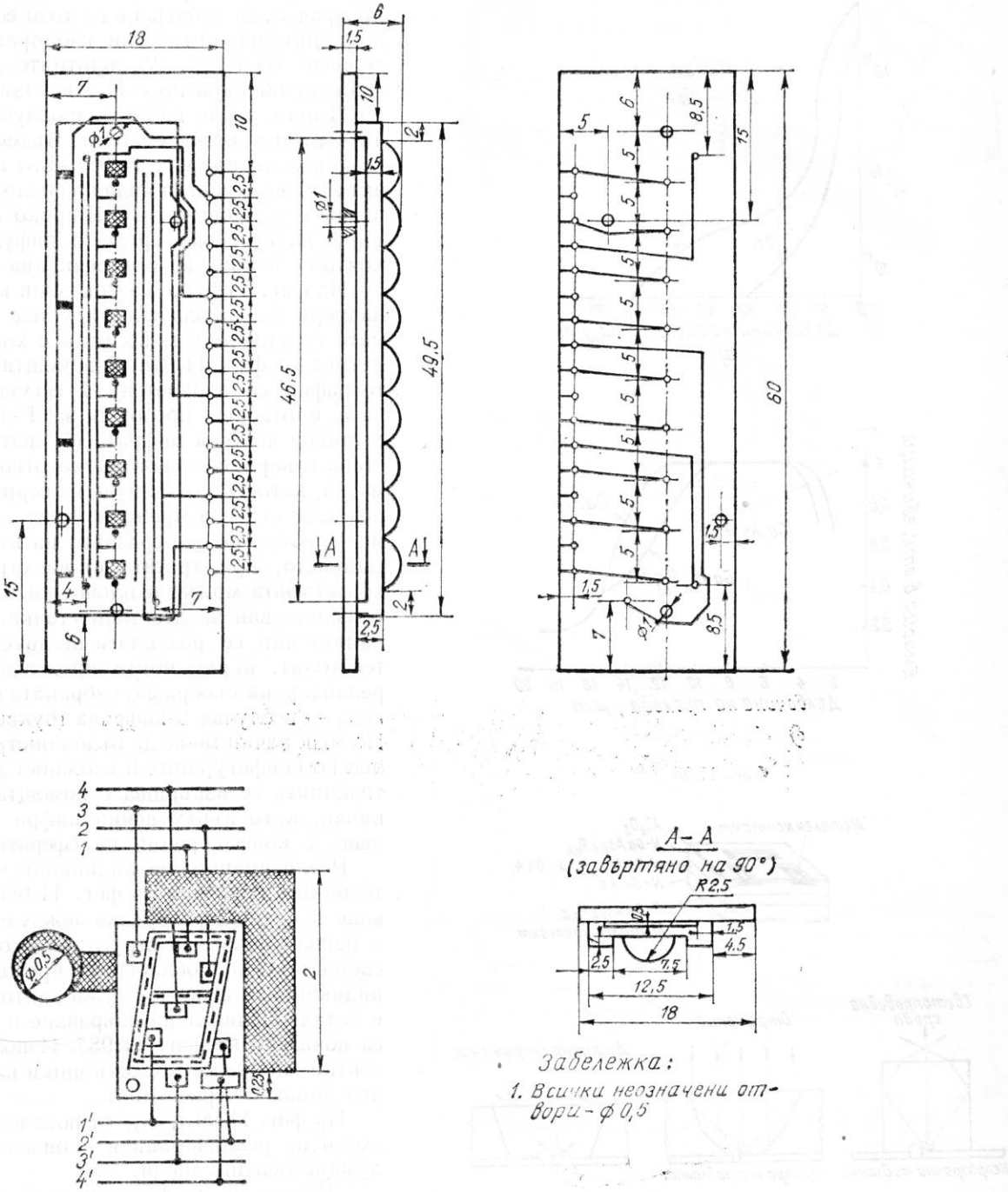
На фиг. 11.97*а,б* са показани конструктивните размери на използуваната у нас индикация. Самата структура е монолитна с хоризонтална геометрия от фиг. 11.97*а*. С помощта на три фотолитографии са изработени 7 сегмента — при първата е отворен прозорец за Р-дифузията като съставна част на цифрата (буквата), при втората става отваряне на контактни отвори в защитната маска, като за намаляване на серийното съпротивление се създава мрежа от контакти с малки размери, които не се отразяват на възприемането на светенето, при третата става структуриране на контактната мрежа и площадки. Отделен елемент е използуван за десетична точка. Така конструираният чип се разполага на двустранно фолиран текстолит, върху който провеждащите шини са реализирани съобразно избраната схема на включване — в случая 9-цифрова (буквена) индикация. По този начин може да бъде конструиран произволен по конфигурация и сложност дисплей. Херметизацията се извършва с помощта на пластмасов капак, като върху всяка цифра е конструирана леща с конфигурация на сферата на Ваерщрас.

Реализирането на индикации чрез хибридната техника е показано на фиг. 11.98*а,б*. За осигуряване на оптична развръзка между съседни елементи е използувана мезаструктура, която ограничава светенето само в областта на прехода. За основа на индикацията може да служи както текстолит, така и ситал. Начинът на свързване и херметизацията са показани на фиг. 11.98*б*. Използувани са контактни площадки за всеки чип и плосък отражателен капак с червен цвят.

На фиг. 11.99 *а,б,в,г* са показани технологични схеми на реализирани в производствени условия луминесцентни диоди.

Лазерни диоди. Конструктивно-технологичните проблеми при полупроводниковите лазерни диоди отчитат принципа на действие и особеностите на този тип прибори. Решаването им осигурява условия за осъществяване на стимулирана емисия и извеждането на кохерентното излъчване от структурата [297, 301].

Стимулираната емисия е възможна само в случай че електроните във валентната зона са изчерпани, а разрешените нива в зоната за проводимост са заети. Условия за това се създават чрез конструиране на свръхрязък преход и висока инжекция при включване в права посока. В резултат на това броят на заетите от свободни електрони състояния в зоната на проводимост е по-голям от броя на заетите състояния във валентната зона.



Фиг. 11.97

При това положение попадането на фотони води с по-голяма вероятност до стимулирана емисия, отколкото до абсорбиране на фотона.

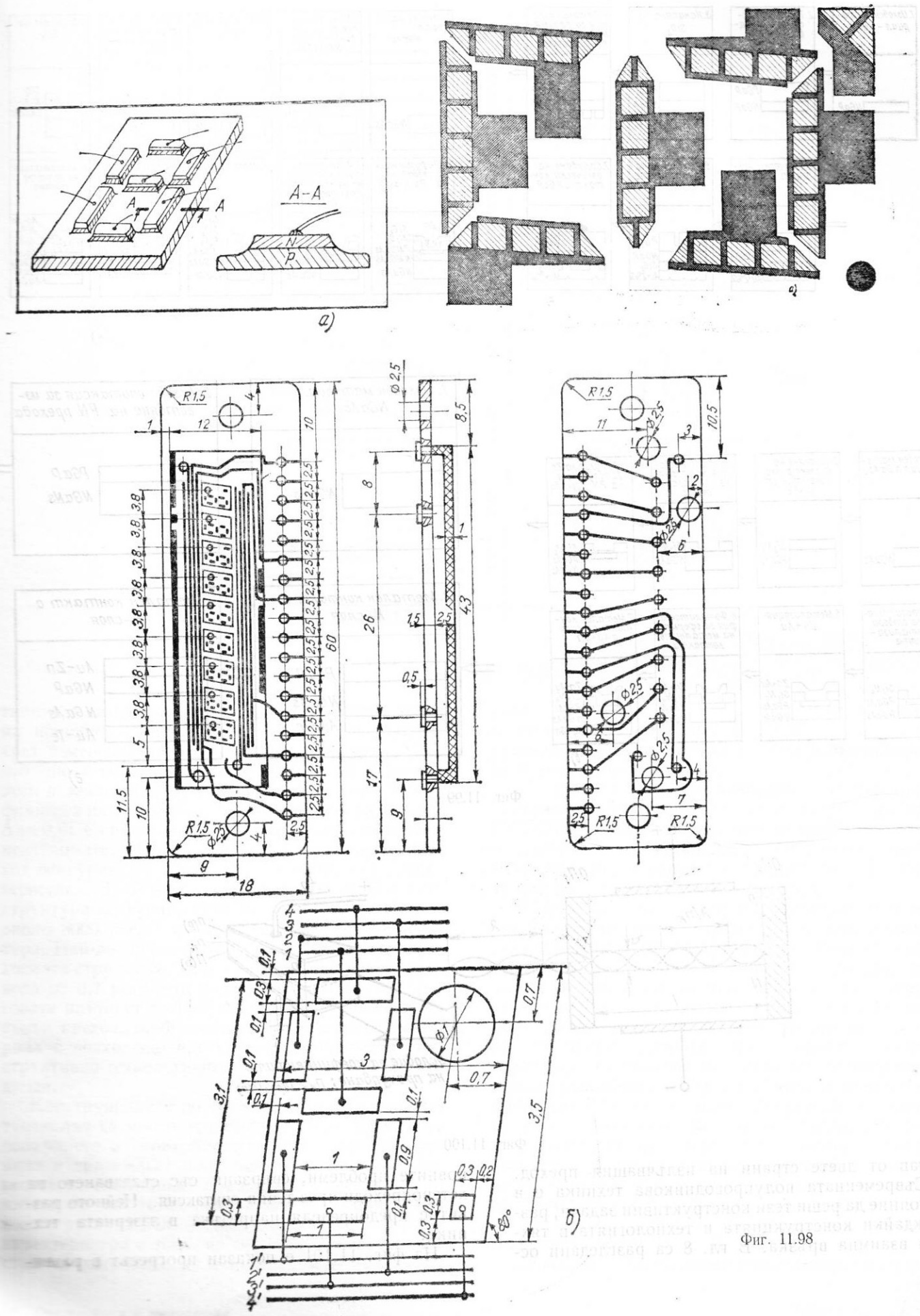
Другият основен конструктивен проблем е създаването на подходящ оптичен резонатор в непосредствена близост с PN прехода. Задачата на този резонатор е да осигури получаване на стояща вълна и изход на излъчването в една посока. На фиг. 11.100 е показана идеализирана вертикална геометрия на лазерния диод. Огледалните повърхности $ОП_1$ и $ОП_2$ са с рефлекционен фактор съответно $r_1=0{,}5$ и $r_2=1$. За случая на GaAs с коефициент на пречупване $n=3{,}4$ и дължина $l=0{,}4$ mm се получава оптична дължина $n.l=1{,}36$ mm. За $\lambda\approx 0{,}9$ μm разстоянието между две съседни стоящи вълни $\Delta\lambda\approx\lambda^2/2nkl=0{,}30$, където k е цяло число.

Това условие следва от основното уравнение на оптичния резонатор

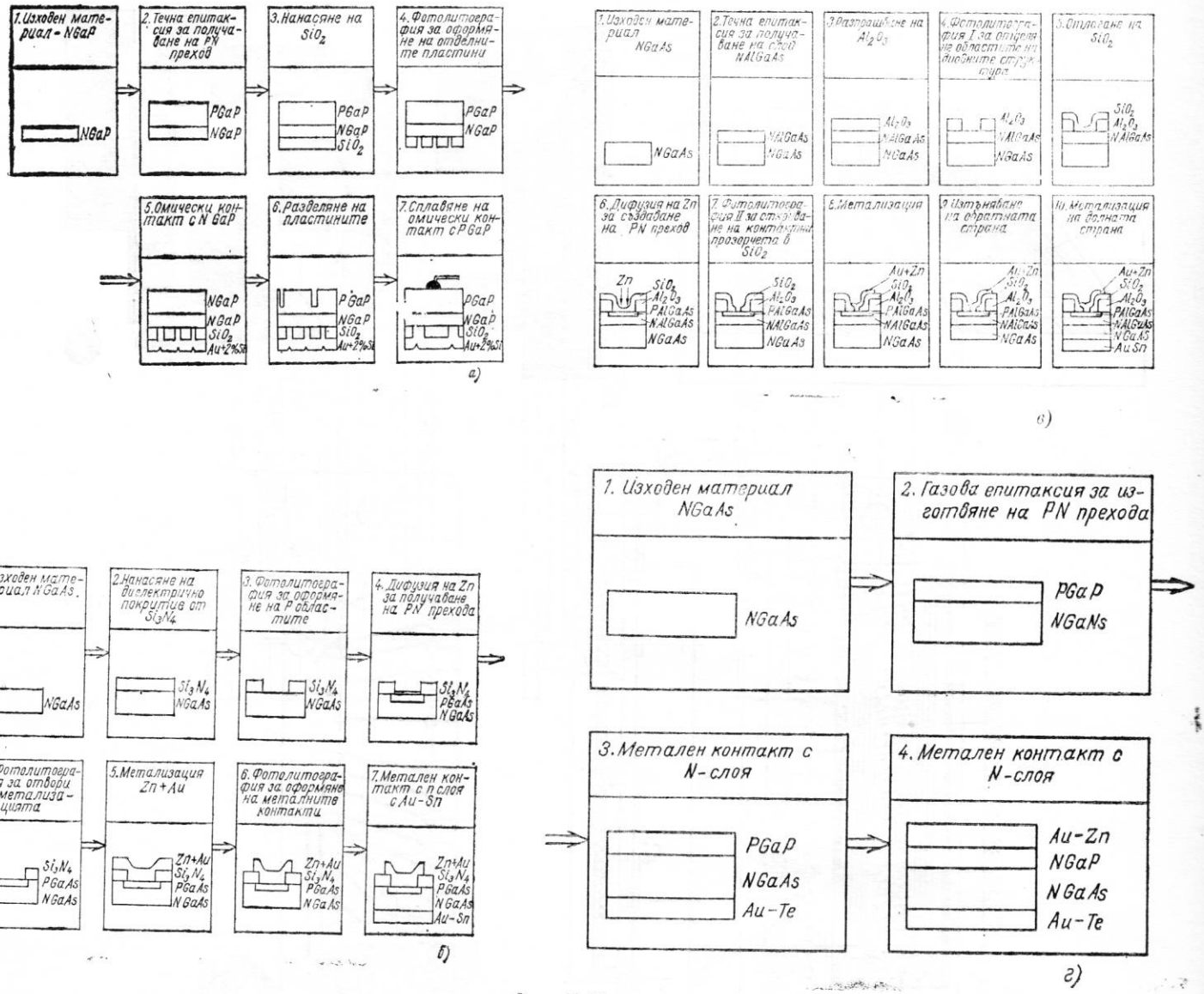
$$\frac{1}{2}(m+1)(\lambda-\Delta\lambda)=n.l,$$

където m е цяло число.

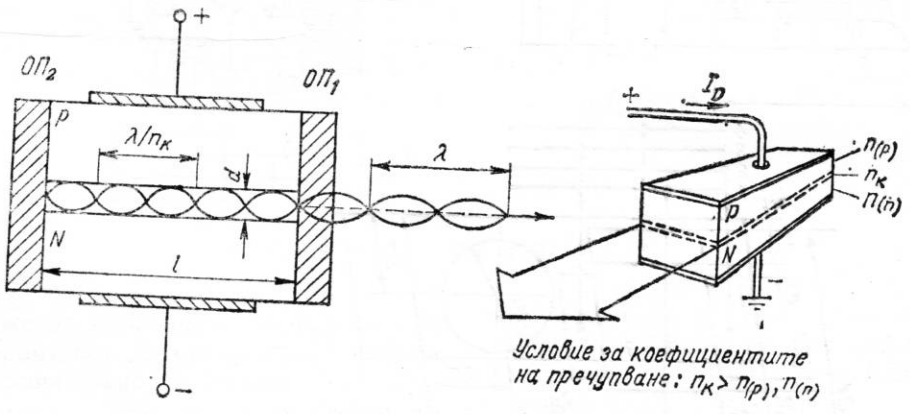
За осигуряване на пълно вътрешно отражение граничещите с PN прехода области трябва да притежават друг коефициент на пречупване, като е изпълнено условието от фиг. 11.100. Затова е необходимо да се създават тънки слоеве с променлив



Фиг. 11.98



Фиг. 11.99

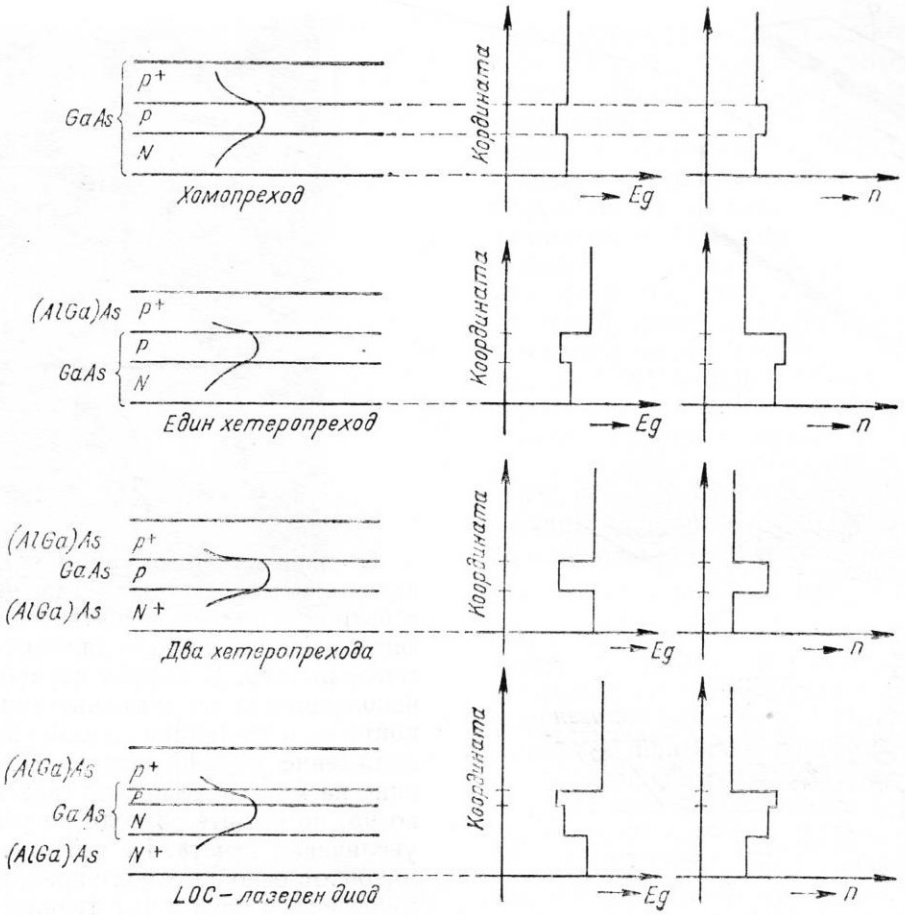


Фиг. 11.100

състав от двете страни на излъчващия преход.

Съвременната полупроводникова техника е в състояние да реши тези конструктивни задачи, разглеждайки конструкцията и технологията в тяхната взаимна връзка. В гл. 8 са разгледани основните проблеми, свързани със създаването на хетеропреходи чрез течна епитаксия. Нейното развитие предопределя напредъка в лазерната техника.

На фиг. 11.101 е показан прогресът в разви-



Фиг. 11.101

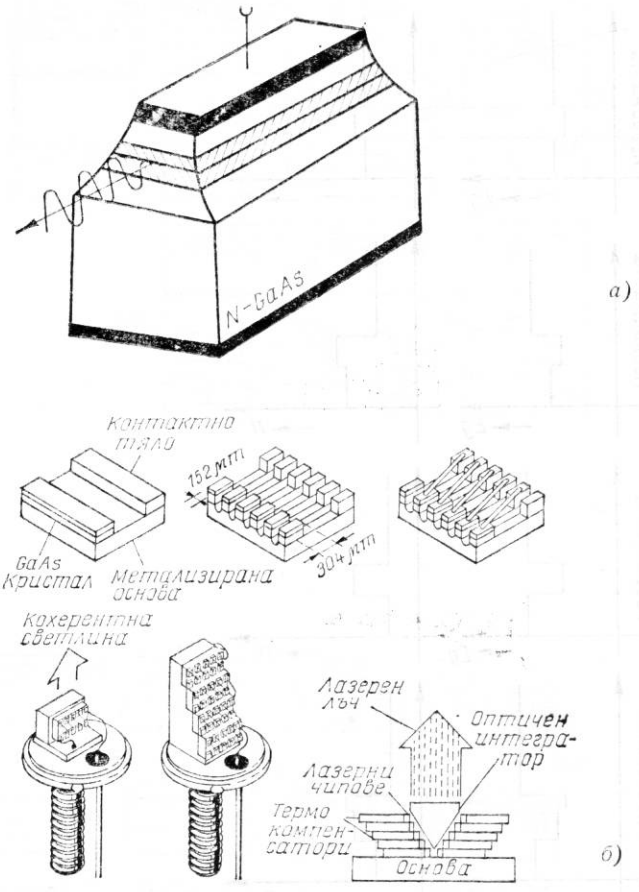
тието на лазерните диоди, изразен в постигането на по-добри стойности за основните параметри чрез изменение на вертикалната геометрия. Схематично е показано и фокусирането на излъчването в зависимост от осигурената разлика в коефициента на пречупване. В хомопрехода разликата $\Delta n \approx 0{,}01$ е предизвикана само от разликата в концентрацията. Използването на един хетеропреход осигурява от едната страна оптичната характеристика. За P^+P хетеропрехода $\Delta n = 0{,}05$ и тази структура осигурява прагова плътност на тока от около 8000 A/cm^2 и работа при стайна температура. Най-добри резултати дава двойно хетеропреходната структура. Тя осигурява дебелина на прехода от 0,1 μm,което води до намаление на праговата плътност до 1000 A/cm^2. Осигуряването на тънък преход, заобиколен от двете страни с материал с подходящо пречупване, е основната конструктивно-технологична задача при лазерните диоди.

Конструираните по този начин диоди с малък тънък лъч са много чувствителни към дефекти от полирането в отражателните ограничаващи равнини и притежават по-широк преход в интензивността на светлинния лъч спрямо максимума. За избягване на тези недостатъци е реализирана нова структура LOC (large optical cavity), която се характеризира с това, че хетеропреходите служат само за насочване на стимулираната емисия от работния PN преход, дебелината на който може да се изменя произволно. По този начин конструкторът добива по-голяма свобода и възможност за оптимизация.

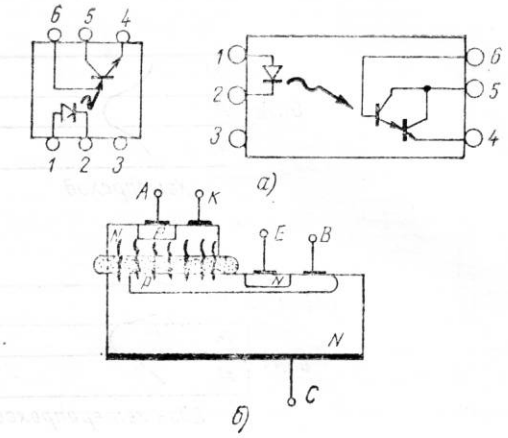
На фиг. 11.102*а,б* са показани различни възможности за монтаж на чипове на лазерни диоди. Голямата разсейвана мощност и необходимостта от оптичен изход са главните особености в монтажа. Към тях се прибавя и работата при T=77K за повечето от изготвените структури.

Към отделен чип основните изисквания са за плоскопаралелност и отражение на ограничаваните плоскости. Реализирането им става обикновено чрез фино полиране. Фиг. 11.102*а* показва общия вид на отделния чип. Фиг. 11.102*б* показва начина за изготвяне на серийно свързани лазерни диоди за работен режим при стайна температура. Върху метализирана от долната страна подложка се поставят чиповете от многослойна структура и обемен материал. Следва меза-ецване, структуриране на отделните структури и създаване на контакт към всяка от тях. Следващите позиции показват опроводяването и монтажа на подложката към основата на корпуса. При симетрично монтиране е възможно използването на оптичен интегратор. Подобна конфигурация е показана на фиг. 11.102*в*, където корпусът допълнително осигурява работа при 77K.

Оптрони и интегрални оптоелектронни при-



Фиг. 11.102

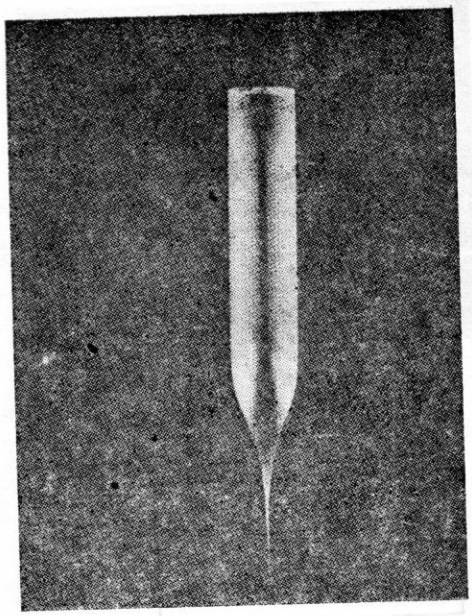


Фиг. 11.103

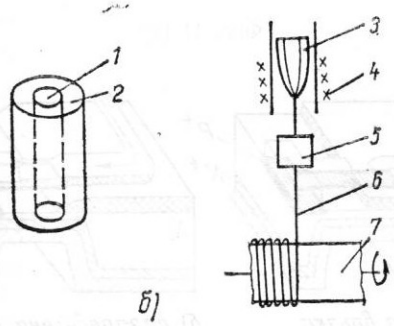
бори. Развитието на дискретните оптоелектронни прибори създаде възможност за по-нататъшна обработка на информацията по оптичен път. За нейното осъществяване е необходимо осигуряване на обща конструкция, състояща се от приемник, излъчвател и оптична среда. Интегрирането на тези компоненти е възможно както по пътя на хибридната, така и на монолитната техника. Първото направление акцентира върху монтажните процеси, а второто изисква подходяща технология за създаване на световълноводи.

Стандартните монтажни процеси осигуряват възможност за изграждане на разнообразни оптоелектронни двойки с оптична среда въздух или синтетичен материал, прилаган под формата на оптично лепило. В първия случай най-подходящо е използуването на допълнителни метални носачи, които са в състояние да осигурят взаимното разположение на елементите. Техниката на изготвяне на металните носачи (вж. гл. 7) е добре усвоена, но общите разходи по усложнения монтаж увеличават цената. На фиг. 11.103*а* са показани някои от основните комбинации, съдържащи луминесцентен диод и фототранзистор или фотодарлингтонова двойка в зависимост от това, кой електрофизичен параметър трябва да бъде оптимизиран —бързодействието или чувствителността. Дарлингтоновата двойка осигурява сравнително малко бързодействие — до 10 μs. Електричното изолационно съпротивление на хибридните оптоелектронни двойки се определя от параметрите на въздушната страна и разстоянието между структурите, както и от изолационното съпротивление на оптичното лепило. Типичните стойности са $R_{и} \geq 100$ GΩ. На фиг. 11.103*б* е показан монтажът чрез оптично лепило. Най-бързите оптоелектронни двойки се изграждат, когато за приемник се използува Шотки-фотодиод. Използуването на фототранзистори като ключови елементи за високи напрежения поставя големи изисквания спрямо изолационното съпротивление на корпуса, тъй като потенциалните разлики между двете структури са 100÷200 V. За повишаване на бързодействието на фототранзистора в оптоелектронните двойки се интегрира едно съпротивление R_{BE}=20 kΩ, паралелно на прехода *EB*. Това, разбира се, става за сметка на чувствителността.

Принципно различни проблеми поставя монолитната интегрална оптика [302, 303, 307]. Тя изисква фоточувствителни структури, изградени с подходяща електрична и оптична изолация. Съвременната полупроводникова техника не разполага още със завършени технологични схеми, позволяващи комбинираното изграждане на обикновени и оптоелектронни структури. Засега са известни възможности за изграждане на детектира-



а)



б)

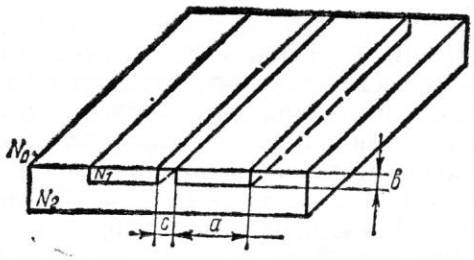
Фиг. 11.104

щи и модулиращи стъпала, които използуват интегрирани световълноводи, както и дискретни световълноводни кабели, изградени на базата на оптични влакна. Последните биват изтеглени от кварцови монокристали, като техниката на изтегляне наподобява разгледаните в гл. 2 процеси. Оптичните влакна могат да бъдат със или без обвивка в зависимост от това, дали ще бъдат използувани самостоятелно или съответно с кабел. Обвивката трябва да има по-малък коефициент на пречупване от този на влакното. Това осигурява пълно вътрешно отражение и предаване на информацията. На фиг. 11.104 са показани външният вид и принципната схема на изтегляне, което става напълно автоматично при непрекъснат контрол за оптичните загуби във влакното (*1* — вътрешно тяло на световода с коефициент на пречупване n_1, *2* — обвивка с коефициент n_2, така че $n_2 < n_1$, *3* — кристал за изтегляне, *4* — пещ, *5* — автоматичен контрол на оптичните загуби, *6* — влакно, *7* — цилиндър за навиване).

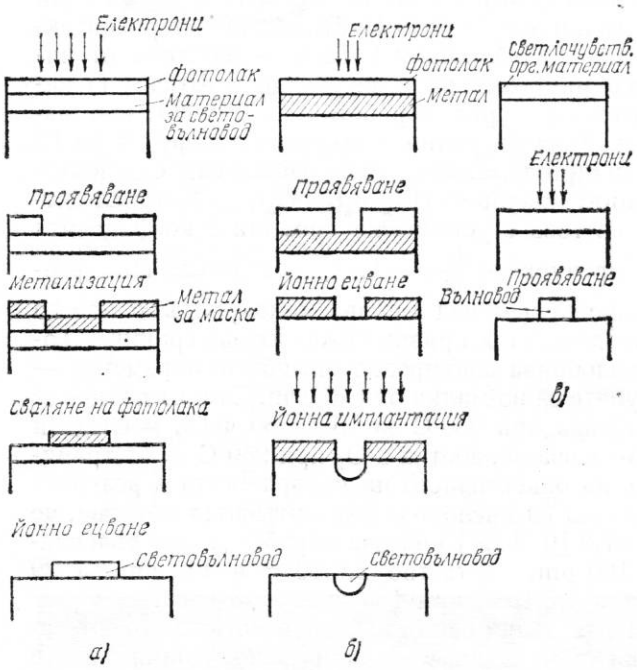
Заместители на оптичните влакна в планарната интегрална оптика са интегралните световълноводи. Различни материали могат да бъдат използувани за тази цел. Използуването на полукристал на литиевия ниобат $LiNbO_3$ и на цинков окис ZnO позволява получаване на вълноводи върху всякаква подложка, макар и с големи загуби (≥ 10 αB/cm). По-интересни са обаче монокристалните слоеве заради малките загуби 1 dB/cm и поради това, че повтарят електрооптичните параметри на обемния материал. Технологичните методи за тяхното създаване са по принцип известни. Използува се: а) хетероепитаксия на ZnO върху подложка от Al_2O_3, прилагана в хибридната СВЧ техника (постигнати са дебелина на слоя до 10 μm, загуби 8 dB/cm); б) епитаксиално израстване на тънки слоеве от GaAs — дебелина до 1,15 μm и оптични загуби 5 до 10 dB/cm; в) хетероепитаксия на $LiNbO_3$ върху $LiTaO_3$ — дебелина от няколко микрометъра и загуби до 3 dB/cm; г) високотемпературна обработка на $LiNbO_3$ във вакуум. Тази операция е свързана с дифузия на Li извън кристала, при което се изменя стехиометричният състав — $(Li_2O)_x(NbO_5)_{1-x}$. Като следствие на това е установена промяна в коефициента на пречупване $\frac{do}{dx} = -1{,}63$, което означава формиране на световод в самия монокристал близо до повърхността без рязка междуфазова граница. Това подобрява извънредно оптичните параметри — загубите са по-малки от 1 dB/cm. Самият процес се извършва при 960°C за 15 до 50 часа, последван от 6-часова обработка в O_2 при 960°C за отстраняване на оцветяването на повърхността в резултат на липса на кислород. Експериментът показва, че $\Delta n = 1{,}8.10^{-3}$ за 15-часова обработка при дълбочина 100 μm, съответно $2{,}6.10^{-3}$ и 143 μm за 29 часа и $4{,}5.10^{-3}$ при 180 μm за 43 часа.

Интегрални световълноводи могат да бъдат направени чрез дифузия или имплантация на Nb или Ta. При дифузия на Nb в $LiTaO_3$ оптичните загуби са 1 dB/cm, а при дифузия на Ta в $LiNbO_3$ оптичните загуби са 3 dB/cm. Този метод се счита за един от най-технологичните.

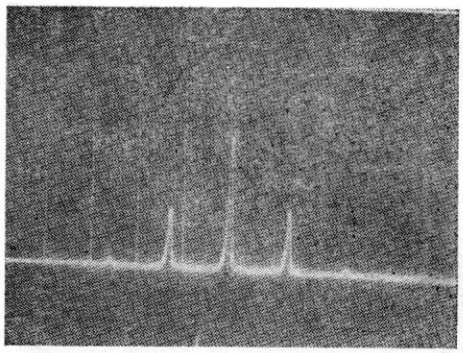
Интегралните световоди имат по-специфични размери — тяхната дължина (размерът, по който се разпространява светлината) може да бъде няколко сантиметра, докато широчината трябва да бъде от порядъка на дължината на вълната. Класическата фотолитография трудно може да осигури задоволителен резултат при такава топология. За осигуряване на малки оптични загуби грапавината на ръба на ивиците трябва да бъде под 50 nm, а отклонението в паралелността на ивиците под 0,1 μm/cm. Това се отнася за често срещания случай на разполагане на вълновод с $n = 1{,}51$ в материала с $n = 1{,}5$ ($\Delta n = 0{,}01$). На фиг. 105 е показан оптичен смесител, получен чрез йонна имплантация, за който $a = 5$ μm, $b = 1$ μm, $l = 2$ μm, $n_1 = 1{,}48$ и $n_2 = 1{,}46$. Дължината на ивиците е $L = 3$ mm. Дори и електронната фотолитография (вж. гл. 5) не винаги изпълнява тези условия, затова се прибягва до автоматично движение на подложката спрямо маската, контролирано чрез интерферометри. На фиг. 11.106 са показани във вертикална последователност основните етапи на фотолитографския процес, като маската служи или за структуриране на вече отложения слой от материал за световод, или за селективна обработка по един от посочените методи. Като трета

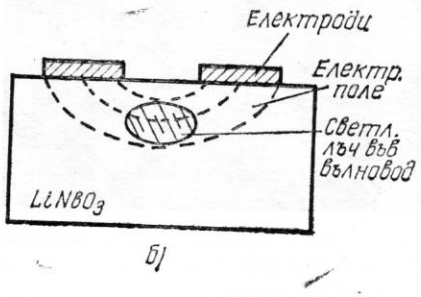


Фиг 11.10

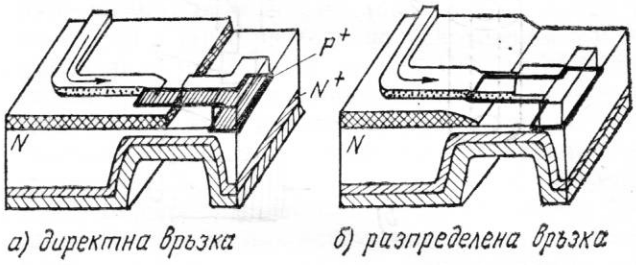


Фиг. 11.106





Фиг. 11.107



Фиг. 11.108

възможност е посочено използването на органични материали за световоди с добавка от фоточувствителен материал, така че структурирането да става чрез самото проявяване. Засветяването става с електрони, а ецването чрез катодно разпрашване (вж. гл. 6).

Самото катодно разпрашване се използува освен за йонно ецване и за нанасяне на материал за световълноводи. Чрез ВЧ разпрашване на различни стъкла са постигнати високи резултати — оптични загуби до 0,5 dB/cm. Такъв е случаят със стъклото В6956 (Совирел), разпрашено в 100% кислородна среда. За постигане на тези резултати се поставят високи изисквания към подложката, обикновено силиций, окислен до 1 μm на повърхността. Дебелината на покритието се избира между 500 и 1200 nm, която се постига при P_{AC} = =5W/cm² и p_{O_2}=0,266 Pa (2.10^{-3} Torr).

Друг подходящ материал за катодно разпрашване е $LiNbO_3$. Използува се катод с 99,9% чистота при мощност 1,1 W/cm², p_{O_2}=0,10 Pa (8.10^{-4} Torr) и температура на подложката 150°C (позволява отлагане на аморфни слоеве върху стъкло или окислена силициева пластина с добра адхезия). Коефициентът на пречупване е от 1,51 до 1,47, а оптичните загуби — до 3 dB/cm. По този начин може да бъде реализиран интегрален модулатор, като слоят се отложи върху монокристал от $LiNbO_3$, обработен и структуриран съгласно описаната технология за получаване на световълновод на повърхността му. На фиг. 11.107*а* е показана конструкция на фазов модулатор, използуващ за подложка термично обработен във вакуум монокристал от $LiNbO_3$. Размерите са: дължина 10 mm, широчина 100 μm, разстояние между металните електроди 100 μm. Електродите са разположени така, че полето е успоредно на оста на кристала. Светлинният лъч се фокусира при повърхностния вълновод с помощта на лазер. Същият модулатор може да бъде изготвен и с помощта на йонна имплантация в кристала за създаване на световълновода.

Другото направление в развитието на интегралната оптика е реализирането на интегрални фотоструктури. На фиг. 11.108 е показана конструкцията на интегрален фотодиод, изграден като PIN структура съвместно с 50 Ω-микролиния. Технологичната схема включва използването на N-

подложка с ρ_N=100÷1000 Ω.cm. Дебелината на пластината е 120 μm. Чрез локална химична обработка в подложката се създават показаните на фигурата „канавки“ с площ от няколко квадратни милиметра. Дебелината на Si се намалява в тази област до 10 μm. На това място се създава PIN диодът,като за целта се провеждат P^+ и N^+= = дифузия — N^+ от обратната страна върху цялата изтънена област и P^+ чрез подходяща маска от SiO_2 от предната страна. Геометрията на P^+ областта е избрана в зависимост от изискванията на 50 Ω-микролиния и създадената дълбочина на прехода — 2 mm×8 μm в изтънената част и 1 mm× ×100 μm в неизтънената. Световълноводът се разполага върху SiO_2 и може да бъде създаден поеди от разгледаните методи на фотолитографията. Показани са конструктивно и два начина за оптична връзка между световода и фотоприемника. Метализацията за контактите трябва да осигури възможност за засветяване на P^+ областта.

Показаната конструкция позволява върху една и съща подложка да се осъществи разпространение и детектиране на светлината, като световълноводът и фотодиодът могат да се разглеждат като интерфейс между оптическата и електрическата част на интегралната схема.

Работният режим трябва да осигурява пълно обедняване в изтънената област и достигане на граничната скорост на токовите носители. В такъв случай бързодействието на системата е определено от времето на прелитане (100 ps), тъй като времеконстантата на линията може да бъде пренебрегната.

ГЛАВА 12

КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧНИ ОСОБЕНОСТИ ПРИ MOS ПРИБОРИТЕ

12.1. КЛАСИФИКАЦИЯ НА УНИПОЛЯРНИТЕ ПРИБОРИ

Главният представител на униполярните прибори е полевият транзистор с PN преход или с изолиран гейт. Независимо от наличието на PN преход в единия вариант двете разновидности са от един и същи тип, защото основни критерии са принципът на управление и видът на токоносителите в канала.

Подобно на биполярните прибори и при униполярните прибори различаваме дискретно и интегрално изпълнение. В конструктивно отношение между тях не съществуват различия, защото в MOS технологията отпада нуждата от изолация. Освен това изводите са винаги от горната страна на подложката, а обратният контакт е потенциален. При тези прибори използуването на дискретни структури е ограничено, а съотношението между аналоговите и цифровите интегрални схеми е ясно изразено в полза на последните.

12.2. ВАРИАНТИ НА ТЕХНОЛОГИЧНИ СХЕМИ ПРИ MOS ПРИБОРИТЕ

На фигурите от 12.1 до 12.4 е показана технологичната последователност на стандартната P-канална технология, на технологията със силициев гейт, на комплементарната MOS технология и LCC MOS/PLANOX технологията. Тези технологични схеми са в основата на съвременните MOS интегрални схеми независимо от модификацията им. Характерно за вертикалната геометрия на съвременните MOS прибори е изключителната сложност, породена от последователното редуване на тънки покрития от различен характер, като поликристален силиций, SiO_2, Si_3N_4, Al и др. По целесъобразност тези особености се разглеждат при отделните схеми. Предмет на отделно разглеждане са полевите транзистори с PN преход. Параметрите на използуваните технологични операции се определят от конструктивните разчети на структурите.

Стандартната P-канална технология (PMOS) се характеризира с една дифузия, която не е свързана с постигане на критични параметри. Най-съществената операция е тънкото окисление (вж. гл. 4). За конструирането на сорса и дрейна могат да бъдат използувани и другите методи за създаване на PN преходи. Широко приложение, особено в N-каналната технология (NMOS), намира йонната имплантация (вж. гл. 9). Метализацията може да бъде различна. Използуват се Al, W и Mo.

Без особени различия е технологията, създаваща силициев гейт (фиг. 12.2). Отлагането на поликристален Si и използуването му като маска са най-характерните особености. Разлика има и във фотолитографския процес, по-специално при едновременно ецване на Si и SiO_2.

Комплементарната технологична схема (CMOS) (фиг. 12.3) изисква допълнителни дифузионни процеси. В гл. 9 са разгледани особеностите при приложението на йонната имплантация в този случай.

На фиг. 12.4 е показана технологията LOCMOS. Тя изисква допълнително отлагане на Si_3N_4, което служи за маска при окислението. Операциите, свързани с Si_3N_4, особено във варианта ISOMOS, са подобни на тези от технологичните схеми ISOPLANAR I и II при биполярните прибори (вж. гл. 11). По този начин се избягва необходимостта от провеждане на стоп-дифузии, което облекчава избора на хоризонтална геометрия.

12.3. КОНСТРУКТИВНИ ПРОБЛЕМИ ПРИ ДИСКРЕТНИТЕ ПОЛЕВИ ТРАНЗИСТОРИ

Токът между сорса и дрейна се управлява чрез изменение на проводимостта на вградения или индуцираия канал, която е функция на неговите геометрични размери. При транзисторите с изолиран гейт управлението се осъществява чрез полевия ефект, а при тези с PN или Шотки-преход — чрез изменение на размерите на обедненатa област под гейта, които са функция на приложеното обратно напрежение между гейта и канала.

Основните зависимости при полевите транзистори с PN преход са следните:

$$V_{\text{П}}=qNa^2/2\,\varepsilon\varepsilon_0\,; \qquad I_{D\text{H}}=qNa\,\mu_0\,bV_{\text{H}}/3\,L;$$

$$S_{\text{Ш}}=q\,\mu_0\,Nba/L\,; \qquad r_D\approx\pi\,L\,(V_{DS}-V_{DS\text{H}})/2\,aI_{D\text{H}},$$

където V_{H} е напрежението на насищане, $V_{\text{H}}=V_{DS\text{H}}/V_{GS=0}$; a, L, b са дълбочината, дължината и широчината на канала; $I_{D\text{H}}$ е токът на насищане по теорията на Шокли; $S_{\text{ш}}$ — стръмността, r_D — вътрешното съпротивление в пентодната област.

Изчислените стойности трябва да бъдат коригирани с параметъра $\alpha=\mu_0 V_{\text{H}}/L\,v_{\max}$, където $v_{\max}$ е максималната скорост на токовите носители (за N—Si $v_{\max}=8{,}5.10^6$cm/s). Този конструктивен параметър изразява влиянието на конструкцията върху VA-характеристики чрез отчитане на действителните причини за насищане на VA-характеристики. За построяването на последните служи уравнението

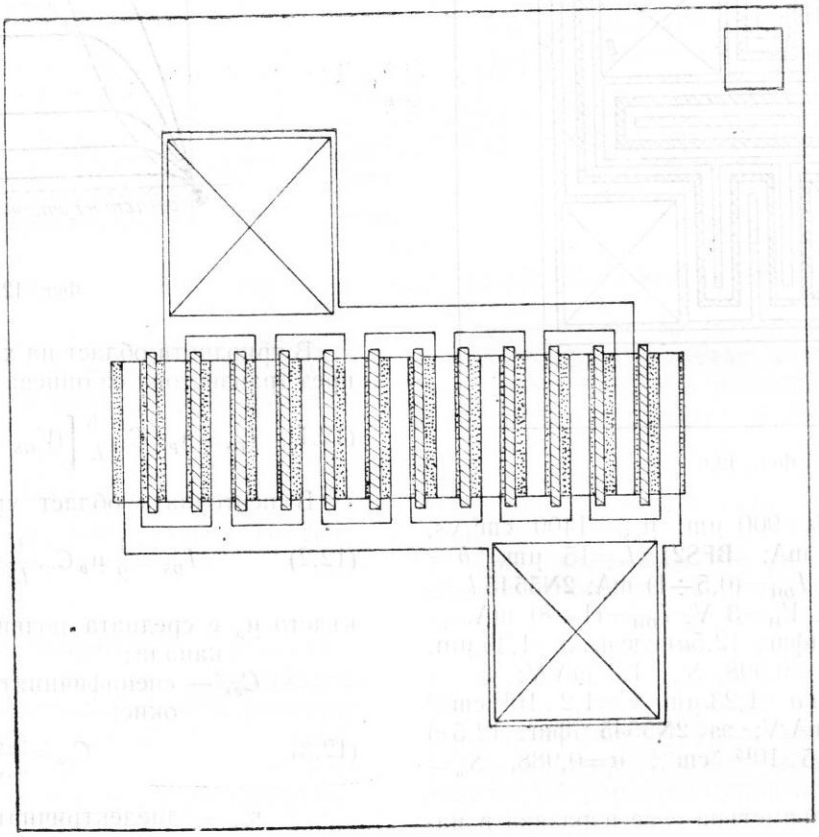
$$\frac{I_D}{I_{D\text{HIII}}}=\frac{3\,\frac{V_{DS}}{V_{\text{H}}}-2\left[\left(\frac{V_{DS}-V_{GS}}{V_{\text{H}}}\right)^{3/2}-\left(-\frac{V_{GS}}{V_{\text{H}}}\right)^{3/2}\right]}{1+\alpha\,\frac{V_{DS}}{V_{\text{H}}}}.$$

Обикновено се използува система от две уравнения с две неизвестни, която определя a и концентрацията N на канала:

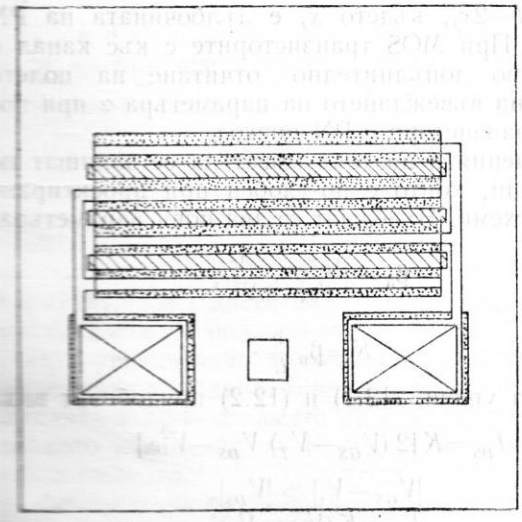
$$V_{\text{н}} = \frac{qNa^2}{2\varepsilon\varepsilon_0} \rightarrow Na^2 = \frac{2\varepsilon\varepsilon_0 V_{\text{н}}}{q}, \qquad a = \frac{2}{3} \cdot \frac{\varepsilon_0 \varepsilon \mu_0 \, bV_{\text{н}}^2}{LI_{\text{DHШ}}}$$

$$I_{\text{DHШ}} = \frac{qNa\,\mu_0\, bV_{\text{н}}}{3L} \rightarrow Na = \frac{3LI_{\text{DHШ}}}{q\,\mu_0\, zV_{\text{н}}}, \quad N = \frac{3LI_{\text{DHШ}}}{q\,\mu_0\, zaV_{\text{н}}}.$$

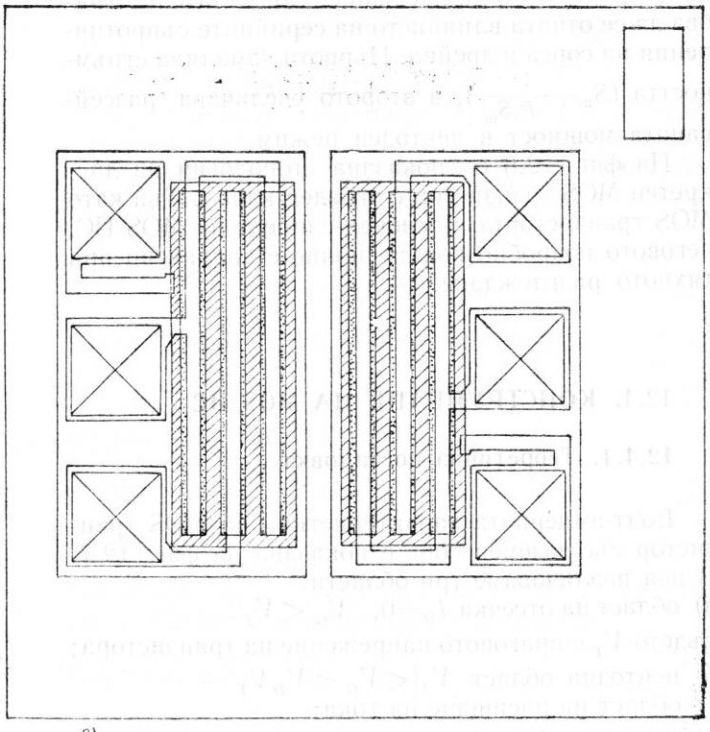
На фиг. 12.5*а*,*б*,*в* са показани топологиите на транзисторите 2N4416, BFS21, 2N5545. Параметрите им са:



а)

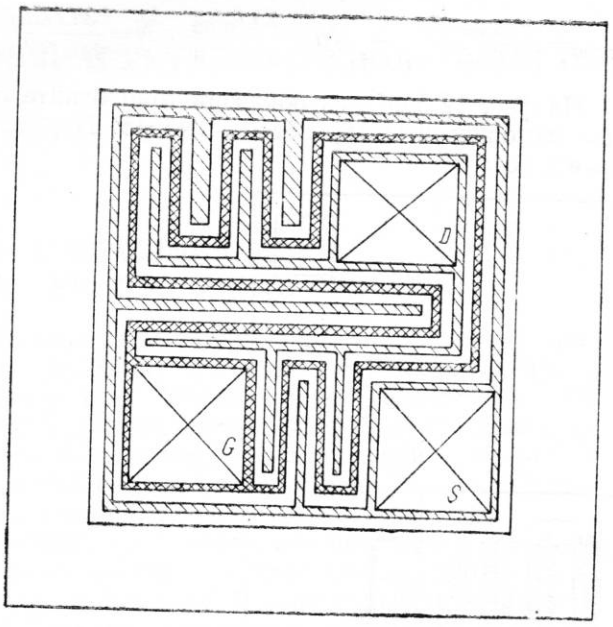


б)



в)

Фиг. 12.5



Фиг. 12.6

2N4416 $L=5$ μm, $b=900$ μm, $\mu_{nSi}=1400$ cm²/Vs, $V_H=3$ V, $I_{DH}=12$ mA; **BFS21** $L=15$ μm, $b=1080$ μm, $V_H=1,3$ V, $I_{DH}=(0,5\div1)$ mA; **2N5545** $L=5$ μm, $b=720$ μm, $V_H=3$ V, $I_{DH}=(1\div8)$ mA.

Така за **2N4416** (фиг. 12.5*а*) следва $a=1,36$ μm, $N=2,2\cdot10^{15}$ cm^{-3} $\alpha=0,998$, $S_ш=1,2$ mA/V; за **BFS21** (фиг. 12.5*б*) $a=1,23$ μm, $N=1,2\cdot10^{15}$ cm^{-3} $\alpha=0,142$, $S_ш=2,3$ mA/V; за **2N5545** (фиг. 12.5*в*) $a=1,63$ μm, $N=1,5\cdot10^{15}$ cm^{-3} $\alpha=0,988$, $S_ш=1,99$ mA/V.

Влиянието на параметъра α се изразява в намаляване на тока на насищане, на стръмността и на напрежението на насищане. Допълнително трябва да се отчита влиянието на серийните съпротивления на сорса и дрейна. Първото намалява стръмността ($S_ш\frac{1}{1+R_sS_ш}$), а второто увеличава разсейваната мощност в пентоден режим.

На фиг. 12.6 е показана топология на дискретен MOS транзистор с вграден канал. Тъй като MOS транзисторът е основен елемент на MOS ИС, неговото подробно конструиране е направено при тяхното разглеждане.

12.4. КОНСТРУИРАНЕ НА MOS ИС

12.4.1. Теоретична постановка

Волт-амперната характеристика на MOS транзистор със заземен сорс е показана на фиг. 12.7. В нея различаваме три области:

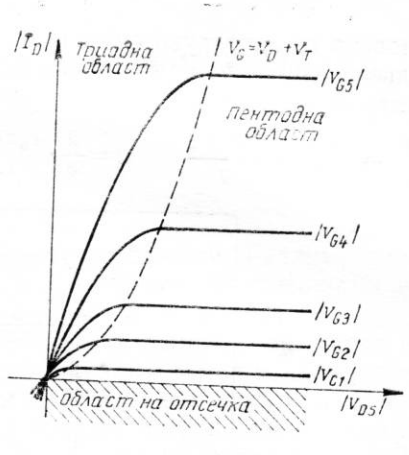
а) област на отсечка $I_D=0$, $|V_G|<|V_T|$,

където V_T е праговото напрежение на транзистора;

б) пентодна област $|V_T|<|V_G|<|V_D|V_T|$ — област на насищане на тока;

в) триодна област

$|V_D+V_T|\leq|V_G|$.



Фиг. 12.7

В триодната област на характеристиките токът през транзистора се описва с уравнението

$$I_{DS}=\mu_p\cdot C'_{ox}\frac{b}{L}\left[(V_{GS}-V_T)(V_D-V_S)-\frac{1}{2}V_{DS}^2\right]. \tag{12.1}$$

В пентодната област уравнението на тока е

$$I_{DS}=\frac{1}{2}\mu_p C'_{ox}\frac{b}{L}(V_{GS}-V_T)^2, \tag{12.2}$$

където μ_p е средната подвижност на дупките на канала;

C_{ox}' — специфичният капацитет на тънкия окис:

$$C'_{ox}=\frac{\varepsilon_{ox}}{d_{ox}}; \tag{12.3}$$

ε_{ox} — диелектричната проницаемост на силициевия двуокис;

d_{ox} — дебелината на силициевия двуокис под гейта;

b — широчината на канала;

L — ефективната дължина на канала.

Тъй като дифузията се извършва едновременно във вертикална и хоризонтална посока, ефективната дължина на канала е по-малка от дължината l, определена на фотошаблона. Обикновено се приема $L=l-2x_j$, където x_j е дълбочината на PN прехода. При MOS транзисторите с къс канал е необходимо допълнително отчитане на полето подобно на въвеждането на параметъра α при полевите транзистори с PN преход.

Уравненията на тока могат да се запишат по друг начин, който е по-удобен при проектиране на MOS схеми. Въвеждат се два нови параметъра:

$$\beta_0'=\frac{\mu_p\varepsilon_{ox}}{2\,d_{ox}},\ \frac{A}{V^2}; \tag{12.4}$$

$$K=\beta_0\frac{b}{L}. \tag{12.5}$$

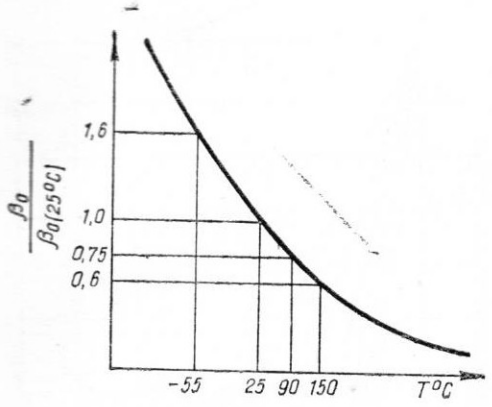
Тогава уравн. (12.1) и (12.2) придобиват вида

$$I_{DS}=K[2(V_{GS}-V_T)V_{DS}-V_{DS}^2] \tag{12.6}$$

за $|V_{GS}-V_T|>|V_{DS}|$,

$$I_{DS}=K(V_{GS}-V_T)^2 \tag{12.7}$$

за $|V_{GS}-V_T|\leq|V_{DS}|$.



Фиг. 12.8

Параметърът β_0 силно от технологията и конструктивните параметри на транзистора. Параметърът K зависи от топологията на прибора, т.е. може да се изменя в процеса на проектиране. Параметърът β_0 зависи от температурата. Законът на изменение е

$$\frac{\beta_0(T)}{\beta_0(T_0)}=\left(\frac{T}{T_0}\right)^{-3/2}, \tag{12.8}$$

където T_0 е абсолютната температура. На фиг. 12.8 е показана графично зависимостта $\frac{\beta_0}{\beta_{0(25°C)}}$.

Характеристиките на транзистора се изменят в случая на разлика в потенциалите на подложката и сорса (ефект на подложката). Когато преходът подложка—сорс е поляризиран обратно, обедне-ната област между подложката и канала се разширява. Следователно необходимо е по-високо напрежение на електрическото поле на гейта, за да се образува провеждащ канал, т.е. праговото напрежение се повишава :

$$V_т'=V_т\big|_{V_{пS}=0}+\Delta V_т;$$

$$|\Delta V_т|=a\,|V_{пS}|^x,$$

където $V_{пS}$ е напрежението подложка—сорс;

$\Delta V_т$ — промяната на праговото напрежение;

a и x са коефициенти, зависещи от топологията на прибора и технологията на изготвяне. Обикновено се приема $a=x=\frac{1}{2}$. Тогава

$$\Delta V_т=\frac{1}{2}\sqrt{V_{пS}},$$

$$V_т'=V_т+\frac{1}{2}\sqrt{V_{пS}}. \tag{12.9}$$

Формулата дава достатъчно точна средна оценка за влиянието на подложката.

При увеличаване на температурата праговото напрежение намалява. Едновременно с това обаче намалява и проводимостта на канала, т.е. наблюдаваното изменение на $V_т$ изглежда по-малко от действителното.

Капацитети на MOS схемите. При определяне на параметрите на MOS схема важно значение имат съществуващите капацитети — собственият капацитет на MOS структурата и паразитните капацитети. Собственият капацитет на MOS транзистора $C_{мos}$ се състои от капацитетите гейт-сорс, гейт-дрейн, дрейн-сорс. Паразитните капацитети са:

C_{PN} е капацитетът на прехода подложка—P^+-област;

$C_м$ — капацитетът между металната шина и силициевата подложка в пасивна област на структурата;

$C_{мр}$ — капацитетът метал-окис — P^+-област;

$C_{мрт}$ — капацитетът метал-тънък окис — P^+-област, капацитет на препокриването.

12.4.2. Методика за изчисляване на инвертор

Тук е разгледана методиката за изчисляване на инвертор, използуващ товарен MOS транзистор, който работи в пентодната област на VA характеристика (гейтът и дрейнът на товарния транзистор са свързани към шината на захранващото напрежение). Необходимо е да се изчисли статичният режим и бързодействието на инвертора.

Статичен режим. На фиг. 12.9*а,б* е показана електрическата схема на инвертор и предавателната му характеристика.

За да се изведат формули за предавателните характеристики при различни стойности на отношението b/L, е необходимо:

— да се запишат уравненията на тока за входния транзистор T_1, който работи в пентодната област на VA характеристика при ниско $V_{вх}$ и преминава в триодната област при високо $V_{вх}$;

— да се запише уравнението на тока през товарния транзистор T_2;

— да се нормират входното и изходното напрежение в уравненията по максималната стойност на изходното напрежение;

— да се определят числени стойности и да се построят графики.

Уравненията на тока през входния транзистор T_1 се дават с формули (12.6) и (12.7). При сравняване с фиг. 12.9 се вижда, че

$$V_{GS_1}=V_{вх};\quad V_{DS_1}=V_{изх}.$$

Тогава (12.6) и (12.7) придобиват вида:

при $|V_{вх}-V_т|>V_{изх}$

$$I_1=K_1[2(V_{вх}-V_т)V_{изх}-V_{изх}^2] \tag{12.10}$$

и при $|V_{вх}-V_т|\le V_{изх}$

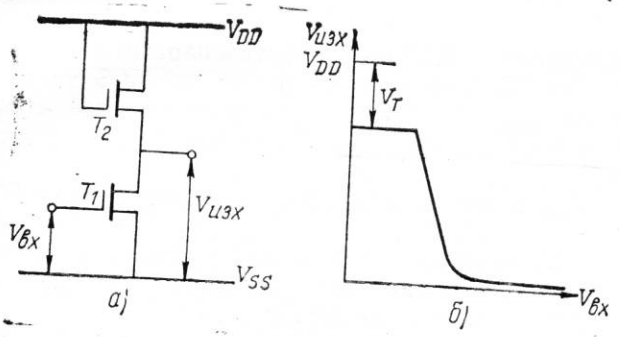
$$I_1=K_1(V_{вх}-V_т)^2. \tag{12.11}$$

Токът през транзистора T_2 се определя от уравнението (12.10). Като вземем пред вид, че

$$V_{GS_2}=V_{DS_2}=V_{DD}-V_т,$$

(12.10) придобива вида

$$I_2=K_2(V_{DD}-V_т-V_{изх})^2.$$



Фиг. 12.9

Тъй като сорсът на транзистора T_2 винаги има някакъв потенциал спрямо подложката, праговото напрежение $V_т'$ се определя от (12.9) и уравнението на тока I_2 придобива вида

(12.12) $$I_2=K_2(V_{DD}-V_т'-V_{изх})^2.$$

След приравняване на токовете I_1 и I_2 и нормиране по максималната стойност на изходното напрежение получаваме:

при $$\left(\frac{V_{вх}-V_т}{V_{DD}-V_т'}\right)\leq\left(\frac{V_{изх}}{V_{DD}-V_т'}\right)$$

(12.13) $$\left(1-\frac{V_{изх}}{V_{DD}-V_т'}\right)^2=\frac{K_1}{K_2}\left(\frac{V_{вх}-V_т}{V_{DD}-V'_т}\right)^2,$$

при $$\left(\frac{V_{вх}-V_т}{V_{DD}-V_т'}\right)>\left(\frac{V_{изх}}{V_{DD}-V_т'}\right)$$

(12.14) $$\left(1-\frac{V_{изх}}{V_{DD}-V_т'}\right)^2=\frac{K_1}{K_2}\left[2\left(\frac{V_{вх}-V_т}{V_{DD}-V_т'}\right)\left(\frac{V_{изх}}{V_{DD}-V_т'}\right)-\left(\frac{V_{изх}}{V_{DD}-V_т'}\right)^2\right],$$

където

(12.15) $$V_{изх\ max}=V_{DD}-V_т',$$

(12.16) $$V_т'=V_т+\frac{1}{2}\sqrt{V_{изх\ max}}$$

Графиките, построени съгласно уравнения (12.13) и (12.14), са показани на фиг. 12.10. С V_{DD} е отбелязано захранващото напрежение.

Преходни процеси в инвертора. При разглеждане на преходните процеси в инвертора приемаме:

— времената за натрупване и пренасяне на носители в транзистора са пренебрежимо малки; тогава продължителността на преходните процеси се определя от капацитетите и съпротивленията във веригата;

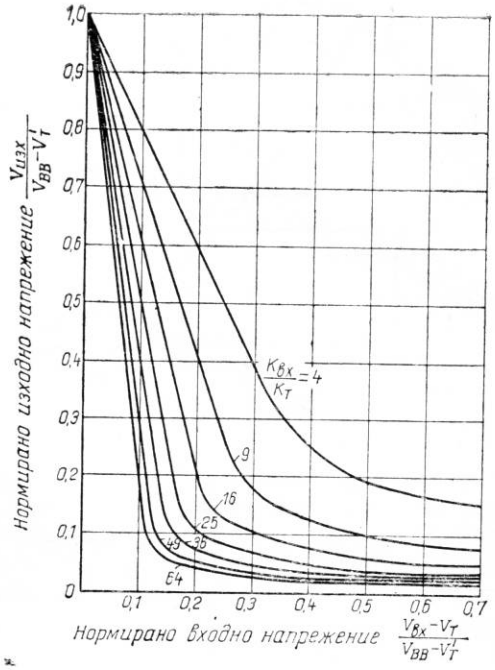
— всички изходни капацитети са обединени в един еквивалентен товарен капацитет $C_т$;

— напрежението на входа на инвертора се изменя със скок както при включване, така и при изключване на транзистора.

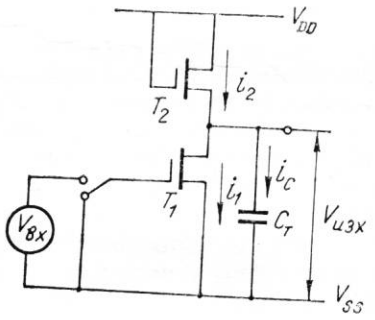
Моделът на инвертора за анализиране на преходните процеси в него е показан на фиг. 12.11.

1. *Време на изключване.* Съгласно допусканията

$$V_{вх}=\begin{cases}V_{вх\ max}, & t<0,\\ 0, & t\geq 0,\end{cases}$$



Фиг. 12.10



Фиг. 12.11

т.е. входният транзистор веднага преминава в непроводящо състояние.

Токът I_2 чрез преобразуване на уравнение (12.12) може да се запише във вида

(12.17) $$I_2=K_2(V_{GS}-V_т')^2=K_2(V_{DD}-V_т'-V_{изх})^2=$$
$$=K_2(V_{DD}-V_т')^2\left(1-\frac{V_{изх}}{V_{DD}-V_т'}\right)^2.$$

Токът през капацитета $C_т$:

(12.18) $$I_c=C_т\frac{dV_{изх}}{dt},$$

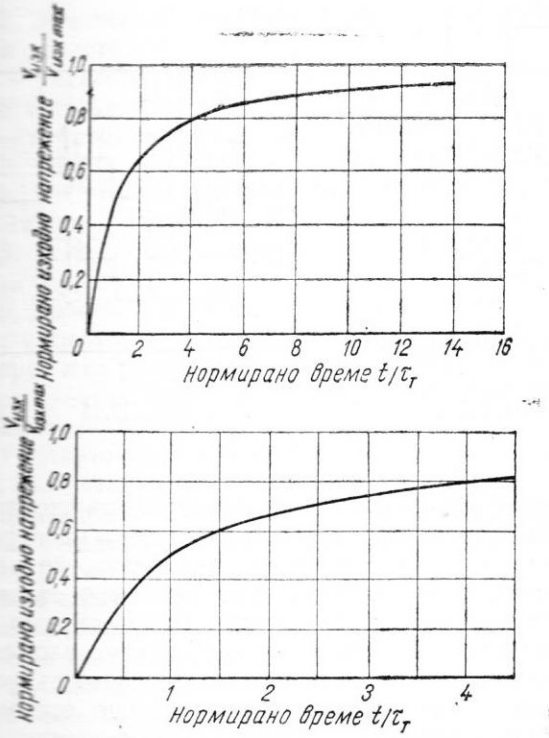
но $$I_2=I_c \quad \text{и}$$

(12.19) $$K_2(V_{DD}-V_т')^2\left(1-\frac{V_{изх}}{V_{DD}-V_т'}\right)^2=C_т\frac{dV_{изх}}{dt}.$$

Въвеждаме означенията

(12.20) $$I_т=K_2(V_{GS_2}-V_{т_2})^2;$$

(12.21) $$R_т=\frac{V_{изх\ max}}{I_т}.$$



Фиг. 12.12

(12.22) В случая $$R_т=\frac{1}{K_2(V_{DD}-V_т')};$$

(12.23) $$\tau_т=C_т R_т.$$

След преобразуване на уравн. (12.19) може да запишем

(12.24) $$t_{изкл}=\frac{V_{изх}/V_{изх\,max}}{1-V_{изх}/V_{изх\,max}}\tau_т,$$

(12.25) $$\frac{V_{изх}}{V_{изх\,max}}=\frac{t/\tau_т}{t/\tau_т+1}.$$

Графиката, построена съгласно (12.25), е показана на фиг. 12.12.

Влиянието на подложката отново се изразява в нарастване на праговото напрежение. Ако решим съвместно уравн. (12.15) и (12.16), ще получим стойности за $V_{изх\,max}$ и $V_т$, с които може да продължим изчисленията. Тъй като в процеса на изключване на входния транзистор $V_{изхmax}$ се изменя от $V_{DD}-V_т$ в началото на преходния процес, докато $V_{изх}\approx 0$ до $V_{DD}-V'_т$. По-правилно би било да се работи с някакви междинни стойности на $V_т$ и $V_{изх\,max}$. Такива стойности може да определим например за $V_{изх}=\frac{V_{изх\,max}}{2}$. Тогава при анализиране на преходния процес на изключване на транзистора може да приемем

(12.26) $$V_{изх\,max}=V_{DD}-V''_т,$$

(12.27) $$V''_т=V_т+\frac{1}{2}\sqrt{\frac{V_{изх\cdot max}}{2}}.$$

Тогава (12.22) придобива вида

(12.28) $$R_т=\frac{V_{изх\,max}}{I_т}=\frac{1}{K_2(V_{DD}-V''_т)}.$$

2. Време на включване. Съгласно допусканията

$$V_{вх}=\begin{cases}0, & t<0,\\ V_{вх\,max} & t\geq 0,\end{cases}$$

т.е. входният транзистор T_1 мигновено преминава в провеждащо състояние в началото на преходния процес.

От фиг. 12.11:

$$I_1=K_1(V_{вх}-V_т)^2 \quad \text{за} \quad |V_{вх}-V_т|\leq V_{изх},$$

$$I_1=K_1[2(V_{вх}-V_т)V_{изх}-V_{изх}^2] \quad \text{за} \quad |V_{вх}-V_т|>V_{изх}.$$

Токът I_2 се определя по формула (12.12) и

$$I_2=I_1+I_c.$$

Като вземем пред вид, че токът I_2 обикновено е малък в сравнение с тока през кондензатора I_c, може да запишем $I_1\approx I_c$. Като приравним изразите за токовете I_1 и I_c и след преобразуване получаваме

(12.29) $$t_{вкл\,пълно}=\frac{C_т}{K_1(V_{вх}-V_т)}\left\{\frac{V_{изх\,max}-(V_{вх}-V_т)}{V_{вх}-V_т}+\right.$$
$$\left.+\frac{1}{2}\ln\left[\frac{2(V_{вх}-V_т)-V_F}{V_F}\right]\right\},$$

където $t_{вкл\,пълно}$ е времето, необходимо за разреждане на кондензатора $C_т$ от напрежение $V_{изх\,max}$ до някаква крайна стойност V_F. Ако транзисторът през цялото време работи само в пентодната част на VA-характеристика, то

(12.30) $$t_{вкл}=\frac{C_т[V_{изх\,max}-(V_{вх}-V_т)]}{K_1(V_{вх}-V_т)^2}.$$

Обикновено в схемите няколко инвертора се включват последователно. Тогава времето на закъснение се определя от предаването на входния сигнал през цялата верига. Приблизителният метод за решаване на задачата се състои в изчисляване на продължителността на фронтовете на нарастване и спадане на сигнала за всеки инвертор и сумирането на така получените времена за всяко стъпало. Така изчисленото време на закъснение не съвпада с действителното по няколко причини:

— на входа на всяко стъпало не действува скокообразно изменящо се напрежение; от друга страна, напрежението на изхода на инвертора започва да се изменя, преди входното напрежение да достигне стойността, предполагана при скокообразен входен сигнал;

— входното напрежение, което включва инвертора, продължава да нараства и след достигане на приетата при изчисленията стойност.

При изчисляване на инвертора размерите на товарния транзистор се определят от изискванията за бързодействие при най-лошото съчетание на параметрите. Размерът на входния транзистор се определя от изискванията към нивата на изходното напрежение при най-лошо съчетание на параметрите.

Най-лошото съчетание на параметрите за бързодействие е:

— ниско напрежение V_{DD} (при зададени вариации в стойността му); капацитетът $C_т$ се стреми да се зареди до по-ниско напрежение, т.е. времето за достигане на необходимата стойност $V_{изх\ max}$ на нарастване;

— високо прагово напрежение $V_т$; токът през товарния транзистор намалява;

— малка стойност на β_0; от (12.12) следва, че токът през товарния транзистор намалява;

— висока температура; съгласно (12.8) β_0 намалява (при изчисляване на максималната работна температура на схемата трябва да се има пред вид температурният пад в корпуса и максималната околна температура). Може да се приеме, че

(12.31) $$\Delta t_{корпус}=20^0.$$

При проектиране на изходен инвертор към капацитета $C_т$ трябва да се прибави капацитетът на проводника, който съединява изхода на инвертора с изводите на корпуса. Можем да приемем,че този капацитет има стойност 5 pF.

Най-лошите условия за получаване на малка стойност на напрежението на изхода на инвертора са:

— високо напрежение V_{DD}; към делителя на напрежение, образуван от товарния и входния транзистор, се прилага по-високо напрежение, т.е. протича по-силен ток; необходимо е входният транзистор да има по-малко съпротивление, т.е. по-голямо отношение β_0/L;

— високо напрежение $V_т$ (на входния транзистор); неизгодно, тъй като нивото на входното напрежение е фиксирано да бъде по-високо от $V_т$;

— ниско напрежение $V_т$ (на товарния транзистор); неизгодно, тъй като токът през него нараства.

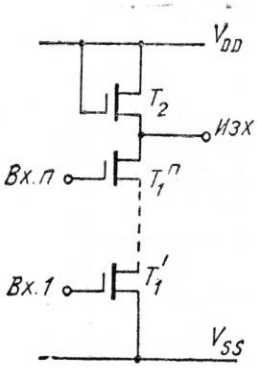
Трябва да се изчислят и двата случая и да се определи по-неблагоприятният за всяка зададена стойност на напрежението на гейта.

Температурата и β_0 не влияят, тъй като във формулата, определяща времето на изключване на транзистора, те влизат като отношение.

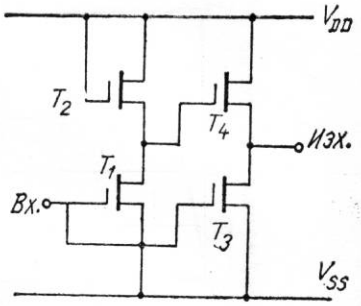
12.4.3. Особености при проектирането на други статични стъпала

Транзистор с отворен дрейн. Схемата се използува с външен товар. Най-трудно се изпълнява условието за ниско ниво на изходното напрежение, когато товарът е нискоомен, а транзисторът с отворен дрейн има голямо съпротивление, т.е. малко β_0 и голямо $V_т$.

Схема с последователно съединени входни транзистори. Тази схема (фиг. 12.13) реализира логическата функция НЕ-И. Когато на всички входове има високо входно напрежение, сумарното съпротивление на входните транзистори трябва да е равно на съпротивлението на входния транзистор T_1 на обикновен инвертор. Това означава, че транзисторите T_1' T_1''. . ., T_1^n трябва да имат n пъти по-голямо отношение β_0/L, където n е броят на входовете. Освен площта, заемана от транзисторите, увеличават се капацитетите на входа и изхода на стъпалото. Друго влошаване на параметрите на схемата е свързано с факта, че всички транзистори освен T_1' във включено състояние имат някакъв потенциал на сорса спрямо подложката, т.е. необходимо е по-голямо входно напрежение, за да се осигури зададеното съпротивление на транзистора в провеждащо състояние. Това ограничава практически използувания брой на последователно свързаните входни транзистори.



Фиг. 12.13



Фиг. 12.14

Схема с двутактен изход. Такава схема (фиг. 12.14) дава възможност да се използуват за усилване по мощност транзистори с малко съпротивление, без да се консумира голям постоянен ток от източника V_{DD}. Транзисторите T_2 и T_3 се изчисляват според зададеното бързодействие при нарастване на напрежението върху капацитета $C_т$. Транзисторът T_4 се изчислява така, че да разреди капацитета $C_т$ за зададеното време.

На входа на транзистора T_4 се подава напрежение

$$V_{вх\ max}=V_{DD}-V_т'.$$

Тогава

(12.32) $$V_{изх\ max}=V_{вх\ max}-V_т''',$$

(12.33) $$V_т'''=V_т+\frac{1}{2}\sqrt{V_{изх\ max}}.$$

12.4.4. Правила при проектиране на топологията

Тези правила са илюстрирани с пример за определяне на конфигурацията на два последователно свързани инвертора, както е показано на фиг. 12.15*а*. Хоризонталната геометрия на същата електрическа схема е показана на фиг. 12.15*б*. Размерите на транзисторите са избрани произволно. (Тук, както и навсякъде по-нататък, при схеми, които илюстрират хоризонталната геометрия, цветовете имат следното значение: червен — P^+ дифузия; жълт — тънък силициев двуокис; черен — отвор в силициевия двуокис за контакт с дифузионна P^+ област; зелен — метал.)

1. Минимален размер на дифузионната област 7,5 μm.

2. Минимално разстояние между две дифузионни области:

— когато се проектират като дрейн и сорс на един и същи транзистор — 7,5 μm;

— когато изпълняват друга функция — 10 μm.

3. Минимален размер на метална шина 7,5 μm.

4. Шините на захранващите напрежения имат минимален размер 20—25 μm.

5. Минимално разстояние между две метални шини 10 μm.

6. Минимален размер на отвор в окиса за контакт с дифузионна област 7,5×7,5 μm. Най-често отворът има размери 10×10 μm. Отворът се прави на разстояние поне 2,5 μm навътре от края на дифузионната област.

7. Минимално препокриване на тънкия окис със съответните дифузионни области 2,5 μm.

8. Дифузионните области на дрейна и сорса завършват навън от тънкия окис поне на 2,5 μm от двете му страни.

9. Размерът на металната шина по широчината на канала на транзистор препокрива тънкия окис на транзистора с по 2,5 μm от двете страни, а по дължината на канала препокрива дифузионните области на сорса и дрейна с по 2,5 μm.

Други правила:

Навсякъде, където е възможно, в окиса над дифузионните области, които контактуват с шините на захранващите напрежения (на фиг. 12.15— общата сорсова област на T_1 и T_3 и общата дрейнова област на T_2 и T_4), се правят отвори, които се метализират. Така се намалява падът на напрежението върху дифузионните области и в същото време се премахва необходимостта шината на захранващото напрежение, която е широка поне 20 μm, да минава по цялата дължина на схемата. Създава се възможност за осъществяване на вътрешни връзки на две нива. Ако това не е целесъобразно, избира се по възможност по-голям минимален размер на дифузионната област. С увеличаване на този размер намалява общото съпротивление на дифузионната област.

Всички чертежи на хоризонталната геометрия са в мащаб 400:1 (1 mm от чертежа отговаря на 2,5 μm върху чипа).

12.4.5. Проектиране на топологията на отделни статични подсхеми

Примерното проектиране на топологията се извършва за P-канална стандартна технология при зададени:

— захранващи напрежения:

$V_{SS}=+5$ V; $V_{DD}=-10$ V;

— входни нива:

$V_{вх\,н}=V_{SS}-3$ V $=+2$ V,

$V_{вх\,в}=V_{SS}-4{,}2$ V $=+0{,}8$ V;

— изходни нива:

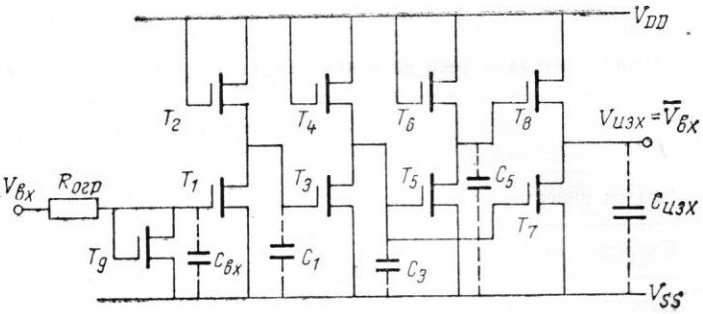
$V_{изх\,н}=V_{SS}-0{,}3$ V $=+4{,}7$ V,

$V_{изх\,в}=V_{SS}-10$ V $=-5$ V при вътрешен товар;

— бързодействие 100 kHz;

— прагово напрежение $V_т=-3$ V.

При производството на MOS схеми обикновено се изготвят структури със следните параметри:



Фиг. 12.16

— дебелина на тънкия окис под гейта $d_{ox}=150\div170$ nm;

— дебелина на дебелия окис $d_{до}=600$ nm;

— прагово напрежение на транзистор с дебел окис $V_т\sim30$ V;

— листово съпротивление на P^+-дифузията $R_s=100$—150 Ω/□.

Типични стойности на необходимите при проектирането параметри:

$$\beta_0=\frac{\mu_p\varepsilon_{ox}}{2d_{ox}}=2\,.\,10^{-6}\ \text{A/V}^2, \tag{12.34}$$

$$C_{ox}=\frac{\varepsilon_{ox}}{d_{ox}}=2{,}2\,.\,10^{-4}\ \text{pF/}\mu\text{m}^2. \tag{12.35}$$

Приема се:

— ефективна дължина на канала

$$L=l-4\ \mu\text{m}; \tag{12.36}$$

— максимална околна температура $t_{max}=50^0$C; тъй като приехме, че температурният пад в корпуса е 20^0C, ще оразмеряваме схемата за максимална температура 70^0C;

— максимален изходен капацитет $C_{изх}=15$ pF.

При изчисленията ще считаме, че $V_{SS}=0$ V, и ще пресмятаме нивата за входното и изходното напрежение спрямо $V_{DD}=-15$ V. При това ще работим само с абсолютните стойности на токовете и напреженията [104].

Проектиране на сложен инвертор. На фиг. 12.16 е показана електрическата схема на сложен инвертор. Той е съставен от входен инвертор, образуван от транзисторите T_1, T_2, два вътрешни инвертора, образувани от транзисторите T_3, T_4, T_5 и T_6, изходно двутактно стъпало, образувано от транзисторите T_7 и T_8, и защитна група $R_{огр}$, T_9. Транзисторът T_9 е с дебел окис под гейта. Инверторите, образувани от транзисторите T_1, T_2 и T_3, T_4, се използуват, когато входният сигнал се взема от изхода на ТТЛ схема, т.е. входната логическа единица има малка стойност. „Същинският“ инвертор е образуван от транзисторите T_5 и T_6. Входните и изходните нива за входен вътрешен инвертор и изходни стъпала са различни. Стойностите им са дадени в табл. 12.1.

Тук $V_{вх\,min}$ и $V_{изх\,min}$ се определят от изискването за шумоустойчивост (1 V). $V_{вх}$ и $V_{изх}$ са стойности на напрежението, които са приети за базови при изчисляване на бързодействието на подсхемата. $V_{вх\,max}$ и $V_{изх\,max}$ са стойности на напрежението в статичен режим. Получават се при съв-

Таблица 12.1

Входни и изходни нива на отделните стъпала в сложен инвертор

	$V_{вх\ min}$, V	$V_{вх}$, V	$V_{вх\ max}$, V	$V_{изх\ min}$, V	$V_{изх}$, V	$V_{изх\ max}$, V	$V'_{изх\ max}$, V
Входен инвертор	3	4,16	4,2	2	9	10,38	10,86
Вътрешен инвертор	2	9	10,38	2	9	10,38	10,86
Изходно стъпало	2	9	10,38	0,3	5	6,35	6,35

местно решаване на уравн. (12.15) и (12.16) за входния и вътрешния инвертор, на уравн. (12.32) и (12.33) за изходното стъпало. $V_{изх\ max}$ са стойности на напрежението, получени при съвместно решаване на уравн. (12.26) и (12.27). За праговото напрежение се получават следните стойности:

— от уравн. (12.15) и (12.16):

(12.38) $V_т = 4{,}62\ V$;

— от уравн. (12.26) и (12.27):

(12.39) $V_т = 4{,}14$ V;

— от уравн. (12.32) и (12.33):

(12.40) $V_т = 4{,}03$ V.

На базата на стойностите на напреженията може да се изчислят необходимите при проектирането нормирани величини. Получените резултати са записани на табл. 12.2.

Тук отношенията $K_{вх}/K_{т min}$ са определени от фиг. 12.10, а $t/\tau_т$ — от фиг. 12.12. В последната графа е дадена по-обобщена формула за изчисление на времето на включване на един транзистор при зададена крайна стойност V_F на напрежението върху него. Тази формула е изчислена от уравн. (12.29) за вътрешен инвертор и изходно стъпало и от уравн. (12.30) за входен инвертор [104, 308, 309, 311].

$K_{вх}$ е коефициентът на пропорционалност във формулата на тока на входния транзистор на съответния инвертор; $K_т$ е за същия инвертор. $C_{изх\ сг}$ е паразитният капацитет на изхода на съответното стъпало.

При зададените стойности на β_0 и максималната температура от фиг. 12.8 може да определим стойността на $\beta_{0\ min}$, която също е необходима при изчисленията

(12.41) $$\beta_0\,(70°C) = \beta_{0\ min} = 0{,}8\,\beta_0\,(25°C) = 0{,}8 \cdot 2 \cdot 10^{-6} = 1{,}6 \cdot 10^{-6}\ A/V^2.$$

Ще започнем проектирането с изчисляване на транзисторите T_7 и T_8. Нека времето на зареждане на изходния капацитет е $t_{зарС_{изх}} \sim 80$ ns. Приехме, че $C_{изх} = 15$ pF. От формула (12.23) и табл. 12.2 може да определим R_{I8}:

$$R_{I8} = \frac{\tau_т}{C_{изх}} = \frac{t_{изкл}}{3{,}76\,C_{изх}} = \frac{80 \cdot 10^{-9}}{3{,}76 \cdot 15 \cdot 10^{-12}} = 1{,}42\ k\Omega.$$

От формули (12.20) и (12.21) може да определим K_8:

$$K_8 = \frac{1}{R_{I8}\,(V_{вх8} - V'''_т)} = \frac{1}{1{,}42 \cdot 10^3 \cdot (10{,}38 - 4{,}03)} = 111 \cdot 10^{-6}\ A/V^2.$$

От формули (12.2) и (12.41) определяме отношението b_8/L_8:

$$\frac{b_8}{L_8} = \frac{K_8}{\beta_{0\ min}} = \frac{111 \cdot 10^{-6}}{1{,}6 \cdot 10^{-6}} = 69{,}4.$$

$L_{8min} = 3{,}5$ μm. Тогава трябва $b_8 = 3{,}5 \cdot 69{,}4 = 243$ μm. Избираме $b_8 = 240$ μm. Тогава $b_8/L_8 = 68{,}6$, $K_8 = b_8/L_8 \cdot \beta_{0min} = 109{,}6 \cdot 10^{-6}$ A/V^2,

$$R_{I8} = \frac{1}{K_8\,(V_{вх8} - V'''_т)} = \frac{1}{109{,}6 \cdot 6{,}35 \cdot 10^{-6}} = 1{,}43\ k\Omega,$$

$$\tau_т = R_{I8}\,C_{изх} = 1{,}43 \cdot 10^3 \cdot 15 \cdot 10^{-12} = 21{,}5\ ns,$$

$$t_{зарС_{изх}} = 21{,}5 \cdot 3{,}76 = 81\ ns.$$

Таблица 12.2

Нормирани величини, необходими при проектирането на сложен инвертор

	$\frac{V_{вх} - V_т}{V_{изх\ max}}$	$\frac{V_{изх}}{V_{изх\ max}}$	$\left(\frac{K_{вх}}{K_т}\right)_{min}$	$\frac{V_{изх}}{V'_{изх\ max}}$	$\frac{t}{\tau_т}$	$t_{вкл}$, ns
Входен инвертор	0,112	0,193	64,5	0,83	4,9	$\frac{C_{изх\ ст}}{K_{вх\ тр}} \cdot 6{,}85$*
Вътрешен инвертор	0,58	0,193	4,33	0,83	4,9	$\frac{C_{изх\ ст}}{K_{вх\ тр}} \cdot 0{,}256$*
Изходно стъпало	—	—	—	0,79	3,76	$\frac{C_{изх}}{K_7} \cdot 0{,}315$**

Забележка. * — $V_F = 2$V; ** — $V_F = 0{,}3$V.

Така за транзистора T_8 получихме: $b_8=240$ μm, $L_8=3{,}5$ μm; $l_8=7{,}5$ μm; $K_8=109{,}6.10^{-6}$ A/V²; $t_{\text{разРС}_{\text{изх}}}=81$ ns.

За транзистора T_7 избираме: $b_7=120$μm; $L_7=3{,}5$ μm; $l_7=7{,}5$ μm.

Тогава $\frac{b_7}{L_7}=34{,}3$; $K_7=\beta_{0\,\min}\cdot\frac{b_7}{L_7}=1{,}6\,.\,10^{-6}\,.\,34{,}3=$ $=54{,}8\,.\,10^{-6}$ A/V². От табл. 12.2 определяме времето на разряд на $C_{\text{изх}}$:

$$t_{\text{РазРС}_{\text{изх}}}=\frac{C_{\text{изх}}}{K_7}\cdot 0{,}315=\frac{15\,.\,10^{-12}}{54{,}8\,.\,10^{-6}}\cdot 0{,}315=86\text{ ns}.$$

При статичен режим токовете през транзисторите T_7 и T_8 са

$$I_7=K_7[2(V_{G7}-V_{\text{т}})V_{\text{изх}7}-V^2_{\text{изх}\,7}]=$$
$$=54{,}8\,.\,10^{-6}[2(10{,}38-3)\,.\,0{,}3-0{,}09]=336\ \mu\text{A},$$
$$I_8=K_8(V_{G8}-V_{\text{т}})^2=109{,}6\,.\,10^{-6}\,.\,(10{,}38-6{,}35)^2=$$
$$=1{,}78\text{ mA}.$$

Изчисляване на транзисторите T_5 и T_6. Тези транзистори образуват вътрешен за подсхемата инвертор. Нека $t_{\text{изкл}\,T5}\sim 220$ ns. Главни съставки на паразитния капацитет на изхода на едно стъпало са собственият капацитет на входния транзистор на следващото стъпало (в случая T_8) и капацитетът на PN прехода между общата P^+-област и подложката за транзистора, чието бързодействие изчисляваме (в случая между общата P^+-област на транзисторите T_5, T_6 и подложката):

$$C_{\text{mos}\,T8}=C'_{ox}b_8(l_8+5)=2{,}2.10^{-4}.12{,}5.2.40=0{,}66\text{ pF}.$$

Типична стойност на специфичния капацитет P^+-област-подложка е $1{,}5.10^{-4}$pF/μm². Като вземем пред вид усреднената площ на дифузионните P^+-области, може да приемем $C_{pn}=0{,}25$ pF. Тогава може да приемем $C_5=0{,}9$ pF.

От формула (12.23) и табл. 12.2 определяме

$$R_{\text{т}6}=\frac{t_{\text{изкл}\,T5}}{4{,}9\,C_5}=\frac{220\,.\,10^{-9}}{4{,}9\,.\,0{,}9\,.\,10^{-12}}=50\text{ kΩ}.$$

От формула (12.28) определяме

$$K_6=\frac{1}{R_{\text{т}6}(V_{BB}-V'_{\text{т}})}=\frac{1}{50\,.\,10^3\,.\,10{,}86}=1{,}84.10^{-6}\text{ A/V}^2.$$

От формули (12.5) и (12.41) определяме отношението

$$\frac{b_6}{L_6}=\frac{K_6}{\beta_{0\,\min}}=\frac{1{,}84\,.\,10^{-6}}{1{,}6\,.\,10^{-6}}=1{,}15.$$

От табл. 12.2 определяме отношението b_5/L_5:

$$\frac{b_5}{L_5}\geq 4{,}33,\quad \frac{b_6}{L_6}=1{,}15\,.\,4{,}33=5.$$

Ако $L_5=3{,}5$ μm, $b_5\geq 17{,}5$ μm.

Избираме $b_5=20$ μm, $L_5=3{,}5$ μm, $l_5=7{,}5$ μm. Тогава $\frac{b_5}{L_5}=5{,}7$; $K_5=5{,}7\,.\,\beta_{0\,\min}=5{,}7\,.\,1\,.\,6\,.\,10^{-6}=$ $=9{,}15\,.\,10^{-6}$ A/V²

$$\frac{b_6}{L_6}\leq\frac{1}{4{,}33}\cdot\frac{b_5}{L_5}=\frac{5{,}7}{4{,}33}=1{,}32.$$

Ако $L_6=3{,}5$ μm, трябва $b_6\leq 4{,}6$ μm.

Приели сме минимален размер от тънкия окис 150 nm. Тогава избираме

$L_6=5{,}7$ μm; $b_6=7{,}5$ μm; $l_6=9{,}7$ μm. Получаваме $b_6/L_6=1{,}32$; $K_6=1{,}6\,.\,10^{-6}\,.\,1{,}32=2{,}1\,.\,10^{-6}$ A/V².

Като извършим изчисленията по обратен ред, получаваме $R_{\text{т}6}=48{,}3$ kΩ,

$\tau_{\text{т}}=R_{\text{т}6}\,.\,C_5=48{,}3\,.\,10^3\,.\,0{,}9\,.\,10^{-12}=43{,}5$ ns; $t_{\text{изкл}\,T5}=$ $=4{,}9\,.\,\tau_{\text{т}}=214$ ns.

От табл. 12.2

$$t_{\text{вкл}\,T5}=\frac{C_5}{K_5}0{,}256=\frac{0{,}256\,.\,0{,}9\,.\,10^{-12}}{9{,}15\,.\,10^{-6}}=25{,}2\text{ ns}.$$

Изчисляване на транзисторите T_3 и T_4. Тези транзистори също образуват вътрешен инвертор. Нека $t_{\text{изкл}T3}\sim 80$ ns. На изхода на транзистора T_3 са включени паралелно входовете на транзисторите T_5 и T_7.

$$C_{\text{mos}\,5}+C_{\text{mos}\,7}=C'_{ox}[b_5(l_5+5)+b_7(l_7+5)]=$$
$$=2{,}2\,.\,10^{-4}\,.\,12{,}5\,(20+120)=0{,}385\text{ pF}.$$

Приемаме $C_3=0{,}65$ pF. От формула (12.23) и табл. (12.2) определяме R_{T4}:

$$R_{\text{т}4}=\frac{t_{\text{изкл}\,T3}}{4{,}9\,.\,C_3}=\frac{80\,.\,10^{-9}}{4{,}9\,.\,0{,}65\,.\,10^{-6}}=25{,}1\text{ kΩ}.$$

От формули (12.28) определяме K_4:

$$K_4=\frac{1}{R_{\text{т}4}(V_{DD}-V'_{\text{т}})}=\frac{1}{25{,}1\,.\,10^3\,.\,10{,}86}=3{,}68\,.\,10^{-6}\text{ A/V}^2.$$

От формула (12.5) и (12.41) определяме отношението b_4/L_4:

$$\frac{b_4}{L_4}=\frac{K_4}{\beta_{0\,\min}}=\frac{3{,}68\,.\,10^{-6}}{1{,}6\,.\,10^{-6}}=2{,}31.$$

От табл. 12.2 определяме отношението b_3/L_3:

$$\frac{b_3}{L_3}\geq 4{,}33\,\frac{b_4}{L_4}=4{,}33\,.\,2{,}31=10.$$

Ако $L_3=3{,}5$ μm, трябва $b_3\geq 35$ μm. Избираме $b_3=40$ μm, $L_3=3{,}5$ μm, $l_3=7{,}5$ μm. Тогава $\frac{b_3}{L_3}=$ $=11{,}42$; $K_3=11{,}42\,.\,\beta_{0\,\min}=11{,}42\,.\,1{,}6\,.\,10^{-6}=$ $=18{,}3\,.\,10^{-6}$ A/V².

Като извършим изчисленията по обратен ред, получаваме

$$\frac{b_4}{L_4}\leq\frac{1}{4{,}33}\cdot\frac{b_3}{L_3}=\frac{11{,}41}{4{,}33}=2{,}64.$$

Ако изберем $L_4=3{,}5$ μm, трябва $b_4\leq 9{,}2$ μm. Избираме $b_4=9{,}2$ μm, $K_4=3{,}5$ μm, $l_4=7{,}5$ μm. Тогава $\frac{b_4}{L_4}=2{,}64$; $K_4=\beta_{0\,\min}\frac{b_4}{L_4}=1{,}6\,.\,10^{-6}.2{,}64=4{,}22\times$ $\times 10^{-6}$ A/V². $R_{T4}=21{,}8$ kΩ; $\tau=R_{T4}C_3=21{,}8\,.\,10^3\times$ $\times 0{,}65\,.\,10^{-12}=14{,}2$ ns; $t_{\text{изкл}\,T3}=4{,}9\,.\,\tau_{\text{т}}=69{,}5$ ns. От табл. 12.2

$$t_{\text{вкл }T3}=\frac{C_3}{K_3}\cdot 0{,}256=\frac{0{,}256\,.\,0{,}65\,.\,10^{-12}}{18{,}3\,.\,10^{-6}}=9{,}1\ \text{ns}.$$

Изчисляване на транзисторите T_1 и T_2. Тези транзистори образуват входен инвертор. Нека $t_{\text{изкл }T1}\approx 160$ ns. На изхода на транзистора T_1 е включен входът на транзистора T_3. $C_{\text{MOS }T3}=C'_{ox}b_3(l_3+5)=2{,}2\,.\,10^{-4}\,.\,12{,}5\,.\,40=0{,}11$ pF. Избираме $C_1=0{,}37$ pF. От формула (12.23) и табл. 12.2 определяме R_{T_2}:

$$R_{T2}=\frac{t_{\text{изкл }T1}}{4{,}9\,C_1}=\frac{160\,.\,10^{-9}}{4{,}9\,.\,0{,}37\,.\,10^{-12}}=88\ \text{k}\Omega.$$

От формула (12.28) определяме K_2:

$$K_2=\frac{1}{R_{T2}(V_{DD}-V''_T)}=\frac{1}{88\,.\,10^3\,.\,10{,}86}=1{,}05\,.\,10^{-6}\ \text{A/V}^2.$$

От формули (12.5) и (12.41) определяме отношението b_2/L_2:

$$\frac{b_2}{L_2}=\frac{K_2}{\beta_{0\,\min}}=\frac{1{,}05\,.\,10^{-6}}{1{,}5\,.\,10^{-6}}=0{,}66.$$

От табл. 12.2 определяме отношението b_1/L_1: $\frac{b_1}{L_1}\geq 64{,}5\cdot\frac{b_2}{L_2}=64{,}5\,.\,0{,}660\approx 42{,}57$. Ако изберем $L_1=3{,}5$ μm, трябва $b_1\geq 149$ μm.

Избираме $b_1=160$ μm, $L_1=3{,}5$ μm, $l_1=7{,}5$ μm. Тогава $h_1/L_1=45{,}7$; $K_1=\beta_{0\,\min}\frac{\beta_1}{L_1}=1{,}6\,.\,10^{-6}\,.\,47{,}5=76\,.\,10^{-6}$ A/V^2.

Ако изберем $b_2=7{,}5$ μm, трябва $L_2\geq 10{,}56$ μm. Избираме $b_2=7{,}5$ μm, $L_2=10{,}6$ μm, $l_2=14{,}6$ μm. Тогава $\frac{b_2}{L_2}=0{,}71$; $K_2=\beta_{0\,\min}\frac{b_2}{L_2}=1{,}6\,.\,10^{-6}\,.\,0{,}71=1{,}14\,.\,10^{-6}$ A/V^2; $R_{T2}=80{,}8$ kΩ; $\tau_T=R_{T2}C_1=80{,}8\,.\,10^3\,.\,0{,}37\,.\,10^{-12}=29{,}2$ ns; $t_{\text{изкл }T1}=4{,}9\,\tau_T=4{,}9\,.\,29{,}9=146{,}5$ ns. От табл. 12.2

$$t_{\text{вкл }T1}=\frac{C_1}{K_1}\cdot 6{,}85=\frac{0{,}37\,.\,10^{-12}}{76\,.\,10^{-6}}\cdot 685=33{,}4\ \text{ns}.$$

Време за презареждане на входния капацитет. $C_{\text{вх}}\approx C_{\text{MOS }T1}+C_{\text{MOS }T9}=C'_{ox}b_1(l_1+5)+C_{ox\,\text{д}\,\text{о}}b_9(l_9+5)$.

Тъй като дебелият окис е 600 nm, а тънкият окис е 16 nm, от формула (12,35) следва, че

$$\frac{C'_{\text{ох д о}}}{C'_{\text{ох}}}=\frac{d_{ox}}{d_{\text{д о}}}=\frac{1600}{6000}=0{,}27.$$

$C_{\text{ох д о}}=0{,}27\,.\,2{,}2\,.\,10^{-4}=0{,}59\,.\,10^{-4}$ pF/μm^2. $C_{\text{вх}}\approx C_{\text{MOS }T1}+C_{\text{MOS }T9}=2{,}2.10^{-4}\,.\,12{,}5.160+0{,}59.10^{-4}\times 12{,}5\,.\,75=0{,}5$ pF. Приемаме, че $C_{\text{вх}}=0{,}53$ pF; $R_{\text{огр max}}=3{,}75$ kΩ. Стойностите на $R_{\text{огр max}}$, b_9, L_9 ще бъдат обосновани при разглеждане на проектирането на транзистора T_9.

$$\tau_{\text{вх max}}=C_{\text{вх}}R_{\text{огр max}}=0{,}53\,.\,10^{-12}:3{,}75\,.\,10^3=2\ \text{ns}.$$

$C_{\text{вх}}$ и $R_{\text{огр}}$ образуват интегрираща верига. Тогава $V_{\text{вх}}$ се мени по закона: $V_{\text{вх}}=V_{\text{крайно}}\left(1-e^{-\frac{t}{\tau_{\text{вх}}}}\right)$. Ако приемем, че $V_{\text{вх}}\big|_{t=t_{\text{зар }C_{\text{вх}}}}=4{,}16$ V, и вземем пред вид, че $V_{\text{кр}}=4{,}2$ V, като решим уравнението, получаваме $\frac{t_{\text{зар}}}{\tau_{\text{вх}}}=4{,}6$. Следователно $t_{\text{зар }C\text{вх}}=4{,}6\,.\,2=9{,}2$ ns. При разреждане на $C_{\text{вх}}$, $V_{\text{вх}}$ се мени по закона: $V_{\text{вх}}=V_{\text{вх нач}}e^{-\frac{t}{\tau_{\text{вх}}}}$. Тъй като $V_{\text{вх min}}=3$ V, $V_{\text{вх нач}}=4{,}2$ V, получаваме $3=4{,}2\,e^{-\frac{t}{\tau_{\text{вх}}}}$. След като решим уравнението, получаваме $\frac{t}{\tau_{\text{вх}}}=0{,}336$; оттук $t_{\text{разр }C\text{вх}}=0{,}336\,.\,2\approx 0{,}67$ ns.

Може да изчислим времето на закъснение на сигнала при преминаване през сложния инвертор. Когато $V_{\text{вх}}$ се променя от $V_{\text{вх min}}$ до $V_{\text{вх max}}$, $t_з=t_{\text{разр }C\text{вх}}+t_{\text{изкл }T1}+t_{\text{изкл }T3}+t_{\text{вкл }T5}+t_{\text{разр }C_{\text{изх}}}=9{,}2\,.\,10^{-9}+33{,}4\,.\,10^{-9}+69{,}5\,.\,10^{-9}+25\,.\,2\,.\,10^{-9}+86\,.\,10^{-9}\approx 223{,}3$ ns. Когато $V_{\text{вх}}$ се променя от $V_{\text{вх max}}$ до $V_{\text{вх min}}$, $t_з=t_{\text{разр }C\text{вх}}+t_{\text{изкл }T_1}+t_{\text{вкл }T_8}+t_{\text{изкл }T_5}+t_{\text{разр }C\text{изх}}=0{,}67\,.\,10^{-9}+148.10^{-9}+9{,}1\times 10^{-9}+214\,.\,10^{-9}+81\,.\,10^{-9}\approx 453$ ns.

Изчисляване на защитния транзистор T_9. Съпротивлението $R_{\text{огр}}$ се избира с площ, равна на 15÷25 „квадратчета“, в зависимост от $R_s=100$—150 Ω/□. Тогава $R_{\text{огр min}}=15.100=1{,}5$ kΩ, $R_{\text{ог рmax}}=25.150=3{,}75$ kΩ. Избираме $b_9=75$ μm, $L_9=3{,}5$ μm. Тогава $\frac{b_9}{L_9}=\frac{75}{3{,}5}=21{,}4$.

Токът през транзистора T_9 се определя от (12.8):

$$I_9=K_9(V_{GS}-V_{T9})^2.$$

Тъй като под гейта на T_9 има дебел окис, съгласно (12.5)

$$\frac{\beta_0\,(T_9)}{\beta_0}=\frac{d_{ox}}{d_{\text{д о}}}=\frac{1600}{6000}=0{,}27;\ \beta_{0\,(T9)}=0{,}27\,.\,2\,.\,10^{-6}=0{,}54\,.\,10^{-6}\ \text{A/V}^2.$$

Съгласно (12.41)
$\beta_{0\,\min T9}=0{,}8\ \beta_{0(T9)}=0{,}8.0{,}54.10^{-6}\approx 0{,}48.10^{-6}$ A/V^2. Пробивното напрежение на силициевия двуокис е $V_{BR\,SiO_2}\sim 10^7$V/cm, т.е. за тънкия окис $V_{BR}\approx 160$ V. Нека за сигурност максимално допустимото напрежение на гейта на T_1 да бъде $V_{G9\text{доп}}=140$ V. Тъй като

$V_{T\,(T9)}=30$ V; $I_9=0{,}43\,.\,10^{-6}(140-30)^2=52$ mA. Тогава $V_{\text{вх min доп}}=V_{GT9\,\text{доп}}+I_9R_{\text{огр min}}=140+52.10^{-3}\times 1{,}5\,.\,10^{-3}=218$ V, $V_{\text{вх max доп}}=V_{GT9\,\text{доп}}+I_9R_{\text{огр max}}=140+52\,.\,10^{-3}\,.\,3{,}75\,.\,10^3=335$ V.

С това проектирането на сложния инвертор е завършено.

Всички транзистори, които участвуват в сложния инвертор, влизат като съставна част и на другите подсистеми, които реализират елементарни логически функции — ИЛИ-НЕ, И-НЕ, със същите размери, в някои случаи с различни бързодействия. За да може резултатите от проектирането на сложния инвертор да се използуват полезно, следващите подсхеми на транзисторите с индекси от 1 до 9 са еднакви с едноименните транзистори от сложния инвертор. Табл. 12.3 съдържа

Таблица 12.3

Размери на транзисторите T_1 — T_9, времена на превключване, съпротивления

	b, μm	L, μm	t, μm	$\frac{b}{L}$	$K_{min} \cdot 10^6$, A/V²	$R_т$, kΩ	C_{MOS}, pF	$t_{вкл}$, ns	$t_{изкл}$ ns
T_1	160	3,5	7,5	45,7	76	—	0,44	33,4	146,5
T_2	7,5	10,6	14,6	0,71	1,14	80,8		—	—
T_3	40	3,5	7,5	11,42	18,3	—	0,11	9,1	69,5
T_4	9,6	3,5	7,5	2,04	4,22	21,8	—	—	—
T_5	20	3,5	7,5	5,71	9,15	—	0,055	25,2	214
T_6	7,5	5,7	9,7	1,32	2,1	48,3	—	—	—
T_7	120	3,5	7,5	34,3	54,8	—	0,33	—	—
T_8	240	3,5	7,5	68,6	109,6	1,43	0,66	—	—
T_9	75	3,5	7,5	21,4	0,43	—	0,034	—	—
$C_{вх}$							0,53	9,2[1]	0,67[2]
$C_{изх}$							15	86[2]	81[1]

[1] време на заряд;
[2] време на разряд.

всички размери, които може да се използуват без изменение. В нея са дадени и всички времена на превключване, някои от които може да се използуват при проектиране на други подсхеми, а също съпротивленията, получени съгласно формули (12.21) и (12.23), които също остават постоянни.

Примерна конфигурация на сложен инвертор е показана на фиг. 12.17. Тази конфигурация не е избрана твърде сполучливо, губи се площ, която трудно може да се използува за други MOS структури. Дрейновите области на транзисторите T_2, T_4 и T_6 може да се обединят. Шината на захранващото напрежение V_{SS} не е необходимо да минава по цялата дължина на общата сорсова област на транзисторите T_9, T_1, T_3, T_5 и T_7, тъй като в окиса над дифузията има отвор по цялата дължина на схемата и е достатъчно той да се метализира. Чрез промяна в конфигурацията на T_1 може да се постигне по-малка площ, заемана от инвертора. Стремежът е площта на всяка подсхема да има форма, близка до правоъгълната. По-компактна конфигурация на същия инвертор е показана на фиг. 12.18.

Проектиране на схема НЕ-ИЛИ (ИЛИ). Схема, която реализира функция НЕ-ИЛИ (ИЛИ) на две променливи, е показана на фиг. 12.19. Освен транзисторите T_1—T_9 в схемата участвуват и транзисторите T_{10}, T_{11} и T_{12}, които реализират логическата функция НЕ-ИЛИ. От изхода на тази група и изхода на инвертора, образуван от транзисторите T_5 и T_6, се взимат сигналите, които се подават на гейтовете на крайните транзистори T_7 и T_8. В зависимост от това, кой сигнал се подава на гейта на транзистора T_8 и кой на T_7, на изхода на схемата се получава функция НЕ-ИЛИ (свързването, посочено с прекъсната линия) или ИЛИ (свързването, посочено с по-ситно прекъсната линия). Бързодействието в двата случая е различно.

Транзисторите T_{10} и T_{11} имат размерите на транзистора T_5, а T_{12} — на T_6. Остава да изчислим бързодействието на схемата. Първо да разгледаме реализирането на функция ИЛИ. Може да използуваме следните резултати от изчисляването на бързодействието на сложния инвертор:

$t_{разр\ C_{изх}} = 86$ ns, $t_{изкл\ T1} = 146{,}5$ ns,

$t_{зар\ C_{изх}} = 81$ ns, $t_{вкл\ T1} = 33{,}4$ ns,

$t_{изкл\ T_6} = 214$ ns, $t_{зар\ C_{вх}} = 9{,}2$ ns,

$t_{вкл\ T_5} = 25{,}2$ ns, $t_{разр\ C_{вх}} = 0{,}67$ ns.

Остава да изчислим бързодействието на инвертора T_3, T_4 и на стъпалото T_{10}, T_{11}, T_{12}. Разглеждането е аналогично за всеки един от двата входа на стъпалото НЕ-ИЛИ:

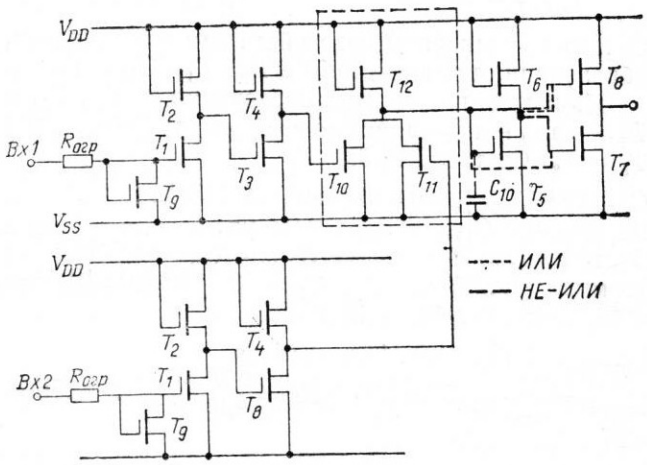
1. T_3, T_4. На изхода на инвертора T_3, T_4 е включен входът на транзистора T_{10}, T_{11}

$C_{MOS\ T10} = C_{ox}\, b_{10}\, (l_{10} + 5) = 2{,}2 \cdot 10^{-4} \cdot 12{,}5 \cdot 20 = 0{,}055$ pF. Приемаме $C_3 = 0{,}3$ pF. От (12.23) и табл. 12.3:

$\tau_т = R_{T4} \cdot C_3 = 21{,}8 \cdot 10^3 \cdot 0{,}3 \cdot 10^{-12} = 6{,}55$ ns.

От табл. 12.2 и 12.3:

$$t_{изкл\ T3} = 4{,}9\,\tau_т = 4{,}9 \cdot 6{,}55 \cdot 10^{-9} = 32 \text{ ns},$$



Фиг. 12.19

$$t_{\text{вкл } T_3}=\frac{C_{\text{изх ст}}}{K_{\text{вх пр}}}\cdot 0{,}256=\frac{C_3}{K_3}\cdot 0{,}256=$$

$$=\frac{0{,}3\,.\,10^{-12}}{18{,}3\,.\,10^{-6}}\cdot 0{,}256=4{,}2\ \text{ns}.$$

2. T_{10}, T_{11}, T_{13}. На изхода на това стъпало са включени входовете на транзисторите T_5 и T_7:

$C_{\text{MOS } T5}+C_{\text{MOS } T7}=0{,}055+0{,}33=0{,}385$ pF.
Приемаме C_{10} (ИЛИ)$=0{,}64$ pF.
От табл. 12.3 $R_{T10}=R_{T6}=48{,}3$ kΩ;
от формула (12.23) $\tau_т=R_{T10}\,.\,C_{10}=48{,}3\,.\,10^3.0{,}64\,.\,.10^{-12}=31$ ns;
от табл. 12.2 и 12.3:
$t_{\text{изкл } T10}=4{,}9\,\tau_т=4{,}9\,.\,31=152$ ns;
$t_{\text{вкл } T10}=\frac{C_{10}}{K_{10}}\cdot 0{,}256=\frac{C_{10}}{K_5}\cdot 0{,}256=\frac{0{,}64\,.\,10^{-12}}{9\,.\,15\,.\,10^{-6}}\cdot 0{,}256=$
$=18$ ns.

Може да определим закъснението на сигнал, подаден на един от входовете на схемата. При промяна на $V_{\text{вх}}$ от $V_{\text{вх min}}$ до $V_{\text{вх max}}$:
$t_з=t_{\text{зар } C_{\text{вх}}}+t_{\text{вкл } T1}+t_{\text{изкл } T3}+t_{\text{вкл } T10\,(T11)}+t_{\text{изкл } T5}+$
$+t_{\text{зар } C_{\text{изх}}}=9{,}2\,.\,10^{-9}+33{,}4\,.\,10^{-9}+32\,.\,10^{-9}+$
$+18.10^{-9}+214\,.\,10^{-9}+81\,.\,10^{-9}=388$ ns.
При промяна на $V_{\text{вх}}$ от $V_{\text{вх max}}$ до $V_{\text{вх min}}$:
$t_з=t_{\text{разр } C_{\text{вх}}}+t_{\text{изкл } T1}+t_{\text{вкл } T3}+t_{\text{изкл } T10\,(T11)}+t_{\text{вкл } T5}+$
$+t_{\text{разр } C_{\text{изх}}}=0{,}67\,.\,10^{-9}+146{,}5\,.\,10^{-9}+4{,}2\,.\,10^{-9}+$
$+152\,.\,10^{-9}+25{,}2\,.\,10^{-9}+86\,.\,10^{-9}=415$ ns.

С това изчислението на схемата, реализираща логическа функция ИЛИ, е завършено. Сега да разгледаме свързването, посочено с прекъсната линия на фиг. 12.19, т.е. реализирането на логическа функция НЕ-ИЛИ. Може да използуваме следните резултати от изчислението на сложния инвертор:

$t_{\text{разр } C_{\text{изх}}}=86$ ns, $t_{\text{разр } C_{\text{вх}}}=0{,}67$ ns,
$t_{\text{зар } C_{\text{изх}}}=81$ ns, $t_{\text{изкл } T1}=146{,}5$ ns,
$t_{\text{зар } C_{\text{вх}}}=9{,}2$ ns, $t_{\text{вкл } T1}=33{,}4$ ns

и от изчислението на схема ИЛИ:

$t_{\text{изкл } T3}=32$ ns, $t_{\text{вкл } T3}=4{,}2$ ns.

Остава да изчислим бързодействието на стъпалата, образувани от транзисторите T_{10}, T_{11}, T_{13} и T_5, T_6.

На изхода на стъпало, образувано от T_{10}, T_{11} и T_{12}, са включени входовете на транзисторите T_5 и T_8. От табл. 12.3:

$C_{\text{MOS } T5}+C_{\text{MOS } T8}=0{,}055+0{,}66=0{,}715$ pF.
Да приемем $C_{10\,(\text{НЕ-ИЛИ})}=0{,}97$ pF.
От табл. 12.3 определяме $R_{T10}=R_{T6}=48{,}3$ kΩ; от формула (12.23) $\tau_т=R_{T10}C_{10}=48{,}3.10^3.0{,}97.10^{-12}=$
$=46{,}8$ ns; от табл. 12.2 и 12.3:

$t_{\text{изкл } T10}=4{,}9\,\tau_т=4{,}9\,.\,46{,}8=230$ ns,
$t_{\text{вкл } T10}=\frac{C_{10}}{K_{10}}\cdot 0{,}256=\frac{C_{10}}{K_5}\cdot 0{,}256=\frac{0{,}97\,.\,10^{-12}}{9{,}15\,.\,10^{-6}}\cdot 0{,}256=$
$=27$ ns.

T_5, T_6. На изхода на стъпалото T_5, T_6 е включен входът на транзистора T_7. От табл. 12.3 $C_{\text{MOS}T7}=0{,}33$ pF.
Приемаме $C_5=0{,}58$ pF.
От табл. 12.3 определяме $RT_6=48{,}3$ k Ω. От формула (12.23) $\tau_т=R_{T6}C_5$ (НЕ-ИЛИ)$=48{,}3.0{,}58.10^{-9}=$
$=28$ ns;
от табл. 12.2 и 12.3:

$t_{\text{изкл } T5}=4{,}9\,\tau_т=4{,}9\,.\,28\,.\,10^{-9}=137$ ns;

$t_{\text{вкл } T5}=\frac{C_5}{K_5}\cdot 0{,}256=\frac{0{,}58\,.\,10^{-12}}{9{,}15\,.\,10^{-6}}\cdot 0{,}256=16{,}2$ ns.

Остава да определим закъснението на сигнал, подаден на един от входовете на схемата:

а) при промяна на $V_{\text{вх}}$ от $V_{\text{вх min}}$ до $V_{\text{вх max}}$:
$t_з=t_{\text{зар } C_{\text{вх}}}+t_{\text{вкл } T1}+t_{\text{изкл } T3}+t_{\text{вкл } T10\,(T11)}+t_{\text{изкл } T5}+$
$+t_{\text{зар } C_{\text{изх}}}=9{,}2\,.\,10^{-9}+33{,}4\,.\,10^{-9}+32{,}10^{-9}+$
$27\,.\,10^{-9}+137\,.\,10^{-9}+31\,.\,10^{-9}=320$ ns;
б) при промяна на $V_{\text{вх}}$ от $V_{\text{вх max}}$ до $V_{\text{вх min}}$:
$t_з=t_{\text{разр } C_{\text{вх}}}+t_{\text{изкл } T1}+t_{\text{вкл } T3}+t_{\text{изкл } T10\,(T11)}+t_{\text{вкл } T5}+$
$+t_{\text{разр } C_{\text{изх}}}=0{,}67\,.\,10^{-9}+146{,}5\,.\,10^{-9}+4{,}2\,.\,10^{-9}+$
$+230\,.\,10^{-9}+16{,}2\,.\,10^{-9}+86\,.\,10^{-9}=484$ ns.

С това изчислението на схема НЕ-ИЛИ е завършено.

Ако едновременно на входовете на транзисторите T_{10} и T_{11} се подаде логическа единица, нивото на изходната логическа нула се понижава, тъй като се получава паралелно свързване на две еднакви съпротивления. Това повишава шумоустойчивостта на следващото стъпало.

В табл. 12.4 са дадени времената на включване и изключване на всички стъпала за схеми ИЛИ и НЕ-ИЛИ.

Таблица 12.4

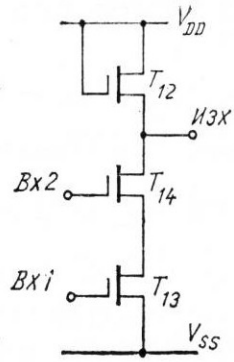
Времена на превключване на отделните стъпала в схеми ИЛИ и НЕ-ИЛИ

	ИЛИ		НЕ-ИЛИ	
	$t_{\text{вкл}}$, ns	$t_{\text{изкл}}$, ns	$t_{\text{вкл}}$, ns	$t_{\text{изкл}}$ ns
$C_{\text{вх}}$	0,67[1]	9,2[2]	0,67[1]	9,2[2]
T_1	33,4	146,5	33,4	146,5
T_3	4,2	32	4,2	32
T_5	25,2	214	16,3	137
T_{10}, T_{11}	18	152	27	230
$C_{\text{изх}}$	82[1]	81[2]	82[1]	81[2]

[1] време на разряд;
[2] време на заряд.

Конфигурацията на схема ИЛИ (НЕ-ИЛИ) е показана на фиг. 12.20. Сорсът на транзисторите T_1, T_3 и T_9 (двата входа), а също и на транзисторите T_{10}, T_{11}, T_5 и T_7 е общ за схемата. Общи са и дрейновите области на транзисторите T_2, T_4, T_{12}, T_6, и T_2 и T_4. Общата сорсова област е направена достатъчно широка, така че може да се шинира. В същото време шинирането не е направено по цялата дължина на дифузионната област: част от дифузионната област се използува и като дифузионен мост.

Проектиране на схема НЕ-И (И). Стъпалото, което реализира логическа функция НЕ-И на две променливи, е показано на фиг. 12.21. Пълната схема, реализираща функция НЕ-И (И), е анало-



Фиг. 12.21

гична на схемата на фиг. 12.19. На мястото на транзисторите T_{10} и T_{11} тук са поставени транзисторите T_{13} и T_{14}, които заедно с товарния транзистор T_{12} реализират функция НЕ-И. При свързване на изходите на стъпалата T_{12}, T_{13}, T_{14} и T_5, T_6 аналогично на свързването с прекъсната линия на фиг. 12.19 на изхода на схемата се реализира функция НЕ-И, а при свързването с по-ситно прекъсната линия — функция И.

За да се запази нивото на логическата нула на изхода на стъпалото, еднакво с това на другите стъпала, избираме $b_{13}=b_{14}=2b_{10}=40$ μm. Тогава

$\frac{b_{13}}{L_{13}}=\frac{b_{14}}{L_{14}}=\frac{40}{3,5}=11,43$. $K_{13}=K_{14}=1,6\,.\,10^{-6}\,.\,11,43=18,3\,.\,10^{-6}$ A/V².

При приетото ниво на входната логическа единица 9 V на изхода на T_{13} се получава напрежение $V_{\text{изх min (13)}}=1$ V. Токовете I_{13} и I_{14} се определят по формула (12.7):

$$I_{13}=K_{13}[2\,(V_{GS13}-V_{T13})\,V_{DS13}-V_{DS13}^2],$$

$$I_{14}=K_{14}[2\,(V_{GS14}-V_{T14})\,(V_{DS14}-V_{DS14}^2].$$

Като вземем пред вид, че $I_{13}=I_{14}$; $V_{DS13}=1$ V; $K_{13}=K_{14}$, $V_{G14}=V_{G13}=9$ V, получаваме

$V_{DS14}\approx 1,46$ V.

Тогава $V_{\text{изх (НЕ-И)}}=V_{DS13}+V_{DS14}=2,46$ V.

За да се запази нивото на изходната логическа нула 2 V, необходимо е на гейтовете на транзисторите T_{13} и T_{14} да се подадат по-високи напрежения. Това означава, че бързодействието на схемата ще намалее. Чрез няколко последователни приближения може да се определят стойностите на тези напрежения.

Нека нивото на изходната логическа нула на стъпалото НЕ-И е 2 V. Тогава съгласно (12.12) уравнението на тока през транзистора T_{12} е

$$I_{12}=K_{12}\left(V_{DD}=V_T-\frac{1}{2}\sqrt{V_{\text{изх}}}-V_{\text{изх}}\right)^2=$$

$$=2,1\,.\,10^{-6}\,.\left(15-3\frac{1}{2}\sqrt{2}-2\right)^2=182\ \mu\text{A}.$$

Но $I_{12}=I_{13}=K_{13}[2\,(V_{GS13}-V_T)\,V_{DS13}-V_{DS13}^2]$.

Нека $V_{G13}=V_{G14}=9,1$ V. Тогава $182\,.\,10^{-6}=18,3\,.\,10^{-6}$ $[2\,.\,(9,1-3)\,V_{DS13}-V_{DS13}^2]$. След преобразуване получаваме

$$V_{DS13}^2-12,2\,V_{DS13}+9,94=0;\quad V_{DS13}=0,88\text{ V},$$

но $I_{12}=I_{14}=K_{14}[2\,(V_{GS14}-V_T)-3/2\,V_{DS13})\,V_{DS14}-V_{DS14}^2]=18,3\,.\,10^{-6}$ $[2\,(9,1-3-1/2\,0,88-0,88)\,V_{DS14}-V_{DS14}^2]$,

$$V_{DS14}^2-9,5\,V_{DS14}+9,94=0;\quad V_{DS14}=1,16\text{ V}.$$

Тогава изходното напрежение на стъпалото НЕ-И ще бъде $V_{DS13}+V_{DS14}=0,88+1,16=2,04$ V. Тъй още с първото приближение се получава стойност на изходната логическа нула, достатъчно близка до 2 V, изчисленията спират дотук. Получихме, че е необходимо на гейтовете на транзисторите T_{13} и T_{14} да се подаде напрежение $V_{G13}=V_{G14}=9,1$ V. Тогава бързодействието на инверторите, образувано от транзисторите T_3 и T_4 от двата входа, ще се намали. За тях ще получим

$$\frac{V_{\text{изх}}}{V'_{\text{изх max}}}=\frac{9,1}{10,86}=0,84.$$

От фиг. 12.12 определяме $\frac{t_{\text{изкл}}}{\tau_T}=5,25$. Бързодействието на инвертора, образуван от транзисторите T_3 и T_4 (и за двата входа), намалява и поради това, че нараства входният капацитет на стъпалото НЕ-И:

$$C_{\text{MOS13,14}}=C'_{ox}\,b_{13}\,(l_{13}+5)=2,2\,.\,10^{-4}\,.\,40\,.\,12,5=$$

$$=0,11\text{ pF}.$$

Можа да приемем $C_3\approx 0,37$ pF.

Съгласно формула (12.21) R_{14} не променя стойността си. От табл. 12.3 определяме $R_{T4}=21,8$ kΩ. Съгласно формула (12.23)

$$\tau_T=R_{14}\,C_3=21,8\,.\,10^3\,.\,0,37\,.\,10^{-12}=8,07\text{ ns}.$$

Тогава $t_{\text{изкл }T3}=5,25$; $\tau_T=5,25.8,07.10^{-9}=42,3$ ns,

$$t_{\text{вкл }T3}=\frac{0,37\,.\,10^{-12}}{18,3\,.\,10^{-6}}\,.\,0,256=5,2\text{ ns}.$$

Може да се приеме, че времената на превключване на всички други стъпала остават същите както при схеми ИЛИ и НЕ-ИЛИ. Като се използуват данните от табл. 12.4, може да се изчисли времето на закъснение на входните сигнали.

За функция И използуваме данните за функция ИЛИ:

а) при промяна на изходния сигнал от $V_{\text{вх min}}$ до $V_{\text{вх max}}$

$t_3=t_{\text{зар }C_{\text{вх}}}+t_{\text{вкл }T1}+t_{\text{изкл }T3}+t_{\text{вкл }T13,\,T14}+t_{\text{изкл }T5}+t_{\text{зар }C_{\text{изх}}}=9,2\,.\,10^{-9}+33,4\,.\,10^{-9}+42,3\,.\,10^{-9}+18\,.\,10^{-9}+214\,.\,10^{-9}+81\,.\,10^{-9}\approx 398$ ns;

б) при промяна на входния сигнал от $V_{\text{вх max}}$ до $V_{\text{вх min}}$

$t_з = t_{разр\ C_{вх}} + t_{изкл\ T1} + t_{вкл\ T3} + t_{изкл\ T13,\ T14} + t_{вкл\ T5} + t_{разр\ C_{изх}} = 0{,}67 \cdot 10^{-9} + 146{,}5 \cdot 10^{-9} + 5{,}2 \cdot 10^{-9} + 152 \cdot 10^{-9} + 25{,}2 \cdot 10^{-9} + 86 \cdot 10^{-9} = 416$ ns.

За функция НЕ-И използуваме данните за функция НЕ-ИЛИ. При промяна на входния сигнал от $V_{вх\ min}$ до $V_{вх\ max}$ с аналогични разсъждения получаваме $t_з = 330$ ns.
При промяна на входния резултат от $V_{вх\ max}$ до $V_{вх\ min}$ получаваме $t_з = 490$ ns.
С това изчислението на двувходовата подсхема НЕ-И (И) е завършено.

Стъпалото, реализиращо логическа функция НЕ-И на три променливи, е показано на фиг. 12.22. Пълната схема, реализираща функция на три променливи НЕ-И (И), е аналогична на дотук разгледаните подсхеми: всеки вход има защитна група $R_{огр}$, T_9, инвертори T_1, T_2, T_3, T_4; след стъпалото НЕ-И следва инвертор T_5, T_6 и изходно стъпало T_7, T_8. При съответното свързване на изхода на подсхемата се реализира функция И или НЕ-И.

За да се осигури ниво на изходната логическа нула на стъпалото 2 V, избираме

$b_{15} = b_{16} = b_{17} = 3{,}5$; $b_{10} = 60$ μm. Тогава

$$\frac{b_{15}}{L_{15}} = \frac{b_{16}}{L_{16}} = \frac{b_{17}}{L_{17}} = \frac{60}{3{,}5} = 17{,}13.$$

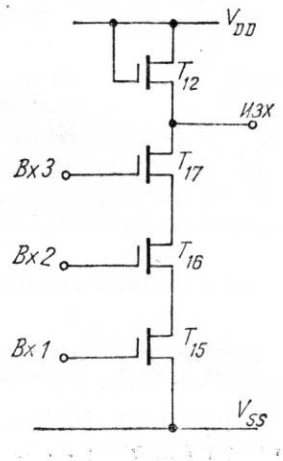
$K_{15} = K_{16} = K_{17} = 1{,}6.10^{-6}.17.13 = 27{,}45.10^{-6}$ A/V^2.
Ако нивото на входната логическа единица е 9 V, то $V_{изхT15} = 0{,}667$V. От равенството на токовете I_{15} и I_{16} и формула (12.7) получаваме

$$K_{15}[2(V_{G15} - V_{T15})V_{DS15} - V_{DS15}^2] = K_{16}[2(V_{GS16} - V_{T16})V_{DS16} - V_{DS16}^2 = 2(9-3)0{,}667 - 0{,}445 = 2\left(9 - 3 - \frac{1}{2} \cdot 0{,}667 - 0{,}667\right)V_{DS16} - V_{DS16}^2.$$

Като решим квадратното уравнение, получаваме

$V_{DS16} = 0{,}875$ V.

$V_{DS15} + V_{DS16} = 0{,}667 + 0{,}87_5 = 1{,}54$ V.



Фиг. 12.22

От равенството на токовете I_{15} и I_{17} и формула (12.7) получаваме:

$$K_{15}[2(V_{G15} - V_{T15})V_{DS15} - V_{DS15}^2 = K_{17}[2(V_{GS17} - V_{T17})V_{DS17} - V_{DS17}^2],$$

$$7{,}6 = 2\left(9 - 3 - \frac{1}{2}1{,}54 - 1{,}54\right)V_{DS17} - V_{DS17}^2,$$

$$V_{DS17}^2 - 7{,}68\,V_{DS17} + 7{,}6 = 0; \quad V_{DS17} = 1{,}11 \text{ V}.$$

Тогава $V_{изх\ min} = 0{,}667 + 0{,}875 + 1{,}11 = 2{,}65$ V. За да получим $V_{изх\ min} = 2$ V, трябва да подадем по-високи входни напрежения на транзисторите на стъпалото. За изчисляване на техните стойности постъпваме аналогично както при двувходовото стъпало НЕ-И. При извършване на изчисленията се вижда, че достатъчно добро приближение се получава, ако приемем

$V_{вх15} = V_{вх16}\,V_{вх17} = 9{,}2$ V

Тогава за инверторите T_3, T_4 от трите входа получаваме

$$\frac{V_{изх}}{V'_{изх\ max}} = \frac{9{,}2}{10{,}86} = 0{,}847.$$

От фиг. 12.12 определяме $\frac{t_{изкл}}{t_т} = 5{,}54$.

$$C_{MOS15,\ 16,\ 17} = C'_{ox}\,b_{15}(l_{15} + 5) = 2{,}2 \cdot 10^{-4} \cdot 60 \cdot 12{,}5 = 0{,}165 \text{ pF}.$$

Може да приемем $C_з = 0{,}42$ pF.
Съгласно формула 12.21 R_{T4} не променя стойността си. От табл. 12.3 определяме $R_{T4} = 21.8$ kΩ. Съгласно формула (12.23):

$$\tau_т = R_{T4}\,C_з = 21{,}8 \cdot 10^3 \cdot 0{,}42 \cdot 10^{-12} = 9{,}15 \text{ ns}.$$

Тогава

$$t_{изкл\ T3} = 5{,}54 \cdot \tau_т = 5{,}54 \cdot 9{,}15 \cdot 10^{-9} = 50{,}8 \text{ ns},$$

$$t_{вкл\ T3} = \frac{0{,}42 \cdot 10^{-12}}{1 \cdot 8{,}3 \cdot 10^{-6}} \cdot 0{,}256 = 5{,}9 \text{ ns}.$$

За закъснението на входния сигнал, като използуваме данните от табл. 12.4, получаваме:

Функция И *Функция НЕ-И,*

при промяна на $V_{вх}$ *от* $V_{вх\ min}$ *до* $V_{вх\ max}$:

$t_з = 410$ ns, $t_з = 340$ ns.

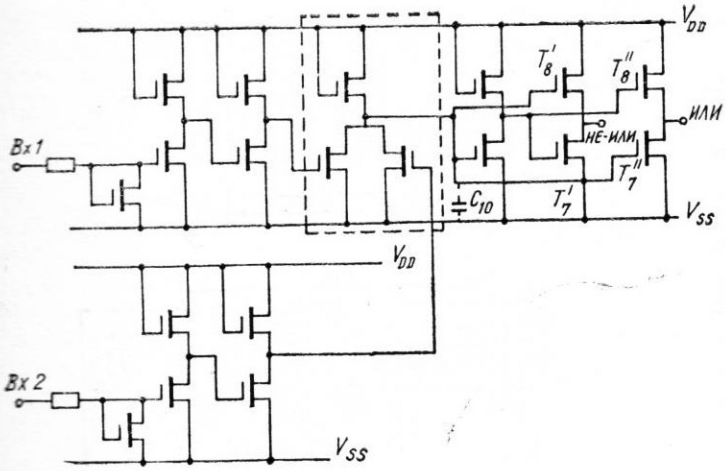
при промяна на $V_{вх}$ *от* $V_{вх\ max}$ *до* $V_{вх\ min}$:

$t_з = 420$ ns, $t_з = 492$ ns

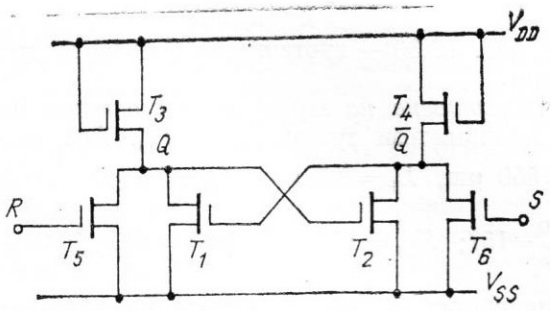
С това изчислението на тривходовата подсхема НЕ-И (И) е завършено.

Хоризонталната геометрия на двувходова и тривходова схема НЕ-И (И) е показана на фиг. 12.23 и фиг. 12.24.

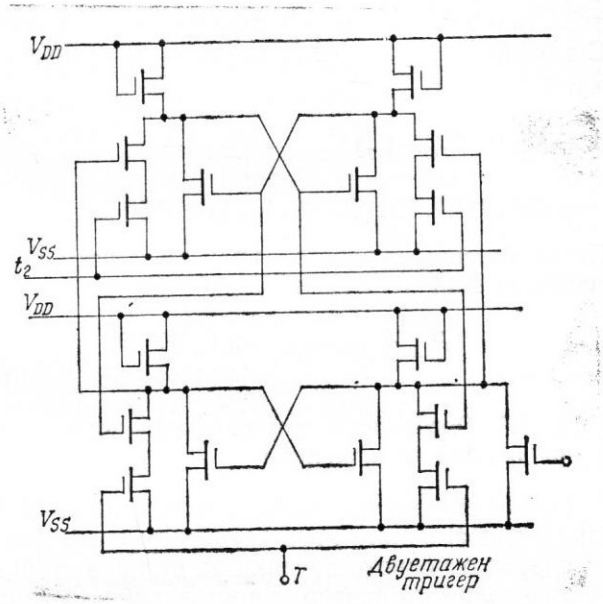
Проектиране на схема ИЛИ (НЕ-ИЛИ). На фиг. 12.25 е показана схема, която реализира едновременно функция ИЛИ и НЕ-ИЛИ. Схемата има две двутактни изходни стъпала, образувани от транзисторите T_7, T_8 и T_7, T_8. Бързодействието им е по-малко в сравнение с това на разгледаните



Фиг. 12.25



Фиг. 12.27



Фиг. 12.29

вече подсхеми, тъй като има паралелно свързване на големи капацитети. От табл. 12.3 може да вземем тези времена на превключване, които остават непроменени:

$t_{\text{разр } C_{\text{вх}}}=0{,}67$ ns, $t_{\text{вкл } T3}=4{,}2$ ns,

$t_{\text{зар } C_{\text{вх}}}=9{,}2$ ns, $t_{\text{изкл } T3}=32$ ns,

$t_{\text{вкл } T1}=34{,}6$ ns, $t_{\text{разр } C_{\text{изх}}}=82$ ns,

$t_{\text{изкл } T1}=148$ ns, $t_{\text{зар } C_{\text{изх}}}=81$ ns.

От същата таблица можем да използуваме и следните величини:

$R_{T12}=R_{T6}=48{,}3$ kΩ, $C_{\text{MOS}T5}=0{,}055$ pF,

$C_{\text{MOS}T7}=0{,}33$ pF, $C_{\text{MOS}T8}=0{,}66$ pF.

На изхода на стъпалото НЕ-ИЛИ са включени входовете на транзисторите T_8, T_5, T_7. Тогава паразитният капацитет, съставен от собствените капацитети на транзисторите T_5, T_7 и T_8, е $C_{\text{MOS}}=0{,}055+0{,}33+0{,}66=1{,}045$ pF. Може да приемем $C_{12}=1{,}3$ pF. От формула (12.23)

$$\tau_T=R_{T12}C_{12}=1{,}3\,.\,10^{-12}\,.\,48{,}3\,.\,10^{3}=63 \text{ ns}.$$

От табл. 12.2 и 12.3:

$$t_{\text{изкл } T10\,(T11)}=4{,}9\,\tau_T=4{,}9\,.\,63\,.\,10^{-9}=308 \text{ ns},$$

$$t_{\text{вкл } T10\,(T11)}=\frac{C_{12}}{K_{10}}\cdot 0{,}256=\frac{1{,}3\,.\,10^{-12}}{9{,}15\,.\,10^{-6}}\cdot 0{,}256=36{,}4 \text{ ns}.$$

На изхода на инвертора T_5, T_6 са включени входовете на транзисторите T_7, T_8. Тогава $C_{\text{MOS}}=0{,}66+0{,}33=0{,}99$ pF. Приемаме $C_6=1{,}24$ pF. От формула (12.23)
$\tau=R_{T6}C_6=48{,}3\,.\,10^{-3}\,.\,1{,}24\,.\,10^{-12}=60$ ns.
От табл. 12.2 и 12.3

$$t_{\text{изкл } T5}=4{,}9\,\tau=4{,}9\,.\,60=294 \text{ ns};$$

$$t_{\text{вкл } T5}=\frac{C_6}{K_5}0{,}256=\frac{1{,}24\,.\,10^{-12}}{9{,}15\,.\,10^{-5}}\cdot 0{,}256=34{,}6 \text{ ns}.$$

Закъснението на входния сигнал е :
а) при промяна на $V_{\text{вх}}$ от $V_{\text{вх min}}$ до $V_{\text{вх max}}$:

НЕ-ИЛИ: $t_з=t_{\text{зар } C_{\text{вх}}}+t_{\text{вкл } T1}+t_{\text{изкл } T3}+t_{\text{вкл } T10\,(T11)}+$
$+t_{\text{изкл } T5}+t_{\text{разр } C_{\text{изх}}}=9{,}2.10^{-9}+33{,}4.10^{-9}+32.10^{-9}+$
$+36{,}4\,.\,10^{-9}+294\,.\,10^{-9}+86\,.\,10^{-9}=491$ ns;

ИЛИ: $t_з=t_{\text{зар } C_{\text{вх}}}+t_{\text{вкл } T1}+t_{\text{изкл } T3}+t_{\text{вкл } T10\,(T11)}+$
$+t_{\text{изкл } T5}+t_{\text{зар } C_{\text{изх}}}=9{,}2\,.\,10^{-9}+33{,}4\,.\,10^{-9}+32\,.\,10^{-9}+$
$+36{,}4\,.\,10^{-9}+294\,.\,10^{-9}+86\,.\,10^{-9}=491$ ns;

б) при промяна на $V_{\text{вх}}$ от $V_{\text{вх max}}$ до $V_{\text{вх min}}$:

НЕ-ИЛИ: $t_з=t_{\text{разр } C_{\text{вх}}}+t_{\text{изкл } T1}+t_{\text{вкл } T3}+t_{\text{изкл } T10(T11)}+$
$+t_{\text{вкл } T5}+t_{\text{зар } C_{\text{изх}}}=0{,}67.10^{-9}+146{,}5.10^{-9}+4{,}2.10^{-9}+$
$+308\,.\,10^{-9}+34{,}6\,.\,10^{-9}+81\,.\,10^{-9}=575$ ns;
ИЛИ: $t_з=t_{\text{разр } C_{\text{вх}}}+t_{\text{изкл } T1}+t_{\text{вкл } T3}+t_{\text{изкл } T10\,(T11)}+$
$+t_{\text{вкл } T5}+t_{\text{разр } C_{\text{изх}}}=0{,}67\,.\,10^{-9}+146{,}5\,.\,10^{-9}+$
$+4{,}2.10^{-9}+308.10^{-9}+34{,}6.10^{-9}+86.10^{-9}=580$ ns.

На фиг. 12.26 е показана примерна хоризонтална геометрия на подсхема ИЛИ/ИЛИ-НЕ.

Проектиране на тригери. Електрическата схема и примерната хоризонтална геометрия на RS тригер са показани на фиг. 12.27 и 12.28. На фиг. 12.29 е показана схемата на двуетажен тригер,

а на фиг. 12.30 — съответната хоризонтална геометрия.

Проектиране на транзистор с отворен дрейн. Да означим този транзистор с T_{18}. Ако изберем $b_{18}=550$ μm, $L_{18}=3{,}5$ μm, $l_{18}=7{,}5$ μm, то $\frac{b_{18}}{L_{18}}=\frac{550}{3{,}5}=157$; $K_{18}=157\,.\,1{,}6\,.\,10^{-6}=250\,.\,10^{-6}$ A/V².

В зависимост от товара нивото на логическата нула на изхода има различна стойност. Ако например изискваното ниво на логическата нула е 1 V, минималната стойност на товарното съпротивление може да определим по следния начин. Съгласно формула (12.7) токът през транзистора T_{18} е

$$I_{18}=K_{18}[2(V_{G18}-V_T)V_{DS18}-V_{DS18}^2]=$$

$$=250\,.\,10^{-6}\,.\,(2\,.\,(9-3)\,.\,1-1)=2750\ \mu A.$$

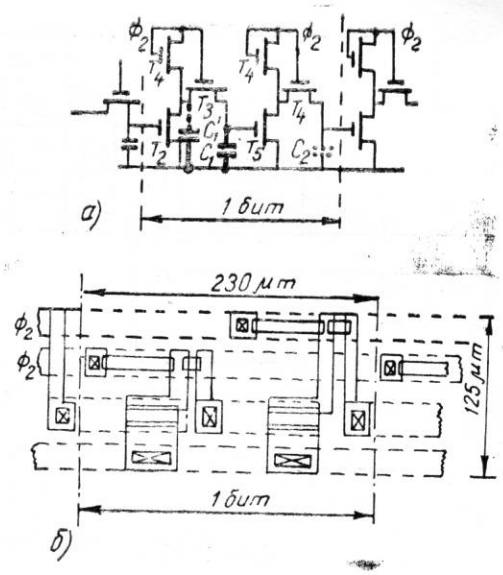
Падът на напрежението върху товарното съпротивление е 14 V. Оттук

$$R_{min}=\frac{14}{2{,}75\,.\,10^{-3}}=5{,}1\,.\,10^3\ \Omega.$$

12.4.6. Особености при проектирането на динамични подсхеми

Освен статичната широко приложение в ИС намира динамичната MOS схемотехника. В нея се използува основното предимство на MOS структурата — голямото входно съпротивление на изолирания по постоянен ток гейт, което позволява във входния капацитет да бъде съхранявана за известно време информация. Времето за задържане зависи от токовете на утечка, затова динамичните схеми са снабдени с тактови генератори за регенерация на информацията. В динамичната техника се различават две направления — първото отчита определено съотношение между товарния и ключовия транзистор, докато при второто се използуват докрай възможностите за натрупване и предаване на заряди, като всички транзистори са с отношение $b/L=1$ и изчисленията се превеждат само за преходните процеси. Тази конструктивна особеност води до увеличаване на влиянието на паразитните капацитети.

По-близо до разгледаните статични схеми е първото направление, при което конструкцията трябва да отчита, че в момента, когато товарният и ключовият транзистор са отпушени, през схемата протича ток към земя. Следователно за реализиране на необходимата стойност на логическата нула, както и при статичните схеми, трябва да бъде изчислено съотношението b/L на ключовия транзистор в зависимост от това на товарния. На фиг. 12.31*а,б* е показана схемата на двуфазен преместващ регистър и съответната топология. С прекъсната линия е показан „интересният“ капацитет C_1 на транзистора T_5, който се зарежда през T_3 по време на импулса Φ_1. Обикновено за товарните транзистори се избира отношение $b/L=$



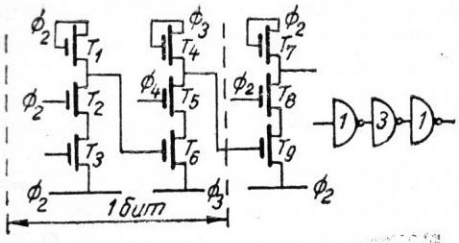
Фиг. 12.31

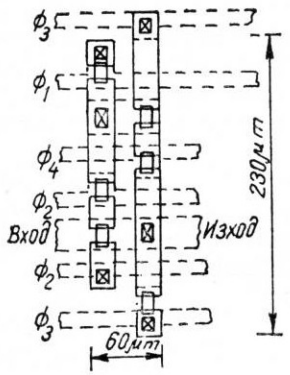
$=1:5$, а за входните — 4:1. Ролята на свързващите транзистори е да представляват нискоимпедансни превключватели на капацитивните токове през „запомнящите“ капацитети на гейтовете. Затова се избира съотношение $b/L=1$.

Съществуват няколко разновидности в динамичната техника по отношение на свързването на гейта на товарния транзистор. В показаната схема той е свързан към тактовия импулс, което намалява консумацията и заеманата площ, но може да бъде свързан и към допълнително захранване V_{GG}.

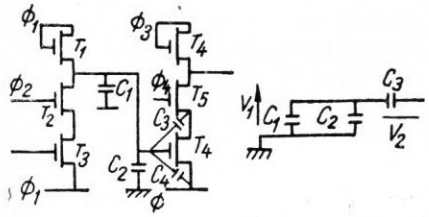
Подобно на статичната техника и тук могат да бъдат реализирани останалите логически функции чрез подходящи подсхеми. Долната граница на тактовите импулси е ограничена от токовете на утечка, а горната — от възможността за бързо зареждане и разреждане на капацитетите. Обикновено се достига диапазонът от 10 kHz до 2 MHz. Показаната топология на фиг. 12.31 позволява допълнително оптимизиране. Според данни от изготвени чипове 100-битов регистър изисква площ 2×2 mm².

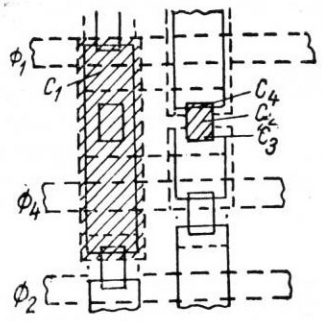
При втория клас динамични схеми всички транзистори независимо от предназначението им се конструират с отношение $b/L=1$. Това прави невъзможно използуването на делител на напрежение за осигуряване на изходния сигнал. Затова в този случай се използува разрядът на гейтовия кондензатор на ключовия транзистор, като от съществено значение е разпределението на зарядите между C_1 и C_1'. Схемно погледнато, за реализиране на достатъчно ниво „1“ в C_1 е необходимо отношението $C^{1\prime}/C_1$ да бъде по възможност най-голямо. Това обаче не се постига конструктивно. Обикновено тези кондензатори имат еднаква площ, което означава намаляване с 50% на нивото. От друга страна, топологията на този вид схеми е значително опростена и заетата площ по-малка. Счита се, че използуването на минимални по размер MOS транзистори намалява площта за една и съща схема, реализирана в двата варианта, пет пъти.





Фиг. 12.32





Фиг. 12.33

На фиг. 12.32 е показана електрическата схема и примерната хоризонтална геометрия на една от възможните конфигурации на четирифазен преместващ регистър. Както и в предишния случай, преместващият регистър е най-простата подсхема, която може да бъде реализирана в този вид динамична техника. Характерно за конструкцията е, че всички DC шини са отпаднали. Друга конструктивна особеност е, че е отпаднала необходимостта от свързващи транзистори. Наличието на четири синхроимпулса поставя сериозен проблем при разполагането на шините и елиминирането на паразитните капацитети.

На фиг. 12.33 е показано съотношението между стойностите на използуваните капацитети.

Капацитетите C_2, C_3, C_4 изграждат гейтовия кондензатор, като C_3 и C_4 са капацитети, получени от препокриването между гейта, сорса и дрейна съответно. C_1 е капацитетът на дифузионна шина на T_1—T_2 спрямо подложката. Особеностите на схемата поставят своите изисквания към стойностите на капацитетите, които резултират в една достатъчно голяма стойност за C_1. От топологията на схемата и използуващия технологичен вариант могат да бъдат определени C_2, C_3 и C_4. Стойността на C_1 се изчислява от приложената еквивалентна схема, като $C_1=C_3(V_2/V_1)—C_2$, където за $V_2=$ $=25$ V, $V_1=2$ V, $C_3=C_2=0{,}016$ pF и $C_1=0{,}18$ pF. В зависимост от създадения PN преход е известен капацитетът на единица площ, което позволява изчисляване на площта на дифузионния прозорец с отчитане на страничната дифузия.

С помощта на показаната основна 4-фазна структура могат да бъдат реализирани и останалите подсхеми, като НЕ-И, НЕ-ИЛИ и т.н.

12.5. РАЗВИТИЕ НА ПОЛУПРОВОДНИКОВИТЕ ЗАПОМНЯЩИ УСТРОЙСТВА

12.5.1. Общи сведения за полупроводниковите запомнящи устройства (ППЗУ)

Първите ППЗУ бяха създадени през 1964—65 година, като техният обем не превишаваше 8—16 бита за биполярните и 16—64 бита за MOS ЗУ.

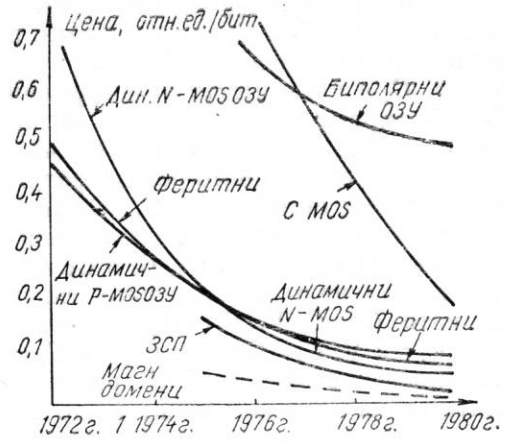
Първото промишлено изделие на MOS ОЗУ, намерило при това изключително широко разпространение, се появи на пазара едва през 1970/71 г.

Основна част от цената на ППЗУ се пада на запомнящите елементи. Ето защо стойността на този вид ЗУ почти не зависи от броя на разредите. Това е позволило ППЗУ да намерят приложение в малки по обем памети още в началото на своето приложение. В резултат на последвалото спадане на цената обемът, при който ППЗУ стават по-икономични, непрекъснато расте. Например през 1967 г. границата, при която MOS ОЗУ са били по-евтини от феритните памети, е била 500 бита, през 1968 г. — 1000 бита, през 1970 г. за статичните — 8000 бита, а за динамичните — 128 000 бита. През 1972—1973 г. почти навсякъде започнаха да използуват ППЗУ в основните ОЗУ на новите модели ЦЕИМ (фиг. 12.34 и 12.35).

Друго важно предимство на ППЗУ са техните по-добри характеристики. При тях лесно се реализира четене без разрушаване на информацията. По отношение на бързодействието ППЗУ са в границите от 10 ns до няколко микросекунди. При използуване на ППЗУ отпадат сложните проблеми на физическо и електрическо съгласуване на запомнящите схеми и управлението.

ППЗУ заемат много по-малко място. При обем 2М байта MOS ОЗУ заема едва 25% от площта на аналогичното феритно устройство.

Въпреки че липсват достатъчно данни, в някои източници се посочва, че ППЗУ имат същата и дори по-добра надеждност от феритните. Това



Фиг. 12.34

е дължи на монолитната структура на ИС и намаления брой съединителни връзки.

ППЗУ позволяват много по-лесно разширяване на обема и са по-стабилни по отношение въздействието на околната среда.

Един от главните недостатъци на ППЗУ е загубата на информация при изключване на захранващото напрежение.

Въпреки очевидните предимства на ППЗУ производителите на феритни памети продължават да увеличават (макар и по-бавно) своето производство, предназначено главно за основните ОЗУ на ЦЕИМ и устройства, които трябва да съхраняват информацията при изключено напрежение. Това се дължи на факта, че цената на феритните устройства продължава да спада, а техните характеристики да се подобряват. Смята се обаче, че новите динамични ОЗУ с обем 4К и 16К ще решат окончателно въпроса в полза на ППЗУ [108, 109].

Полупроводниковите ЗУ могат да бъдат к л а с и ф и ц и р а н и по четирите най-важни, независими един от друг признака:

— технология — биполярни и MOS;

— схемно решение — статични и динамични;

— принцип на работа — с последователен и произволен достъп;

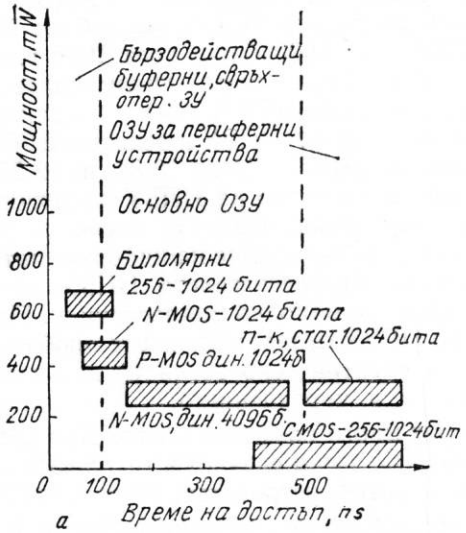
— режим на съхранение на информацията — постоянни (ПЗУ) — ROM и оперативни (ОЗУ) — RAM.

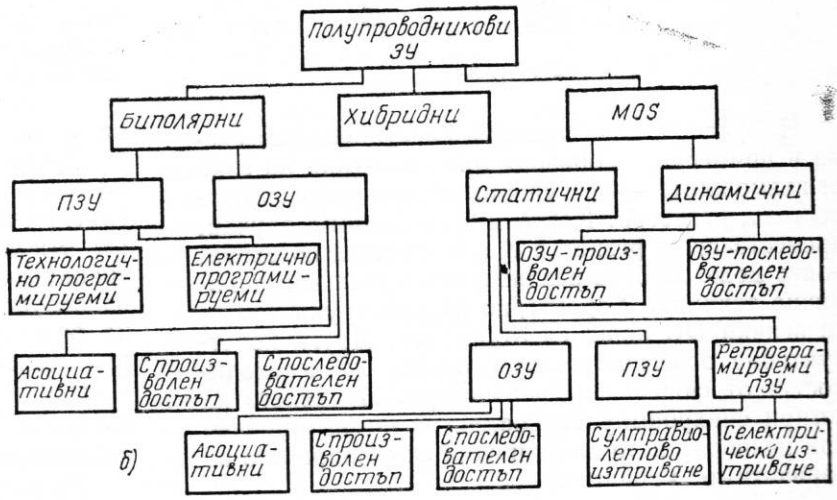
Независимо от възможните комбинации между тези признаци поради технологична или схемна нереализируемост броят на видовете ППЗУ е по-малък.

MOS паметите се отличават с голямо разнообразие на своите параметри и функционални възможности. Поради способността на MOS транзисторите да се самоизолират тези ЗУ имат по-висока степен на интеграция. С помощта на MOS технологията могат да бъдат получавани високоомни резистори върху сравнително малки площи, поради което MOS ЗУ консумират по-малко енергия. Същото може да бъде получено и при използването на динамична техника, тактувано захранване и др. С помощта на специална N-канална технология могат да бъдат изготвени MOS ЗУ, превъзхождащи аналогичните биполярни устройства по редица параметри и имащи при това сравнимо с тях бързодействие (време на достъп до 100 ns).

По отношение на цената предимството на MOS паметите е очевидно, тъй като те се изготвят с помощта на по-прост технологичен процес — обикновено само 4 фотолитографски операции и един дифузионен процес.

Икономичността на MOS технологията може да бъде съчетана с бързодействието на биполярните прибори при разработка на т. нар. „хибридни“ памети, в които матрицата от запомнящи елементи се изготвя с MOS транзистори, а дешифраторите и входно-изходните усилватели — с биполярни (фиг. 12.35б). През периода 1965—1970 г. този тип ЗУ бе смятан за най-перспективен, но впоследствие беше почти напълно изместен от биполярните ЗУ с пълна вътрешна дешифрация (имащи същия обем и бързодействие) и от динамични ЗУ, които са със значително по-висока степен на интегра-





Фиг. 12.35

ция и много по-евтини при сравнимо бързодействие.

12.5.2. Преглед на някои основни технологии за изготвяне на MOS ЗУ (фиг. 12.36)

В началото на гл. 12 са разгледани някои от основните технологични схеми на MOS технологията. Като едни от най-важните изделия MOS ЗУ са оказали и оказват съществено влияние върху тяхното развитие.

От 1968 година се разработват, експериментират и внедряват различни подобрения или нови технологии с цел да се постигнат:

— намалени размери на ЗУ;
— голямо бързодействие;
— ниски прагови напрежения;
— висока надеждност;
— малка консумирана мощност.

Тук ще бъдат разгледани предимствата и недостатъците им по отношение на възможностите, които предлагат за конструиране на ЗУ.

а. *Стандартна PMOS технология.* Първите MOS ИС, в това число и MOS ЗУ, бяха изготвени с помощта на P-канална MOS технология с метален (Al) гейт върху Si с ориентация <111>. Тази технология удовлетворява изискванията за реализиране на MOS памети, но не е лишена от някои съществени недостатъци:

— транзисторите имат високо прагово напрежение (3,5÷5 V), дължащо се на ориентацията на монокристала, на голямата работа на излитане (за алуминиев гейт) и на значителната дебелина на тънкия окис;

— запомнящата клетка (ЗК) и целият кристал имат много големи размери, а това не позволява да се изготвят статични MOS ЗУ с обем над 128 бита (при пълна вътрешна дешифрация) или над 256 бита без периферни схеми (табл. 12.4);

— бързодействието е малко, което се обяснява с голямата площ на гейта, големите капацитети на препокриване и малката подвижност на носителите. Допълнително затруднение е наличието на дълги метални шини.

Захранващите напрежения са високи, което прави ИС несъвместими с ТТЛ.

б. *NMOS технология.* По принцип технологията на N-каналните прибори не се различава съществено от P-каналните. Особеностите са свързани с повърхностната инверсия на подложката. Запушването на транзистора се постига със специална обработка на повърхността на пластината, водеща до изменение на праговото напрежение.

Предимствата на NMOS технологията са:

— голяма стръмност на характеристиките — резултат от 2—3 пъти по-голямата скорост на електроните в сравнение с тази на дупките (по-голямата стръмност на транзисторите позволява да се намалят размерите им или да се използува за повишаване на бързодействието);

— N-каналните прибори са съвместими с ТТЛ.

в. *Технология на самосъвместяващ се гейт:*

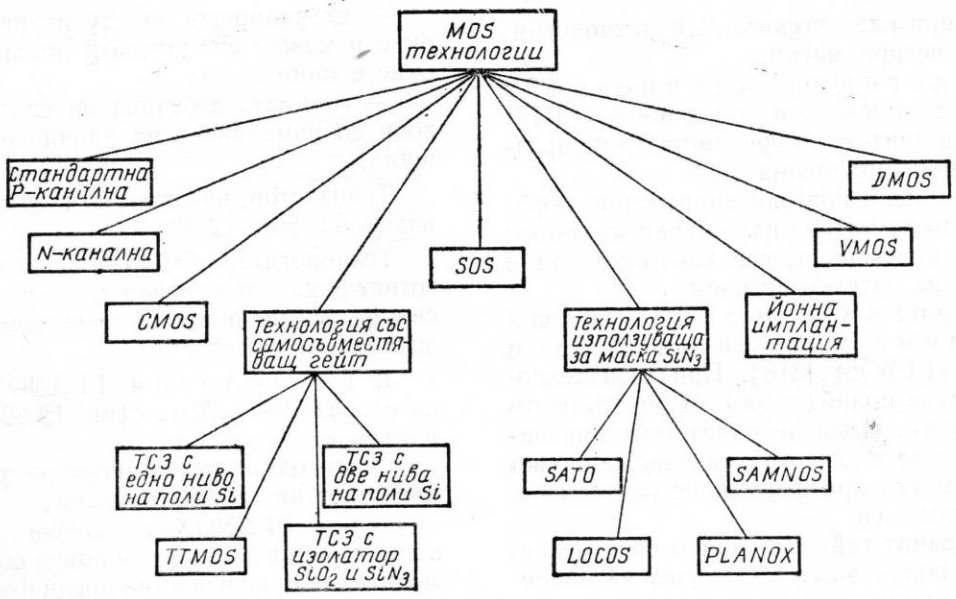
1. Технология на силициев гейт [314, 315, 316]. Основните характеристики на ЗУ могат значително да се подобрят, ако при изготвянето се използуват нископрагови транзистори със Si-самосъвместяващ се гейт. Тази технология днес е стандартна за много производители.

Вертикалната геометрия на такъв транзистор е показана на фиг. 12.37.

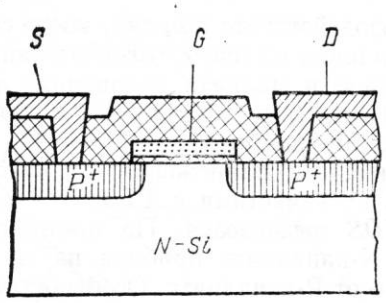
Предимства:

— тънкият окис е защитен по време на фотолитографията, което повишава стабилността на структурата, а оттам и рандемана;

— праговото напрежение се намалява до 2 V, тъй като разликата в работата на излитане между поликристалния силиций и монокристалния сили-



Фиг. 12.36



Фиг. 12.37

ций е малка; при това праговото напрежение на паразитния транзистор не се намалява и дава възможност да се използуват по-високи захранващи напрежения;

— страничната дифузия е пренебрежимо малка, защото активният (тънкият) окис нараства преди формирането на сорса и дрейна; освен това несъвпадението между първа и втора маска не се отразява върху структурата. В резултат на това паразитните капацитети силно намаляват, подобряват се динамичните характеристики, увеличава се бързодействието (1,5 пъти по-бързи от P-каналните);

— голямата проводимост на поликристалния силиций ($R_{\square}<100$ Ω/□) дава възможност да бъде използуван като допълнително „комутиращ“ слой;

— след дифузията за дрейн и сорс не се извършва окисление, като по този начин се избягва преразпределението на примесите и се запазват листовите съпротивления на същите между 15 и 50 Ω/□;

— гейтът може да бъде скрит в окиса, което дава възможност металните контакти да бъдат разположени по-близо до него. От друга страна, металните шини могат да препокриват гейта — постига се по-ефективна пасивация; всичко това води до намаляване на размерите на ЗК с около 20%;

— както и при класическата MOS технология, са необходими четири маски.

2. Технология на силициев гейт с изолатор окис и нитрид [317]. Тази технология притежава предимствата на предната със следните допълнения:

— малко по-ниски прагови напрежения поради използуването на нитрид като първи изолатор;

— по-добра надеждност, тъй като нитридът е добра преграда за натриевите йони.

3. Технология, използуваща трудно топими метали за гейтов електрод (TTMOS) [316]. При тази технология се използува молибден за гейт вместо поликристален силиций. Молибденовият гейт има висока температура на топене и може също да служи за дифузионна маска при формиране на транзистора. Предимствата са:

— молибденовият гейт има малко специфично съпротивление, получава се малък пад на напрежение върху превключващите шини и малка задръжка на схемата;

— производителите на ИС с молибденов гейт смятат, че тази технология е по-проста, отколкото тази с поликристален силиций;

— осигурява се възможност за получаване на транзистори с плуващ гейт (floating gate) чрез нанасяне на изолационен слой от силициев двуокис над трудно топимия молибден.

г. *Технологии, използуващи нитрид за маска*:

1. Технология SATO [318] (self-aligned thick oxide). Тази технология съчетава предимствата на самосъвместяващия се гейт с универсалността на класическата MOS технология, т.е. възможна е широка гама от материали за гейтови електроди и изолатор, при използуване на маските на класическата технология. Тя осигурява значително повишаване на бързодействието на схемите:

— SATO позволява да се намали височината на стъпката между дебелия и тънкия окис; това намалява брака от напукване на лака и води до повишаване на рандемана на схемите;

— избягват се високотемпературни процеси след формиране на тънкия окис под гейта;

— изборът на метал за гейта не е от значение;

— SATO е подходяща за използуване в съчетание с йонна имплантация, като в този случай обикновено се използува алуминиев гейт.

2. Технология LOCOS (LOCal Oxidation of Silicon). Чрез нея се постига пълно използуване на дебелия окис, поставен на подходящо място. Съчетава се предимството на самоцентриращия се гейт и нитридната маска.

Предимства:

— получава се по-добро очертаване на областите на дебелия окис;

— силицият, получен между областите от дебел окис, е от мезатип, а това гарантира плосък PN преход, намалява паразитния капацитет и увеличава пробивното напрежение на транзистора;

— стъпалността между активния и пасивния окис и между силициевата повърхност и дебелия окис е минимална;

— голямата дебелина на силициевия двуокис води до намаляване на капацитета на металните шини.

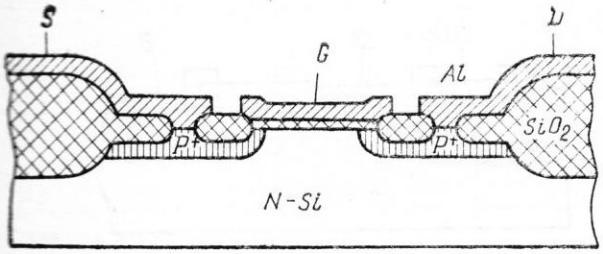
Транзистор, изготвен по тази технология, е показан на фиг. 12.38.

Технологията LOCOS — II, позволява да се изготвят N-канални транзистори, разделени помежду си с P-дифузионни области за намаляване на паразитния капацитет.

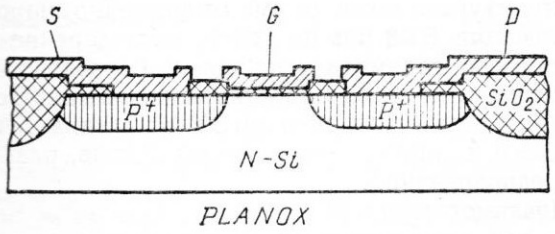
3. Технология PLANOX [322]. Обявена е през 1969—70 г. (фиг. 12.39). Предимствата ѝ са:

— по-голяма равнинност на релефа и непрекъснатост на металните шини;

— при PLANOX се запазва повърхностната концентрация на дифузионните области, тъй като защитният окис израства преди формиране на тези области, т.е. легиращите примеси не се преразпределят.

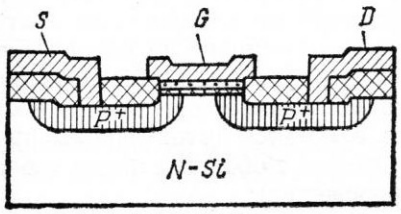


Фиг. 12.38



PLANOX

Фиг. 12.39



SAMNOS

Фиг. 12.40

4. Технология SAMNOS (Self—Aligned MNOS) [323]. Използването на едни и същи маски при технологиите MNOS и SAMNOS улеснява създаването на ИС. При тази технология най-напред се формира гейтовият диелектрик, чиято структура има вида ON (окиснитрид).

Предимствата на SAMNOS (фиг. 12.40) пред MNOS са:

— използуване на самоцентриращ се гейт — препокриването на гейта е равно на проникването на дифузията под гейтовия диелектрик или 2—3 пъти по-малко, отколкото при процеса MNOS; възможното отместване на втората маска не е от значение, следователно отношението b/L остава постоянно;

— осигуряване на равнинност на схемите — стъпалността между дебелия окис и гейтовия диелектрик е два пъти по-малка от тази при класическата MOS технология;

— праговото напрежение е намалено до 2 V.

д. *CMOS технология* [110]. Редът на операциите при тази технология е разгледан в гл. 12. Съчетаването на P и N-канални транзистори на един чип позволява да се строят MOS ИС с допълнителна симетрия.

Предимства:

— добри работни характеристики;

— много малка разсейвана мощност — консумира се енергия само в процеса на превключване; в статичен режим консумираната мощност е от порядъка на nW;

— захранването е от един източник;

— широк работен диапазон за захранващото напрежение и температурата на околната среда;

— голяма шумоустойчивост;

— приборите могат да имат много голямо бързодействие (за сметка на малката разсейвана мощност могат да се увеличат размерите на транзисторите, като се понижава тяхното съпротивление, а оттам се намалява и времето за презареждане на паразитните капацитети).

Недостатъци:

— малка степен на интеграция в сравнение с ИС с еднотипни транзистори (необходимост от формиране на специален „джоб“ с противоположна по отношение на подложката проводимост);

— за изготвяне на CMOS са необходими най-малко 6 фотолитографии.

е. *SOS технология* [324, 325]. Ефективни решения на проблемите от CMOS технологията дава SOS технологията. Същността ѝ се състои в епитаксиално израстване на тънък слой монокристален силиций върху подложка от сапфир (α-Al_2O_3) или шпинел ($MgAl_2O_4$). След ецване, което достига до подложката, се получават „островчета“ от силиций. По-нататък технологичният процес е аналогичен на този с монокристален силиций.

Предимства:

— много добра изолация между отделните прибори — няма възможност за утечка;

— провеждащите шини са разположени върху изолиращата подложка, т.е. няма паразитни капацитети, следователно бързодействието е много голямо (доближава се до бързодействието на биполярните схеми);

— капацитетът дрейн-подложка е силно намален, тъй като дифузията стига до подложката;

— силициевата N-област между дрейна и сорса има плаващ потенциал, ето защо няма ефект сорс-подложка и отпада необходимостта от подаване на напрежение на подложката;

— лесно се създават P и N-канални прибори върху един и същи чип;

— намалява се консумираната мощност — важно условие за устройствата, работещи с батерии.

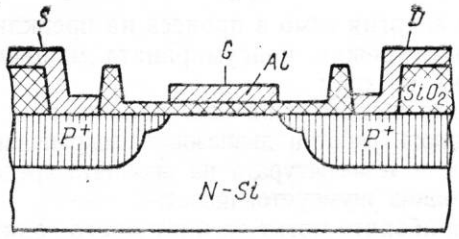
Като недостатък може да се отбележи, че приборите, получени по тази технология, имат твърде висока цена.

ж. *Йонна имплантация* [313]. Не е самостоятелна технология, а технологична операция, използването на която води до усъвършенстване на MOS ИС (фиг. 12.41). Този метод позволява да се премахне препокриването на дифузионните области от гейта и по такъв начин съществено да се намали паразитният капацитет ($C_{пар}$=0,01 pF за всеки 10 μm широчина на гейта). Чистотата на технологичния процес води до намаляване на утечките в PN преходите.

Йонната имплантация се използува за:

— изготвяне на транзистори с къс канал (2 μm);

— изготвяне на транзистори със самосъвместяващ се гейт;



Фиг. 12.41

— за направа на стопдифузия — увеличава се праговото и пробивното напрежение на дебелия окис;

— за изменение на праговото напрежение на транзисторите.

В зависимост от степента на легиране праговото напрежение на обикновен N-канален транзистор може да бъде намалено до необходимата стойност (1,5÷2 V). По-силно легиране се прилага за получаване на транзистори с вграден канал, които се използуват за товар в статичните ЗУ.

Възможността от широко вариране на праговото напрежение на ключовите транзистори (със слабо легиран канал) и на напрежението на отсечка на транзисторите с вграден канал позволява на конструкторите на ЗУ да намират оптимални стойности на тези напрежения, необходимо изискване за оразмеряване на логическата схема.

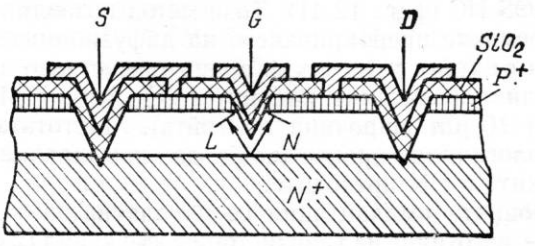
3. *V MOS технология* [325, 110]. Технологията с V-образен канал (фиг. 12.42) дава възможност за построяване на транзистори с къс канал, малък препокриващ капацитет, високо пробивно напрежение и голяма интеграция на елементите.

Тази технология е директно съвместима с V-образните биполярни схеми, което позволява едновременно изграждане на NPN биполярни транзистори и бързодействуващи P-канални MOST върху един и същи чип.

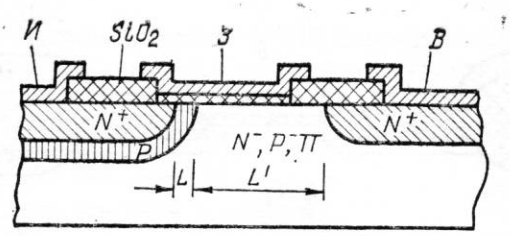
и. *D MOS технология* [110, 112, 113, 326]. Както V MOS технологията, така и D MOS позволява да се получат миниатюрни висококачествени транзистори без намаляване на геометричните им размери. При тази технология транзисторът се формира чрез последователна дифузия с акцепторни и донорни примеси в един и същи прозорец на сорса, в резултат на което се създава P-канал с дължина 0,4—2 μm.

За разлика от класическата MOS технология активната област между дрейна и сорса е съставена от две части:

— къса част L с модулируема инверсия (образува канала и определя бързодействието);



Фиг. 12.42



Фиг. 12.43

— по-дълга „дрейфова“ област (фиг. 12.43).

Структурата може да има относително широка метализация 5÷8 μm на гейта, благодарение на което освен голямото усилване и бързодействие се получават и високи работни напрежения. Това е най-добрата технология за ЗУ от гледна точка на степен на интеграция и бързодействие, разглеждани едновременно.

Предимства:

— пет пъти по-голямо бързодействие в сравнение с P-каналните прибори, вкл. работа в СВЧ обхват;

— голяма стръмност на характеристиките;

— възможност за задаване на праговото напрежение чрез регулиране на разпределението на примесите в канала, т.е. независимо от типа на подложката могат да се изготвят прибори, работещи както с обеднен (отрицателно прагово напрежение), така и с обогатен канал (положително прагово напрежение);

— докато при класическата MOS технология създаването на къс канал е свързано с увеличаване на паразитните капацитети, при D MOS тези капацитети са много малки (гейтът препокрива канала само от едната страна);

— металът на гейта служи не само за модулиране на проводимостта в канала, но и препокрива подложката — получават се прибори с високо пробивно напрежение;

— при D MOS почти не се наблюдава модулация на канала, водеща до намаляване на изходния импеданс и до намаляване на коефициента на усилване по мощност;

— за подложки могат да се използуват силициеви пластини от N, P или π-тип;

— D MOS осигурява възможност за лесно формиране на една подложка на биполярни и MOS транзистори.

Новите технологии подобриха характеристиките, надеждността и рандемана на MOS ИС, както и съвместимостта им с биполярните ИС (табл. 12.5).

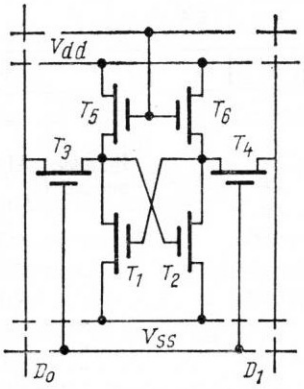
12.5.3. MOS оперативни запомнящи устройства

1. *Статични.* Статичен RAM се използува главно в малки системи, където не е оправдано влагането на допълнителни средства и време, необходими за проектиране на динамични RAM. Главни области на приложение за този вид ОЗУ са уредите за широко потребление и микропроцесорите.

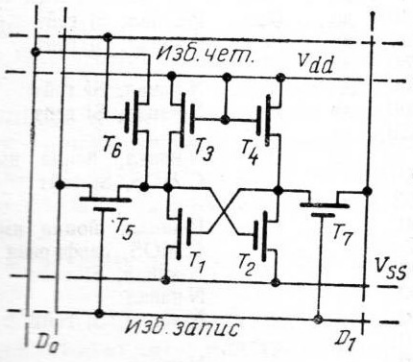
Таблица 12.5

Технология	Задръжка, ns	Работа на превключване, pt	Плътност: прибор, бр/mm²	Плътност: вентили, бр	Размер на кристала, mm
P-канал с метален гейт	80	450	150	50	7×7
P-канал със силициев гейт	15	145	270	90	6×6
N-канал със силициев гейт	15	45	285	95	6×6
N-канал със силициев гейт и обеднен товар	12	38	320	107	6×6
N-канал с полисилиций на две нива	10	35	525	175	6×6
CMOS със силициев гейт	10	0,5	220	45	5,5×5,5
V MOS, D MOS	5	20	600	225	
C MOS на сапфир	2—5	0,1	650	275	5×5

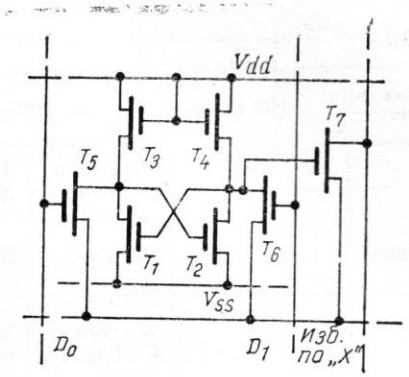
Запомнящата клетка на тези ОЗУ представлява тригер, към който обикновено са добавени два или повече транзистори (ключови, усилващи и др.) — от фиг. 12.44 до фиг. 12.51. Ще се спрем само на някои най-характерни особености на този вид MOS ОЗУ.



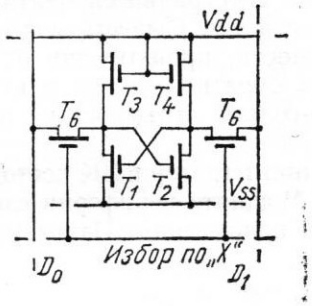
Фиг. 12.44



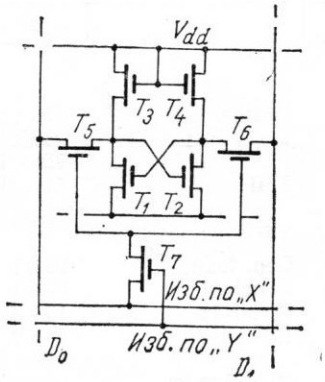
Фиг. 12.46



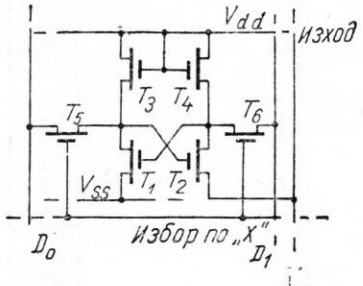
Фиг. 12.47



Фиг. 12.48



Фиг. 12.49



Фиг. 12.50

Таблица 12.6

Характеристика на приборите	1970 г.	1975 г.		1977 г.		1980 г.	
Тип ЗУ	256 бита, статична	1024 бита, статична	4096 бита, динамична	4096 бита, статична	16384 бита, динамична	16384 бита, статична	65К бита, динамична
Бързодействие	1 μs	150 ns	250 ns	150 ns	200 ns	100 ns	200 ns
Технология	P-канал	N-канал C MOS	N-канал едно ниво поли— Si C MOS	N-канал две нива поли—Si		N-канал V MOS D MOS C MOS	N-канал V MOS D MOS CCD

а. Статичните ЗК съдържат по-голям брой елементи от динамичните (най-малко 6). Топологичното проектиране е затруднено, тъй като ЗК има по-голям брой интегрални елементи, връзки, контактни отвори и т.н. Съществуват и някои специфични особености, произтичащи от наличието на положителна обратна връзка в клетката, които изискват по-голяма стръмност на някои от транзисторите.

б. Статичният тригер в ЗК постоянно консумира енергия. Мощните периферни схеми също увеличават тази консумация. Използуването на тактувано-гейтово напрежение (V_{GG} на фиг. 12.45) или намалена стръмност на T_5 и T_6 води до допълнително увеличаване на размерите на ЗК. Това се дължи на по-бавните периферни схеми, както и на по-големите паразитни капацитети.

в. Работата с тези ЗУ е много опростена — без синхронизирани тактови сигнали и без регенерация на данните.

г. Липсата на високоволтови тактови сигнали прави много лесна съвместимостта по вход и изход на устройството с ТТЛ.

В табл. 12.7 са показани типовете и основните

Таблица 12.7

Тип	Фирма	Организация	Време на достъп, μs	Време на цикъл, μs	Захранващо напрежение, V	Консумирана мощност, mW	Съвместимост с ТТЛ	Корпус (брой изводи)	Технология
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
				без вътрешна дешифрация					
MK 4001 P	Mostek	256×1	0,15	0,07	—18	250	не		P-канал, Al гейт
TM 4003	Texas Inst	256×1	0,15		—18	200	не		високо $U_т$
TM 4008	„ „ „	256×1	0,12		—18	200	не		„
1495	AMI	511×1	0,15	0,35	+5, —10	300	не		„
				с вътрешна дешифрация					
RA—6—4803	Gen. Instr.	32×1	1,5	1,5		90			„
3530	Fairchild	64×1		3,5	—13,—27	500	не	16	„
MC 1170	Motorola	16×4	0,5	1,2	—30	250	не		„
EA 1400	El. Array	64×2	1	1	—26	135	не		„
1605	AMI	128×1	1	1,4	+5,—12	350	по изход		„
MK 4002 P	Mostek	64×4	1	1	+5,—12	350			„
MK 4007 P	„ „ „	256×1	1	1	+5,—9			16	P-канал, йонна имплантация
C 6550	Solitron	64×4	1	1	+5,—5,—9		да		
1101	Intel	256×1	1,5	1,5	+5,—9	400	да	16	P-канал, Si гейт
11011	Intel	256×1	1	1	+5,—9	400	да	16	P-канал, Si гейт
3532	Fairchild	512×1	0,55		+5,—3	230	да	16	„
2602	Signetics	1024×1	1(0,5)		+5	200	да	16	N-канал, Si гейт
IM 7552	Intersil	1024×1	1,(0,5)		+5	2200	да	16	N-канал, Si гейт
2102	Intel	1024×1	1 (0,5)		+5	350	да	16	„
4102	Moster	1024×1	0,45		+5		да	16	N-канал, йонна имплантация
IM 6508 MDE	INL	1024×1	0,46	0,3	0;+5	0,5			C MOS, Si гейт
IM 6508 1/DM	INL	1024×1	0,2	0,165	0;+5	0,05			„
S 4006	AMI	1024×1	0,4	0,65	+12,+5	450			P-канал, йонна имплантация
MWS 5501	RCA	1024×1	0,09	0,09	0,+10	5,2			C MOS, сапфирена подложка
IM 7003	INL	2048×1	0,06	0,18	+3,+15	300			N-канал, Si гейт
480 4C	SMI	1024×4	0,35	0,35	0,+5	500			N-канал
P 2114—3	ITL	1024×4	0,3	0,3	0,+5	710			N-канал, Si гейт
C 2114—2	ILL	1024×4	0,2	0,2	0,+5	710			„
4104 ACP	SMI	1024×4	0,2	0,35	+5,+12	650			N-канал

параметри на някои от статичните MOS ОЗУ, разработени до момента. От нея ясно се вижда развитието на тези устройства — от бавните с обем 32÷64 бита и несъвместими с ТТЛ ИС до високоинтегрираните с голямо бързодействие и пълна ТТЛ съвместимост памети.

2. *Динамични.* Работата на динамичните ОЗУ е свързана с въвеждането и съхраняването на електрически заряди в собствени или специално създадени капацитети. Това определя и някои особености на този вид памети:

а. В резултат на неизбежните утечки съхраняващият се в капацитетите заряд намалява, което в крайна сметка води до загуба на информацията. По тази причина динамичните MOS ОЗУ се нуждаят от периодична регенерация на данните, което удължава цикъла и затруднява работата с този вид устройства. На фиг. 12.63 е показана блокова схема на устройството, с което се осъществява регенерацията на ЗК.

б. Динамичните ЗК съдържат много малко транзистори — от 1 до 4, които при това могат да бъдат с минимални размери. В резултат на това степента на интеграция силно нараства.

в. Динамичните ОЗУ имат много по-голямо бързодействие от статичните — дължи се главно на по-бързите периферни схеми и по-малкия брой елементи в ЗК.

г. При динамичните ОЗУ енергия се консумира главно при активна работа — запис или четене. В пасивен режим тази енергия е нищожна.

д. За осигуряване на работоспособността и необходимото бързодействие динамичните памети се нуждаят от високи по амплитуда синхронизирани тактови сигнали. Това прави много трудна пълната им съвместимост с биполярните ИС.

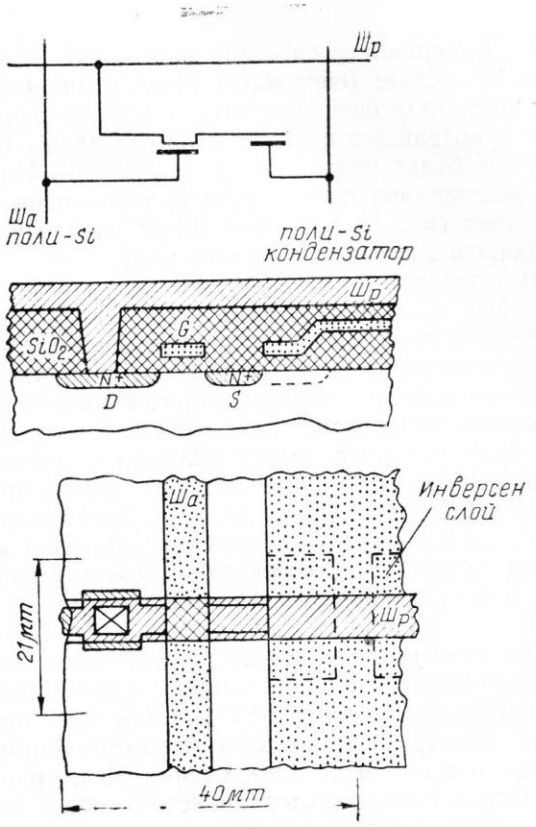
На фиг. 12.52*а*, 12.53*а*, 12.54*а*, 12.55*а*, 12.56*а*, 12,57*а*. 12,58*а* са показани няколко от основните типове динамични ЗК, а на фиг. 12.52*б*, 12.53*б*, 12.54*б*, 12.55*б*, 12.56*б*, 12.57*б*, 12.58*б* — техните примерни топологии.

Докато при клетките с 4 и 3 транзистора информацията се запомня и съхранява от паразитните капацитети, при дву- и еднотранзисторните клетки е необходимо допълнително изготвяне на кондензатор.

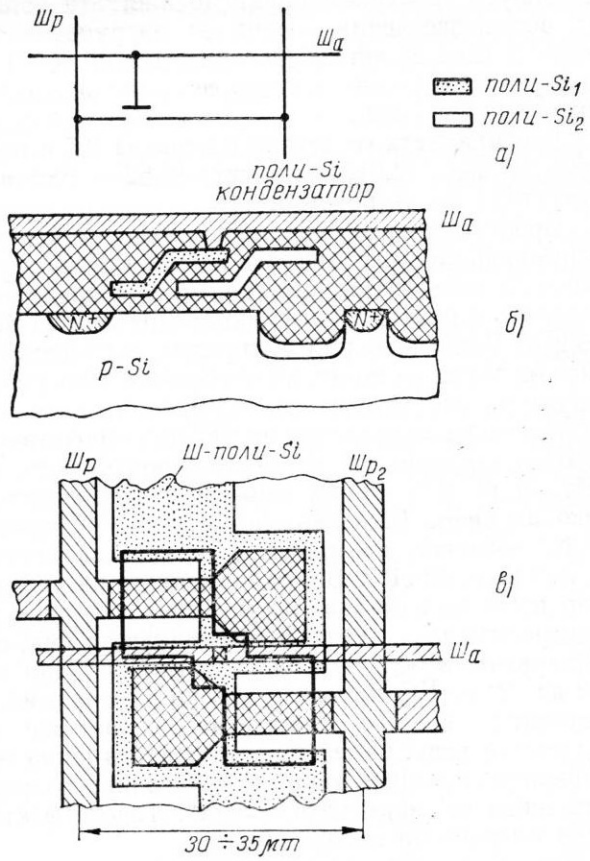
Тук е интересно да се покажат две модифицирани N-канални технологии (със силициев гейт) за изготвяне на еднотранзисторни клетки. Използуват се при някои 4К и всички 16К памети.

TM4070 [113, 326, 327] е направен по подобрената SLP (Single Layer Polisilicon) технология, На фиг. 12.59 са показани електрическата схема. вертикалната и хоризонталната геометрия на ЗК. При нея транзисторът и кондензаторът са поставени един до друг. Един слой от поликристалния силиций служи за връзка и електрод на кондензатора.

Фирмата Intel в своя прибор 2116 [326, 115] използува DLP (Double Layer Polisilicon) технология (фиг. 12.60*а*,*б*,*в*). Характерното при нея е, че кондензаторът стои над транзистора и затова е необходима втора шина от поликристален сили-



Фиг. 12.59



Фиг. 12.60

ций. Всъщност се спестява място, тъй като втората N^+ област (сорсовата) става излишна.

Повечето от специалистите смятат, че съвременните еднотранзисторни ЗК с площ 0,0002—0,0033 mm² ще бъдат неподходящи за 65К ЗУ. Но това не представлява препятствие за технологията със силициев гейт, която може да се използува при приборите със зарядна връзка CCD.

В литературата [116] е посочена разработка на 65К ОЗУ (Continously Charge-Coupled Random—Access Memory C³ RAM) с произволен достъп.

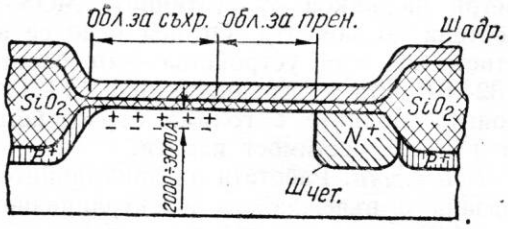
Предимството на ЗУ от този тип е свързано не толкова с простата технология, топологията и минималните размери на елементите, а и с ограничения брой контакти между силиция и металните слоеве. Производителите наричат новия прибор „безтранзисторен елемент на ЗУ с произволен достъп". Информацията в него се съхранява в областта, формирана с помощта на йонна имплантация. В резултат на това размерите на ЗК не надминават размерите на един гейт (150 μm). Това е четири пъти по-малко от ЗК на 16К-битовата ЗУ с двоен поликристален силиций и е приемливо за реализирането на 65К ЗУ. Дори и при такива малки размери на клетката бързодействието се запазва и е както на обикновения MOS транзистор. Освен това със съчетаването в обща затворена (гейтова) област съхраняването и предаването на информацията се премахва необходимостта от формиране на две отделни затворени области. Последното не само че опростява структурата на ЗК, но и позволява за съхранение на заряда да се използува по-голяма площ. До клетката остават да водят две шини — една за натрупване или запис и една за четене (всички сегашни RAM използуват три шини), с което се прави значителна икономия на площ.

Вертикалната геометрия на такава ЗК е показана на фиг. 12.61, а на фиг. 12.62 — тестовата структура на устройството.

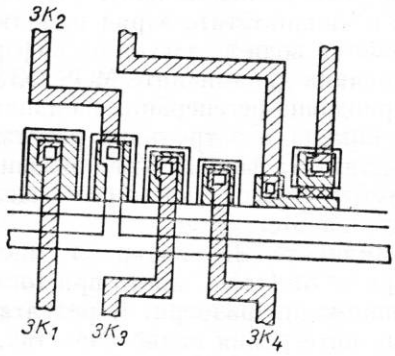
Простотата на ЗК е постигната благодарение на формиране под част от гейта на области за съхранение на заряда. По-ниското ниво за съхранение е получено с помощта на йонно внедряване на примеси от P-тип (300 nm) в силиция, а по-високото ниво от N-тип на по-малка дълбочина. При такава структура след записа на информацията на едно от нивата на съхранение за нейното прочитане е необходимо само да се снеме напрежението на гейта и по този начин зарядът се премества от ниво на ниво. Този движещ се заряд се приема от N^+-областта, съединена с шината за четене.

За запис на „1" в ЗК напрежението на разрядната шина се намалява до 0. Това позволява на електроните да „изтекат" в потенциалната яма, съществуваща в областта на съхраняване. При запис на „0" на $Ш_р$ се подава високо напрежение, в резултат на което в областта на съхраняване заряд не настъпва. Освен това на другата шина потенциалът се изменя така, че да изолира разрядната шина от „зарядната област". Това е фактически операцията запомняне.

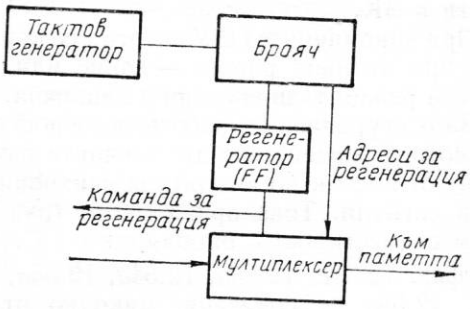
Дори при нулев потенциал на гейта (р е ж и м н а з а п о м н я н е) под него се формира потен-



Фиг. 12.61



Фиг. 12.62



Фиг. 12.63

циална яма за съхраняване на заряда. При подаване на напрежение на гейта потенциалът в предаващата област става по-положителен от потенциала в областта на съхранение, което на практика означава връзка между нея и разрядната шина. Всички налични заряди в областта „отиват" в шината и се прочитат.

Схемата на фиг. 12.63 показва каква допълнителна електроника е необходима за случая на динамичните памети. Тази схема е предназначена за възстановяване с равномерно разпределени цикли. Тактовият генератор включва брояча, чиито последни места са възстановителните адреси. Броят на тези места се получава от двоичния логаритъм от броя на адресите в паметта. В зависимост от вида на операцията (четене, запис или възстановяване) мултиплексорът включва адресите за възстановяване или съответния работен адрес.

Ако е необходим възстановителен цикъл, броячът включва регенератор (*FF*), който изработва команда. Това е необходимо, за да не съвпаднат цикълът на записване с цикъла на възстановяване. Командата включва мултиплексора и спира запис-

Таблица 12.8

Тип	Фирма	Организация	Брой тактове	Захранващо напрежение, V	Време на достъп, ns	Цикъл на четене, ns	Цикъл за запис, ns	Пасивна мощност, mW	Активна мощност, mW	Съвместимост с ТТЛ	ЗЗК брой транзистори	Корпус	Технология
1103	Intel	1024	2	16,19	300	480	580	60	400	не	3	18	P-канал, Si гейт
1103-1	„ „	1024×1	2	19,22	150	340	340	76	500	не	3	18	„ „
1103-A	„ „	1024×1	1	16,19	205	408	580	60	400	не	3	18	„ „
AMS 6002	AMS	1024×1	2	7,20	150	250	250	20	180	не	4	22	P-канал, Al гейт
MK 4006	Mostek	1024×1		5,—12	400	400	650	35	450	да	3	16	„ „
MM 5260	Nat Sem	1024×1	1	5,—22	350	450	600	75	400	да	3	16	P-канал, Si гейт
TMS 4020	TI	1024×2		2,—16	320	640	640		400	не	3	22	P-канал, Al гейт
TMS 4063	TI	1024×1	1		130	200	200			не	4	18	„ „
HM 3503	Hithachi	1024×1		19,22	130	300	340			не	3	18	P-канал
HMS 6004	AMS	4096×1	3	—15,8	300	650	650	125	250	да	3	22	P-канал, Al гейт
EA 1504	El. Ar	4096×1	1	—5,12	300	500	500	125	250	да	1	22	N-канал, Si гейт
2107 A	Intel	4096×1	1		300	500	650	40	400	да	3	22	„ „
MK 4096	Mostek	4096×1	2	—12,12	300	400	400	21	350	да	1	16	„ „
660516	AMI	4096×1	1	—5,12	230	350	270	10	250	да	3	22	N-канал, Si гейт
2604	Signetics	4096×1	1	—5,12	300	500	500	2	290	да	3	12	„ „
SMCN 4412	Standart	4096×1	3	—2,12	180	340	340		300	да	3	22	„ „
TMS 4030	TI	4096×1	1	—3,5	300	470	470	2	400	да	1	22	„ „
IM 700810	INL	8192×1		5,12	150	300	300		400	да			„ „
MK 4116P-2	INL	16384×1		5,12	150	375	375		462	да			N-канал, Si гейт
MB 8116E	FCAY	16384×1		5,12	200	375	375		462	да			„ „
C 2116	INL	16384×1		5,12	250	375	375		900	да			„ „
TM 4070-1	TI	16384×1		5,12	350	500	500		900	да	18	18	„ „
MP 416	NECM	16384×1		5,12	300	500	500		720	да			„ „

ването или четенето. След завършване на процеса възстановяване регенераторът превключва и дава възможност за изпълнение на останалите операции.

В табл. 12.8 са показани някои от основните типове динамични MOS ЗУ. От таблицата се вижда, че интеграционната плътност на динамичните RAM памети е един цикъл пред статичните. Появяват се 4K битови статични, 16K битови динамични и 32K битови ROM.

Главният проблем между производители и потребители на 4K RAM се явява корпусът и броят на изводите. Най-популярният тип корпуси в момента е стандартният 22-изводен dual-in-line корпус (DIP). Тяхната популярност се състои в това, че към тези прибори може да бъде организиран пряк достъп по 12-разредни адресни шини. Налице са обаче редица неудобства и тенденцията е към 16-изводните корпуси (DIP). 22-изводният корпус е неподходящ за повечето автоматични уреди и големи ОЗУ, тъй като неговият по-голям размер (56% по-голям от 16-изводния и 45% от 18-изводния) възпрепятствува по-голямата плътност на приборите върху платките. От друга страна, 16-изводните корпуси изискват особен начин на разпределение на изводите и допълнително мултиплексиране на 12-те адресни сигнала по 6 адресни шини. В замяна на това се получава по-голяма плътност и повишаване на информационния капацитет с 60%.

Техниката на едновременното изпълнение на няколко команди (12-те адреса върху 6 извода) беше постепенно възприета от всички производители и сега те произвеждат 16-изводни 4K RAM.

Задачата за намаляване на размерите на корпуса може да бъде решена и с 18-изводния корпус. Той изисква допълнителен мултиплексиращ чип, тъй като 12-те адресни линии са запазени.

Други типове MOS ОЗУ

Съществуват разновидности на MOS ОЗУ, някои от които са от интерес за практиката. Тук са разгледани следните три възможности:

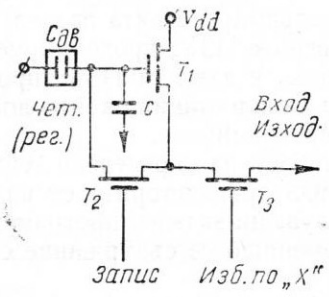
а) първи тип — чрез използуване на т. нар. „зарядна помпа“;

б) втори тип — чрез използуване на т. нар. „двоичен“ капацитет, чиято стойност силно зависи от приложеното напрежение;

в) трети тип — чрез използуване на ЗК от типа, показан на фиг. 12.52*а*, но с някои конструктивни и схемни особености.

ЗК на първите два типа са показани на фиг. 12.64*а,б* и фиг. 12.65. Особености на тези видове MOS ОЗУ:

— както при динамичните ОЗУ и тук информацията се съхранява върху капацитети; регенерацията обаче е „планарна“, т.е. всички клетки се регенерират едновременно, и то по време на



Фиг. 12.65

самото четене или запис; това опростява работата с този вид ОЗУ и ги прави близки до статичните;

— по брой на елементите в ЗК те са по-близки до статичните ОЗУ, което ограничава степента на интеграция до 2К;

— консумираната енергия е много малка, само с преходните процеси за режим на четене, запис или регенерация;

— при използуването на динамична периферия бързодействието на квазистатичните ОЗУ е равно или по-голямо от това на динамичните;

— по отношение на съвместимостта с ТТЛ проблемите са същите както при динамичните MOS ОЗУ.

За третия тип е характерно изменението на конструктивните параметри на транзисторите от ЗК. Съотношението между ключовите транзистори T_3, T_4 и транзисторите T_1, T_2, както и стойността на напрежението, подавано на адресната шина „X", са избрани така, че при регенерация T_1—T_4 образуват статичен тригер.

12.5.4. MOS постоянни запомнящи устройства (MOSПЗУ) — ROM

ПЗУ ще наричаме устройствата, в които не се предвижда изменение на информацията по време на изпълнение на определен вид задачи. В зависимост от възможността за изтриване и презапис ПЗУ могат да се разделят на две групи:

а. *С неизменящо се съдържание.* Това са фабрично програмирани ROM памети най-често по специален проект на клиента, с помощта на който се изготвят фотошаблоните. Характеризират се с много ниска цена, голямо бързодействие и постоянен достъп на данните. ЗК, а оттам и цялото ЗУ са максимално опростени и се достига голяма плътност на отделните елементи. На фиг. 12.66*а* е показана електрическата схема на част от запомнящата матрица, а на фиг. 12.66*б* — нейната топология. При наличие на транзистор между „X" и „Y" шини се съхранява „1", при отсъствие — на „0".

По-универсални са ПЗУ, програмирани от потребителя в експлоатационни условия (т. нар. полупостоянни ЗУ PROM), но те са само биполярни.

ПЗУ се използуват за съхраняване на неизменящи се алгоритми, справочни таблици, таблици на истинност и др.

б. *ПЗУ с изменящо се съдържание — програмируеми RMM* (*Read Mostly Memories*). Те се доставят без запис (бели полета); върху тях клиентът сам програмира своята задача. Различават се от обикновените ПЗУ, програмируеми в процеса на изготвяне, и даже от ПЗУ, програмируеми в процеса на експлоатация, които допускат само еднократно програмиране.

В тези прибори на определени гейтове на матрицата на MOS транзисторите се пази набор от заряди, образуващи зададен програмен код (всички ПЗУ с изменящо се съдържание са MOS прибори).

Такива ЗУ се програмират и изтриват, като се подават съответствуващите сигнали на външните контакти на корпуса. С помощта на такава процедура подобен прибор може да се програмира многократно.

Сега се произвеждат два типа ПЗУ с изменящо се съдържание:

1. ПЗУ с изтриване на информацията с ултравиолетова светлина, които често се наричат електрически програмируеми ПЗУ — ЕППЗУ (EPROM) [117]. Те бяха пуснати през 1970 г. на основата на технологията с лавинно-инжекционни MOS транзистори с плуващ гейт. За изтриване на съдържащата се в тях информация трябва да се облъчат с определена доза ултравиолетова светлина. Светлината постъпва в прибора през прозорче на корпуса и предизвиква рекомбинация на дупки и електрони в областта непосредствено под гейта, водеща до изтриване на натрупания заряд.

Недостатък на EPROM е необходимостта да се използува ултравиолетова светлина за изтриване. Процесът е достатъчно труден и неприемлив в случаи, когато е необходимо бързо обновяване на паметта. За такива системи потребителят е длъжен да използува прибори с електрическо изтриване.

2. ПЗУ с електрическо изменение на съдържанието — ЕИПЗУ (EAROM) [313, 330]. Тези памети са подобни на EPROM, но за изтриването на данните се използуват електрически сигнали ($\sim$30 V). От друга страна, тази памет може да се разглежда като бавен RAM, тъй като системата може електрически да чете и пише (EAROM с MNOS транзистор може да съхранява информацията и след изключване на захранването).

Удобство при тези ЗУ е възможността както за пълно, така и за частично (селективно) изтриване на съдържанието. За пълното изтриване операторът подава управляващ импулс на всички адресни шини. При селективното изтриване такъв имулс се подава само на определени шини — необходима е по-сложна апаратура.

MNOS — EAROM имат по-малко бързодействие. Благодарение на практически неограниченото време на запомняне на информацията те намират все по-голямо приложение в спомагателните памети, където са необходими енергонезависими устройства, в програмируемите калкулатори, в блоковете за настройка на телевизионни приемници, в ЧМ радиоприемници, в любителските радиостанции, в търговията и др. Използуването им е възможно до 10^5—10^6 цикъла.

EAROM на лавинно-инжекционен MOS транзистор с двоен диелектрик [109, 337] са най-добри от гледна точка на изтриване на съдържанието. В тях се съчетават бързодействието на приборите с ултравиолетово изтриване и простотата на програмиране, свойствена за нитридните прибори.

На фиг. 12.67*а* е показана електрическата схема на ЗК с лавинноинжекционен транзистор, на фиг. 12.67*б* — нейната топология.

В табл. 12.9 са показани най-важните характеристики на основните типове ROM памети.

Таблица 12.9

Тип	Производител	Организация	Време на избор при четене, μs	Време на програмиране, s	Метод на изтриване	Технология
1702	Intel	265×8	0,5—1,0	30—100	ултравиолетово	P-канал, Si гейт
2704	„	1024×4	0,4—1,0	30—100	„	N-канал, Si гейт
2708	„	1024×4	0,4—1,0	30—100	„	„ „
2716	„	1024×16	0,4—1,0	30—100	„	„ „
7051	Nitron	1024×1	2—5	0,1—0,5	електрическо	MNOS
ER 2400	GIC	1024×4	2	0,1—0,2	„	MNOS
ER 3400	„	1024×4	2	0,1	„	MNOS
ER 2800	„	8192×1	2	0,1	„	MNOS
μPD 454	NEC	256×8	0,8 —1,0	0,8—1,0	„	N MOS с двоен диелектрик
μPD 458	NEC	1024×8	0,4 —1,0	0,8—1,0	„	„ „
РОЗ-9332 А	GIC	4096×8	0,85—1,0	—	—	N-канал, йонна имплантация, програмиране с фотошаблона
ТМ 4732	TL	4096×8	0,45—1,0	—	—	N-канал, програмиране с фотошаблона

12.5.5. ЗУ с произволен и последователен достъп

В зависимост от начина за избиране на клетките от паметта ППЗУ се делят на:

а. *ППЗУ с произволен достъп*. При тях начинът и времето за избиране на коя да е клетка от паметта са едни и същи независимо от това къде се намира. Този тип ЗУ имат най-малко време на достъп. Всички досега разгледани ЗК са от този тип.

б. *ППЗУ с последователен достъп*. Изборът на дадена клетка може да се получи само в строго определен ред и трябва да се започне от една точка. Данните от клетката не може да се получат, докато не бъдат обходени всички клетки, разположени между началната точка и нея.

ЗУ с последователен достъп се използуват в някои типове периферни устройства и калкулаторни схеми и представляват значителна част от общата промишлена продукция на ППЗУ. Такива ЗУ се произвеждат и във вид на модули (всеки модул съдържа 2÷32 кристала × 128 бита). С четири такива модула лесно се получава разширение на паметта до 16 384 бита.

в. *Асоциативни ЗУ* [108]. При тях ЗК се избира по съдържание. Използуват се в случаите, когато се налага да се търси необходимата информация в големи масиви от данни. Едновременното „запитване“ на голям брой клетки (при четене) се реализира достатъчно просто. В ЗУ с организация по дума всеки запомнящ елемент се съединява с четящата шина чрез една логическа схема ИЛИ.

При сравняване на кода в „запитваната“ ЗК с еталонен, записан в регистъра „за признак“, лесно се забелязва несъответствието в един единствен разред. Адресът на клетката, който съдържа дума, съвпадаща с еталона, постъпва в специален регистър.

За формирането на сигналите за съвпадение не се изисква допълнителна схема. Това осигурява ниска цена на ЗЕ, опростяване на схемата за управление и намаляване броя на входовете.

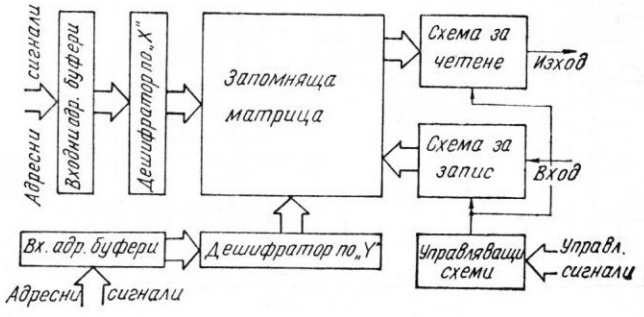
В [337] е описано подробно асоциативно ЗУ с организация 256×16, цикъл на четене (запис 105 ns и време за избор 400 ns). На фиг. 12.68*а* е дадена ЗК на устройството, а на фиг. 12.68*б* — нейната примерна топология.

Предимство на устройствата от този тип е голямата им шумоустойчивост. Това предполага, че през следващите години те ще намерят значително по-широко използуване в състава на ЦЕИМ, сортиращите ЗУ, в различните пускови системи и др.

12.5.6. Устройство на статичното MOS ОЗУ

На фиг. 12.69 е показана блоковата схема на статично MOS ОЗУ с пълна вътрешна дешифрация на адресните сигнали. При използуване на динамична периферия към управляващите сигнали трябва да се добавят и тактовите, а действието на управляващата схема се разпростира и върху дешифраторната част.

На фиг. 12.69 могат да се отделят три основни блока — адресна част, запомняща матрица и входно-изходна схема, включваща схемите за четене, запис и управление. При подаването на определена комбинация от адресни сигнали с помощта на дешифраторите по „*X*“ и „*Y*“ се избират една или повече ЗК (в зависимост от това, дали се чете от



Фиг. 12.69

един или от повече битове). При избирането на ЗК тя се свързва със съответните цифрови шини. По тях се предават данните, усилени от съответния усилвател за повишаване на бързодействието. Всички останали неизбрани ЗК са изолирани от тези цифрови шини.

Запомнящата матрица се състои от ЗК, цифрови шини, шини за избор на ЗК и някои други елементи. Основният елемент е ЗК. Изискванията към нея са следните:

а) минимални размери, тъй като размерите на ЗК определят размерите на кристала, а оттам и крайния рандеман; зависимостта на рандемана от размерите на кристала и някои други фактори е показана със следната зависимост:

$$y = \frac{1}{(1+DA)^n} \cdot \frac{\pi (r - \sqrt{A})^2}{A}, \qquad (12.51)$$

където y са годните чипове върху пластината;

D е плътността на дефектите във фотомаските;

A — площта на чипа;

n — броят на фотолитографските операции, извършени с един комплект фотомаски;

r — радиусът на силициевата пластина;

б) минимална консумация на енергия;

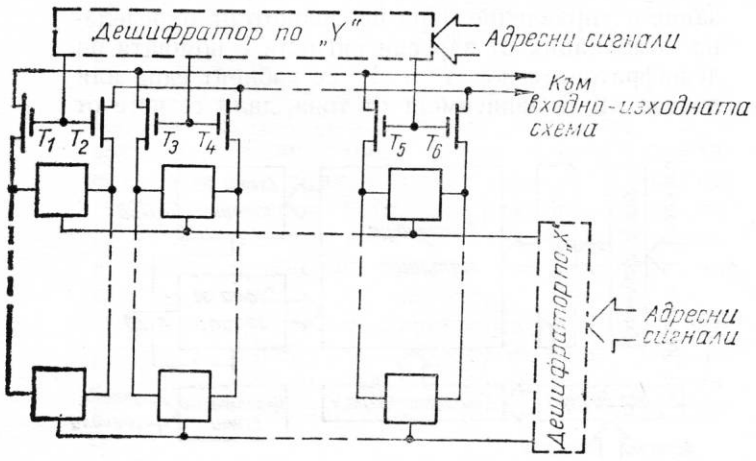
в) максимално бързодействие.

От показаните различни варианти най-интересните са тези на фиг. 12.51 и 12.50, намерили най-широко приложение в статичните MOS ОЗУ.

Първият вариант се използува главно в паметите с външна (биполярна) дешифрация, а вторият — във всички съвременни MOS ОЗУ с пълна вътрешна дешифрация. Тази клетка има минимални размери, което напълно компенсира трудностите, свързани с осигуряването на достатъчна товароспособност.

На фиг. 12.70 е показана запомнящата матрица, организирана от ЗК и показана на фиг. 12.50. На фиг. 12.71 е дадена примерната топологична схема на част от запомнящата матрица.

Дешифраторът представлява комбинационна схема. В зависимост от подадената комбинация входни (адресни) сигнали тази схема осъществява



Фиг. 12.70

избора на един от своите изходи и получаването на сигнал от него (в случая логическа „1").

Изискванията към дешифраторите на статичните MOS ОЗУ са следните:

а. Максимално бързодействие. Закъснението в дешифраторите е около 30—40% от времето на достъп, тъй като техните изходи (особено в „X" направление) са натоварени със значителни паразитни капацитети.

б. Минимални размери. В съвременните MOS ОЗУ дешифраторите и другите периферни схеми заемат 20—30% от активната площ на чипа. Всяко намаляване на тази площ води до повишаване на рандемана.

в. Минимална консумативна мощност. Въпреки че в периферните схеми са съсредоточени само около 20—30% от общия брой транзистори, тези схеми консумират около 50% от общата мощност. Това се дължи на мощните управляващи вериги, които се използуват за преразреждането на значителните паразитни капацитети.

При наличието на достатъчни по амплитуда адресни сигнали входните адресни буфери представляват статични MOS инвертори. Тези буфери инвертират адресните сигнали и намаляват общия брой на входовете на ИС. При наличието на много ниски по амплитуда адресни сигнали (например от ТТЛ) адресните буфери се усложняват извънредно много.

На фиг. 12.72*а* е показана електрическата схема на входен буфер, състоящ се от два инвертора, а на фиг. 12.72*б* — примерната му топология.

В статичните MOS ОЗУ се използуват два основни типа дешифраторни схеми, показани на фиг. 12.73 и 12.74*а*.

Показаният на фиг. 12.73 дешифратор се характеризира с малка консумирана мощност, малък брой транзистори (в сравнение с тази от фиг. 12.74*а*) и по-малко бързодействие. Включването на товарни транзистори във всеки възел (подобно на T_{21}) подобрява бързодействието, но затруднява проектирането и увеличава броя на елементите. На изхода на дешифратора са поставени мощни буферни стъпала, инвертиращи изходните сигнали и осигуряващи достатъчно бързодействие.

Дешифраторът от фиг. 12.74*а* има по-голям брой елементи и по-голяма консумация, но в същото време е и по-бърз.

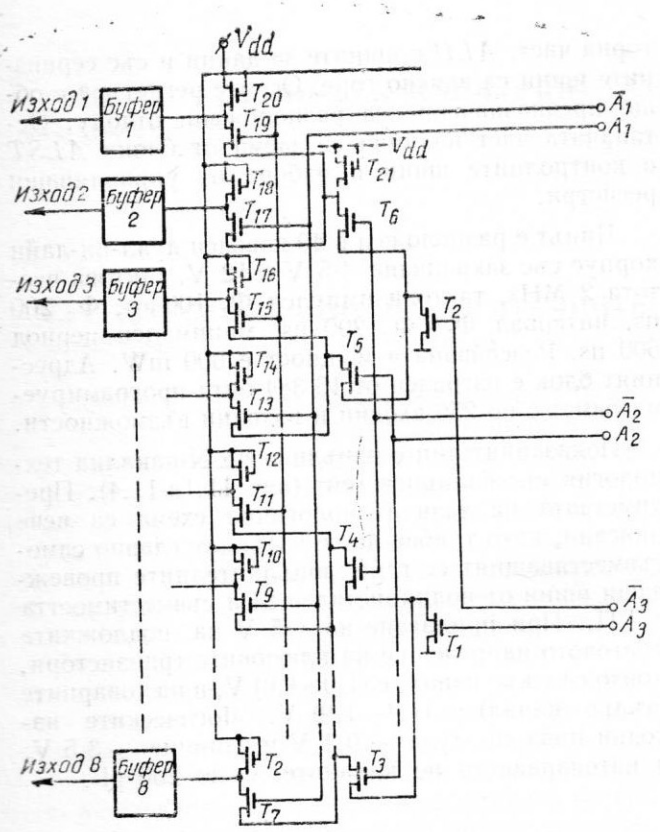
На фиг. 12.74*б* е показана примерната му топология, където изходните буфери представляват обикновени „пушпулни" стъпала.

Ролята на входно-изходната схема е да осъществи връзката между запомнящата матрица и външните устройства. Тази връзка има две страни:

а) осигуряване на необходимите режими на работа;

б) осигуряване на достатъчна товароспособност.

ППЗУ имат два основни режима на работа — активен и пасивен. При пасивния режим с помощта на външен сигнал (наричан най-често „избор на схемата") се забранява всякакъв обем на данни между схемата и външните вериги. Този режим се използува при ориентирането на памети



Фиг 12.73

от по-голям брой ИС, когато се налага свързване на няколко изхода.

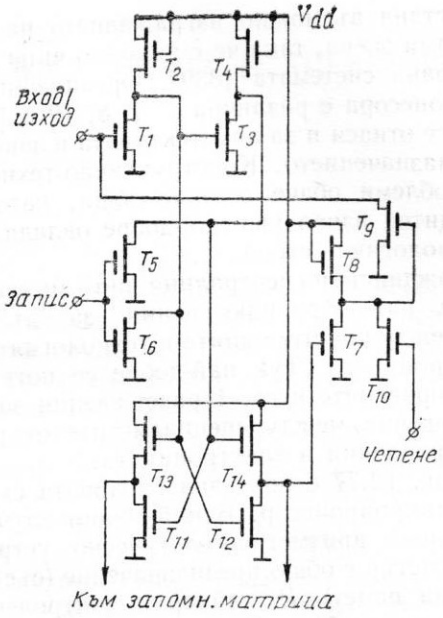
В активно състояние основни са режимите „четене“ и „запис“, задавани с помощта на друг външен сигнал — за четене (запис). При запис информацията се подава на „информационния“ вход.

За разлика от адресните схеми и ЗК при входно-изходните схеми не е възможно отделянето на един или дори на няколко основни типа. Всяко MOS ОЗУ има своя оригинална входно-изходна схема в зависимост от използуваната технология или от предназначението си. За да изясним все пак нейното действие, ще разгледаме един пример — схемата на Motorola MC 1170 с обем 64 бита и организация 16×4 бита [336] — фиг. 12.75.

Транзисторите T_1—T_4, T_{11}—T_{14} образуват т. нар. схема на запис, а транзисторите T_7—T_9 — схемата за четене. Тук управляващата схема е силно опростена и режимите на работа се определят от състоянието на транзисторите T_5, T_6 и T_{10}. Особеното при тази схема е общият вход—изход, с което се намалява количеството на външните изводи, но силно се затруднява работата с нея.

Един от основните проблеми при статичните MOS ОЗУ е намаляването на консумираната мощност. Това би могло да стане най-лесно чрез намаляване на проводимостта на товарните прибори. При ЗК обаче това води до увеличаване на размерите, докато при периферните схеми води до намаляване на бързодействието.

Значително намаляване на консумацията се получава при тактувано захранващо напрежение. Този метод е приложим само при памети с товарни



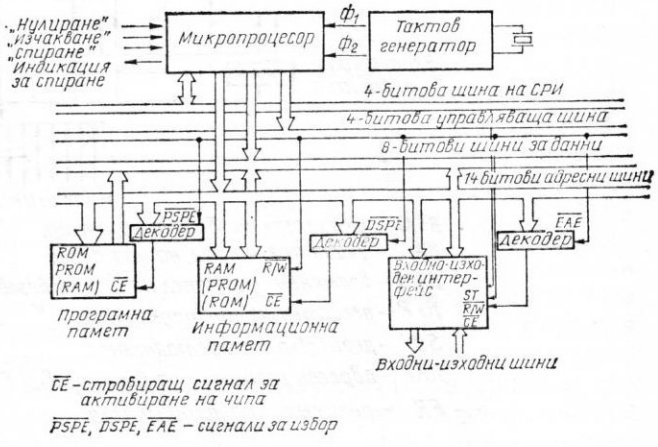
Фиг. 12.75

MOS транзистори и изисква наличие на мощни превключващи устройства.

12.6. ГОЛЕМИ ИНТЕГРАЛНИ СХЕМИ

Електронизацията и автоматизацията на промишленото производство поставят пред полупроводниковата техника въпроса за непрекъснатото увеличаване на степента на интеграция. От друга страна, развитието на полупроводниковата техника само̀ предлага нови решения, особено в областта на цифровата техника. Такъв е случаят с прилагането на MOS техниката за изграждане на микрокомпютърни системи. Съвременните конструктивно-технологични решения в тази област позволяват изграждането на микропроцесори с над 7000 транзистора (500 вентила) в един чип с площ от 26 mm², като това не представлява окончателна граница.

На фиг. 12.76 е показано принципното устройство на един миникомпютър. През последните



Фиг. 12 76

години стана възможно изграждането на всички необходими звена, така че с няколко чипа да бъде реализирана системата [339]. Организацията на микропроцесора е различна — 4, 8, 12 и 16 бита. Същото се отнася и за архитектурата в зависимост от предназначението. Конструктивно-технологичните проблеми обаче остават общи, като всеки производител използува най-добре овладяната от него технологична схема.

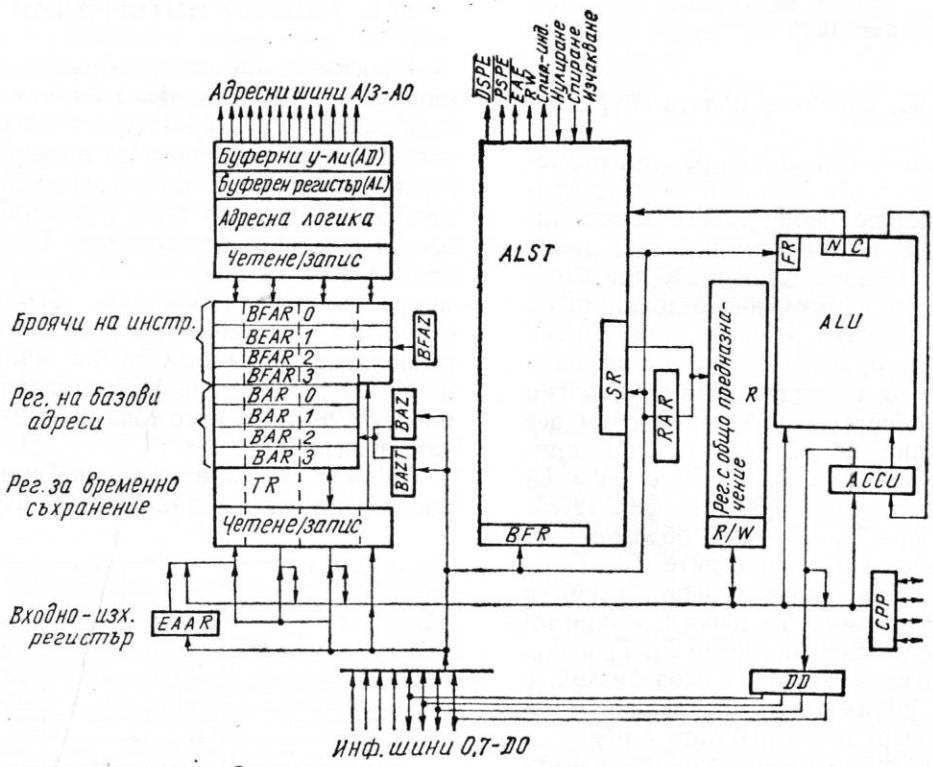
Изграждането на централния чип—микропроцесора — е най-добра илюстрация за дълбоката връзка между конструкцията и технологията в микроелектрониката. Тук най-добре се потвърждават и направените в гл. 1 разсъждения за новия тип отношения между специалистите от различните направления в електрониката.

На фиг. 12.77 е показана блоковата схема на 4-битов микропроцесор. В най-общия случай чипът съдържа аритметично-логическо устройство *ALU*, регистър с общо предназначение (със свръхоперативна памет) *R*, таймер и контролен блок *ALST* и адресен блок. Предназначението на всеки един от тези блокове е известно от теорията на изчислителните машини.

В чипа на микропроцесора адресният регистър със съответната логика са разположени в лявата горна част. *ALU* с шините за данни и със сервизните шини са вдясно горе. Осемте регистъра с общо предназначение са разположени отдолу. Останалата част на чипа се заема от блока *ALST* с контролните шини и набора от управляващи регистри.

Чипът е разположен в 40-изводен дуал-ин-лайн корпус със захранване +5 V и 12 V, тактова честота 2 MHz, тактови импулси Φ_1 100 ns, Φ_2 200 ns, интервал Φ_1—Φ_2 200 ns, минимален период 500 ns. Разсейваната мощност е 600 mW. Адресният блок е изграден от 16 384 бита програмируема памет с по 256 входни и изходни възможности.

Показаният чип е изпълнен по N-канална технология със силициев гейт (вж. 11.1÷11.4). Предимствата на тази технологична схема са вече описани, като трябва да се изтъкнат главно самосъвместяващият се гейт, допълнителните провеждащи шини от поликристален Si и съвместимостта с TTL. При прилагане на —5 V на подложката праговото напрежение на ключовите транзистори, които са с къс канал, е (1,0÷1,6) V, а на товарните (дълъг канал) — (1,4—1,9) V. Логическите изходни нива са: нула — 0,4 V и единица — 3,5 V, а натоварването по капацитет — до 200 pF.



BFAZ – указател на брояча на инстр.
BAZ – указател на рег. на баз. адрес
BAZT – временен указател на рег. на базовия адрес
BFR – регистър на инструкциите
SR – регистър на състоянията
RAR – адресен регистър на регистровия блок
FR – регистър на функцията
N – нулиращ тригер
C – тригер на преноса
CPP – сервизен вход на микропр.
DD – буферни у-ли на инф. шини

Фиг. 12.77

ГЛАВА 13

КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧНИ ОСОБЕНОСТИ В СЛОЙНАТА И ХИБРИДНАТА ТЕХНОЛОГИЯ

13.1. КЛАСИФИКАЦИЯ НА ИЗГОТВЯНИТЕ ПРИБОРИ

В *слойната техника* съществуват различни направления, в някои от които изобщо не се използуват полупроводникови прибори. Причината, поради която все пак слойната техника се разглежда заедно с конструирането на полупроводниковите прибори, се крие главно в общите насоки и методи на технологията и в общите принципи на конструиране на пасивни или на активни компоненти. В слойната техника различаваме тънкослойна и дебелослойна техника. Разликата между тях е концентрирана главно в различната технология на нанасяне на слоевете. Определено може да се твърди, че покритията в тънкослойната технология са много по-тънки от тези на дебелослойната, но междинната граница в дебелината на покритията е силно размита. Като ориентировъчни стойности за най-дебелите и най-тънките покрития могат да се приемат 25 μm при дебелослойната технология и 0,1 μm при тънкослойната технология. С помощта на слойната технология се изготвят главно пасивни елементи, като в различни лаборатории са получени и активни компоненти — транзистори или диоди. Пасивните елементи имат структура, получена чрез нанасянето на няколко слоя с различни свойства върху избрана подложка.

Ако към така изготвената пасивна слойна схема се прибавят активни компоненти (чипове на транзистори, диоди или интегрални схеми), получава се *слойна хибридна технология*. Съществуват специални изпълнения на корпуси за хибридната техника (вж. гл. 7). Една разновидност на хибридната технология е мултичипната техника, характеризираща се с използуване на няколко чипа от един тип или на различни структури за реализиране на специални функции. Мултичипната техника предлага големи предимства поради свободата при проектирането и при избора на функцията, която трябва да бъде реализирана. С помощта на допълнителни слойни резистори и кондензатори чрез мултичипната техника могат да бъдат реализирани различни специфични функции.

13.2. ДЕБЕЛОСЛОЙНА И ТЪНКОСЛОЙНА ТЕХНОЛОГИЯ

Ще разгледаме едновременно технологичните схеми на дебелослойната и тънкослойната техника, за да можем да определим по-добре приликите и разликите при реализирането на прибори с помощта на тези технологии. Отначало трябва да се спрем на избора на подложката. Материалът на подложката, неговите параметри и обработката му оказват съществено влияние върху параметрите на нанасяните слоеве и се отразяват изобщо върху надеждността на цялата хибридна схема.

Материалът на подложката трябва да има следните качества: голямо електрическо съпротивление и малки диелектрични загуби, значителна механична якост при малка дебелина (обикновено около 0,5 mm), голяма физична и химична устойчивост при нагряване до 300—400°C, да бъде химично неактивен към нанасяните върху подложката вещества, да не отделя газове във вакуум, да има температурен коефициент на линейно разширение, близък до този на използуваните слоеве, да има голяма топлопроводност, постоянна и честотно независима диелектрична проницаемост, да може лесно да се обработва механически, за да се гарантира добро качество на повърхността му. При така изброените изисквания към подложките е трудно да се намери материал, който отговаря на всички изисквания. Обикновено като най-важни се избират качеството на повърхността на подложката, което гарантира адхезията на слоевете към нея, коефициентът на температурно изменение (например удължаване на подложката, отразяващо се на качествата на тънките покрития), добра топлопроводност, имаща голямо значение за определяне на максималната разсейвана мощност в хибридната схема, голямата химична устойчивост, липсата на алкални йони или атоми, които биха могли да дифундират в покритията и да променят параметрите им.

За подложки на произвежданите у нас хибридни схеми се използува ситал. Това е стъклокерамичен материал, който може да се пресова, изтегля, валцова и отлива по центробежен начин. Температурният коефициент на линейно разширение на ситала е $6{,}4.10^{-6}/^{0}C$, диелектричната проницаемост 9,3, топлопроводността — 0,3 W/cm.K. Ситалът издържа резки промени на температурата във въздушна среда, притежава голямо електрическо съпротивление и по електрическа якост не отстъпва на вакуумната керамика. Той има добра химична устойчивост, газонепроницаем е, а освен това при повишаване на температурата отделя малко газ. Използуват се подложки с размер $60\times48\times0{,}5$ mm, на които се нанасят в зависимост от големината от няколко до няколко десетки схеми. В табл. 13.1 са показани параметрите и на някои други подложки, използувани в слойната техника. По-важните от тях са различните видове стъкла, кристалният двуалуминиев триокис под формата на сапфир, както и пластмасите, които с успех могат да бъдат използувани до температура от порядъка на 100°C, а в последно време и до

Таблица 13.1

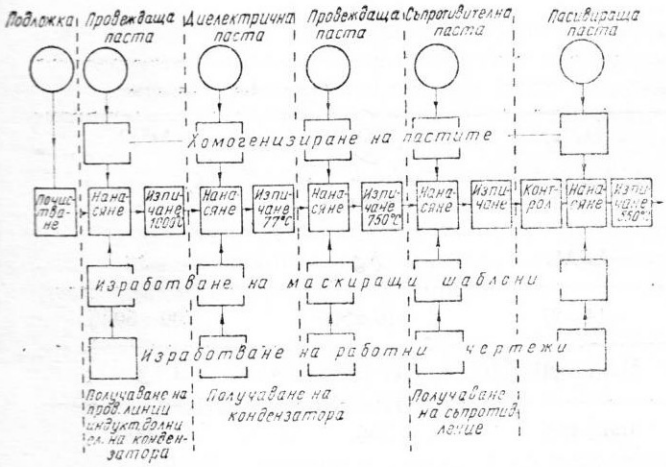
Материал	Състав	Търговско наименование	Гладкост, μm	Топлопроводност, W/cmK	Коефициент на разширение, 10^{-6}/°C	Специфично съпротивление, Ω.cm	Т° деформация, °C	ε_r/1MHz	tgδ
Алкално стъкло	72% SiO_2 9% CaO 16% Na_2O	Корн 0080	0,025	9,2	9,2	$10^{5,6}$	490	7,2	10^{-2}
Борно-силикатно стъкло	80% SiO_2 13% B_2O_3 2% Al_2O_3 3% NaOH	Корн 7740 (Пирекс)	0,025	2,7	3,2	$10^{9,1}$	515	4,6	10^{-2}
Алумино-силикатно стъкло		Корон 7059	0,025	3	4,5	$10^{12,4}$	872	5,8	
Кварц	100% SiO_2	Фотоцеран		3,4	0,54	10^{12}	1070	3,8	0,25
Алуминиева керамика	96% Al_2O_3	Ситал	1,5	0,35	6,4	10^{10}	1650	9,3	
Алуминиева керамика	99,5% Al_2O_3	Ситал	0,3	0,37	6	10^{10}	2040	9,1	10^{-4}
Алуминиев (кристален) окис		Сапфир	0,025	0,42	6	10^{10}	2040	9,4	10^{-4}
Берилиев окис	99,5% BeO		0,525	2,1	6,1	$10^{13,3}$	1600	6,3	
Магнезиева керамика		Алтелит	1	6	8	10^{14}		6,3	

400—500°C. При пластмасовите подложки разсейваната мощност е ограничена [120, 342].

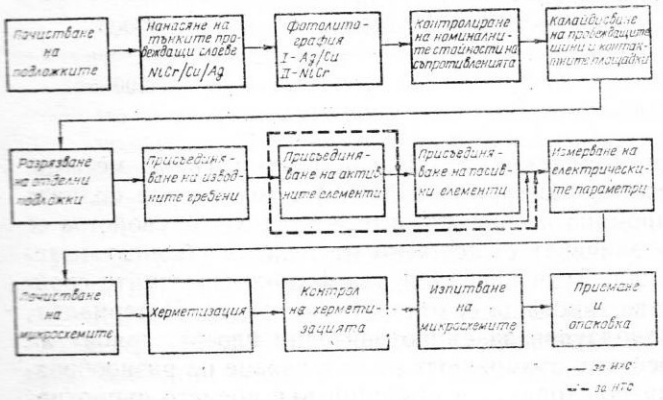
Ситаловите подложки се почистват по следния начин. Подложките се потопяват последователно в бихромна смес, загрята до 80°C, където престоят 1 h, и в баня от H_2O_2. След това се промиват обилно с течаща дейонизирана вода в продължение на 5 min, поставят се в стъклена вана с дестилирана или дейонизирана вода за 15 min, преместват се в стъклена вана с абсолютен алкохол също за 15 min. След това се измиват с абсолютен алкохол в ултразвукова баня в продължение на 5—10 min. Така почистените подложки се поливат с изобутилов алкохол и се избърсват с капроново платно. Гаранция за почистването на ситаловата повърхност е липсата на петна и различни други замърсявания. До нанасянето на покритията ситалът се поставя в среда от чист азот. Подобни операции за почистване на подложките се използуват и за другите материали, особено за различните керамики, използувани при конструирането на метално-керамични корпуси за интегрални схеми.

На фиг. 13.1 и 13.2 са показани технологичните схеми на дебелослойната и на тънкослойната технология. Може да се забележи голямата прилика и сходството между отделните операции на тънкослойната технология с монолитната полупроводникова технология и обратно, принципната разлика в технологията на дебелослойните покрития. Технологичната схема от фиг. 13.1 е изградена за реализиране на дебелослойна схема, в която трябва да бъдат създадени съпротивления, кондензатори и индуктивности. В нея трябва да се обърне внимание на реда на операциите, които се определят от видовете и предназначението на покритието. След почистване на подложката следва операцията, целяща получаването на провеждащи шини и на останалите компоненти на другите структури, които се изграждат от този слой—метални електроди за кондензатори, индуктивности и др. Важното е, че всяка операция се извършва по почти еднакъв начин, т.е. пастата се хомогенизира, пресова се върху подложката и след това се изпича. За тази цел по подобие на металните носачи при пластмасовите корпуси се изработва метална маска под формата на мрежа, през която става пресоването на материала.

Друга важна конструктивна особеност, с която трябва да се съобразява технологичната схема, е многослойният характер на този вид схеми. Това означава, че трябва предварително да се определи редът на нанасяне на отделните слоеве (например изготвянето на два провеждащи слоя един върху друг в края на технологичната схема би било нецелесъобразно, тъй като изисква изолация помежду им, а тя може да бъде реализирана само чрез нанасяне на диелектрична паста, какъвто е случаят с изготвянето на кондензаторите). За различните пасти се избират различни температури на хомогенизиране и изпичане. Освен показаните на фиг. 13.1 пасти се използуват и различни изолиращи слоеве на местата, където става пресичане на провеждащи шини и глазури, необходими за пасивирането на цялата схема.



Фиг. 13.1



Фиг. 13.2

Пастите, които се нанасят чрез пресоване върху подложката, се изграждат от няколко компонента — пластификатори, разтворители, функционални съставки, определящи поведението на пастата и стъклената маса (основната съставка). За провеждащи шини, електроди, контактни площадки, индуктивности се прибавят функционални съставки, осигуряващи добра проводимост. При съпротивителните пасти тази съставка се състои от метали и метални окиси, главно от платиновата група, понякога с прибавка на сребро. Диелектричните пасти са изградени главно на базата на различни титанови стъкла, които се характеризират с голяма диелектрична константа и осигуряват добра разсейвана мощност. Глазурите, използувани за пасивиране, се отличават с по-малка диелектрична константа, но с по-голяма механична якост и влагоустойчивост.

В табл. 13.2 и 13.3 са показани параметрите на използуваните в дебелослойната и тънкослойната техника покрития [120]. Самият процес на синтероване протича в пещи с няколко различни температурни зони, като температурата се поддържа с голяма точност. В зависимост от пастата се избира и температурата на изпичане. Съществуват правила, свързани с последователното синтероване на различните пасти, което определя най-високата температура на синтероване за първата паста и по-нататъшното намаляване на температурата до последната паста.

Съществена операция в технологичната схема е калайдисването на провеждащите шини, при което тяхното съпротивление се намалява с единдва порядъка. Калайдисването помага и за по-нататъшното монтиране на хибридните компоненти. Предпочита се калайдисване чрез потопяване, тъй като само в този случай се избягва калайдисването на съпротивителните шини.

За гарантиране на точно зададените стойности на съпротивленията и кондензаторите (за съпротивленията от 1 до 10%, а за кондензаторите от 10 до 30%) се използуват различни технологични

Таблица 13.2

Материали	Тънкослойна технология					Дебелослойна технология			
	WiCr	Ta	Ni	TiO_2	TaN	Кермет Cr—SiO	Ag/Pd — 1/2 оловно—борно силикатно стъкло 45 %	Ag/Pd — 9/10 оловно—борно силикатно стъкло 60 %	Ag/Pd — 1/2 оловно—борно силикатно стъкло 70 %
Вид на наставяване	изпарява-не	разпраш-ване	химично отлагане	разпраш-ване	разпрашване	пресоване и разпрашване			
Листово съпротивление, Ω/□	30 — 300	10 — 100	10 — 100k		10 — 60	100 — 50k	900	3K	25K
Стойност на изготвено съпротивление	50 — 50k	10 — 50k	10 — 100k	10^{13} Ω	10 — 10^4 Ω	2 . . . 1 MΩ	1 . . . 4.10^5Ω	1 . . . 4.10^5Ω	1 . . . 4.10^5Ω
Температурен коефициент, 10^{-6}/°C	100	100	100		+50. . . −20	— 150	+ 71	+ 300	— 1000
Тодеранс, %	0,5	0,5	0,5		0,1	2	5	5	5
Дебелина на слоя, nm	20	50	60			25000	25000	25000	25000

Таблица 13.3

	Тънкослойна технология			Дебелослойна технология	
Изолатор	SiO	SiO_2	Ta_2C_5	TiO_2	$BaTiO_3$
Начин на нанасяне	изпарение	изпарение, разпрашване	разпрашване	пресоване през маска	разпрашване
Електроди	Al	Al	Al/AW	Ag	Ag
ε_r	4÷7	3÷4	14÷27	10÷500	100÷5000
Загуби, %	0,2	0,1	10÷30	1	3
Температурен коефициент, 10^{-6}/°C	±100	20÷40	100÷400	200	1000
Стойност на C, nF	0,1 . . . 10	0,1 . . . 10	0,1 . . . 50	0,01 . . . 1	0,1 . . . 10
Дебелина на слоя, nm	200	200	300	25000	25000
Пробивно напрежение, V	20	40	20	500	500

варианти, като отнемане от материала с помощта на струйна механична обработка (шлайфане), обработка с помощта на лазерен лъч и др. Трябва винаги да се има пред вид, че при това стойността на кондензатора става по-малка, а на съпротивлението — по-голяма.

При тънкослойната технология технологичната схема, показана на фиг. 13.2, съдържа операции, които са характерни за монолитната технология. Това се отнася особено за операциите, свързани с нанасянето на тънките слоеве. Използуват се главно вакуумно изпарение и катодно разпрашване. Възможно е също електрохимично отлагане на тънки метални слоеве за гарантиране на определени параметри. Вакуумното изпарение може да става от стопилка или да бъде взривно изпарение. Съпротивителните, провеждащите и диелектричните слоеве се нанасят по цялата подложка, след което с помощта на фотолитография става тяхната селективна обработка и структуриране. Ето защо проблемите на конструирането на тези схеми са близки до тези на монолитната техника.

От показаните на табл. 13.2 и 13.3 материали най-широко приложение за съпротивителни слоеве са намерили никел-хромът и танталът. Изпарението на никел-хрома е свързано с някои проблеми, произлизащи от различното налягане на парите на никела —4.10^{-3} Pa (3.10^{-5} Torr) и на хрома —1,17 Pa (9.10^{-3} Torr). При една и съща температура на изпарителя в изпарения слой има завишено количество на хрома, което определя и избора на началната сплав. Специфичното съпротивление зависи силно от съотношението в молярните съставки на никела и хрома. Експериментите показват, че специфичното съпротивление расте с увеличаване на количеството хром. По отношение на температурния коефициент също се забелязват големи промени и при определено съотношение може да бъде реализиран и темпериран коефициент около нулата (при молярни отношения на никела и хрома от порядъка на 1:1). За всички тънки метални слоеве (по-тънки от 20 nm) е характерна силната промяна на параметрите, като техните свойства се различават съществено от тези на обемния материал. Тези различия във физико-химичните свойства трябва да се отчитат (вж. гл. 6). Материалът, използуван за съпротивителни слоеве, трябва да осигури възможност за получаване на разнообразни по стойност и стабилни във времето съпротивления, да има малък температурен коефициент и добра корозионна устойчивост. При използуване на никел-хром се достига листово съпротивление до 300 Ω при малък температурен коефициент. Температурата на изпарение на тази сплав е значителна (1600°C), като за постигане на висококачествени слоеве е необходимо подложката да се подгрява обикновено до 270°C.

За електрическо съединение на различните елементи, било то пасивни или хибридни (активни), се използуват провеждащи слоеве, у нас главно мед с тънък слой сребро. Обикновено широко се използува слой от никел-хром, подобряващ адхезията на медта към подложката. Това позволява едновременно отлагане на всички метални слоеве чрез едно изпомпване на вакуумната апаратура, което от своя страна поевтинява продукцията. За провеждащи материали се използуват и паладий сребро със съпротивление 50 mΩ/□, платина-сребро — 8 mΩ/□, паладий-злато — 70 mΩ/□ или чисто злато — 8 mΩ/□. За по-добра адхезия на златото винаги се използува тънък слой от хром или никел-хром, който има добра адхезия към ситала (след температурна обработка до 300°C за около 30 min). Проблемите на тънките метални слоеве са разгледани в гл. 6. Очевидно техниката на изпарение оказва съществено влияние върху получените слоеве.

Металните слоеве се структурират с помощта на фотолитография и подходяща химична обработка. След това провеждащите шини се калай-

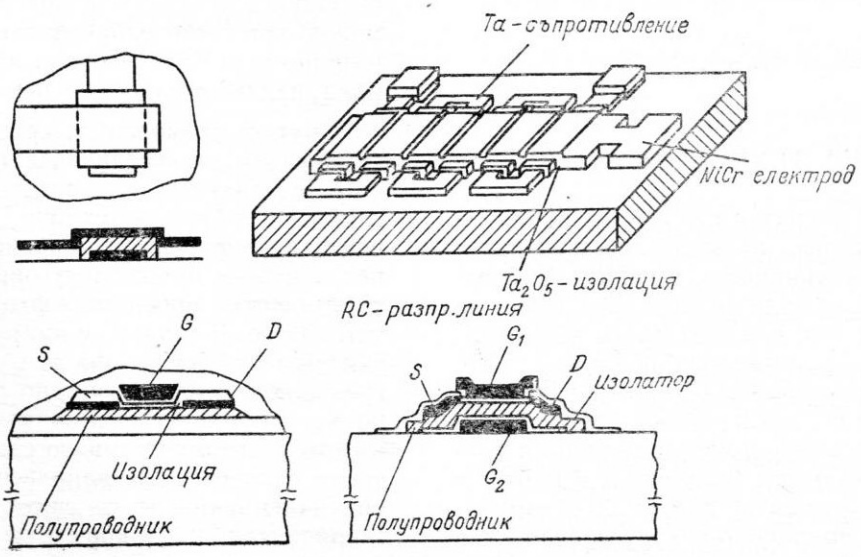
дисват, ако не е използувано злато. За целта подложките най-напред се потопяват във флюс, а след това в припой, като потопяването и изваждането става перпендикулярно на повърхността на разтвора. Ситаловите плочки с нанесените върху тях схемни елементи се разрязват с помощта на скрейбер. Към тях се монтират външните изводи под формата на външен гребен, който се запоява към предварително калайдисаните контактни площадки с обикновен поялник.

13.3. РЕАЛИЗИРАНЕ НА КОМПОНЕНТИ В СЛОЙНАТА ТЕХНОЛОГИЯ

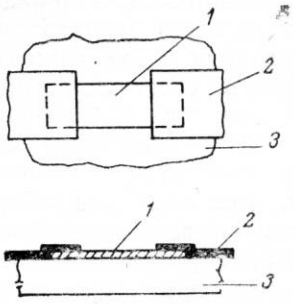
В слойната техника с помощта на подходящи слоеве могат да се реализират различни пасивни компоненти, а и някои активни структури. Реализирането на тънкослойни транзистори въпреки широките изследвания в близкото минало не представлява някакъв особен интерес, с изключение на съвременната SOS технология (в този случай обаче може да се спори дали техниката е слойна или монолитна). Освен чрез тази техника активни компоненти могат да бъдат реализирани и чрез кадмиев сулфид от N-тип и кадмиев селенид, както и телур от P-тип [340, 341]. Дебелината на полупроводниковия слой е обикновено от няколко стотици nm за кадмиевия сулфид и няколко десетки nm за кадмиевия селенид и телура. На тази база могат да бъдат реализирани полеви транзистори, показани на фиг. 13.3. Въпреки това реализирането на активни компоненти е свързано с големи трудности. Това е една от причините за развитието на хибридната техника.

Дебелослойната и тънкослойната технология позволяват да се изграждат произволни по конфигурация и материал контактни площадки. Това помага при монтажа на хибридните корпуси. В този случай липсващата съставка — активните компоненти — се допълва. С помощта на слойната техника могат да бъдат реализирани съпротивления, кондензатори и индуктивности. Те се оразмеряват подобно на съответните компоненти в монолитната техника, т.е. за база се избира листовото съпротивление (съответно капацитетът на квадрат), като по-нататък се изчислява необходимата стойност. Чрез подходящ избор на специфичното съпротивление в дебелослойната технология може да се гарантира необходимата стойност на листовото съпротивление, така че след хомогенизиране и синтероване на пастата да бъде реализирана необходимата стойност. Широчината на съпротивителните меандри при дебелослойната технология се избира между 250 μm и 2,5 mm. При тънкослойната технология конфигурацията е подобна, но съпротивителните меандри могат да достигнат границите на използуваната фотолитография — 5—10 μm. Една от особеностите на тънкослойните съпротивления е възможността за получаване на отрицателни температурни коефициенти, характерни само за тънките слоеве или при определени съотношения на съставките на сплавите. При кондензаторите хоризонталната геометрия се изчислява въз основа на специфичния капацитет, като се изхожда от параметрите на съответните слоеве. При сравняване с монолитната техника се констатира, че за изготвяне на слойни кондензатори се използуват повече технологични стъпки, тъй като са необходими три слоя. Комбинацията метал—изолатор—метал предопределя до голяма степен електрофизичните параметри на създаваните кондензатори.

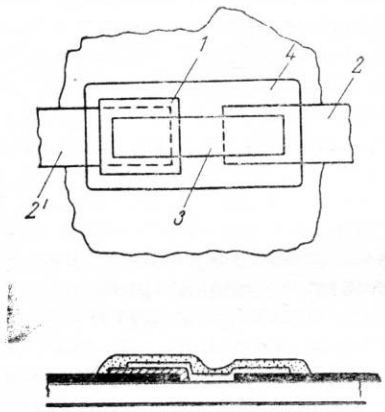
Характерно за изготвяните активни компоненти е голямата нестабилност на характеристиките, поради което основното направление остава хибридната техника или нейният вариант — мултичипната техника. На фиг. 13.4 и 13.5 са показани принципните положения при конструирането на съпротивления и кондензатори. Самото оразмеря-



Фиг. 13.3



Фиг. 13.4



Фиг. 13.5

ване става съгласно следните математически зависимости (вж. и гл. 9). (Всички размери се получават в cm):

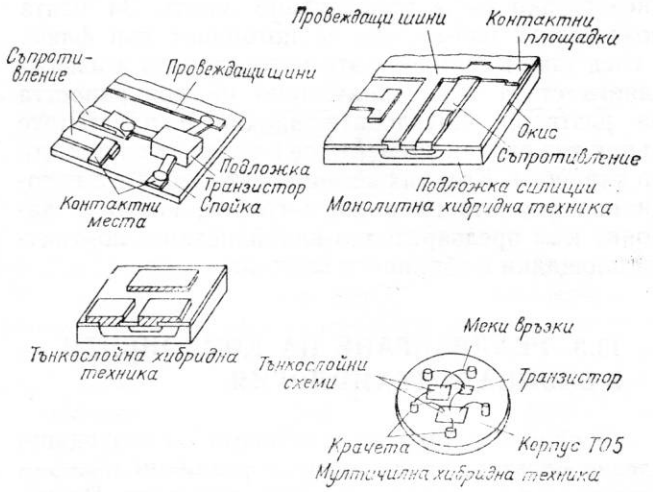
$$b_{\min} \geq \sqrt{\frac{P_R R_s}{P_{\text{доп}} R}},$$

$$l = \frac{Rb}{R_s},$$

$$A_{\text{конд}} = \frac{Cd}{0{,}0885\,\varepsilon}.$$

13.4. ХИБРИДНА ТЕХНОЛОГИЯ

На фиг. 13.6 са показани различните варианти на хибридната техника, включително и нейната разновидност — мултичипната техника. Хибридната техника може да бъде реализирана както на подложка от ситал или някаква друга керамика, така и върху полупроводникова подложка, като в случая в нея се реализират активните елементи, а върху изолиращо покритие, обикновено от силициев двуокис, се разполагат съпротивления и други компоненти на схемата. Вариантът, в който се използува подложка от ситал или друга керамика, пластмаса и т.н., е по-широко разпространен и е в основата на съвременната хибридна техника. Причините за това са в по-добрите изолационни качества на тези подложки, както и в свободата при

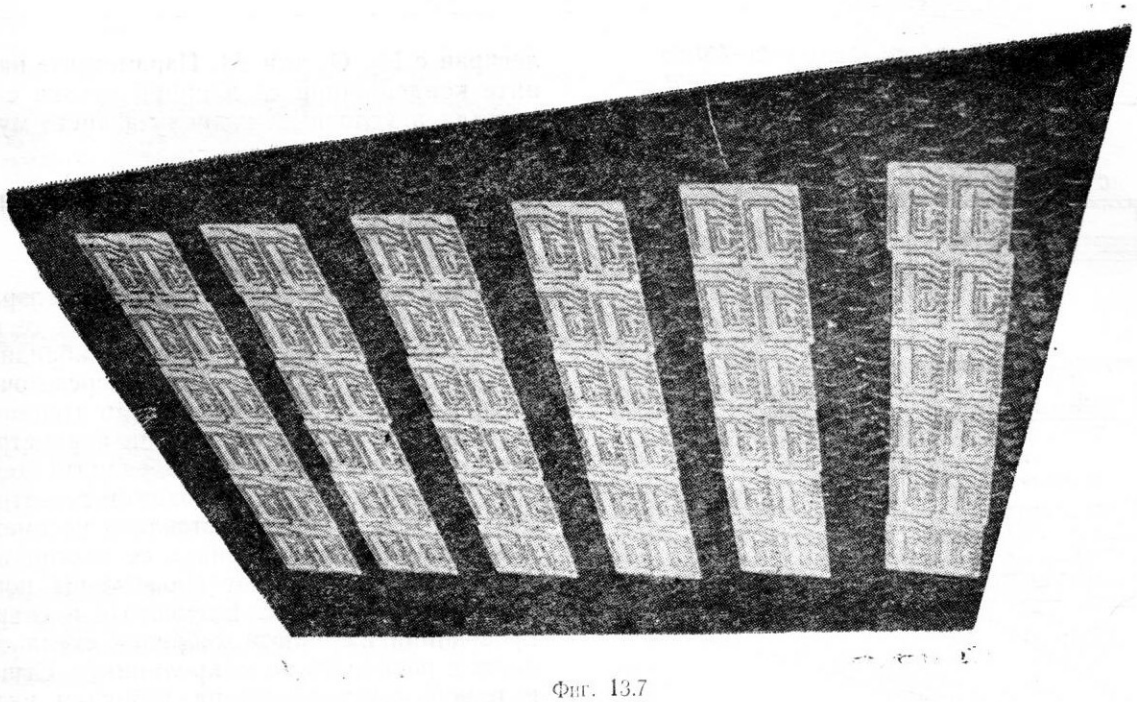


Фиг. 13.6

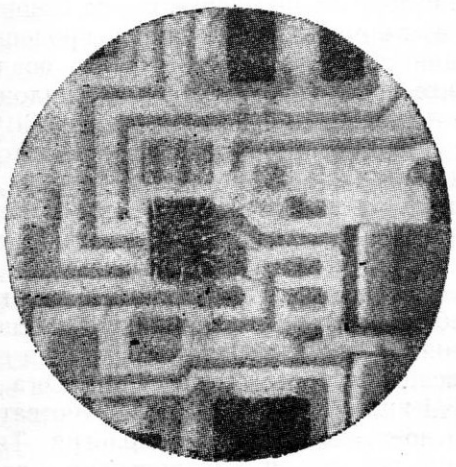
конструирането. При мултичипната технология може да се използуват както обикновен корпус на интегрални схеми с повече изводи, така и специален хибриден корпус. За реализиране на сложни конфигурации се използуват специални корпуси, като може определено да се твърди, че мултичипната техника има голямо бъдеще.

На фиг. 13.7 и 13.8 е показано какво голямо предимство дават хибридните схеми по отношение на реализирането на специфични функции по желание на клиента. На една подложка в непосредствено съседство се намират чипове с произволна сложност — дискретни кондензатори с гарантирани параметри, съпротивителни и провеждащи шини, достатъчно добре изолирани един от друг с помощта на изолиращи покрития, както и различни възможности за херметизация и монтаж на активните и пасивните компоненти. Всичко това, съчетано със свободата при проектиране и с възможностите, които предлагат подложките, включително и за СВЧ обхвата, прави хибридната техника изключително перспективна.

Другата възможност, предлагаща мултичипната техника, е увеличаването на надеждността чрез използуване на технологичната схема на слойната хибридна техника. Както се вижда на показаните фигури, едновременното бондиране на пет и повече чипове има определени предимства по отношение на общите разходи в едно електронно устройство. В случая се имат пред вид икономически изследвания на разходите, необходими за изграждане примерно на едно централно процесорно устройство на голяма изчислителна машина, където съществуват много еднакви по предназначение елементи. От направените изследвания за оптимален вариант се счита едновременното затваряне в хибриден корпус на 2—5 чипа. Тук трябва да се има пред вид и броят на изходите, който се получава. В такъв аспект един дуал-ин-лайн корпус с 16—25 извода е оптимално решение.



Фиг. 13.7



Фиг. 13.8

13.5. ТЕХНОЛОГИЧНИ ВАРИАНТИ И ОСОБЕНОСТИ В ТЪНКОСЛОЙНАТА ТЕХНОЛОГИЯ

Използуването на тантал като основен материал в тънкослойната технология е довело до създаването на интересни технологични схеми, намерили широко приложение в производството.

Технологична схема А [342]:

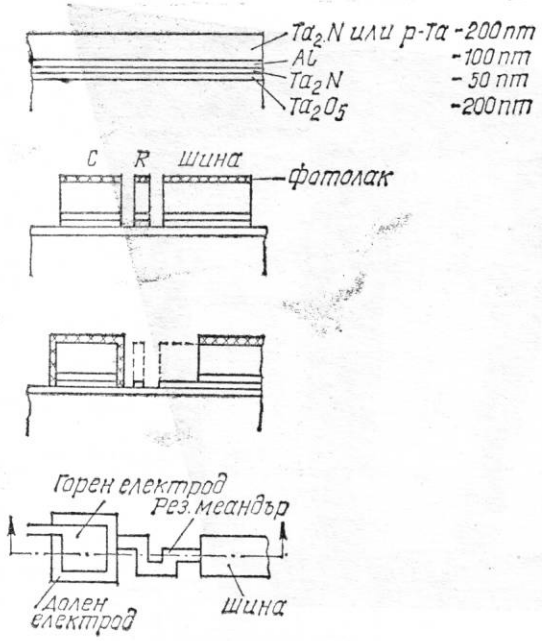
— почистване на подложката;
— разпрашване на βTa;
— фотолитография I (защита на долни електроди и контактни места);
— фотолитография II без химична обработка (отваряне на прозорци и долните електроди за анодизация);
— анодизация на *С* (до 90% от стойността им);
— отстраняване на фотолака;
— разпрашване на тантал-оксинитрид;
— изпарение на Ti-Pd (слой за контакти);
— фотолитография III (за защита на контактни места);
— фотолитография IV (за защита на резистивните меандри) (Ta_2O_5 в областите на *С* действува като стопер);
— стареене на $R(T=300^0C$ за 2h);
— повтаряне на фотолитография II (за окончателно анодизиране на *С*);
— отстраняване на фотолака;
— изпарение на NiCr—Au;
— фотолитография V (за защита на шини, горни електроди (*С*) и контактни места).

Тази технологична схема може да бъде приложена и върху стъклена подложка, ако върху нея предварително е отложен Ta_2O_5 за ецстопер.

Технологична схема Б (фиг. 13.9):

— почистване на подложката;
— разпрашване на Ta_2O_5 за ецстопер;
— разпрашване на тантал-оксинитрид (за резистивни меандри);
— разпрашване на алуминиев слой (разделителен слой);
— разпрашване на Ta_2N или βTa (за кондензатори);
— фотолитография I — за защита на долни електроди (*С*), меандри, шини и контакти, ецване до ецстопера;
— фотолитография II — за резистивни меандри, отваряне на прозорци, ецване до резистивния меандър чрез разтваряне на алуминий (свличане на горния танталов слой);
— фотолитография III — за прозорци в долните електроди;
— анодизация на кондензаторите (резисторите не трябва да имат галванична връзка с долния електрод);
— изпарение на никел-хром-злато;
— фотолитография IV — за защита на горни електроди, шини и контакти;
— стареене (24 h при $T°=250°C$).

Схемата се характеризира само с едно изпаре-



Фиг. 13.9

ние. Съпротивителният материал трябва да е устойчив при ецването на алуминий. Възможно е приложението и на някои други материали.

Технологична схема B:

— почистване на подложката;
— разпрашване на Ta_2O_5 за ецстопер;
— разпрашване на тантал-оксинитрид (200 nm);
— фотолитография I — защита за долни електроди, меандри, шини и контактни места;
— фотолитография II — прозорци за долни електроди и меандри;
— анодизация на R и C, примерно до $R=50\ \Omega/\square$ и $C=50\ nF/cm^2$;
— сваляне на фотолака;
— изпарение на никел-хром-злато;
— фотолитография III — защита за горни електроди, шини и контактни места;
— стареене.

Характерно за тази технологична схема е използването на един и същи слой за създаване на съпротивления и кондензатори.

В допълнение на гл. 6, където се разглеждат параметрите на тънки слоеве и по-специално на тантал-нитрид и тантал-оксинитрид, интерес представляват и тантал-алуминиевите слоеве. Свойствата на танталовия слой могат да бъдат изменяни и чрез вграждане на метални атоми вместо атоми на различни газове. В това отношение алуминият е подходящ, тъй като неговият окис може да бъде използуван и като диелектричен слой. Изследвани са слоеве с различен състав тантал-алуминий — 88:12, 55:50, 35:65. За химичната обработка при фотолитография се използува натриева основа.

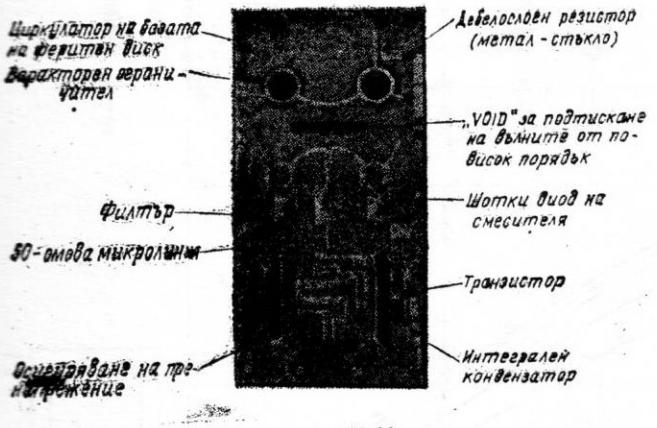
Основен процес при използуването на тантал в хибридна технология е анодизацията за получаване на диелектричен слой (вж. гл. 4). Особеното е това, че долната част на слоя (неанодизираната) се използува за електрод (Ta_2O_5 има $\varepsilon_r=27$). Електролитът е лимонена киселина 0,01% или фосфорна киселина 0,1%. Танталът може да бъде легиран с N_2, O_2 или Al. Параметрите на получените кондензатори са в пряка връзка с вида на тантала и условията на получаването му.

13.6. РЕАЛИЗИРАНЕ НА ХИБРИДНИ СВЧ ИНТЕГРАЛНИ СХЕМИ

Съществуват няколко варианта за изработване на СВЧ интегрални схеми. Може да се приложи монолитната техника, както и хибридната техника, в два варианта — със съсредоточени и с разпределени параметри. Поради големите загуби в схемите със съсредоточени параметри по-голямо приложение намират хибридните схеми с разпределени параметри. Основният схематичен елемент на тези схеми представлява несиметричната микролиния. Микролинията се състои от ивица проводник, разделен от провеждаща повърхност със слой диелектрик. Елементите и свързващите проводници на цялата хибридна схема се разполагат в равнината на микролинията. Съществуват и някои други форми на хибридни интегрални схеми с разпределени параметри, за основа на които служат компланарната линия, процепната линия, линията на базата на окачена подложка и др., които намират по-ограничено приложение.

При реализирането на хибридни СВЧ интегрални схеми намират приложение както тънкослойната, така и дебелослойната техника, но тук за разлика от нискочестотните схеми понятията тънкослойна и дебелослойна са условни, тъй като независимо от използуваната технология дебелината на провеждащия слой трябва да бъде 3—5 пъти дебелината на скинслоя. В този аспект горните понятия се употребяват във връзка с начина на нанасяне на провеждащия слой. Сега хибридните СВЧ интегрални схеми се изработват изключително по тънкослойната технология. Тя осигурява по-малки загуби и по-контрастно изображение на схемата. Тъй като загубите в микролинията, породени от грапавостта на подложката, растат пропорционално, проблемите на адхезията, особено силно изразени при дебелослойната техника, са в противоречие с осигуряване на допустимите загуби при свръхвисоките честоти. От направени изследвания е констатирано, че за да се задържат тези загуби в границите на 5% в X-диапазона, грапавостта на подложката не трябва да превишава 0,12 μm. Тази стойност на гладкостта може да бъде гарантирана при добра адхезия само от тънкослойната техника.

В хибридната СВЧ техника се използуват главно алуминоокисни керамики (Al_2O_3) с различна степен на чистота. В сравнение с берилиевата керамика и магнезиевия титанат тази керамика е по-евтина и има по-малки загуби, по-стабилни електрически параметри и същевременно осигурява лесна механична обработка. Към изискванията на подложките трябва да се прибави гарантирането на параметрите в честотния и температурния обхват на използуване за цялата схема. Особено завишени са изискванията спрямо относителната диелектрична проницаемост, която трябва да



Фиг. 13.10

бъде постоянна и да има определена голяма стойност. При металните покрития от абсолютна важност е гарантирането на добра проводимост в честотния обхват.

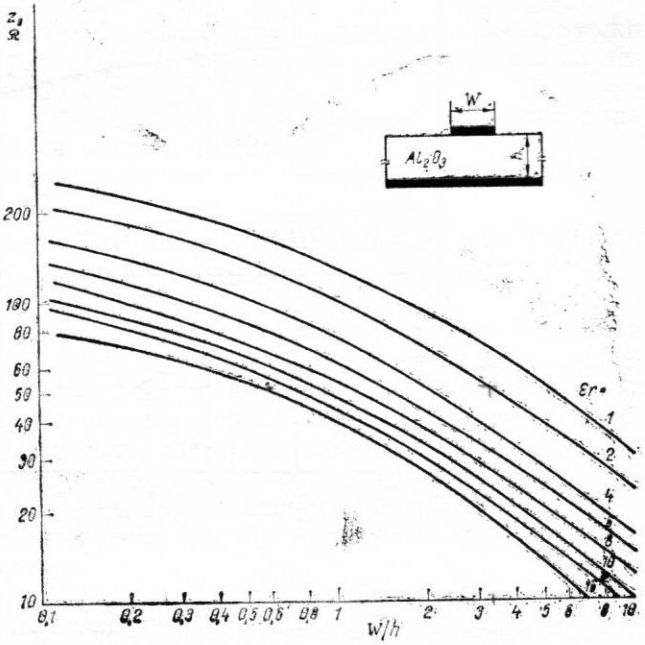
За гарантиране едновременно на добра адхезия и добра електропроводимост обикновено се комбинират няколко различни материала, като най-долният слой осигурява добра адхезия при по-голямо съпротивление, докато горният слой поема функциите на микролинията. Освен това изборът на металното покритие се определя и от неговата съвместимост с останалите елементи на схемата, от гарантирането на условията на бондиране и т.н. За намаляване на загубите дебелината на провеждащите покрития трябва да бъде около 3÷5 пъти скинслоя, т.е. необходими са дебелини на провеждащия слой от около 10 μm. На практика това се осъществява чрез вакуумно отлагане на тънък слой с последващо галванично надебеляване. Проблемите на фотолитографията и структурирането на микролиниите са разгледани в гл. 5.

На фиг. 13.10 е показан общият вид на една СВЧ хибридна интегрална схема, от който се вижда разположението на микролиниите и на активните компоненти, реализирани в хибридно изпълнение [343, 344]. В гл. 7 са показани основните изпълнения на различни корпуси за хибридно изпълнение в СВЧ техниката. При по-мощните СВЧ схеми, например варакторни умножители, усилватели на мощност и др., съществен проблем е топлоотвеждането. В този случай полупроводниковите прибори се монтират непосредствено върху метален радиатор или върху подложка от берилиев окис.

Като пример за проектиране на СВЧ хибридна схема ще разгледаме проектирането на балансен смесител. За подложка избираме двуалуминиев триокис — 99,5% чистота тип МН 506 по каталог на Томсон CSF. Тя има размери 25×25 mm и дебелина 635 μm. Покрита е с двуслойна метална система хром—злато. Дебелината на покритието е хром (0,1 μm) и злато (5 μm). Грапавостта е под 0,8 μm, ε_r при 10 GHz е 9,5.

А. Проектиране на 50-омова микролиния. Проектирането на 50 Ω несиметрична микролиния става в следния ред:

w, h → Фиг. 13.11:
за $Z_0 = 50\,\Omega$
и $\varepsilon_r = 9{,}5$
се получава $w/h = 1$,
т. е. $w = 635$ μm



Фиг. 13.11

λ, λ_{TEM} за w/h, ε_r → От фиг. 13.12 за
$w/h = 1$ $\varepsilon_r = 9{,}5$ се получава:
$\lambda/\lambda_{TEM} = 1{,}225$.
Тъй като $\lambda_{TEM} = \dfrac{\lambda_0}{\sqrt{\varepsilon_r}}$
следва $\lambda = 1{,}225 \dfrac{\lambda_0}{\sqrt{\varepsilon_r}} = 1{,}193$ cm

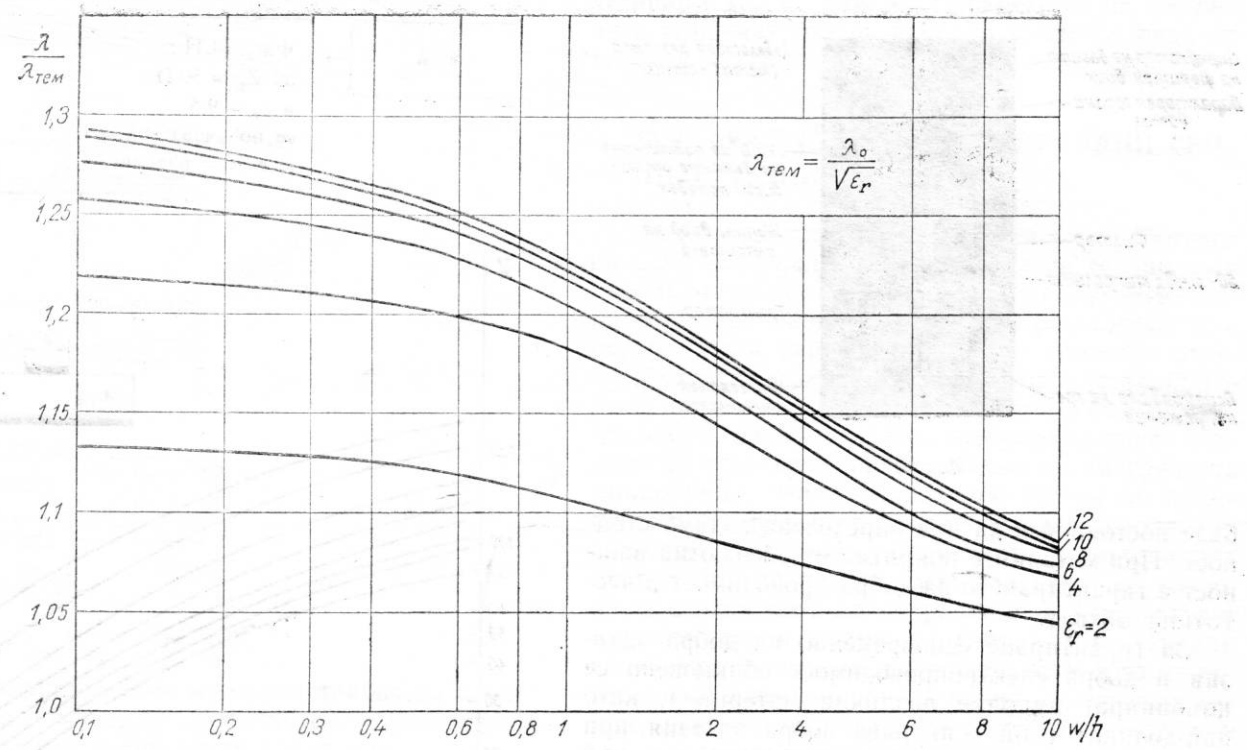
α_c, коефициент на затихване (загуби в провеждащите шини) →

$$\alpha_c = \alpha_{c_1} + \alpha_{c_2} = 8{,}87 \frac{\sqrt{\pi f \mu}}{2 Z_0 w} \left(\frac{1}{\sqrt{\sigma_{c_1}}} + \frac{1}{\sqrt{\sigma_{c_2}}} \right), \frac{\text{dB}}{\text{m}},$$

където
σ_{c_1} е проводимостта на микролинията;
σ_{c_2} — проводимостта на заземяващата повърхност.
Използува се:

$$\alpha_c \approx 8{,}87 \frac{20\,\pi \sqrt{f \rho_{Au}}}{Z_0 w},$$

където f се замества в GHz, ρ в Ωm, Z_0 в Ω, w в cm.
(за $Z_0 = 50\,\Omega$, $w = 635 \cdot 10^{-4}$ cm,
$\rho_{Au} = 2{,}35 \cdot 10^{-6}$ Ωcm,
$\alpha_c \approx 0{,}083$ dB/cm.



Фиг. 13.12

На фиг. 13.13*а* е показана принципната схема на СВЧ смесител. Това е твърде популярна схема на балансен смесител за X-обхвата. Входният сигнал и сигналът на хетеродина се подават от един хибриден 3 dB — 90°-отклонител. Той е елемент от СВЧ схемотехниката и има основна задача да изолира двата високочестотни входа на смесителя. Сигналът на двата изхода има еднаква амплитуда, но е дефазиран на 90° при затихване от 3 dB спрямо входния сигнал. Балансната схема позволява да се сведат до минимум амплитудно модулираните шумове от генератора и осигурява допълнително подтискане на „битите" честоти. В изхода на смесителя има нискочестотен филтър, който пропуска само междинната честота. Като активни елементи са използувани диоди на Шотки, проектирани за работа в X-обхвата.

Б. Проектиране на 3 dB — 90°-хибриден отклонител. На фиг. 13.13*б* е показана геометрията на хибридния насочен отклонител и е дадена скица, поясняваща характеристичните импеданси на отделните рамена и техните размери. Конфигурацията на хибрида, наричан още квадратурен хибрид, е дадена правоъгълна за по-голяма нагледност, но може да се направи и кръгова стига само да се спазят стойностите и размерите на скицата.

Първата отворена четвъртвълнова линия имитира първия капацитет на филтъра, а втората — втория, като тя същевременно дава накъсо края на четвъртвълновата линия от последователния клон. С това се имитира индуктивността на филтъра. Филтърът е ефективен само за дадена честотна лента.

Импедансът Z_1 се прави възможно най-малък, а импедансът Z_2 — най-голям, тъй като те участвуват във формулите за $Z_{вх}$.

От условието, което се налага от $w < \frac{1}{2}\left(\frac{30}{\sqrt{\varepsilon_r}\, f_{(GHz)}} - 0{,}8\,h\right)$, cm (max w на микролинията) за честота 20 GHz (има се пред вид втората хармонична на генератора) следва:

$$w < 2{,}18 \text{ mm}.$$

Избираме $w=2$ mm. Тогава за Z_1 от фиг. 13.11 ще получим $Z_1=25\ \Omega_1$, а от фиг. 13.12 определяме $\lambda_1=11{,}2$ mm и $\lambda_1/4=2{,}8$ mm.

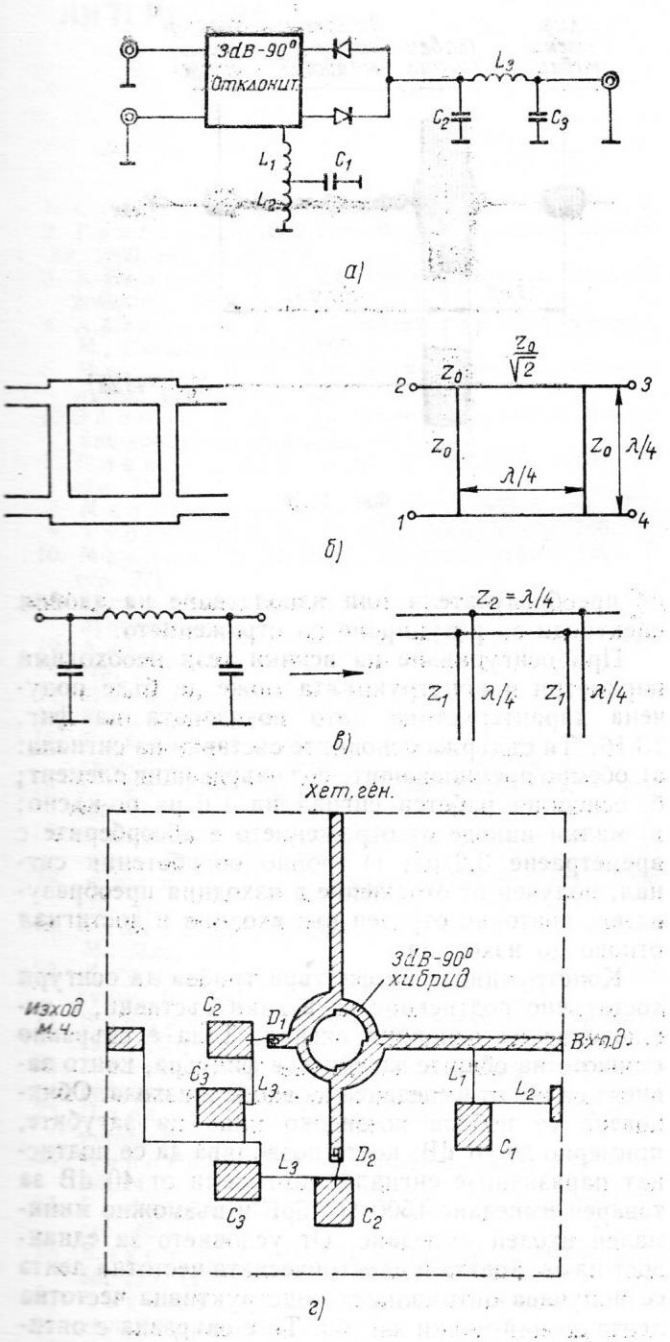
По отношение на Z_2 избираме минималната широчина на микролинията от съображения за технологичност — 0,1 mm. Тогава от фиг. 13.11 и 13.12 за Z_2 и $\lambda_2/4$ получаваме съответно $Z_2=100\ \Omega$ и $\lambda_2/4=3{,}1$ mm.

L_1, L_2 и C_1 осигуряват веригата за нулево преднапрежение на двата диода. Нейното проектиране е идентично на това на филтъра, като могат да се използуват директно резултатите от проектирането му. На фиг. 13.13*в* е показана конфигурацията на схемата и са дадени кратки обяснения по отделните елементи.

Размерите на хибрида от фиг. 13.13*б* за $Z_0=50\ \Omega$ се определят от размерите на 50-омова линия. За линия с импеданс $Z_0/\sqrt{2}=35{,}4\ \Omega$ от методиката за w се получава:

$w=1175$ μm,
$\alpha_c=0{,}063$,
$\lambda=1{,}150$ cm.

Тъй като сигналът на изход *4* изпреварва този в изход *3* с 90°C, за посочената на фиг. 13.13*а* схема на свързване на диодите се налага допълнително дефазиране между двата изхода, така че фазовата разлика между тях да стане 180°. Това се постига лесно, като линията между изход *3* и



Фиг. 13.13

съответния диод се направи с $\lambda/4$ по-дълга от тази между изход 4 и другия диод.

По този начин размерите и параметрите на хибрида са напълно определени.

В. Проектиране на нискочестотния филтър. Преди всичко тук трябва да се поясни, че понятието „нискочестотен филтър" е фиктивно — първо, защото междинната честота, която излиза след филтъра, е 100 MHz и второ, защото няма пълна аналогия между свръхвисокочестотната и нискочестотната схемотехника. Така че схемата на филтъра от фиг. 13.13*а* в известен смисъл е условна. Изискванията, които се поставят към филтъра, е той да филтрира ω, ω_s и ω_0 и да пусне само $\omega_{м.ч.}$. Това може да се осъществи чрез подходящо свързване на различни отрязъци от микролинии. От вълноводната техника се знае, че за една отворена линия

$$Z_{вх}=Z_0 \operatorname{ctg} l,$$

а за една дадена накъсо линия:

$$Z_{вх}=Z_0 \operatorname{tg} l,$$

където l е дължината на линията в електрически градуси ($l=l_0\ 360^0/\lambda$, като l_0 е дължината на линията в cm).

Общият вид на конструирания смесител е показан на фиг. 13.13 *г*.

13.7. РЕАЛИЗИРАНЕ НА ПИЕЗОЕЛЕКТРИЧЕСКИ ЕЛЕМЕНТИ

Конструктивно-технологичните проблеми при пиезоелектрическите прибори са тясно свързани с тънкослойната техника. Това се отнася и за трите направления — механоелектрически преобразуватели, електромеханични преобразуватели и акустоелектронни прибори, като акустоелектронен усилвател, акустоелектрически транзистор, пиезоелектрически филтър и пиезоелектрически резонатор.

Като пример е разгледано конструирането на пиезоелектрически филтър. От принципа на действие е известно, че филтърът трябва да съдържа два преобразувателя, разположени на определено разстояние един от друг. На фиг. 13.14 е показано едно примерно разположение, като между двата преобразувателя е поставен свързващ елемент, а в края на чипа — подходящи абсорбери за поглъщане на рефлектиралите вълни. Материалът на подложката е обикновено $LiNbO_3$, CdS, ZnO или оловно-цирконатнотитанатна керамика и се избира по неговите пиезоелектрически параметри. Транзитното време на акустичната вълна е обикновено 1,6 μs и зависи от хоризонталната геометрия на филтъра. Ако за преобразувателите е използувана традиционната гребеновидна структура с еднаква геометрия на електродите и постоянно разстояние между тях L, честотната характеристика на филтъра, както е известно, е от вида $\sin x/x$ (фиг. 13.15), като за централната честота f_0 и честотната лента Δf е изпълнено условието

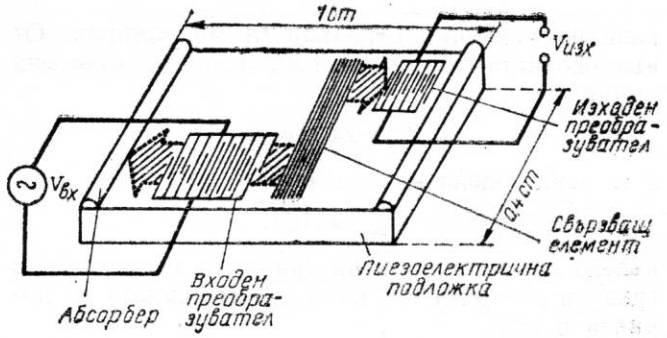
$$f_0=\frac{v_s}{L}$$

$$\frac{\Delta f}{f_0}=\frac{2x}{N}, \quad \text{като} \quad x=N\frac{f-f_0}{f_0},$$

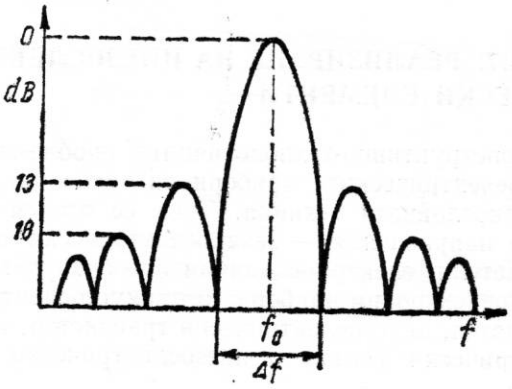
където N е броят на електродните двойки;

v_s — скоростта на разпространение.

Повърхностната вълна прониква в подложката на дълбочина до една дължина на вълната. Електродите се изработват обикновено от Al с дебелина 0,2 μm. Следователно честотната лента се определя конструктивно от броя на двойките електроди, а централната честота — от разстоянието между тях. Капацитетът на преобразувателя C и излъчва-



Фиг. 13.14



Фиг. 13.15

телният импеданс $R_{пр}$ зависят главно от дължината на „гребените" W:

$$R_{пр} = R + jX, \qquad R(\omega) = R_0 \left(\frac{\sin x}{x}\right)^2,$$

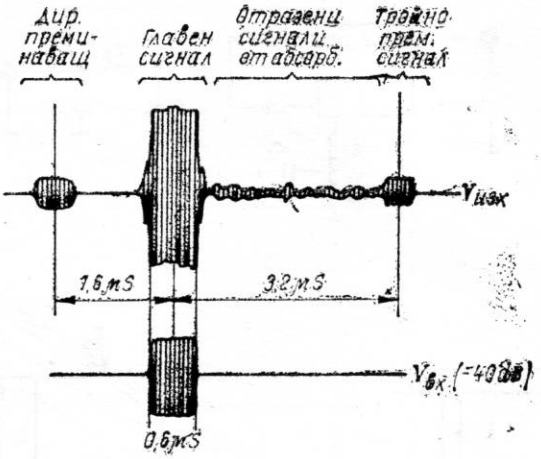
$$X(\omega) = R_0 \frac{\sin 2x - 2x}{2x^2},$$

$$R_0 = \frac{4}{\pi} k^2 \frac{N}{2\pi f_0 C_{пр}},$$

$$C_{пр} = N\varepsilon_0(1+\varepsilon_r)W,$$

където k е електромеханичният коефициент и зависи от материала.

Чрез подходящо оформление на хоризонталната геометрия на входния преобразувател може да се постигне желаната предавателна характеристика на филтъра, включително и за високи честоти. Това води до сериозни проблеми във фотолитографията подобно на тези при световълноводите (вж. гл. 11). Основен конструктивен проблем представлява правилното проектиране и разположение на абсорберите. Използуват се различни конструктивни решения, като разполагане от обратната страна (служещи едновременно за монтаж), снемане на фаска по ръбовете с подходящ ъгъл, така че отразената вълна да се отклони настрани



Фиг. 13.16

от преобразувателя или използуване на двойни електроди за редуциране на отражението.

При осигуряване на всички тези необходими параметри в конструкцията може да бъде получена характеристика като показаната на фиг. 13.16. Тя съдържа основните съставки на сигнала: а) обемно преминаващите под свързващия елемент; б) основния работен сигнал на 1,6 μs по-късно; в) малки пикове от отражението в абсорберите с времетраене 3,2 μs; г) тройно обработения сигнал, получен от отражение в изходния преобразувател, повторно отразен във входния и достигнал отново до изходния.

Конструкцията на филтъра трябва да осигури достатъчно подтискане на всички съставки, с изключение на основния сигнал. Това е свързано с нивото на общите загуби във филтъра, които зависят силно от импеданса на входа и изхода. Обикновено се избира по-високо ниво на загубите, примерно до 16 dB, което позволява да се подтиснат паразитните сигнали, по-големи от 40 dB за товарен импеданс 1500 Ω ‖ 5pF и възможно минимален входен импеданс. От условието за еднаквост на звуковата и електрическата честотна лента се получава оптималната конструктивна честотна лента за най-малки загуби. Тя е свързана с оптимален брой електроди в преобразувателите

$$N_{опт} = \left[\frac{1}{2\pi f_0 R_0 \varepsilon_0 (1+\varepsilon_r)}\right]^{1/2}.$$

В практиката филтрите се комбинират със селективни усилватели на базата на мултичипната техника, които са в състояние да покрият собствените загуби във филтъра. От голямо значение за намаляване на паразитните сигнали са и начинът на оформяне на печатната платка и изборът на конфигурацията на електрическите шини до изводите.

ЛИТЕРАТУРА

1. Степанов, А. В. Известия АН СССР, 1969, 2.
2. Григорьева, Л. Ф. Вопросы радиоэлектроники, 1960, сер. II, вып. 2.
3. Куклева, З. А. *Оптико-механическая промышленность*, 1965, 6.
4. Антропов, А. И. Теоретическая электрохимия, М., Высшая школа, 1969.
5. Мямлин, В. А. и др. Электрохимия полупроводников. М., Наука, 1965.
6. Эфимов, Е. А. и др. Электрохимическое поведение кремниего электрода, 1964, 9.
7. Плаксин, И. Н. и др. ДАН СССР, 1959, 128, стр. 777.
8. Миливидский, Б. М. ФТТ, 1963, 5, стр. 1750.
9. Туровский, Е. М. ФТТ, 1963, 5, стр. 750.
10. Маслов, В. Н. и др. Кристалография, 1962, 7, стр. 271.
11. Элькин, Б. И. Вопросы металлургия и физики полупроводников. М., изд. АН СССР, 1957.
12. Алпатова, Н. М. и др. ДАН СССР, 1962, 142, стр. 1073.
13. Маслова, Л. В. и др. *ФТТ*, 1961, 3, стр. 269.
14. Колтун, М. М. *ЖФХ*, 1964, 38, стр. 723.
15. Файнштейн, С. М. Обработка поверхности полупроводниковых приборов. М., Энергия, 1970.
16. У ай, Я. А. *Электронная техника*, 1970, 4, стр. 50г
17. Орион, Б. В. и др. — *Обзоры по электронной технике*, 1971, стр. 307.
18. Ажажал, З. Т. *Электронная техника*, 1968, стр. 41.
19. Булгер, Р. и др. Окисление, дифузия, эпитаксия. М., Мир, 1969.
20. Холланд, Л. Нанесение тонких пленок в вакууме. М., Мир, 1963.
21. Воронков, М. Г. и др. Сб. Электронная техника, 1970, ПП, сер. 2, вып. 1.
22. Мазель, Е. З. и др. Планарная технология кремния. М., Энергия, 1974.
23. Плоскина, И. И. Инфракрасные спектры силикатов. М., 1967.
24. Попова, З. И. и др. *Заводская лабор.*, 1957, 23, стр. 4.
25. Рыбинский, О. А. и др. *Электроника*, 1964, 84, стр. 40.
26. Боков, Ю. С. *Обзоры по электр. технике*, 1969, 56, стр. 125.
27. Боков, Ю. С. *Электронная техника*, сер. 6, 1970, вып. 4, стр. 101.
28. Ерусалимчик, И. Г. *Электронная техника*, сер. 2, 1972, вып. 7, стр. 17.
29. Лубашевская, А. В. *Электронная техника*, сер. 6, 1969, вып. 3, стр. 64.
30. Федотов, Я. А., Г. И. Поль. Фотолитография и оптика. М., Сов. радио, 1972.
31. Кугзов, И. Г. *Электронная техника*, сер. 2, 1972, вып. 7, стр. 106.
32. Ануфриенко, В. В. *Электр. техника*, сер. 10, 1970, вып. 1, стр. 42.
33. Глазштейн, Л. Я. *Обзоры по электр. технике*, сер. 10, 1970, вып. 7, стр. 58.
34. Коцева, Ив. Частна публикация.
35. Мазель, Пресс. Планарная технология кремн. приборов. М., Энергия, 1971.
36. Филипов, Ф. Рък. за лаб. упражнения по КТПП. Печ. база на ВМЕИ, 1975.
37. Парфенов, О. Д. Технология микросхем. М., Высшая школа, 1977.
38. Ямаков, Кисьов. Технология на полупроводниково производство. С., Техника, 1974.
39. Сефтал, Н. и др. *Сер. физика*, 1957, № 1, стр. 47.
40. Алферов, И. К., Андреев. Доклады Акад. наук СССР, 1972, стр. 206.
41. Валиев, К. А., А. А. Орликовский. Полупроводниковые интегральные схемы памяти. М., Советское радио, 1979.
42. Валиев, К. А., А. Н. Кармазинский. Цифровые интегральные схемы на МДП-транзисторах. М., Советское радио, 1971.
43. Курносов, А. И. Материалы для полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. М., Высшая школа, 1980.
44. Красилов, Трутко. Методы расчета транзисторов. М., Высшая школа, 1971.
45. Колосов, Горбунов. Пол. твердые схемы. М., Энергия, 1975.
46. Городецкий, Кравченко. ПП ПП Приборы. М., Энергия, 1973.
47. Носов. ПП Импулсные диоды. М., Мир, 1972.
48. Спиридонов, Вертоградов. Дрейфовые транзисторы. М., Энергия, 1972.
49. Сборник статей — Кристаллизация из газовой фазы, ДАН, СССР, 1970.
50. Расчет и проэктирование ПП приборов. Перевод с английского под редакцией к.т.н. Глебова.
51. Микроэлектроника. Теория конструирования и производства ПП. Перевод с англ. под редакцией проф. Богородицкого.
52. Пасынков, Чирков. ПП Приборы. М., Высшая школа, 1966.
53. Федотов. Кремневые планарные транзисторы. М., Сов. радио, 1973.
54. Интегральные схемы. Принципы конструирования и производства. Перевод с англ. под редакцией проф. Полосова.
55. Гаврилов, Скворцов. Технология производства полупроводниковых приборов. М., Сов. радио, 1972.
56. Гребен, А. В. Проектирование аналоговых интегральных схем. М., Энергия, 1976.
57. Таков, Т., И. Стоянов. Линейни и интегрални схеми. С., Техника, 1974.
58. Степаненко, И. П. Основи на полупроводниковата микроелектроника. С., Печ. база на ВМЕИ, 1975.
59. Курносов, А. И., В. В. Юдин. Технология производства полупроводниковых приборов. М., Судостроение, 1965.
60. Новиков, В. В. Теоретические основы микроэлектроники. М., Высшая школа, 1972.
61. Ефимов, И. Е., И. Я. Кузыр. Основы микроэлектроники. М., Связь, 1975.
62. Лебедев, О. Гр., М. А. Огибин. Конструирование радиоэлектронной апаратуры на основе интегральных схем. Л., 1974.
63. Алексенко, А. Г. Основы микросхемотехники. М., Сов. радио, 1977.
64. Скарлет, Дж. ТТЛ интегральные схемы и их применение. Перевод с англ. М., Мир, 1974.
65. Боровски, Б. Х. Елементи и схеми на ЕИМ. С., Техника, 1975.
66. Конов, К. И. Импулсни схеми с интегрални ТТЛ елементи. С., Техника, 1975.
67. Наумов, Ю. Е. Интегрални логически схеми за ЦЕИМ. С., Техника, 1972.
68. Ефимов, И. Е., И. Я. Козырь. Основы микроэлектроники. М., Связь, 1975.
69. Анализ и расчет интегральных схем. Пер. с англ. М., Мир, 1969.
70. Штерн, Л. Основы проектирования интегральных схем. Пер. с англ. М., Энергия, 1973.
71. Интегральные схемы. Принципы констру-

ирования и производства. Пер. с англ. М., Сов. радио, 1968.
72. Черняев, В. Н. Технология производства интегральных микросхем. М., Энергия. 1977.
73. Нойс, Бон, Чиа. *Електроника*, 1969, бр. 15.
74. Стриха, В. И. Полупроводниковые приборы с барьером Шотки. М., Сов. радио, 1974.
75. Носов, Шигин. Математические модели элементов интегральной электроники. М., Мир, 1976.
76. Коббольд, Р. Теория и применение полевых транзисторов. Л., Энергия, 1975.
77. Колесов, Л. Н. Введение в инженерную микроэлектронику, Л., Энергия, 1974.
78. Буркова, Р. Дисертация. ВМЕИ „Ленин", 1978.
79. Вглле, В. М., И. В. Трехов. Доклады конференции производства и применения силовой промышленности в нар. хозяйстве. М., 1968.
80. Кузьмин, В. А. Тиристоры малой и средней мощности. М., Сов. радио, 1971.
81. Джентри, Ф. и др. Управляемые ПП вентили. М., Мир. 1967.
82. Челноков, В. Е., Ю. А. Евсеев. Физические основы работы силовых полупроводниковых приборов. М., Энергия, 1969.
83. Кузьмин, В. А., К. А. Сенаторов. Четырехслойные полупроводниковые приборы. М., Энергия, 1967.
84. Агаларадзе, П. С. и др. Сер. Преобр. техника, 1971, вып. 16.
85. Воронин, К. Д., П. Т. Дерменднн. *Радиоэлектроника*, 1973, вып. 11.
86. Ашкиназн, Г. А. Критические скорости нарастания прямого напряжения тиристоров. М., 1968.
87. Буруев, З. Ф. и др. *Преобр. техника*, 1972, вып. 3.
88. Грехов, П. В. К вопросу о включении тиристора. ФТП, 1973, № 1, стр. 37.
89. Молибоч, Н. П. и др. ФТП, 1970, № 4, стр. 98.
90. Дерменджи, П. Г., Ю. А. Евсеев. *Радиотехника и электроника*, 1972, № 11.
91. Ашкиназн, Г. А. и др. Сб. Применение новых технологических методов в произв. силовых диодов и тиристоров. Талин, 1973.
92. Дон — ТИИЭР. 1967, т. 53, стр. 81.
93. Исайкин, А. С. и др. Сб. ПП приборы и преобр. устр., вып. 3, часть 2, 1974.
94. Накомура. — *Электроника*, 1969, № 10.
95. Бедикян, Л., Р. Буркова и др. Конференция по физика, Видин, 1976.
96. Пономарев, В. А. и др. *Электронная техника*, сер. ПП. пр. 1971, 5.
97. Бузанова, Л. К. и др. Полупроводниковые фотоприемники. М., Энергия, 1976.
98. Библ. по автоматике. Вып. 474, Энергия, 1972.
99. Носов, Ю. Р. Оптоэлектроника. М., Сов. радио, 1977.
100. *Зарубежная радиоэлектроника*, 1975, кн. 5, стр. 57.
101. Горох, Ю. Голография в приборах и устройствах. М., Энергия, 1974.
102. Кроуфорд, Р. Схемные применения МОП транзисторов. Пер. с англ. М., Мир, 1970.
103. Ричман, П. Физические основы полевых транзисторов с изолированным затвором. Пер. с англ. М., Сов. радио, 1971.
104. Валиев, Кармазинский, Королев. Цифровые интегральные схемы на МДП транзисторах. М., Сов. радио, 1971.
105. Микроэлектроника. Сб. ст. под ред. Ф. В. Лукина, вып. 3, 5. М., Сов. радио, 1972.
106. ПП Приборы и их применение. Сб. ст. под ред. Федотова, вып. 16, изд. М., Сов. радио, 1966.
107. Старос, Ф. Г., Л. П. Крайзмер. Полупроводниковые интегральные запоминающие устройства. М., Энергия, 1973.
108. Ферхофштадт — ТИИЭР, 1976, № 6, стр. 102.
109. Крайзмер, Л. П., Р. А. Лашевский. *Зарубежная радиоэлектроника*. 1975, № 2.
110. Кодш, Кочин, Сигг, Венделин. — *Электроника*, 1971, № 4.
111. Алтьман, Л. — *Электроника*, 1976, № 7.
112. Алтьман, Л., Матера. — *Електроника*, 1976, № 4.
113. Зарков, И., С. Димитров. Нац. школа по електронни процеси на повърхността. Приморско, 2—7. VI. 1976.
114. Алтьман, Л. — *Електроника*, 1975, № 26.
115. Фроман—Бенчковский. — *Электроника*, 1971, № 10.
116. Алтьман, Л. — *Электроника*, 1974, № 12.
117. Кармазинский, А. Н. Интегральные схемы на МДП приборах. М., Мир, 1975.
118. Аваев, Н. А., В. Н. Дулин. Большие ИС с инжекционным пытанием. М., Советское радио, 1977.
119. Технология толстых и тонких пленок, М., Мир, 1973.
120. Noble, N. V. — *Electr. engng.*, 1961, July, p. 483.
121. Henkels, N. W. — *Electr. engng.*, 1961, p. 482.
122. Meyers, P. P. Computer conference, Los Angeles, 1961.
123. Meindl, J. D. — Microelectronics system, electr. engng., 1961, July, p. 484.
124. Khambata. Einführung in die Gruppenintegration. B., Technik, 1963.
125. Möschwitzer. Halbleiterelektronik. B., Technik, 1972.
126. Auth. J. In Probleme der Festkörperelektronik 1. B., Technik, 1969.
127. John, W. Analyse und statistische Prozeßmodellierung. B., Technik, 1972.
128. Marshall, J. — *Computer Design*, 1967, No 2, p. 18.
129. Casazza, J. J. — *Electron. Design.*, 1966, Dec., p. 17.
130. Aeuschel, K. — *Siemens-Zeitschrift*, 1967, vol. 8 S. 669.
131. Goessberger, A. Metallurgy of semicond. materials, London, 1962.
132. Dasch, W. C. J. — *Appl. phys.* 1958, vol. 29, p. 736.
133. Spenke, E. Semiconductor silicon. New York, 1969.
134. Mondel, E. — *Sem. prod. and sol. state technal.*, 1967, No 1.
135. Jensen, E. W. — *Soild et. techn.*, 1967, No 2, p. 19.
136. Schwuttke, G. H. Proc. of the symposium, Poenix, Arizona, March, 1966.
137. Schwuttke, G. H. — *J. K. Howard. Anal.*, 1967, vol. 10, p. 118—133.
138. Sirtl, E., A. Adler. — *Chromsäure.* Z. Metallk., 1961, vol. 52, S. 529—531.
139. Bernewitz, L. I., K. R. Mayer. — *Phys. state sol.* 1973, Vol. A 16, p. 579—583.
140. Lang, A. R. — *J. Appl. Phys.*, 1958, Vol. 29, p. 597—598.
141. Grienaur, H., W. Speck. — *Siemens-Zeitschrift*, 1971, Vol. 45, S. 493—497.
142. Borrmann, G., W. Hartwig, H. Irmler. Z. Naturforsch, 1958, Vol. 13A. S. 423—425.
143. Jenkinson, A. E. Philips. — *Techn. Rev.*, 1962, Vol. 23, p. 82—91.
144. Eckers, W., H. Grienaur. Siemens-Forsch.- u. Entwicklungsber., 1972, No 1, S. 292—296.
145. Bond, W. L., I. Andrus. — *Phys. Rev.*, 1956, Vol. 101, p. 1211—1213.
146. Fairhurst, K. M. — *Microelectronic and Rel.*, 1966, Vol. 5, p. 15.
147. Regh,—*J. Electrochem.* Techn., 1968, Vol. 6. p. 155.
148. Sillivan, M. U. S. Patent No 3436259, 1965.
149. Mendel, E. — *Proc. IEEE*, 1969, Vol. 57, p. 811.
150. Sillivan,—M. J. Electrochem. Soc., 1963, Vol. 110, p. 412.
151. Sillivan, M. USA Patent 2983655. 1961.
152. Tokyama, T. — *Solid State Electroncs*, 1962, Vol. 5, p. 135.
153. Goessberger, A. U. — *J. Electrochem. Soc.*, 1962, Vol. 109, p. 604.
154. Holmes, P. J. Electrochemistry of semiconductors' 1962, p. 167.
155. Petrocelli, J. V. Surface Chemistry of metals and Semiconductors, 1964, p. 62.

156. Beck, F. — *Electrochem*, 1959, Vol. 63, p. 943.
157. Gatos, H. C. — *J. Phys. Chem Solids*, 1960, Vol.14, p. 169.
158. Gatos, H. C. Surface Chemistry of Metals and Sem., 1960, p. 302.
159. Ray-Choudhury. — *J. Electrochem. Soc.*, 1971, Vol. 118, p. 1183.
160. Kato, — *J. Tosiba Ref.* 1964, Vol. 19, p. 12.
161. Mendel, E. IBM Report, 1966, Vol. 22.
162. Kane, P. F. — *Analytical Chemistry*, 1966, Vol. 38, p. 29.
163. Kormany, T. — *Tki Közlemengek* 14, 1969, Vol. 14, p. 91.
164. Yamagishi, S. — *J. Appl. Phys.*, 10, 1971, Vol. 10. p. 5.
165. Blake, L. H. — *Solid State Technology*, 1970, No 1. p. 24.
166. Kormany, T. Herstellung atomar reiner Oberflächen in Ultrahochvakuum, Budapest, 1969.
167. Jona, F. — *IBM J. Res. Develop.*, 1965, Vol. 9, p. 375.
168. Kern, W. — *RCA Review*, 31, 1970, Vol. 31. p. 187.
169. Baner, G. — *Phys. Letters*, 1968, No. 26, p. 530.
170. Irwing, S. A. — *Electrochemistry of semiconductors*, 1962, p. 380.
171. Taylor, W. W. — *J. Appl. Phys.*, 1957, Vol. 28, p. 1221.
172. Slighter, W. P. — *Transistor Technology*, 1952, Vol. 1, p. 119.
173. Harvey, W. W. — *J. Electrochem. Soc.*, 1962, Vol. 109, p. 155.
174. Schmidt, P. H. — *J. Electrochem. Soc.*, 1952, Vol. 109, p. 879.
175. Atalla, — *M. M. BSTY*, 1959, Vol. 38, p. 749.
176. Müller, W. Pat. BRD 823763, 1951.
177. Faust, J. W. Pat, USA 2861931, 1958.
178. Turner, D. R. Surface Chemistry of Metals and Sem., 1960, p. 172.
179. Evers, D. D. Pat. USA 2767137, 1954.
180. Topfer, A. Pat. USA 2913383, 1960.
181. Bogenschutz. — *J. Electrochem. Soc.*, 1967, Vol. 114, P. 970—973.
182. Greenwood, — *J. J. Electrochem. Soc.*, 1969, Vol. 116, p. 1325.
183. Ray-Choudhury, P. — *J. Electrochem. Soc.*, 1969, Vol. 116, p. 4.
184. TSNI, T. T. V. — Solid State Technol., 1967, Vol. 10, Dec., p. 33.
185. DOO, V. Y. — *IEEE Trans. ED.* 1966, Vol. 13, p. 561.
186. Zaininger, K. — *IEEE Trans. ED.* 1969, Vol. 16, p. 33.
187. Waxman, A. S. — *Appl. Phys. Lett.*, 1968, Vol. 12, p. 109.
188. Dalton, J. V. — *J. Electrochem. Soc.*, 1968, Vol. 115, p. 865.
189. Flietner, H. Die Halbleiteroberfläche und ihre Bedeutung für Halbleiterelemente, BD1. B., Technik, 1969.
190. Paul, R. Problems der Festkörperel. BD3. B., Technik, 1971.
191. Atalla, M. — *BSTJ*, 1959, Vol. 38, p. 749.
192. Deal, B. E. — *J. Appl. Phys.*, 1965, Vol. 36, p. 3770.
193. Ligenza, J. — *J. Phys. Chem. Solids*, 1960, Vol. 14, p. 131.
194. Pliskin, W. — *J. Electrochem. Soc.*, 1964, Vol. 111, p. 237.
195. Deal, B. E. — *J. Appl. Phys.*, 1965, Vol. 36, p. 3770.
196. Levis, B. — *Microelectronics and Rel.*, 1954, Vol. 109, p. 3.
197. Mirsch, Reimer. Technologie elektronischer Bauelemente. B., Technik 1974, S. 185—200.
198. Sinclair, W. — *J. Amer. Ceramic Soc.*, 1963, Vol. 46, p. 20.
199. Zaininger, K. H. — *IEEE Trans. ED* 1969, Vol. 16, p. 333.
200. Duffek, E. F. — *Electrochem. Technol.*, 1965, Vol. 3, p. 75.
221. Spragne, J. L. — *J. Electrochem. Soc.*, 1962, Vol. 109, p. 94.
202. Hannoui, R. — *Thin Solid Films*, 1970, Vol. 6, p. 397.
203. Ligenza, J. R. — *Solid State Technology*, 1970, No 12, p. 33.
204. Mai, Ch. Semicond. — *Prod. and Solid State Techn.*, 1966, Vol. 10, p. 112.
205. Edagawak, H. — *J. Appl. Phys.*, 1963, Vol. 2, p. 765.
206. Seraphim, D. P. — *IBM J. Res. Dev.*, 1964, Vol. 8, p. 400.
207. Revesz, A. G. — *IEEE Trans.*, 1965, Vol. 12, p. 97.
208. Mier, M. G. — *J. Vac. Sci. and Techn.*, 1970, No 6, p. 727.
209. Pliskin, W. A. — *IBM, J. Res. Dev.* 1964, Vol. 8, p. 122.
210. Burger, Donovan. Fundamentals of silicon int. technik. N. Y., Prentic Hall, p. 20—110.
211. Clark, K. G. — *Solid St. Technol.*, 1971, No 6, p. 48, 1971, No 9, p. 52.
212. Clark, K. G. — *Microelectronics*, 1971, No 3, p. 23.
213. Haller, I. M. — *IBM J. Res. Dev.*, 1968, Vol. 12, p. 252.
214. Dunham, K. R. — *Solid St. Techn.* 1971, No 6, p. 41.
215. Berg, A. A. — *J. Electrochem. Soc.*, 1965, Vol. 112, p. 457.
216. Schneider, H. G. Werkstoffe und Technik, L., Verlag Leipzig, 1972.
217. Linssow, R. O. — *J. Electrochem. Soc.*, 1968, Vol. 115, p. 661.
218. Harell, S. A. Kodac Photores. Seminar, 1969, p. 18.
219. Hatzakis, M. — *J. Electrochem.* Soc., 1969, Vol. 116, p. 1033.
220. Kinssow, R. O. — *The J. of Vacuum Science and Technol.*, 1969, No 1, p. 18.
221. Shirley G.M.B.H. Instruktion, 1970.
222. Heninlags, K. E. — *NTZ*, 1968, No 10, p. 611.
223. Kühnel, Dartsch. — *Technologie elektronischer Bauelemente*, Technik, 1972. S. 211.
224. Handbuch der Vakuumtechnik. VEB Hochvakuum, Dresden, 1974.
225. Balzers. Aufdampfmaterialien, 1975.
226. Müller, B., B. Wagner. Vortr. XX Int. Koll. Ilmemau, 1975, S. 37.
227. Knedlick, Ch. Vakuumtechnische Blätter, 1975.
228. Knedlick, Ch. — *Nachrichtentechnik*, 1970, No 12, S. 456.
229. Mayer, H. Physik dünner Schichten. Stuttgart, 1950.
230. Nitsche, K. Magnetische elektrische Zerstör. Prüfung. Berlin, Technik, 1971.
231. Knedlick, Ch., F. Lietz. — *Wiss. z. Th. Ilmenau*, 1968, No 3, S. 327.
232. Wechsung, W., Braier. — *Vakuum-Technik*, 1975, No 6, S. 157.
233. Mirsch, S. — *Vakuumtechnische Blätter*, 1975, S. 433.
234. Mirsch, S., H. Reimer, Phyteb. Th. Ilmemau in Technologie elektronischer Bauelemente, Technik, 1974.
235. Kühne, H. Kombinat VEB Halbleiter Fr/Oder in Technologie elektronischer Bauelemente. B., Technik, 1974, S. 249.
236. Sinclair, W. — *J. Amer. Ceramic Soc.* 1963, Vol. 46, p. 20.
237. Sdewares, G. — *IBM J. Res. Dev.*, 1970, No 4, p. 209.
238. Müller, Wagner. XX Int. Wiss. Koll. Th. Ilmenau, 1975, S. 37.
239. Jacob. — *Solid St. Technology*, 1977, No 12, p. 31.
240. Katona, J. Inst. für Nachrichtentechnische Industrie, Budapest, in passive elektronische Elemente. B., Technik, 1974.
241. Kühlmann, R. Vorträge vom XX Int. W. Koll. Th. Ilmenau, 1975, S. 57.

242. Siemens-Industrie-Schriften, 1972.
243. Delfs, H. — *Elektr. Rundsch.* 1971, No 12, S. 301.
244. Katalog Hybrid. REMIX, Budapest, 1974/75.
245. Pieper, Fr. Telefunken Applikationsbericht, 1972.
246. Richter, W. — *Radio-Fernsehen Elektronik*, 1970, H. 7, S. 212.
247. Siemens-Firmenschrift, 1977.
248. Kaischew, R. — *Fortschr. der Mineralogie*, 1960, Vol. 38, S. 7.
249. Bliznakow, G. — *Fortschr. der Mineralogie*, 1958, Vol. 36, S. 149.
250. Bliznakow, G. — *Phys. State Sol.*, 1956, Vol. 13, S. 101.
251. Wewman, R. C. — Microelectronics and Reliability, 1964, No 2, p. 121.
252. Teal, R. G. — *J. Appl. Phys.*, 1946, Vol. 17, p. 879—81.
253. Schulz, M. Kristall und Technik. 1968, Vol. 3, S. 193.
254. Wienhald, K. O. Epitaxie — Vorträge von Fr./ /Oder, 1974.
255. Batsford, K. O. — *Electrical Communication*, 1963, Vol. 38, p. 354.
256. Steinberg, R. F. — *J. Appl. Phys.*, 1966, Vol. 37, p. 4586.
257. Autell, G. R., D. Effer — *J. Electrochem. Soc.* 1959, Vol. 106, p. 509.
258. Sirtl, E. — *J. Phys. Chem. Sol.*, 1963, Vol. 24, p. 1235.
259. Goodwin, A. R. — *Brit. J. Appl. Phys. Ser.*, 1968, Vol. 2, p. 115.
260. Mayer, S. E. — *J. Electrochem. Soc.*, 1964, Vol. 111, p. 550.
261. Grove, A. S. In Physics and Technol. of Semicond. N. Y., John Wiley, 1967, p. 321.
262. Shepherd, W. H. — *J. Electrochem. Soc.*, 1965, Vol. 112, p. 988.
263. Eversteyn, D. C. — *J. Electrochem. Soc.*, 1970, Vol. 117, p. 925.
264. Broadshaw, S. E. — *Int. J. Electronics*, 1967, Vol. 23, p. 381.
265. Nelson, H. — *RCA Review*, 1963, Vol. 24, p. 367.
266. Anderson, R. L. — *IBM Journal Res. Devel.*, 1960, Vol. 4, p. 283.
267. Herrmann, F. P. In Technologie elektronischer Elemente. B., Technik, 1974.
268. Cooke, M. — *Microelectronics*, 1976, No 3, p. 49.
269. McDonald, Goessberger, A. In Halbleiterpraxis. M., Oldenburg, 1970.
270. Mitlenbacher, J. XX. Int. Wiss. Koll. Th. Ilmenau, 1975, S. 101.
271. Lepselter, M. P. Ohmic Contacts to Silicon. Murray Hill, 1970, p. 159.
272. Hooper, A. — *Sol. State Electronics*, 1974, Vol. 17, p. 531.
273. Schulz, M. In aktive elektronische Bauelemente. B., Technik, 1974.
274. Schloti, J. In Technologie elektronischer Bauelemente. B., Technik, 1974.
275. Diener, Köhler, u.a. Halbleiter Elektronik, B., Technik, 1972.
276. Möschwitzer, Lunze. Halbleiterelektronik. B., Technik, 1972.
277. Bergh, Strain. Ohm Conf. to Semiconductors. 1972, p. 118.
278. Sze. Tivin. Proceeding of IEE, 1965, p. 600.
279. Das M. S. — *Solid State Electronics*, 1969, Vol. 12, p. 305.
280. Hoeneisen, B. — *Solid State Electronics*, 1972, Vol. 15, p. 819.
281. Valdes, E. Characteristics of silicon epitaxial transistor, RHEEM, Semiconductor Corporation. Montain, 1968, Vienna.
282. Flaks, F. Calculs des transistors VHF de puissance RHEEM. Montain, 1968, Vienna.
283. Encinas, Minue. Etude et réalisation des transistors VHF de puissance 2—3 et 6 W — 180 MHZ en silicum epitaxie. RHEEM, Montain, 1968, Vienna.
284. Irvin John. Resistivity of bulk silicon and of diffused layers in silicon. N. Y., McGraw Hill, 1966.
285. Hauser, J. R. Bipolar Transistors. M. Oldenburg, 1971, p. 220—250.
286. Raderecht, P. S. — *Int. J. Electron.*, 1971, Vol. 31, p. 6.
287. Warner, W. M. — *Sol. St. Electr.*, 1966, No 2, p. 167.
288. Bullis, W. M. — *Sol. St. Electr.*, 1966, No 2, p. 167.
289. Lambert, J. L. Wiss. Berichte AEG Telefunken. 1972, No 4.
290. Tvasa. — *J. Electrochem. Soc.*, 1968, Vol. 115, p. 9.
291. Tvao. — *J. Electrochem.* Soc., 1968, Vol. 115, p. 8.
292. Optron, Inc. (фирмена брошура), 1977.
293. Plihal, M. — *Siemens-Zeitschrift*, 1976, No 8. S. 167.
294. Peacer, A. R. — *Microelectronics*, 1976, No 3. p. 5.
295. Hall, R. — *Microelectronics*, 1976, No 3, p. 13.
296. Kressel — RCA (фирмен шрифт), May 1973
297. Gereth, R. Telefunken Applikationsbericht, 1970.
298. Collier. Optical Holography, Bell. Tel. Lab., 1971.
299. Valdes, E. — *IEEE J.S.S. Circuits*, 1968, No 6, p. 317.
300. Anderson, R. L. — *IEEE Journal of S. S. Circuits*, 1967, No 3, p. 65.
301. Mueller, C. W. — *Applied Optics*, 1972, No 6, p. 1382.
302. Appels, J. A. — *IEEE Trans. on Magnetics*, (1973), No 2, p. 83.
303. Collier, H. — *IEEE Spectrum*, (1973), No 3, p. 48.
304. Collier, H. — *IEEE Spectrum*, (1973), No 3, p. 48.
305. Mikroelektronik 5 Manuscriptdruck der Vorträge, 1972.
306. Revue technique: Thomson — CSF (фирмен шрифт), Dec. 1974.
307. Sah, C. T., H. C. Pao — *IEEE Trans. El. Devices*, 1966, No 4, p. 212.
308. Wright. — *El Letters*, 1970, No 19, p. 167.
309. Cobbold, R. — *El. Letters*, 1966, No 2, p. 19.
310. Müller, B. — *Electronic Engineering*, 1970, No 10, p. 786.
311. Koehler, H. F. — *Computer Design*, 1974, No 6.
312. Faggin, F., T. Klein. — *Electronics*, 1969, No 20, p. 88.
313. Faggin, F., T. Klein — *Sol. St. Electronics*, 1970, 13, 1125.
314. English, P. *D.* — *Microelectronics*, 1970, No 9, p. 39.
315. Vedass, L. L., A. S. Grove — *IEEE Spectrum*, 1969, No 10, p. 28.
316. Langhton, W. J. — *Electronics*, 1971, No 8, p. 68.
317. Appels, J. A., F. Koi — *Philips Res. Rep.*, 1970, Vol. 25, p. 118.
318. Appels, J. A., M. M. Paffen. — *Philips Res. Rep.*, 1971, Vol. 26, p. 154.
319. Kooi, E., J. G. von Lierop. — *Philips Res. Rep.*, 1971, Vol. 26, p. 274.
320. Morandi, F. — *Electronics*, 1971, No 26, p. 139.
321. Bazin, B. — *Sol. St. Electronics*, 1972, Vol. 15, p. 649.
322. Mueller, C. W., P. H. Robinson. — *Appl. Phys.*, 1968, Vol. 36, p. 2746.
323. Ross, E. C., C. W. Mueller. — *IEEE Trans. El. Devices*, 1966, Vol. 13, p. 349.
324. Holmes, F. E., C. A. T. Salom. — *El. Letters*, 1972, Vol. 9, p. 457.
325. Riley: Special Report, Electronics, 1973, Aug. 2.
326. Schlenter, M. — *Elektronik*, 1976, H. 10, S. 23.
327. Hnatek, E. R. A User's Handbook of Semiconductor memories. 1977. Wiley Interscience.
328. Schmidt, J. D. — *Solid State Design*, 1965, No. 1, p. 67.
329. Pleschko, P., L. Terman. — *IEEE Trans. El. Computers*, 1966, No. 4, p. 432.
330. Brewer, D. E., S. Nissim — *Electronics*, 1967. No 23, p. 832.

331. Friedrich, J. H. — *J. Sol. State Circ.*, 1968, No 3, p. 286.
332. Brugler, J. S., R. Gespers. — *IEEE, Trans. El. Devices*, 1973, No 3, p. 212.
333. USA Patent No 4012757, 15.3.1977 — Santa Clara.
334. Developments in large integration. Motorola Sem. Prod. Inc., 1974.
335. Kooi J. K. — *IEEE J. Sol. State Circ.*, 1970, No 5, p. 320.
336. Data Book Electronics Information Series MSI/LSI Semi-conductors memories, Texas Instr., 1977, Vol. 1.
337. Wolfendale, E. MOS-Int. Circ. Design, L. 1972.
338. Siemens-Forschungsbericht (1976).
339. Hanke, H. J. XX. Intern. Wiss. Koll. Th. Ilmenau, 1975.
340. Topfer, M. L. Recent developments in thin films transistors. N. Y., Mc. Graw Hill, 1970.
341. Polaschegg, H. D. — *Vakuum-Technik*, 1976, No 1, S. 12.
342. Kirby, P. L. — *Elektronik*, 1968, No 5, S. 143, *Elektronik*, 1969, No 6, S. 361.
343. Delis, H. — *IRE Rundschau*, 1971, No 6, S. 125.
344. Henning, H. K., D. Hingarh. — *IEEE J. Paper*, 1977, No 3, pp 101—109.
345. Müller, J., Wulms. — *IEEE, Paper*, 1977, No 3, pp. 143—70.
346. Evans, S. A., R. D. Davies, D. B. Estreich. — *IEEE J. Paper*, 1977, No 3, pp. 191—198, 208—210.
347. Wulms. The TDA 1077 IEEE J., 1977, No 3, pp. 238—242.
348. Shinozaki, S. — *Electronic Letters*, 1977, No 1, pp. 6—7.
349. Wulms, H. E.J. ISSCC, Digest of Techn. papers, 1975, p. 96—97.
350. Jaeger, R. C. ISSCC, Digest of Techn. Papers, 1975, pp. 92—93.
351. Sanders, T. J., M. A. Weiant. GOMAC, 1976. pp. 8.
352. Warner, R. M. — *Electronics*, 1976, Jan. 8, p. 129.
353. Circuit integré, Pat. français, No 2,130,399, cl. HO11, 19/00.
354. Wiedman, S. K., H. H. Berger. — *Solid State Electronics*, 1976, No. 9, p. 1007.
355. Circuit integré, pat. fr. No 2,138,905, cl. HO11, 19/00.
356. Berger, H. H., S. K. Wiedman. — *IEEE J.S.S. Circuit*, 1972, No. 5, p. 340.
357. Wiedman, S. K., H. H. Berger. — *Electronics*, 1977, Feb. 14, pp. 83—86.
358. Weinberger, A. — *IEEE J.S.S.Circuit*, 1977, pp. 182—190.

СЪДЪРЖАНИЕ

Предговор 5

Глава 1. **Миниатюаризация и надеждност** 7

Глава 2. **Технология на полупроводниковите материали** 9

2.1. Силиций 9
2.2. Германий 10
2.3. Сложни полупроводници 11
2.4. Механична обработка на полупроводниковите материали 12
2.5. Полупроводниковата пластина като изходен материал на всяка технологична схема . . . 13

Глава 3. **Химична обработка** 17

3.1. Влияние на химичната обработка върху повърхността 17
3.2. Механизъм на химичната обработка 20
3.3. Химичната обработка в примери 23

Глава 4. **Диелектрични покрития в полупроводниковото производство** 27

4.1. Предназначение на диелектричните покрития 27
4.2. Методи за получаване на тънки диелектрични покрития и механизъм на процесите 28
4.3. Параметри на диелектричните покрития . . 34

Глава 5. **Фотолитография** 41

5.1. Предназначение и същност на фотолитографията 41
5.2. Методи на фотолитографията 41
5.3. Механизъм на фотолитографския процес . . 44
5.4. Параметри на лаковете и фотошаблоните и контрол на параметрите на фотолитографския процес 47

Глава 6. **Вакуумни процеси в полупроводниковата технология** 50

6.1. Предназначение на вакуумните процеси . . 50
6.2. Механизъм на отлагането 51
6.3. Разпрашване на диелектрици и полупроводников материал 55
6.4. Йонно ецване 55
6.5. Параметри на отложените покрития и техният контрол 57

Глава 7. **Корпуси и монтажи в полупроводниковата технология** 60

7.1. Предназначение на корпуса и на монтажните операции 60
7.2. Видове корпуси 60
7.3. Монтажен процес 69

Глава 8. **Епитаксия** 73

8.1. Предназначение и същност на епитаксията 73
8.2. Технология на епитаксиалното израстване и методи 73
8.3. Механизъм на епитаксиалното израстване при използуване на химичен транспорт или директна реакция в системата 77
8.4. Параметри на епитаксиалните слоеве . . . 79

Глава 9. **Получаване на PN преход и неизправящ преход** 81

9.1. Преходът в концентрацията — основен елемент в конструкцията на полупроводниковия прибор (изправящи и неизправящи преходи) . . 81
9.2. Сплавяне 81
9.3. Преход метал — полупроводник 83
9.4. Дифузия 85
9.5. Йонна имплантация 91
9.6. Контрол на параметрите на получените преходи 93

Глава 10. **Преход метал — диелектрик — полупроводник** 94

10.1. MOS кондензатор 94
10.2. Преход метал — нитрид—окис—полупроводник 98

Глава 11. **Конструктивно-технологични особености на биполярните прибори** 101

11.1. Класификация на биполярните прибори . . 101
11.2. Видове технологични схеми в биполярната технология 101
11.3. Планарно-епитаксиални структури 103
11.4. Аналогови интегрални схеми (АИС) 106
11.5. Цифрови интегрални схеми 121
11.6. Конструктивно-технологични особености в инжекционната логика 124
11.7. Конструиране на силови и мощни прибори 129
11.8. Оптоелектронни прибори 140

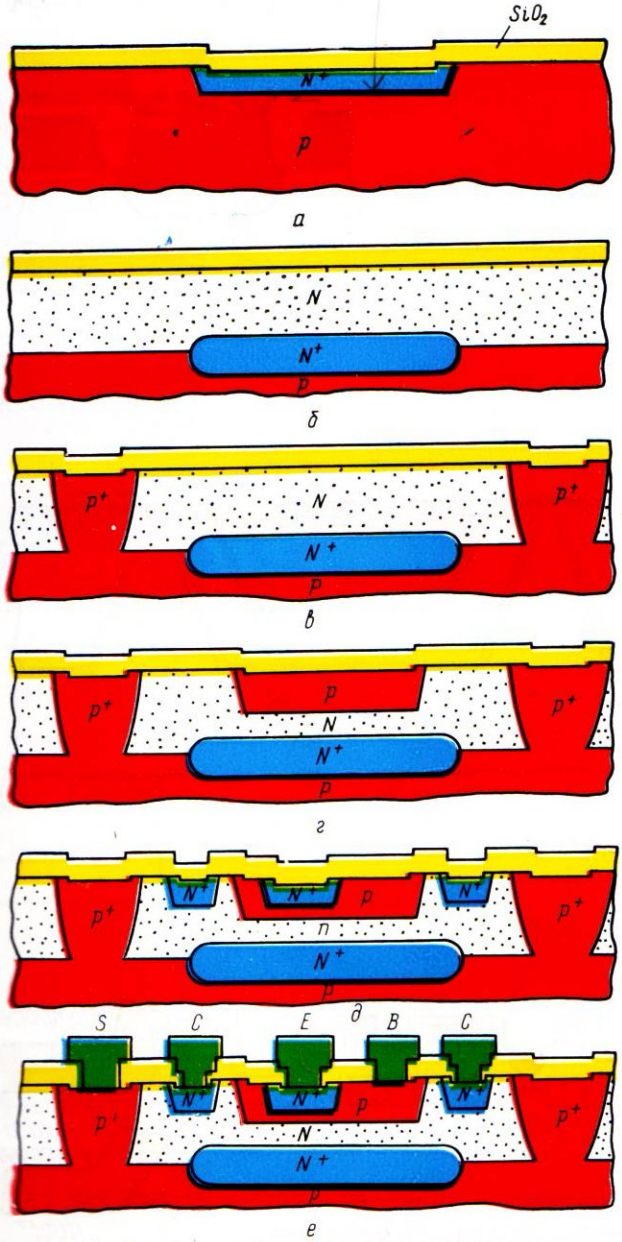
Глава 12. **Конструктивно-технологични особености при MOS приборите** 158

12.1. Класификация на униполярните прибори 158
12.2. Варианти на технологични схеми при MOS-приборите 158
12.3. Конструктивни проблеми при дискретните полеви транзистори 158
12.4. Конструиране на MOSИС 160
12.5. Развитие на полупроводниковите запомнящи устройства 175
12.6. Големи интегрални схеми 189

Глава 13. **Конструктивно-технологични особености в слойната и хибридната технология** .

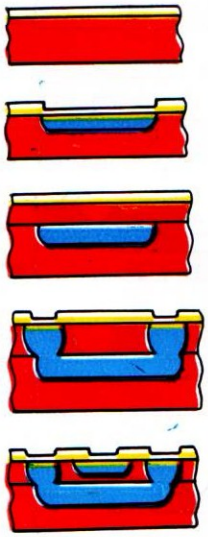
13.1. Класификация на изготвяните прибори . . 191
13.2. Дебелослойна и тънкослойна технология 191
13.3. Реализиране на компоненти в слойната технология 195
13.4. Хибридна технология 196
13.5. Технологични варианти и особености в тънкослойната технология 197
13.6. Реализиране на хибридни СВЧ — интегрални схеми 198
13.7. Реализиране на пиезоелектрически елементи 201

Литература 203



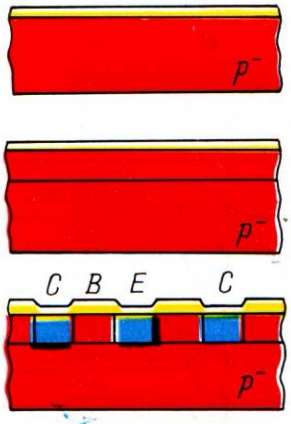
Стандартна планарно - епит. схема

Фиг 11.1



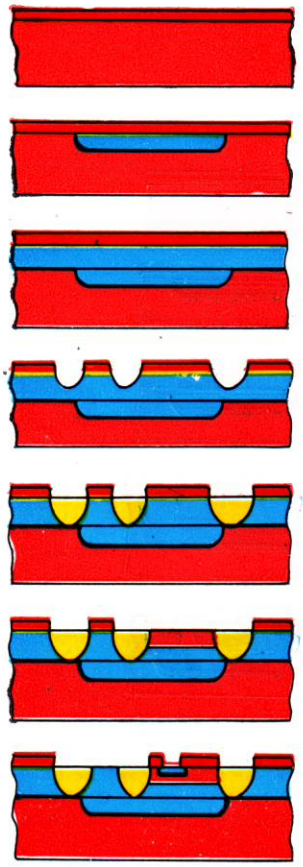
CDI – схема

Фиг. 11.2



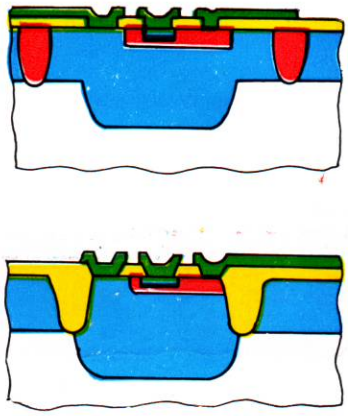
Тримаскова схема

Фиг. 11.3

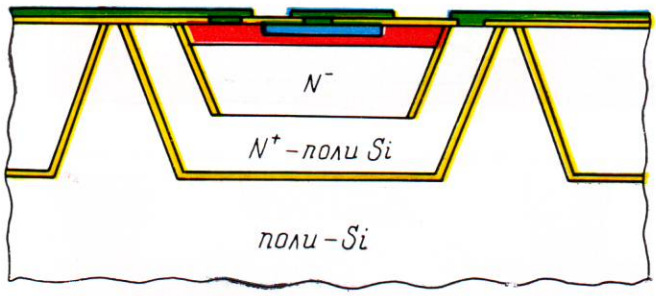


Изопланарна схема

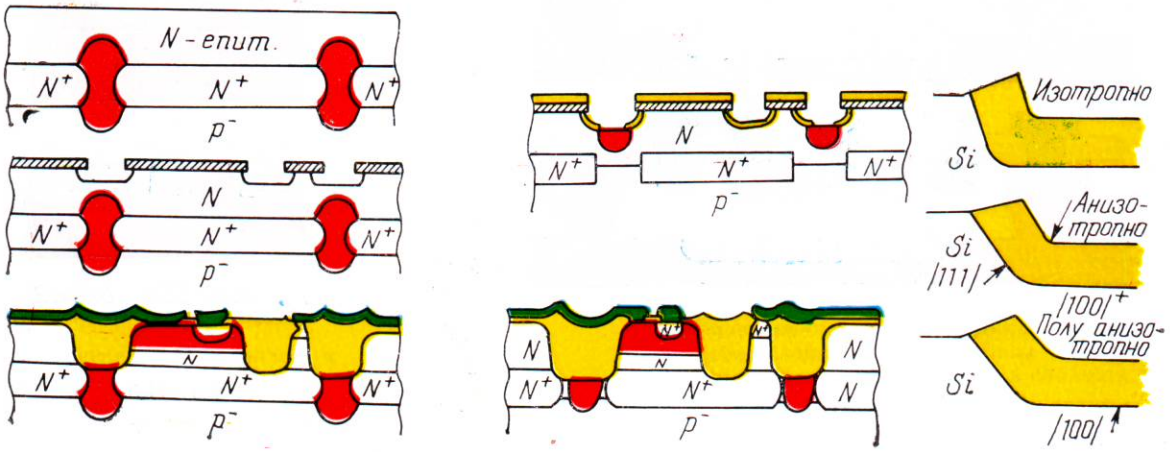
а)



б)

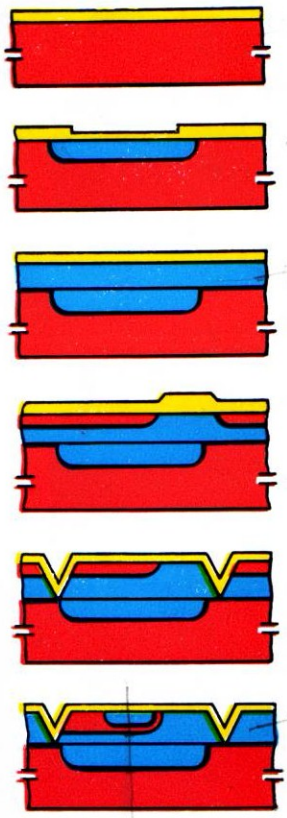


в)



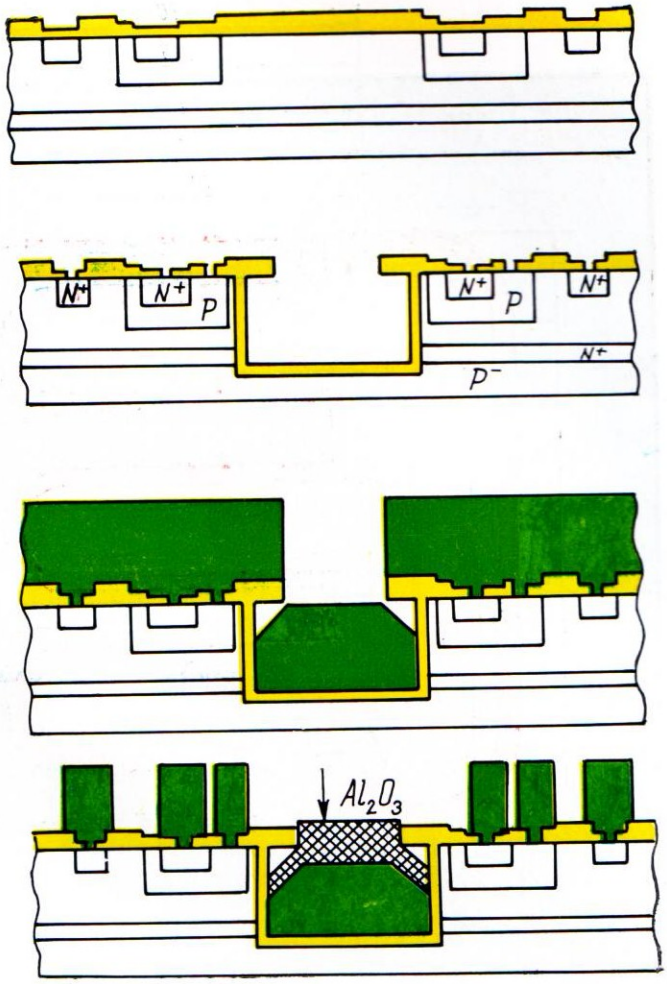
г)

Фиг. 11.4

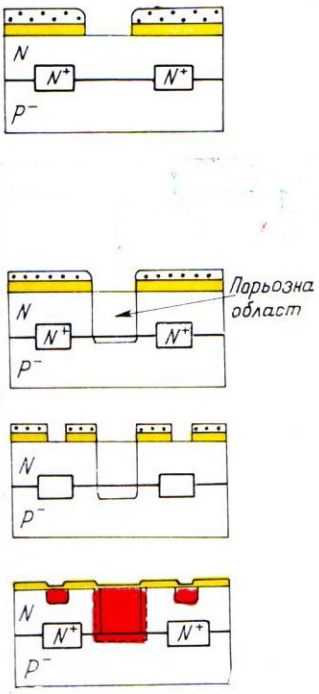


V-ATE - схема

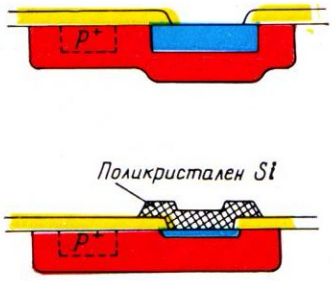
Фиг. 11.5



Фиг. 11.6

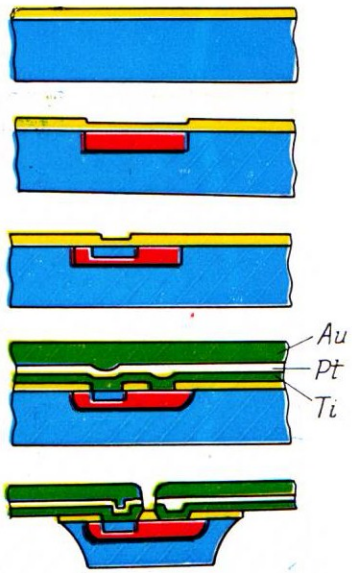


а)



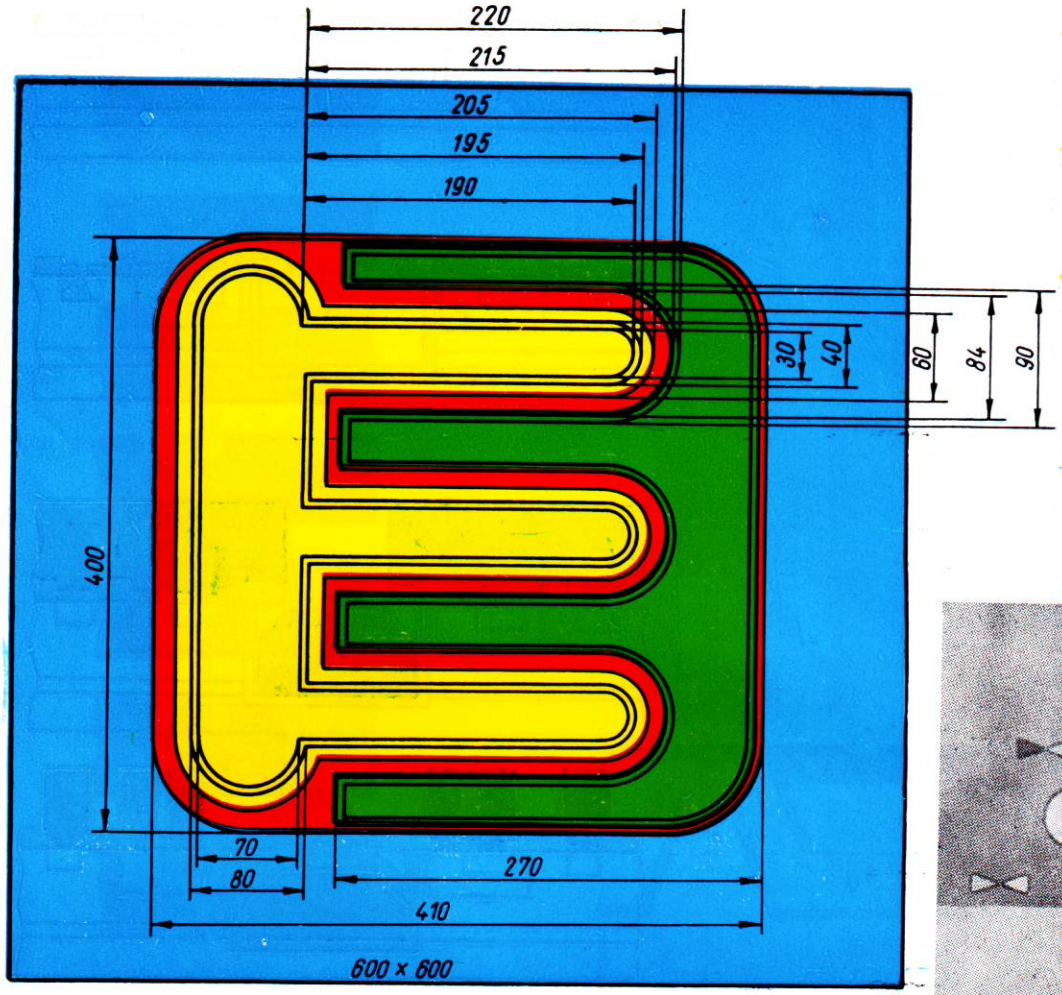
б)

Фиг. 11.7

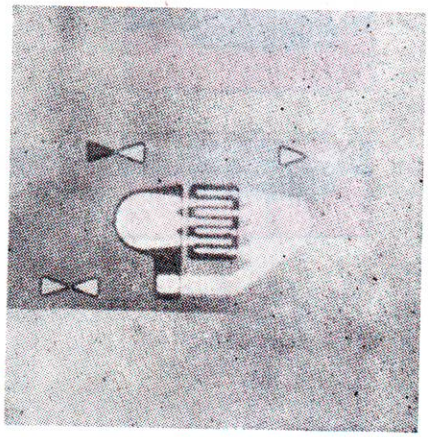


Бийн - Лид - схема

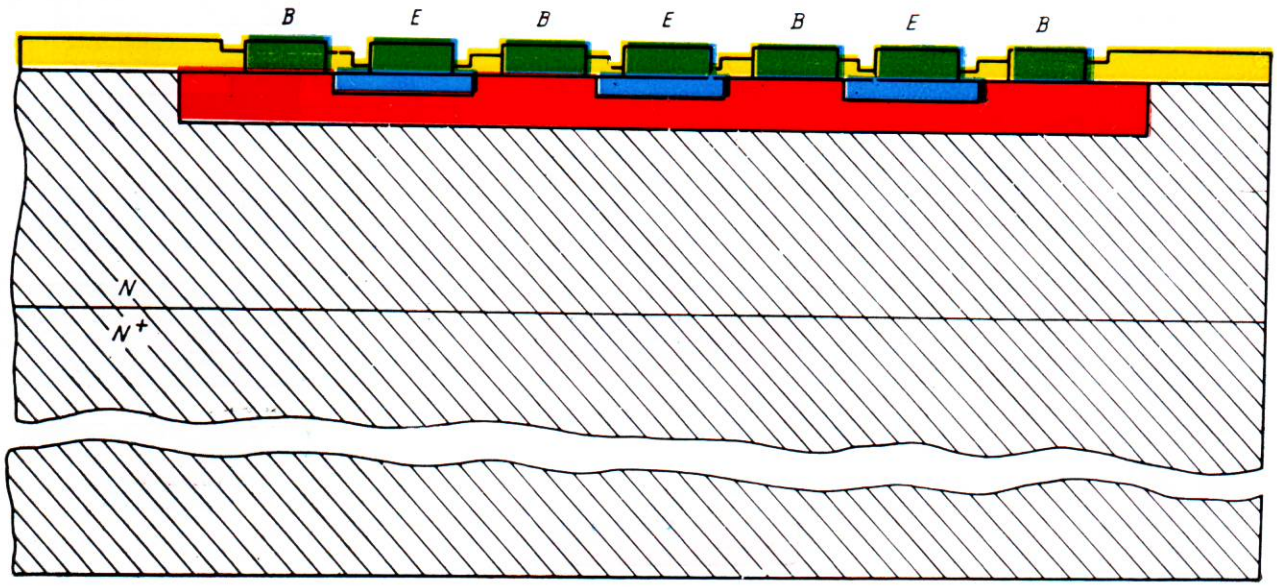
Фиг. 11.8


220
215
205
195
190
30
40
60
84
90
400
70
80
270
410
600 × 600
M: 200 : 1

а)

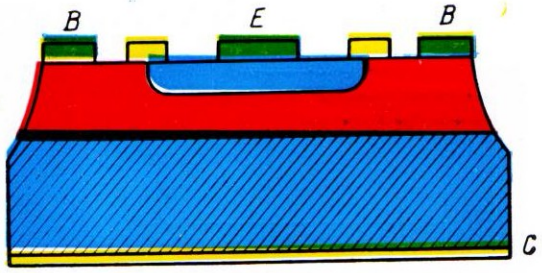


в)

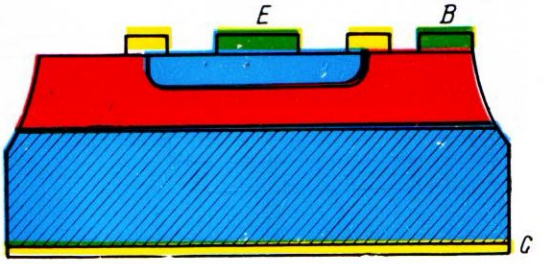

B
E
B
E
B
E
B
N
N+

(б

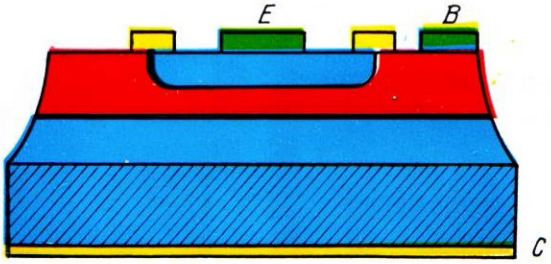
Фиг. 11.10



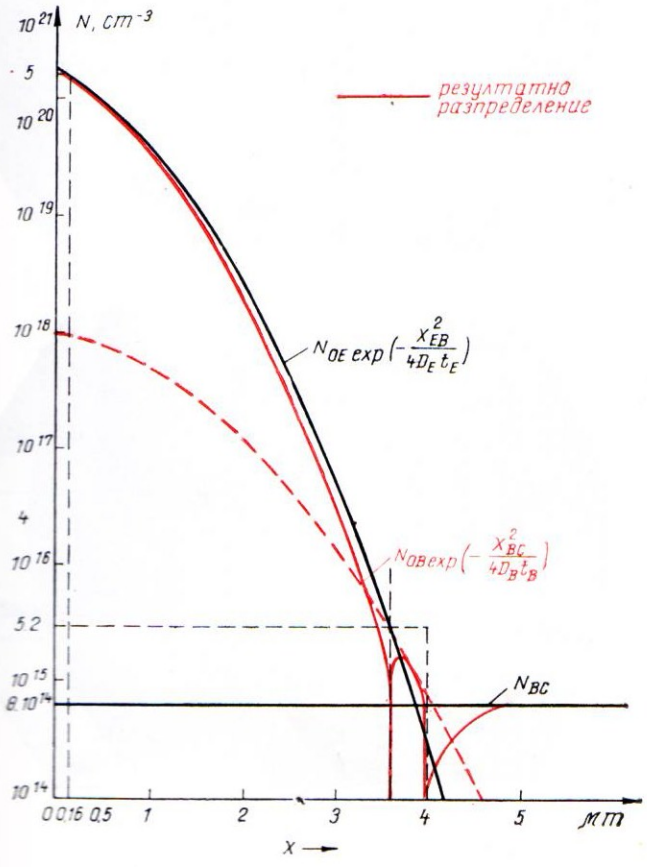
Фиг. 11.11



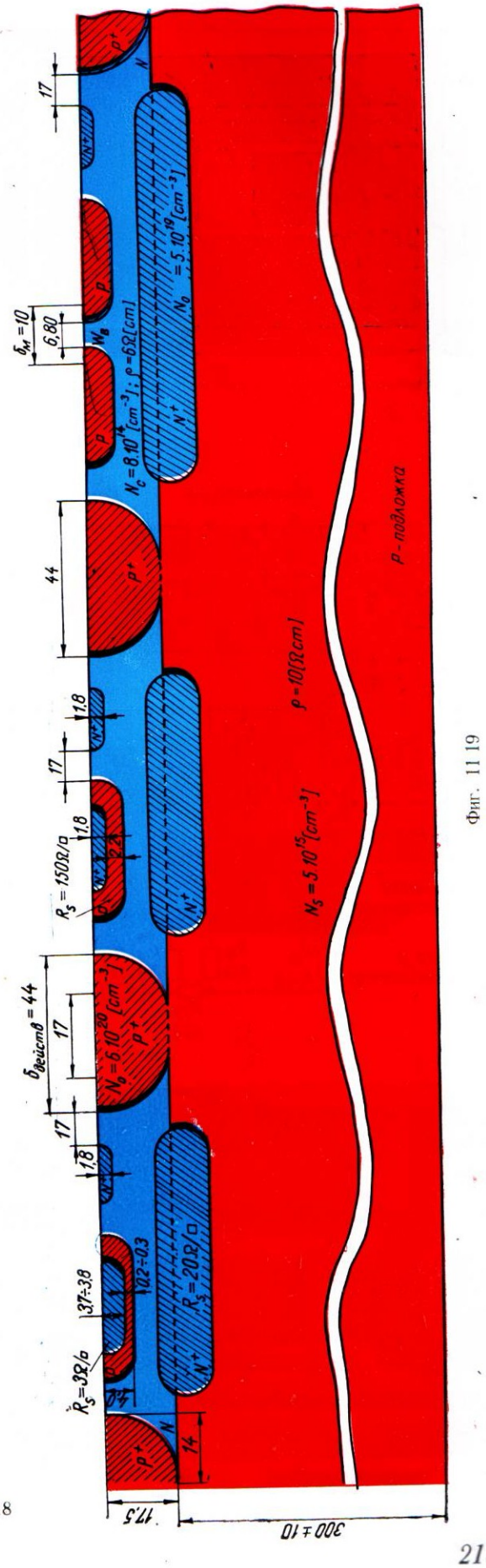
Фиг. 11.12



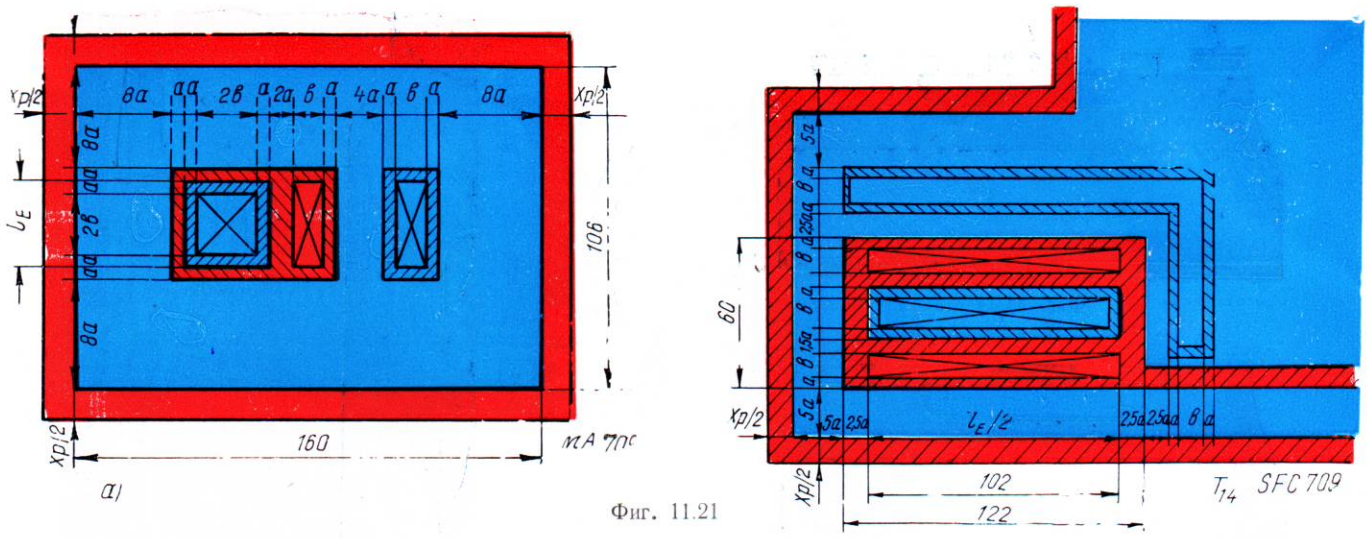
Фиг. 11.13



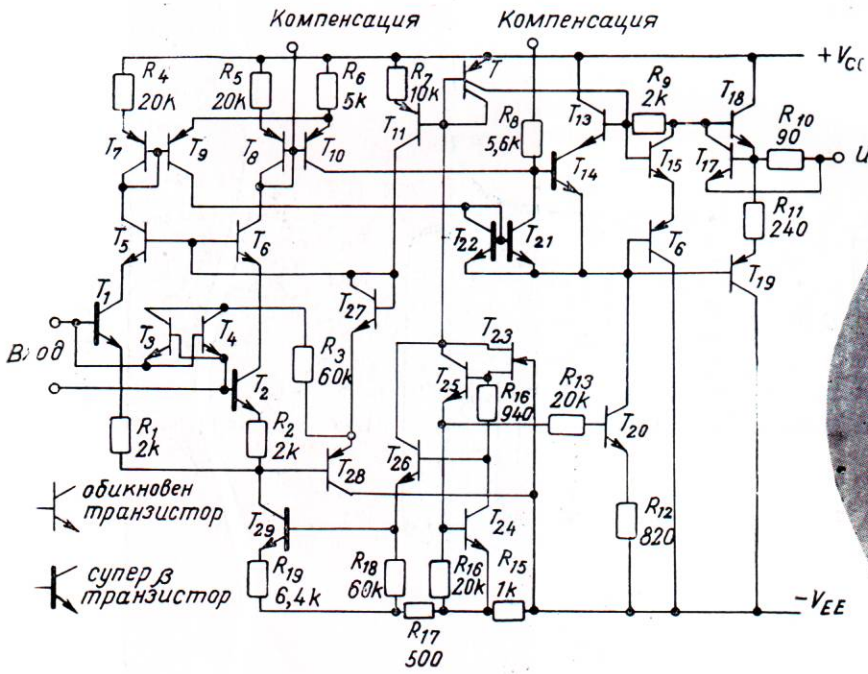
Фиг. 11.18

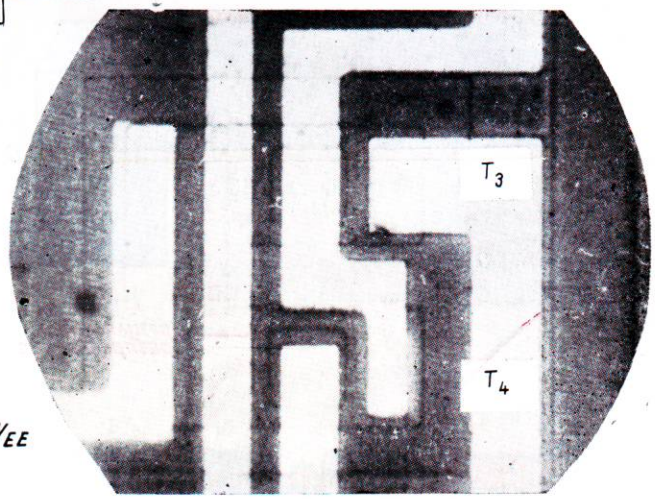


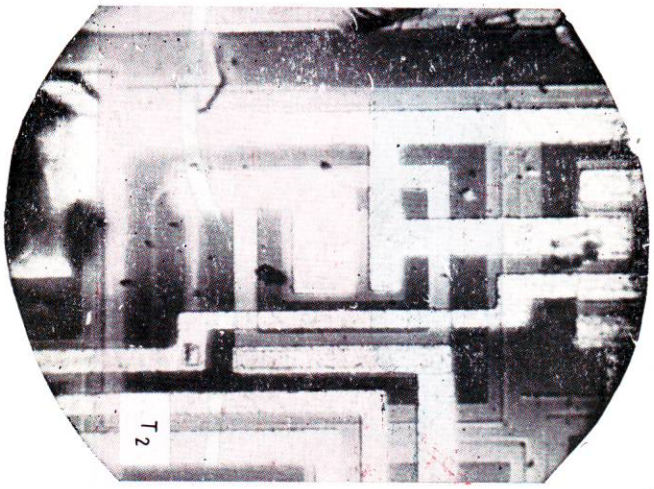
Фиг. 11.19

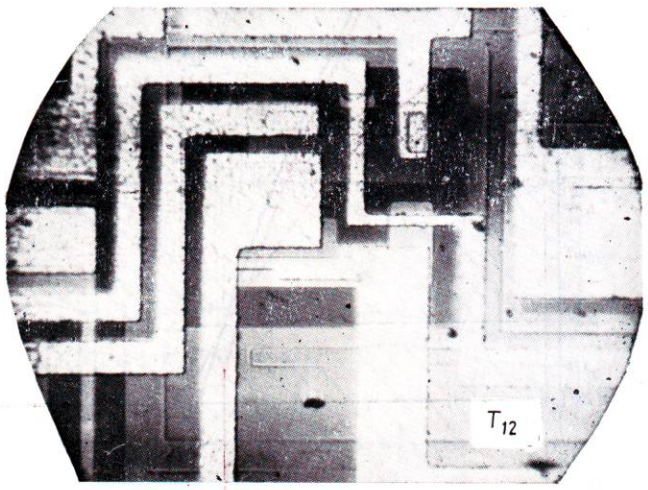


Фиг. 11.21

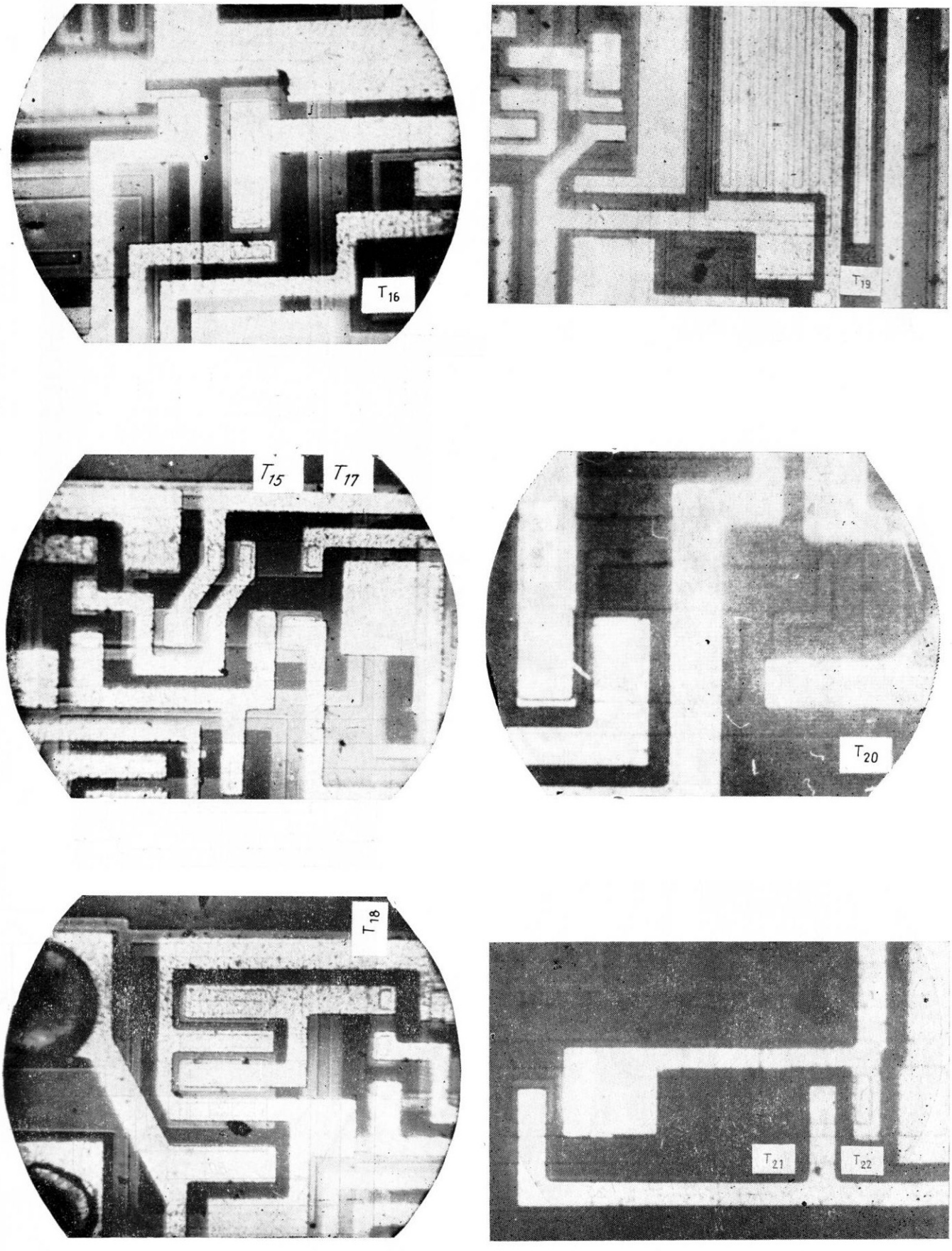




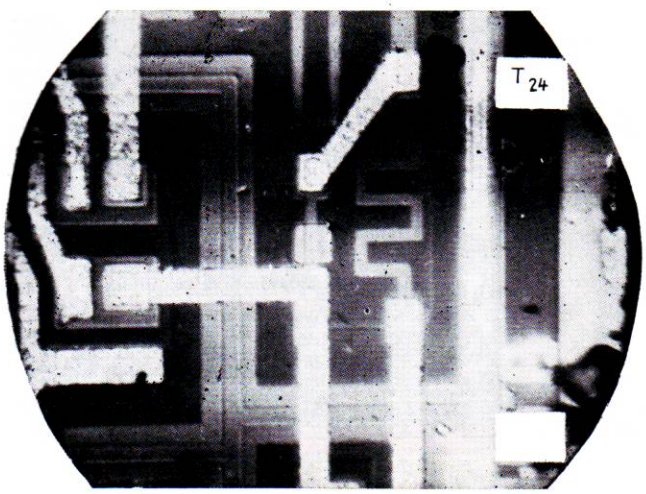


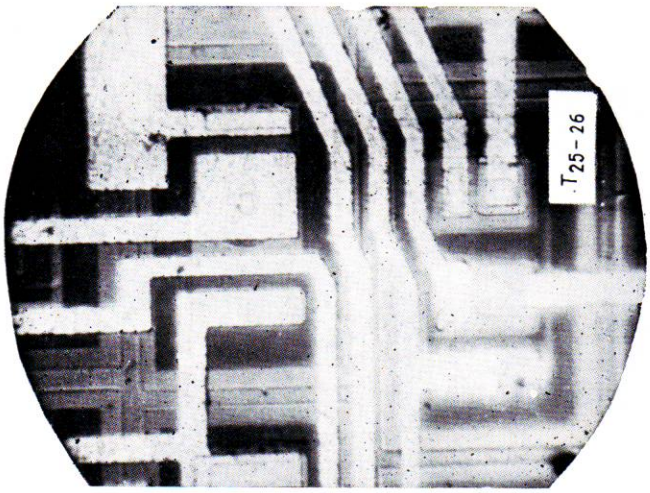


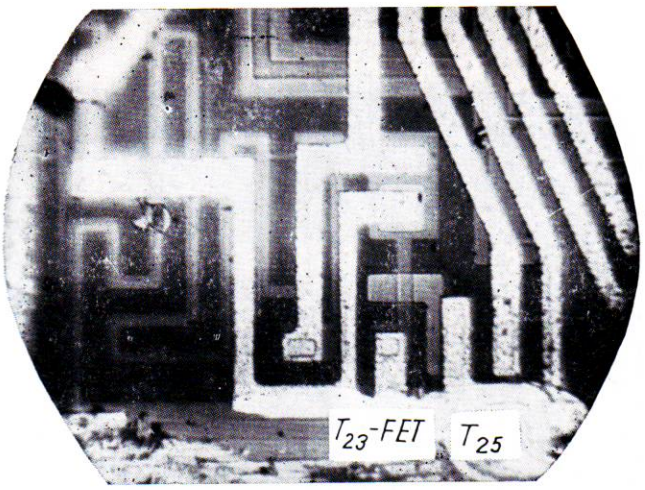
Фиг. 11.24



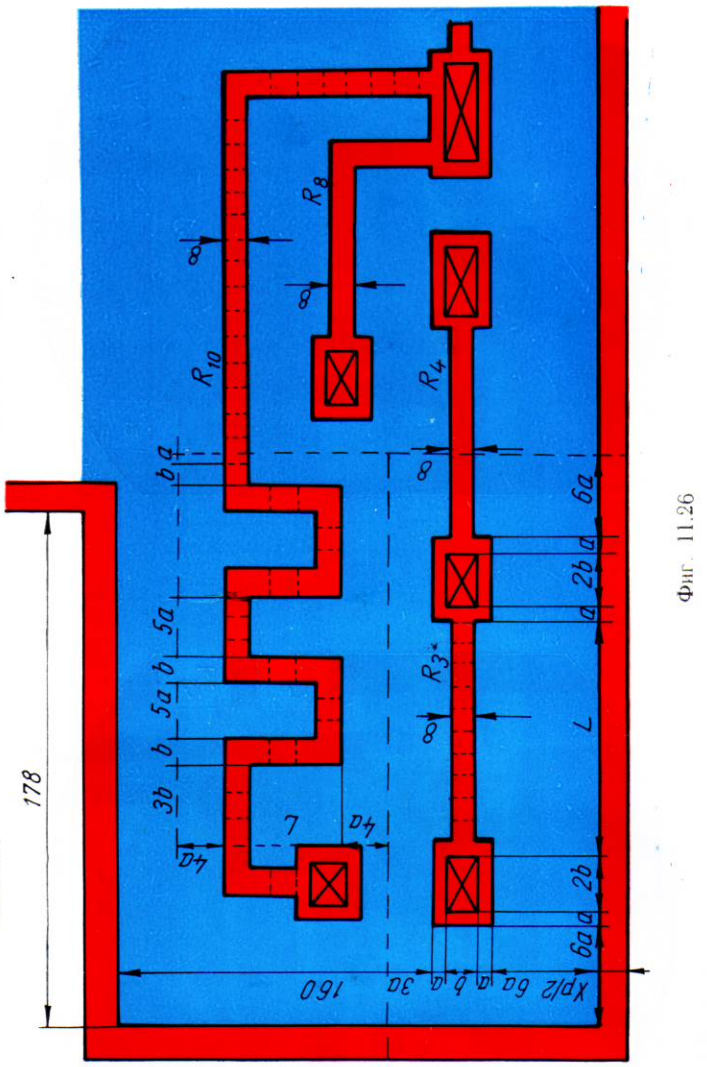
Фиг. 11.24



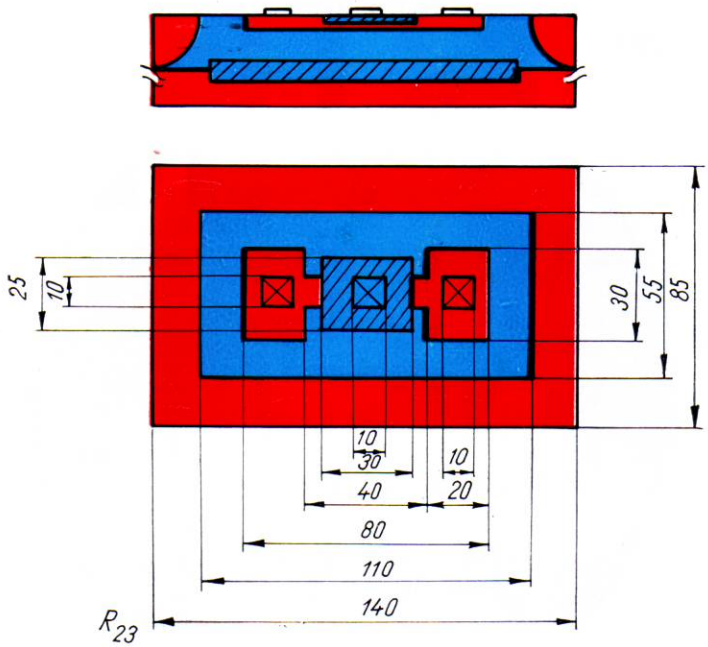




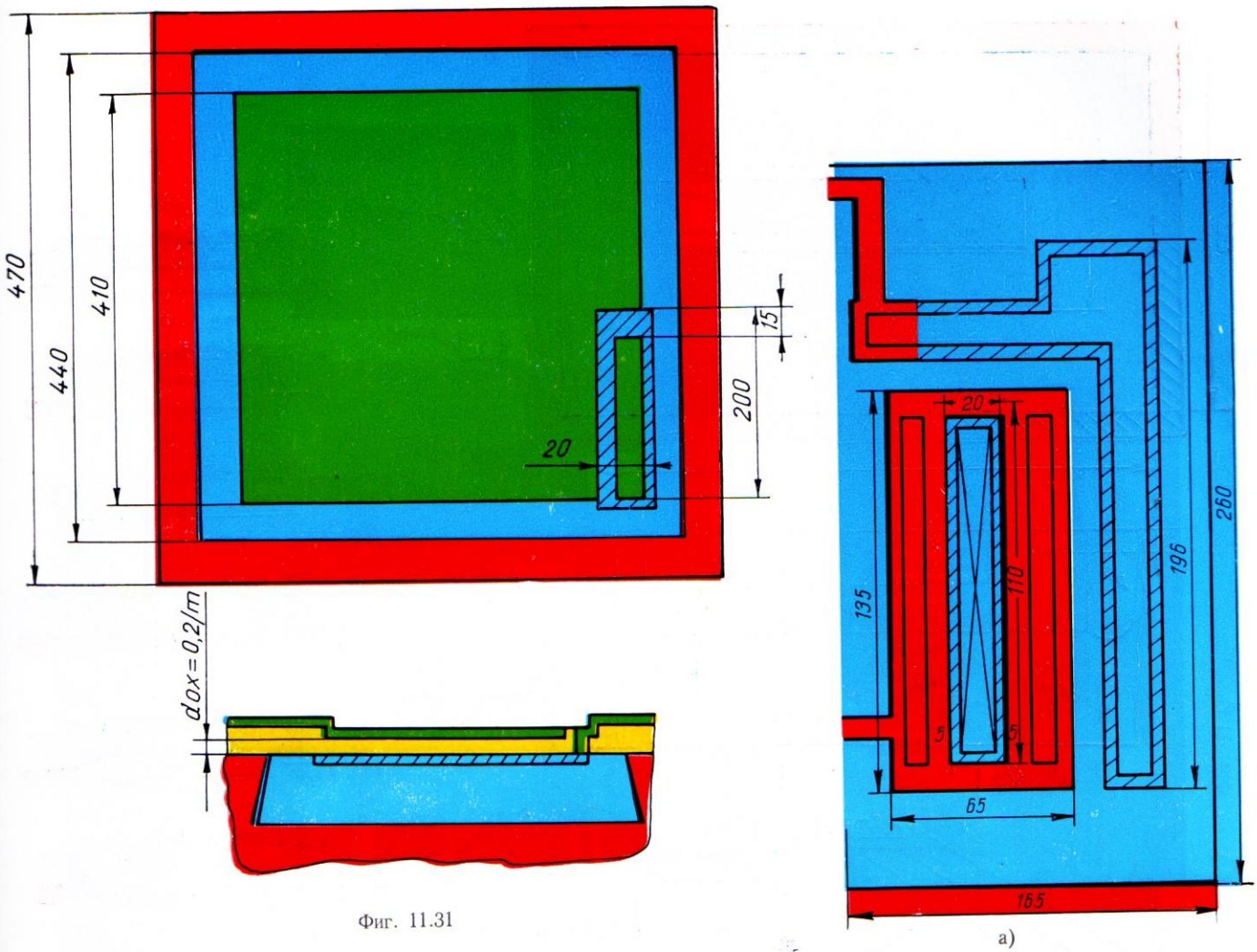
Фиг. 11.24



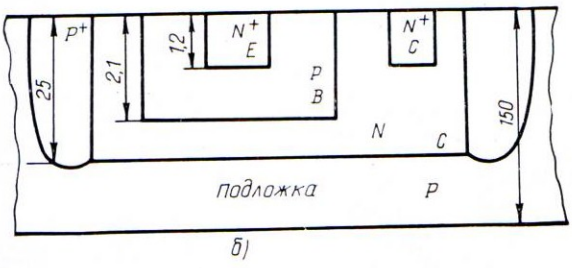
Фиг. 11.26

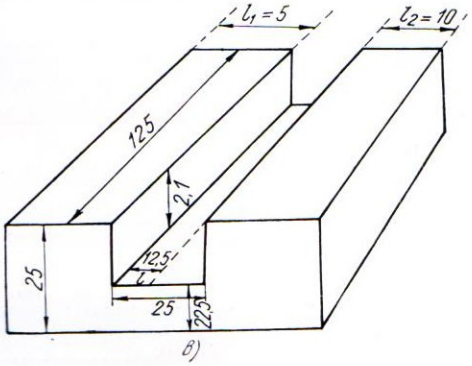


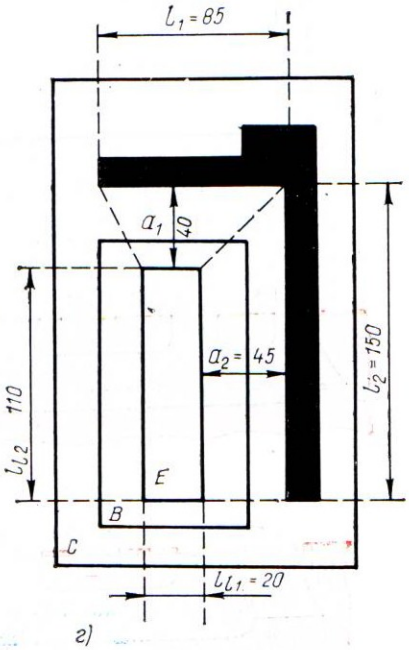
Фиг. 11.28



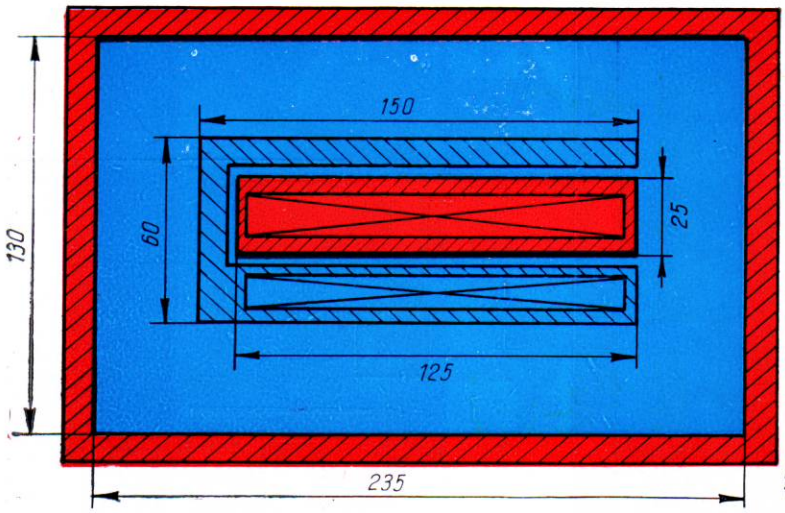
Фиг. 11.31

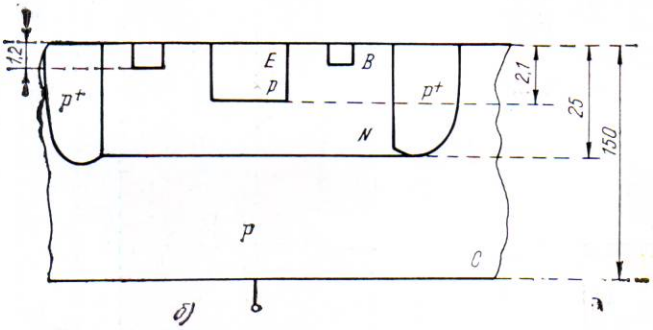




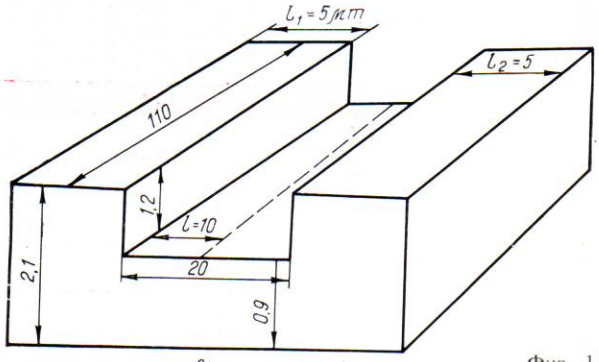


Фиг. 11.33



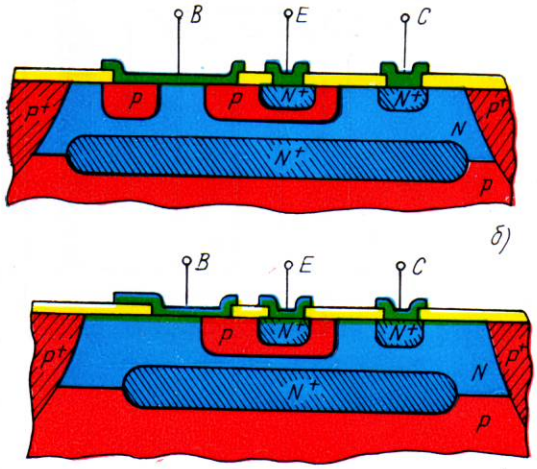


б)



в)

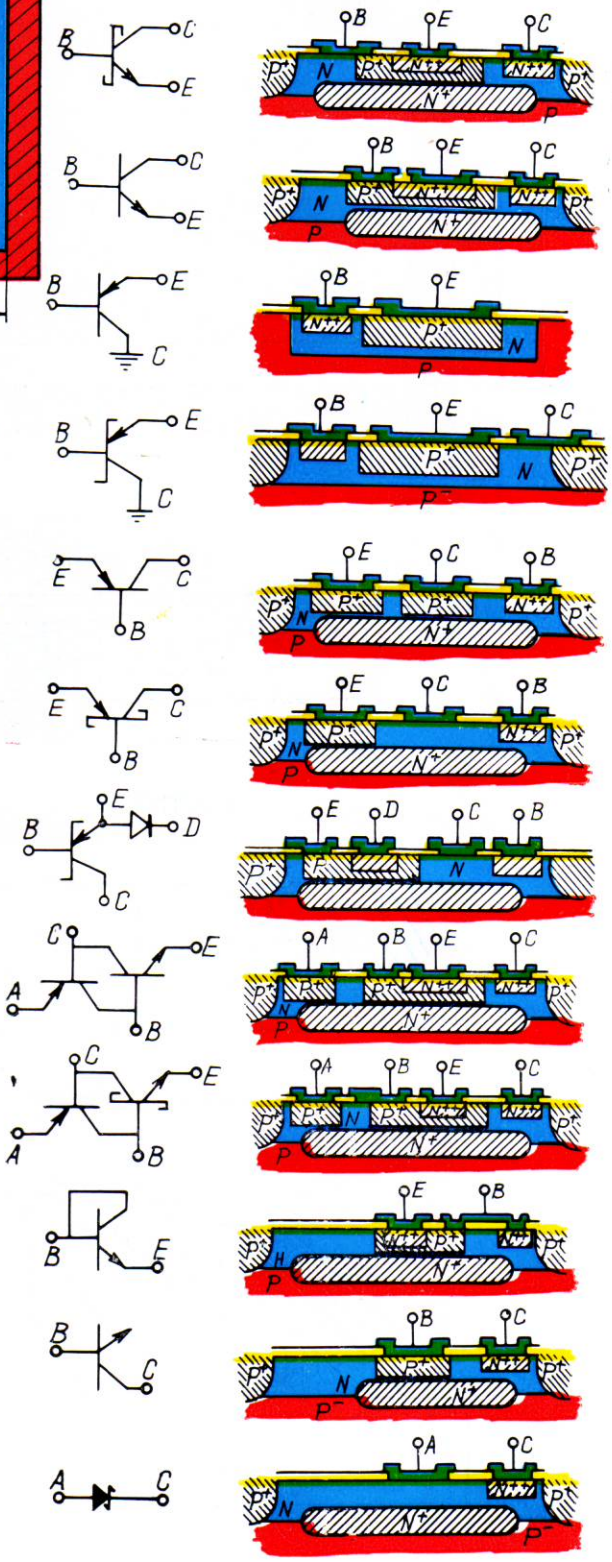
Фиг. 11.34



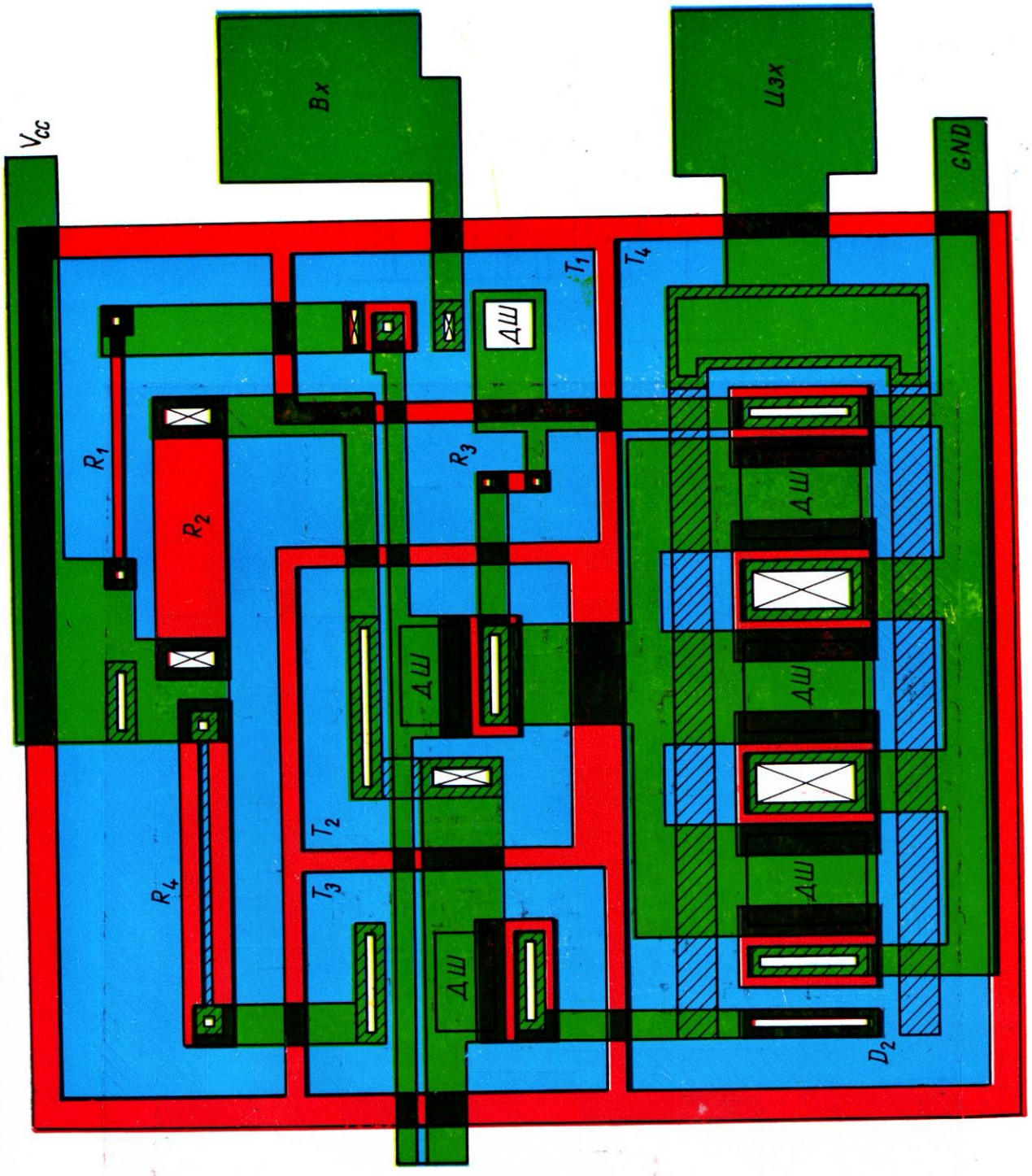
б)

а)

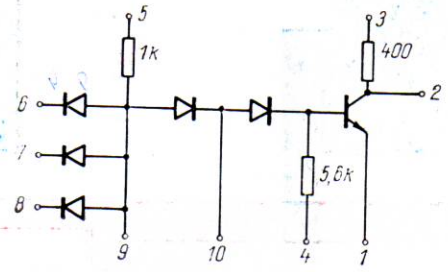
Фиг. 11.37



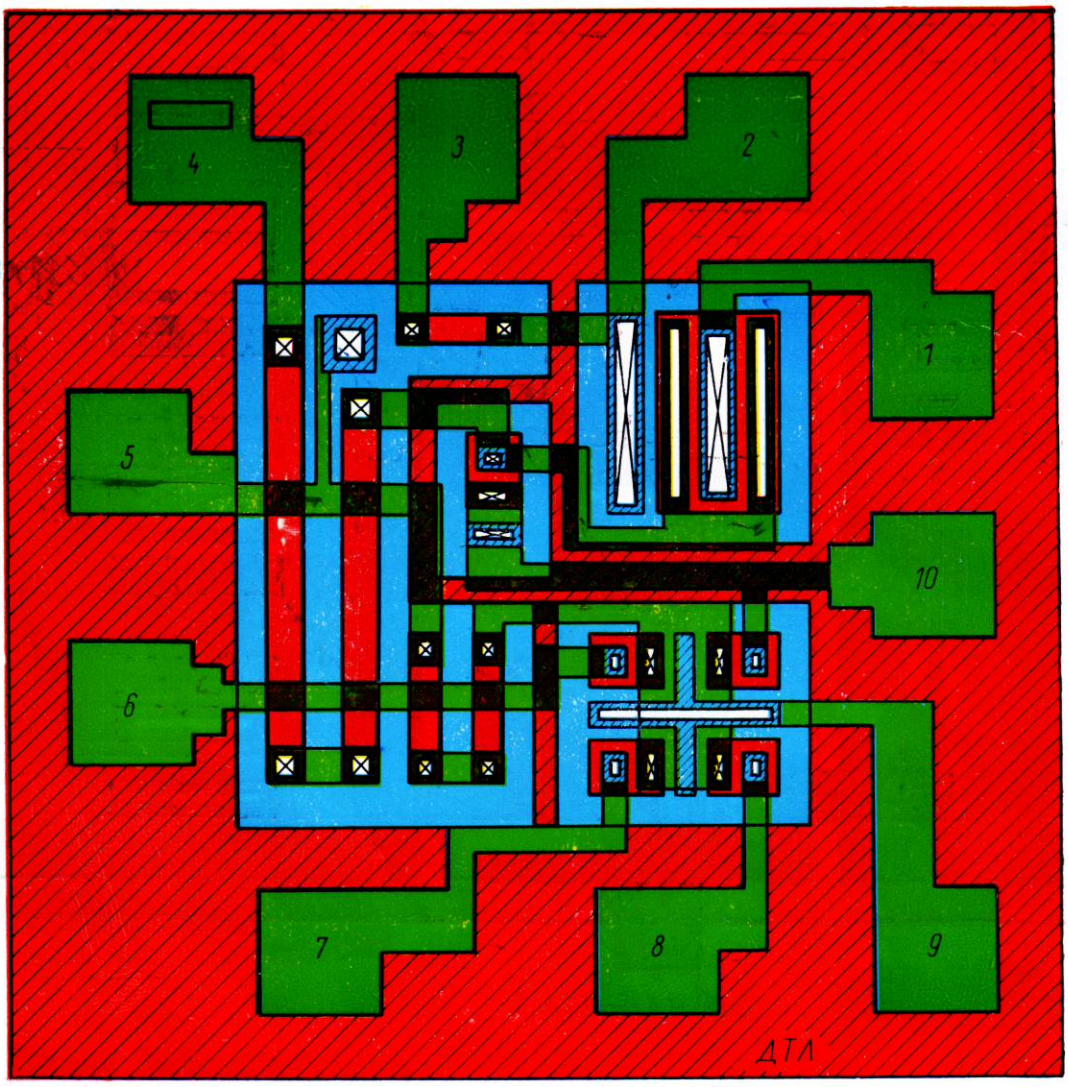
Фиг. 11,40



Фиг. 11.41

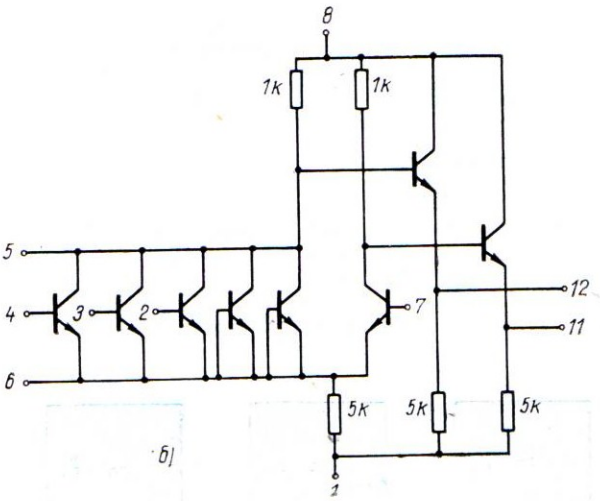


а)

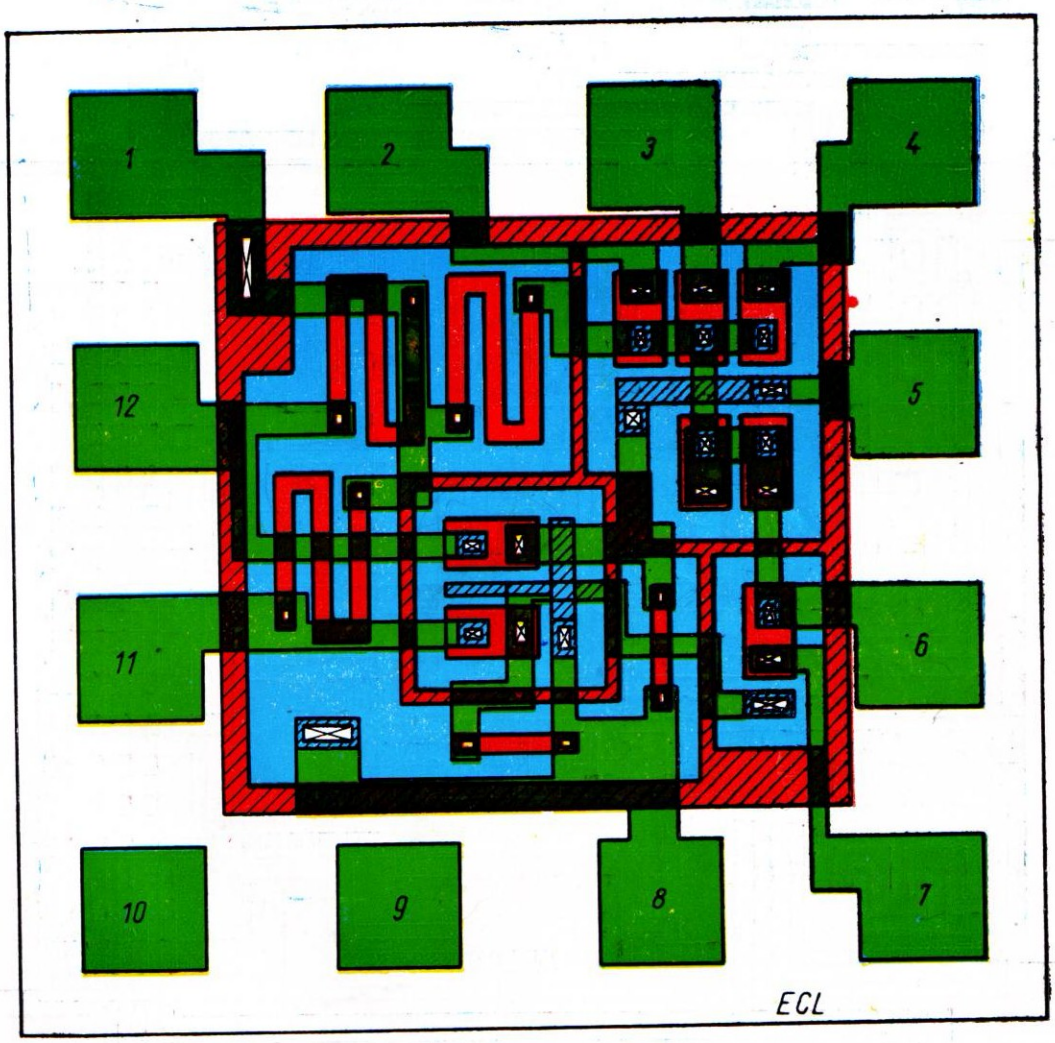


а')

Фиг. 11 42

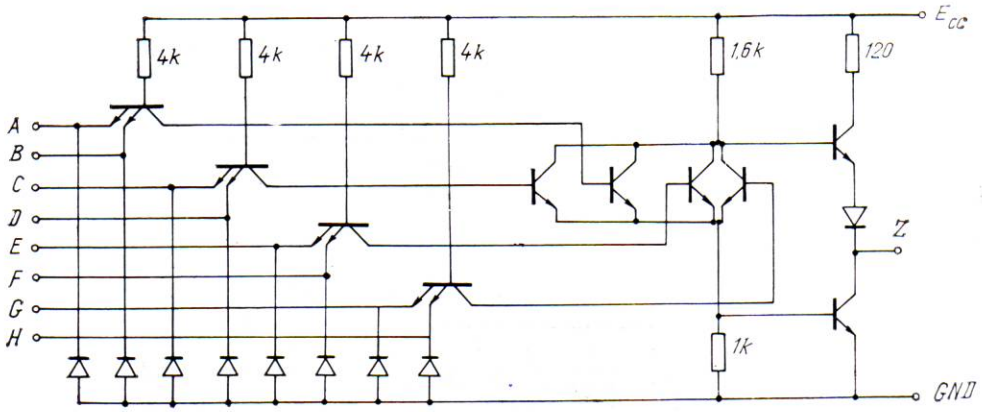


б)

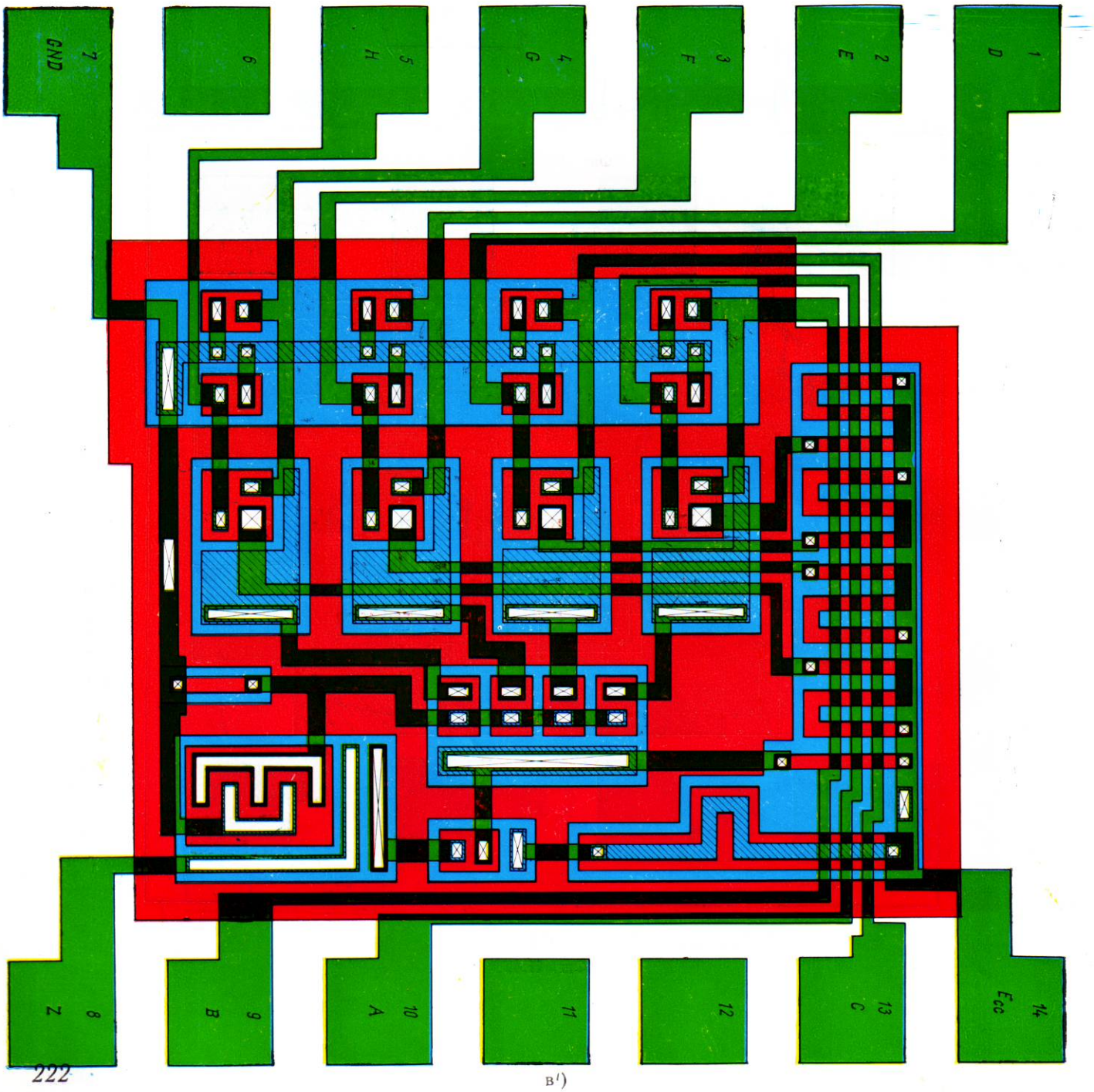


б')

Фиг. 11.42

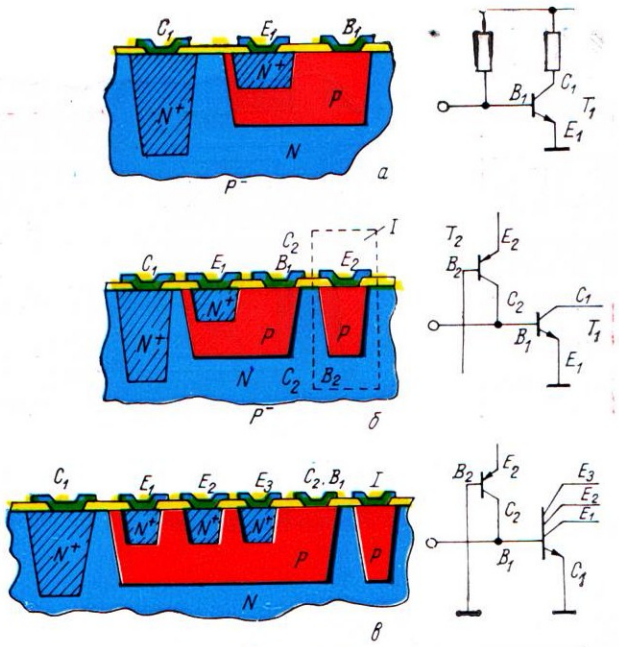

4k
4k
4k
4k
1,6k
120
E_{cc}
A
B
C
D
E
F
G
H
Z
1k
GND

в)

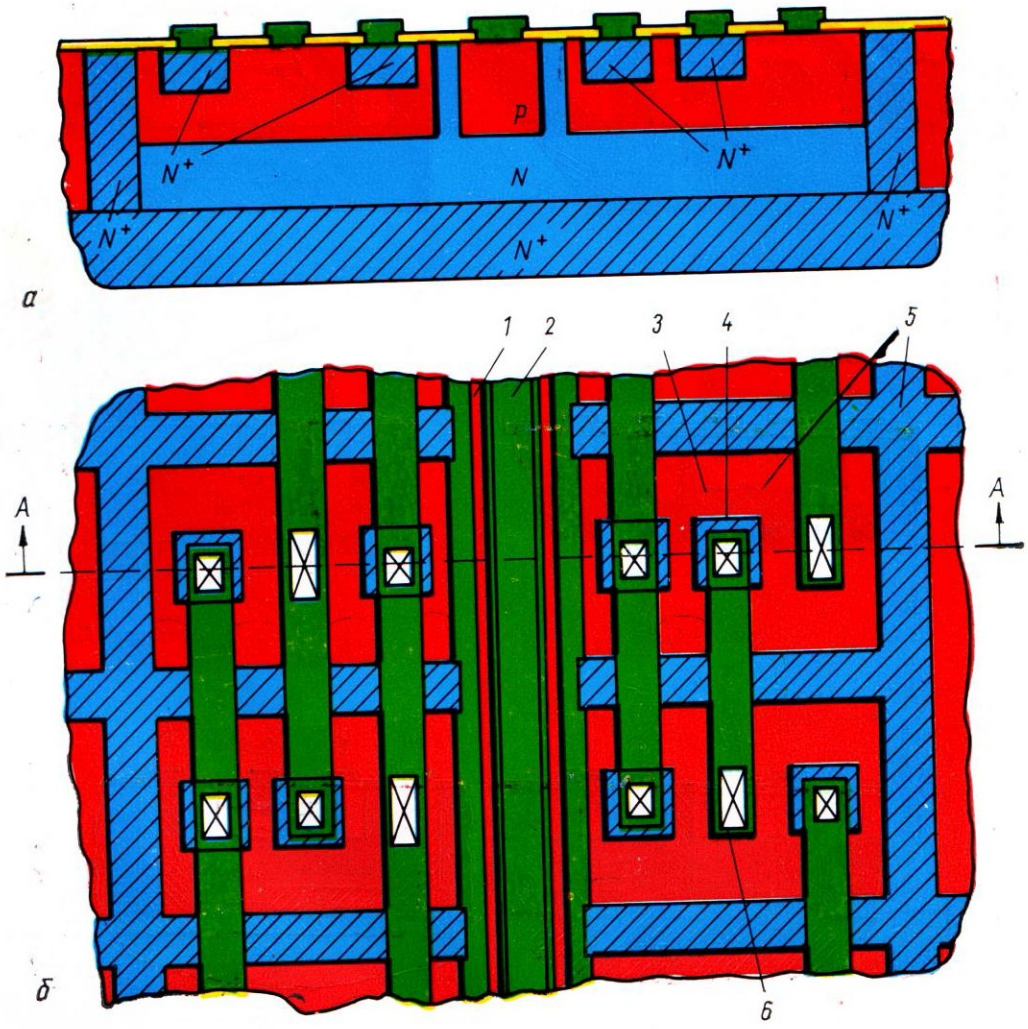

7 GND
6
5 H
4 G
3 F
2 E
1 D
8 Z
9 B
10 A
11
12
13 C
14 E_{cc}

в')

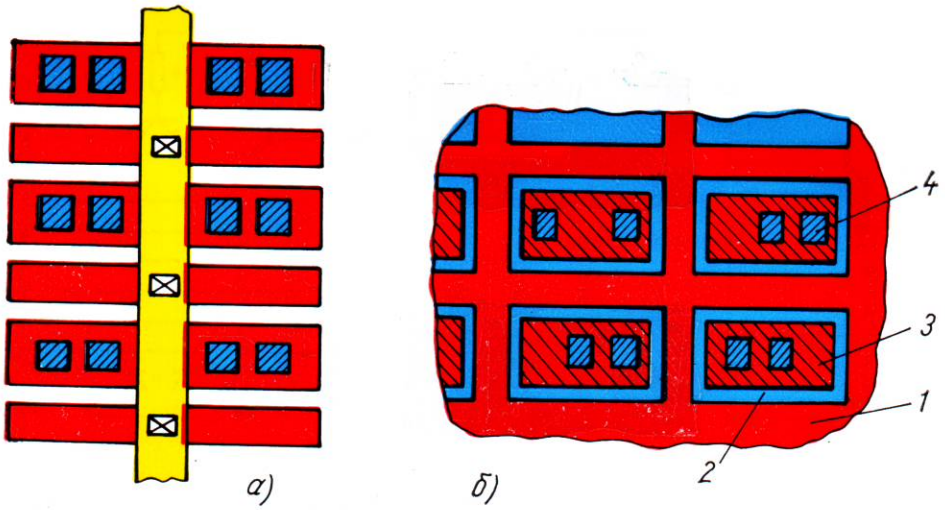
Фиг. 11.42



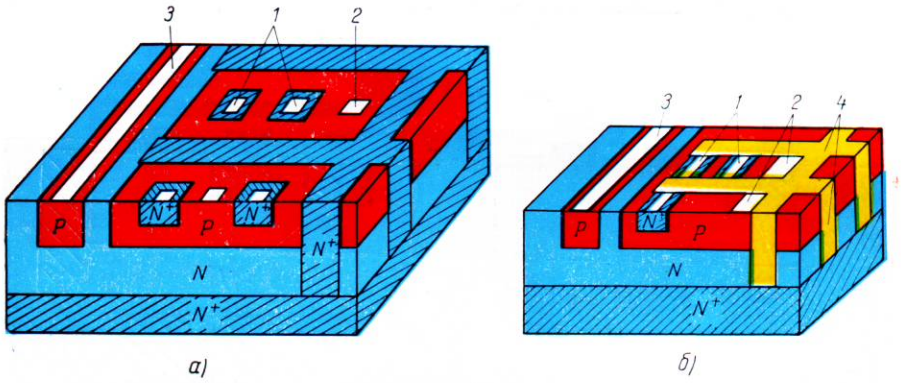
Фиг. 11.43



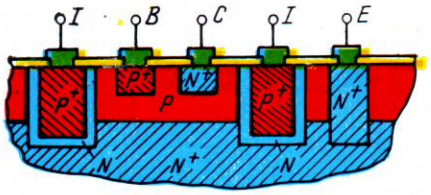
Фиг. 11.44



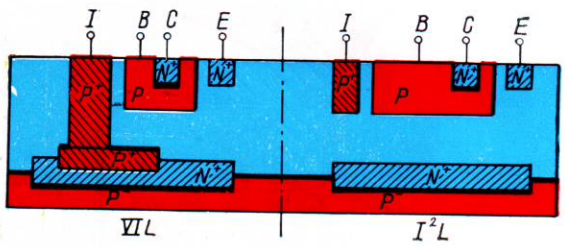
Фиг. 11.45



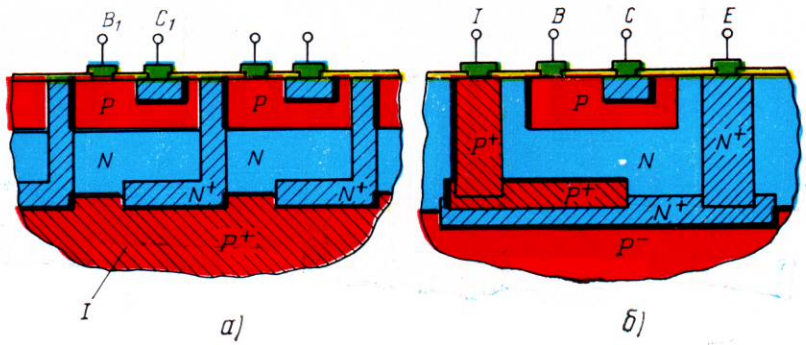
Фиг. 11.46



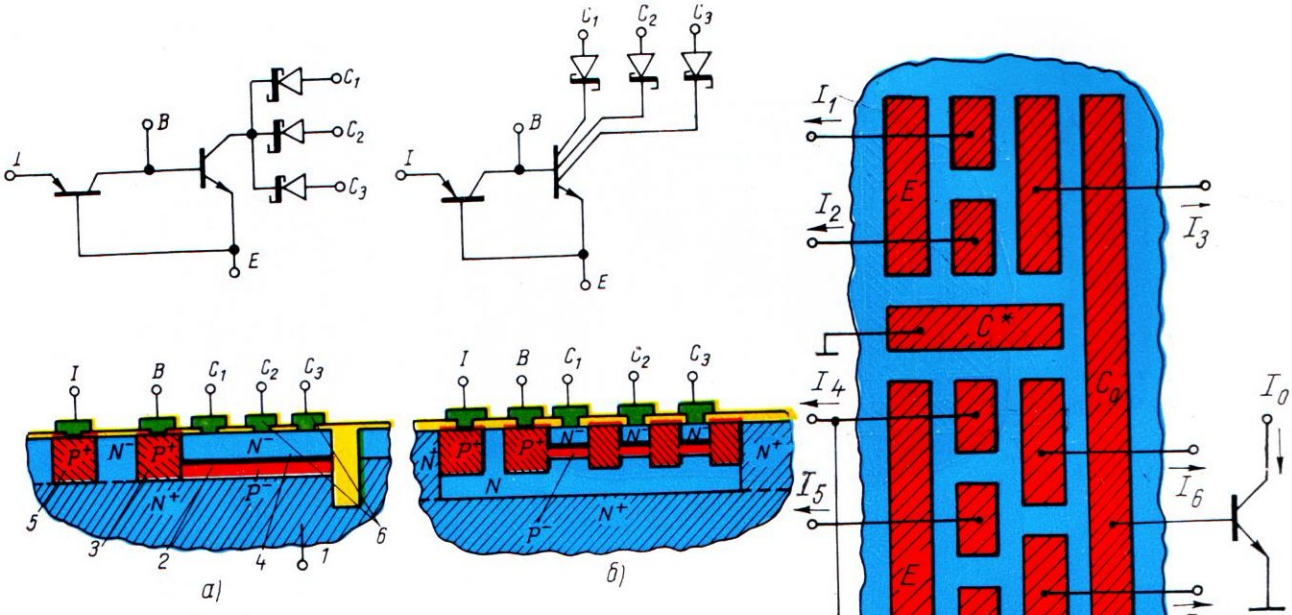
Фиг. 11.47



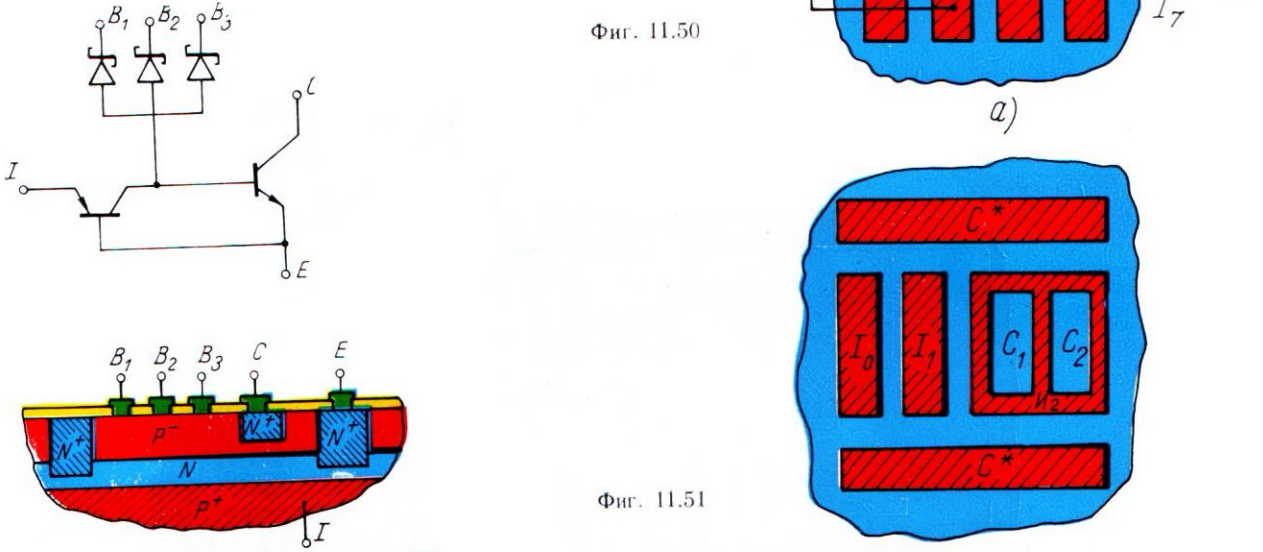
Фиг 11.48



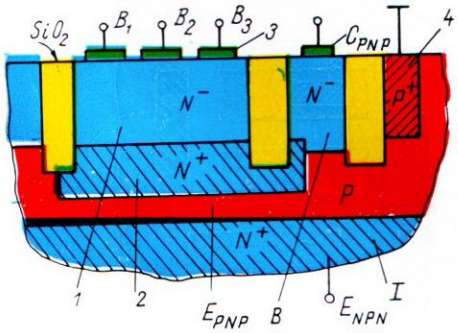
Фиг. 11 49



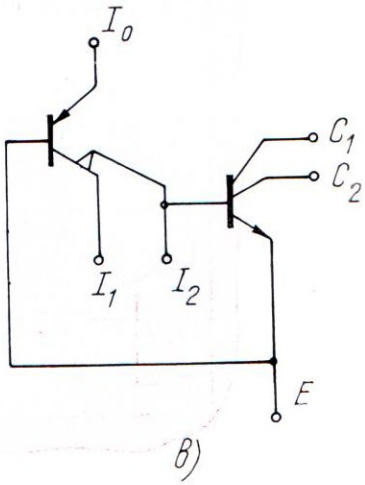
Фиг. 11.50



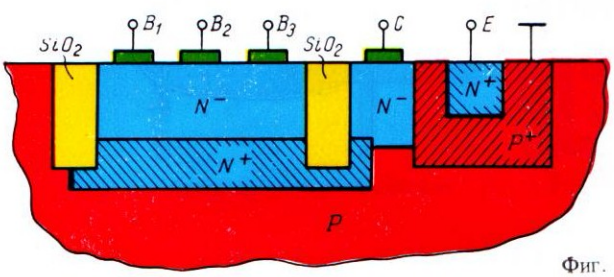
Фиг. 11.51



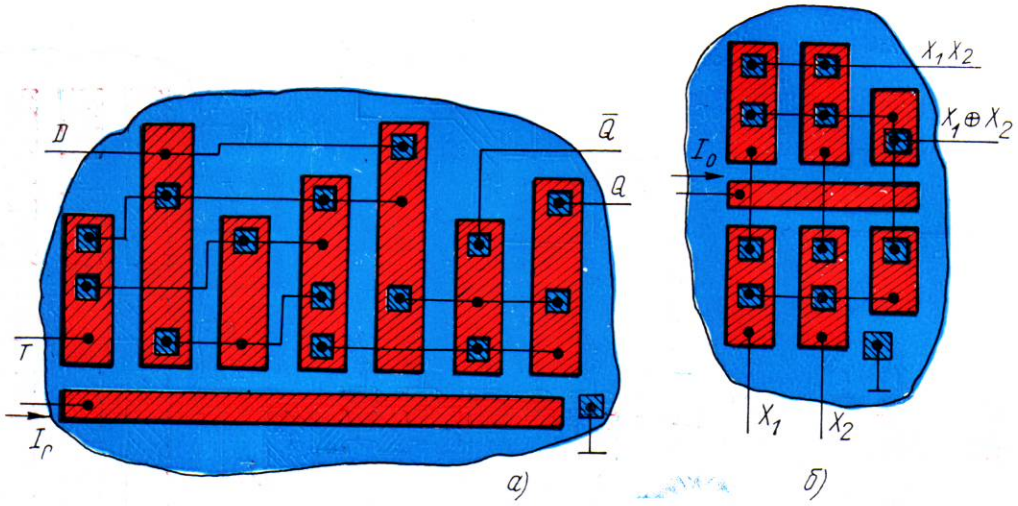
Фиг. 11.52



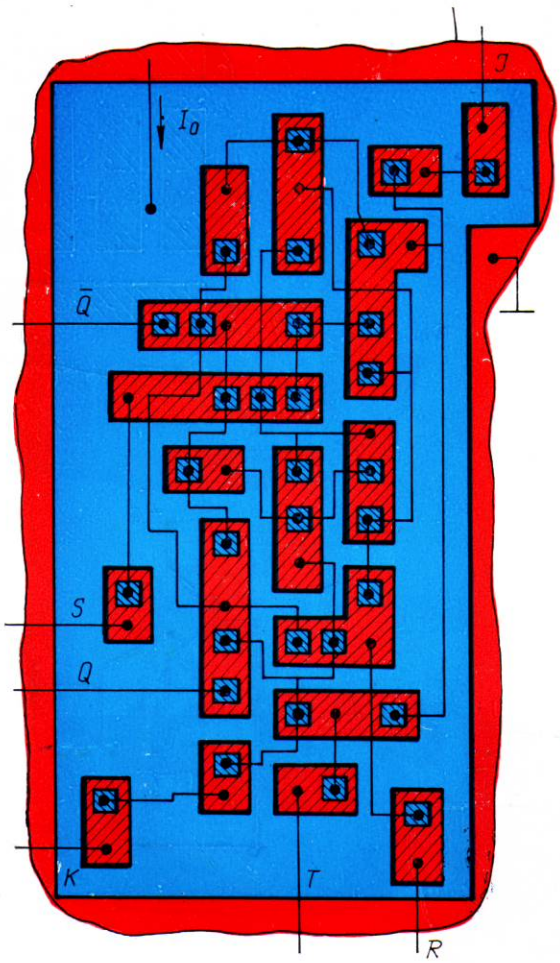
Фиг. 11.54



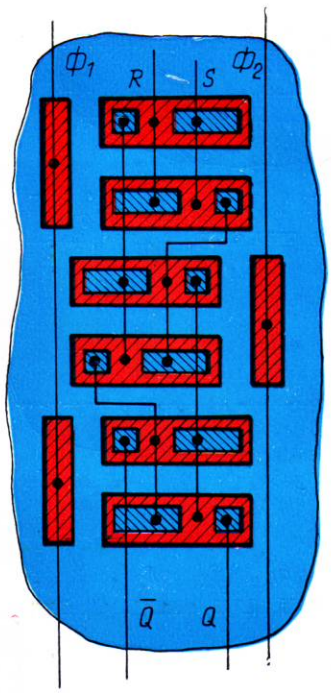
Фиг. 11.53



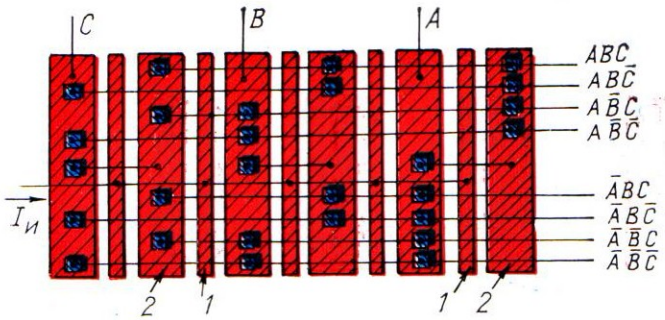
Фиг. 11.55



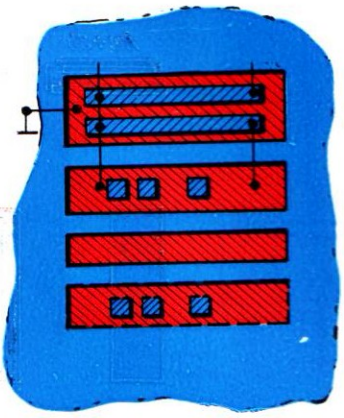
Фиг. 11.56



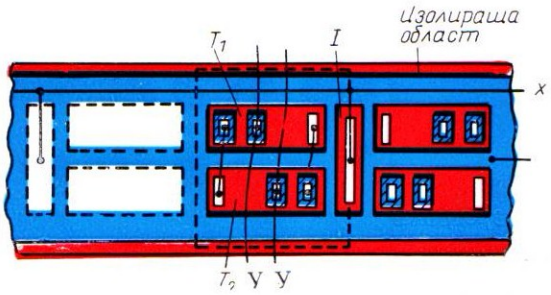
Фиг. 11.57



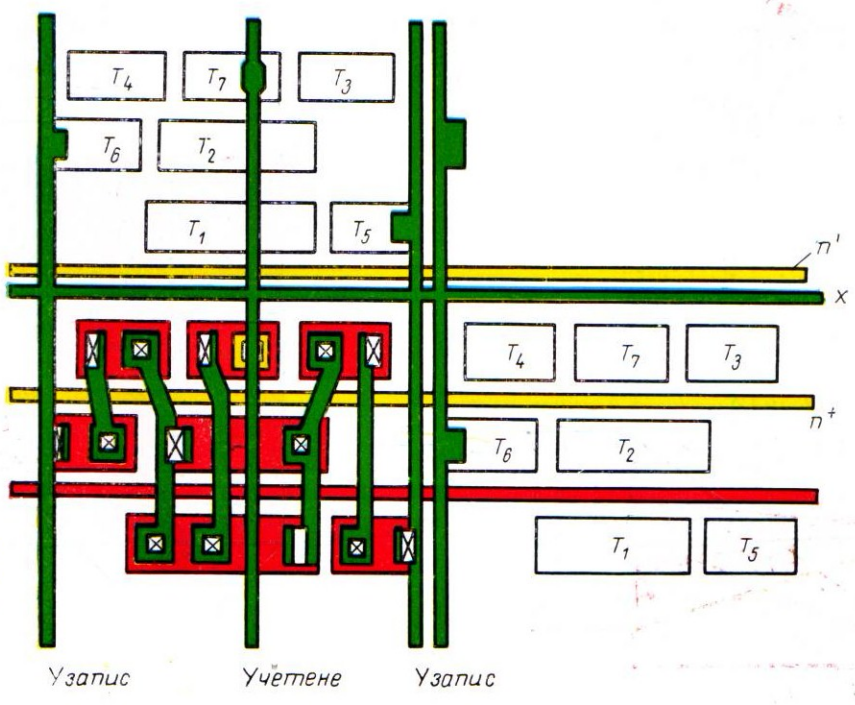
Фиг. 11.58



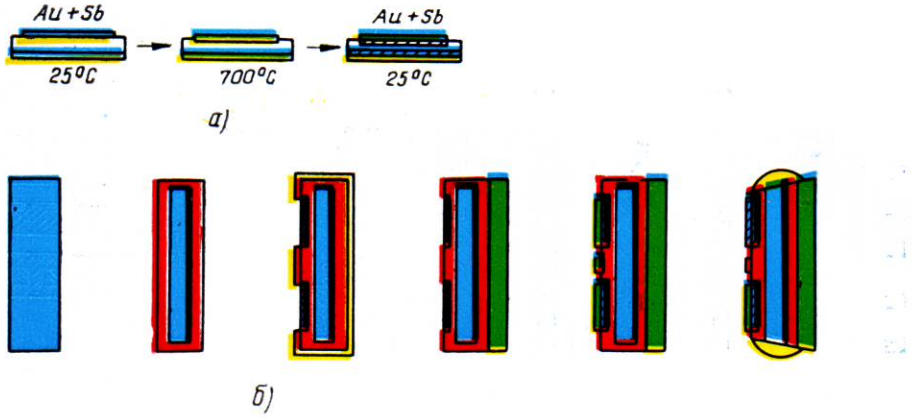
Фиг. 11.59



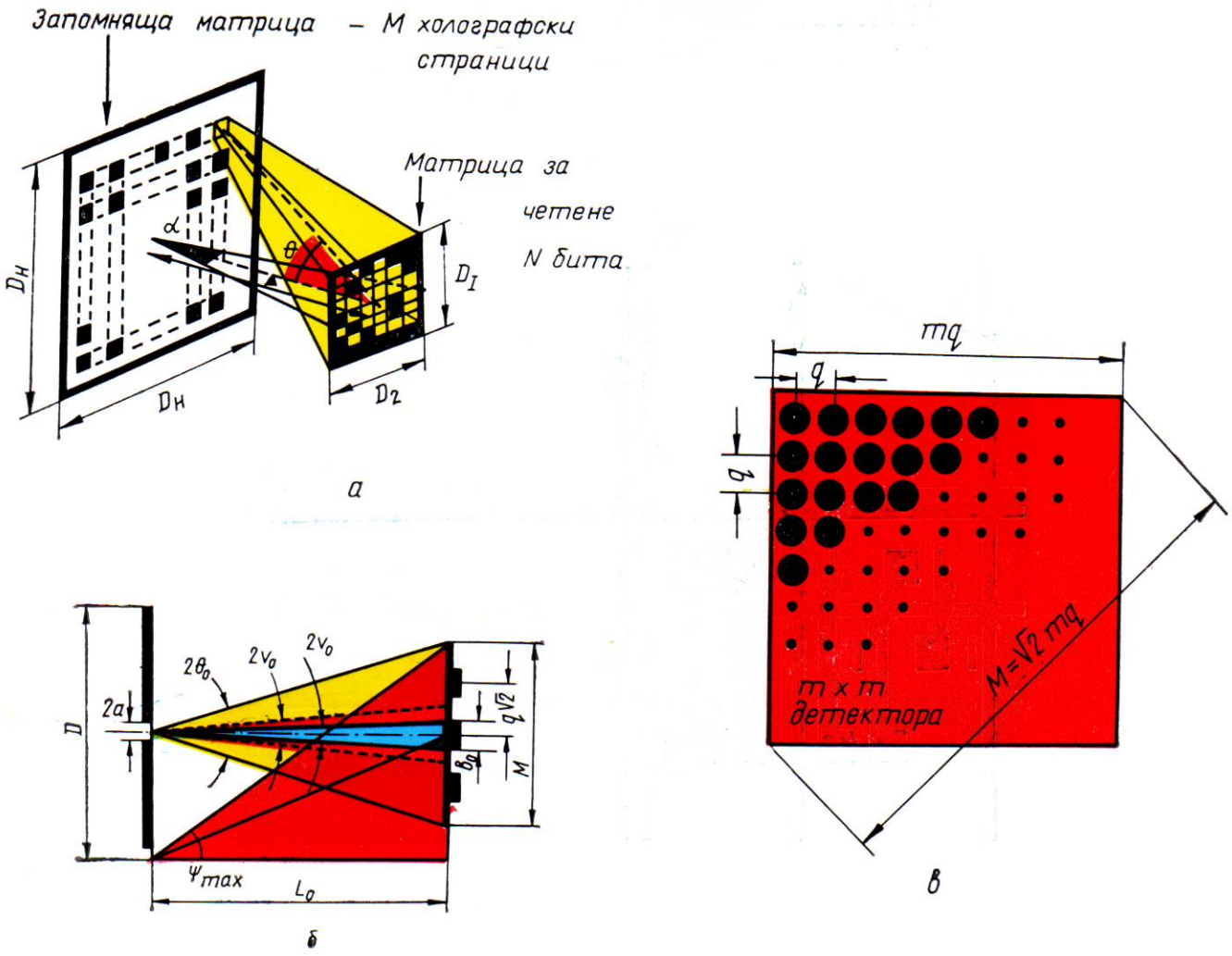
Фиг. 11.60



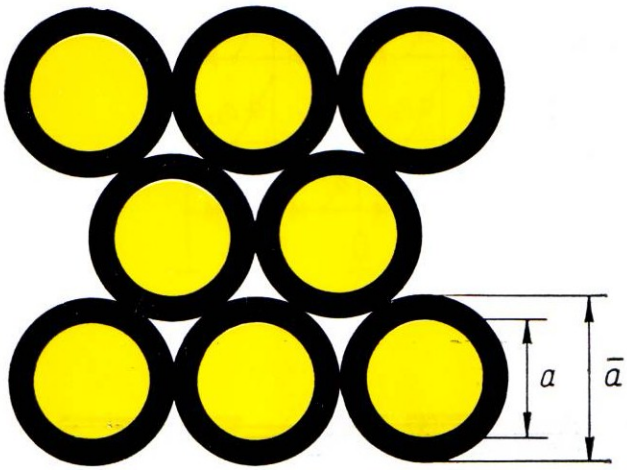
Фиг. 11.63



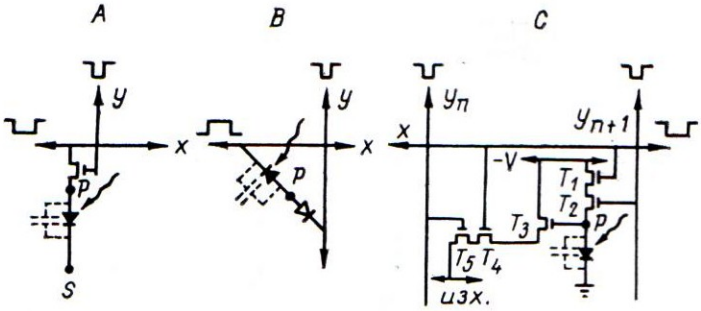
Фиг. 11.64



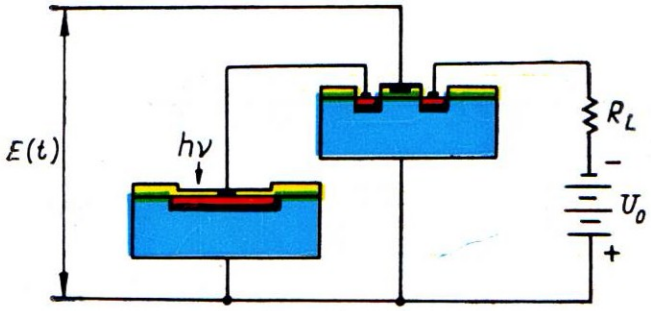
Фиг. 11.81



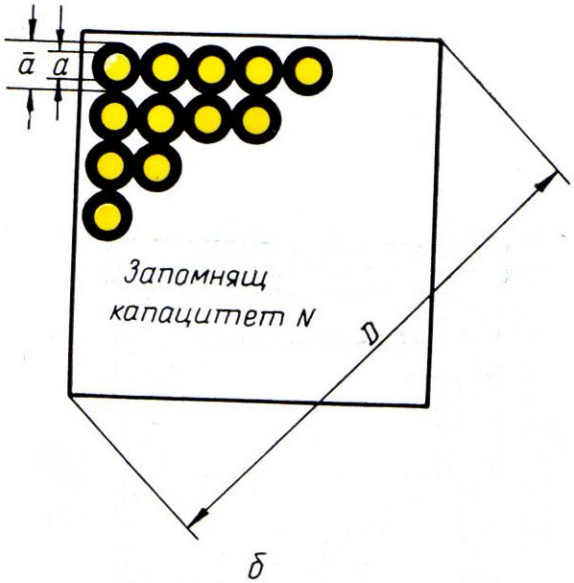
а



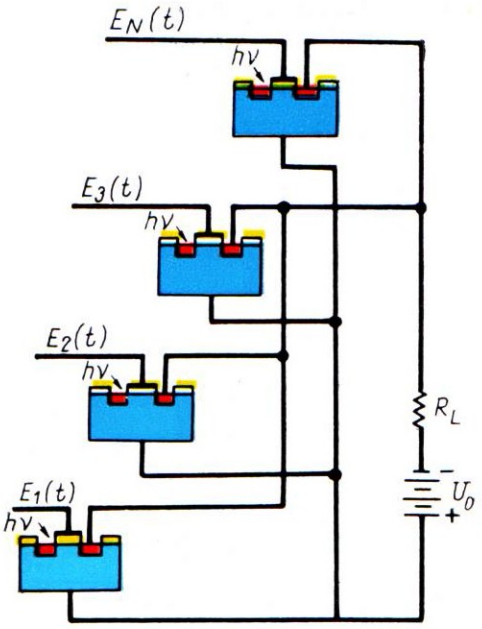
а



б



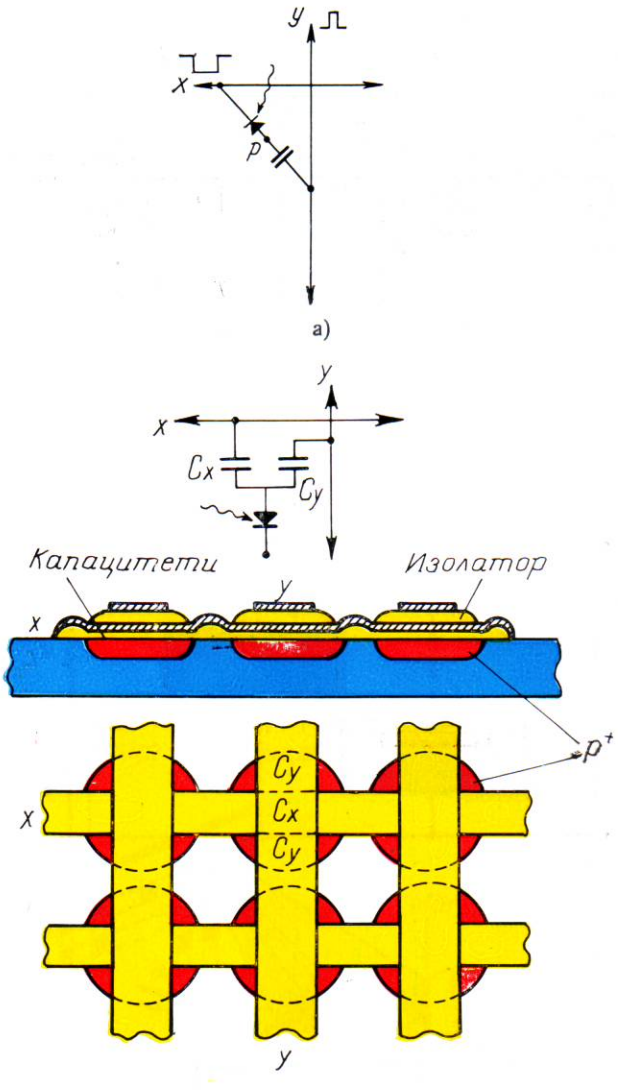
б



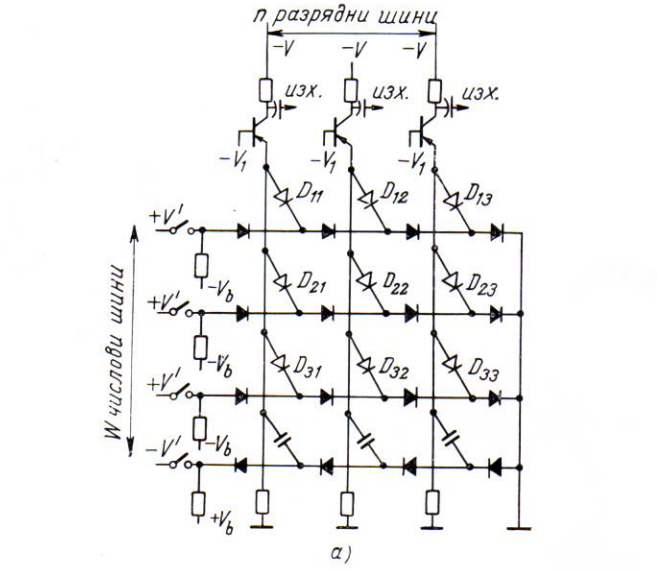
в

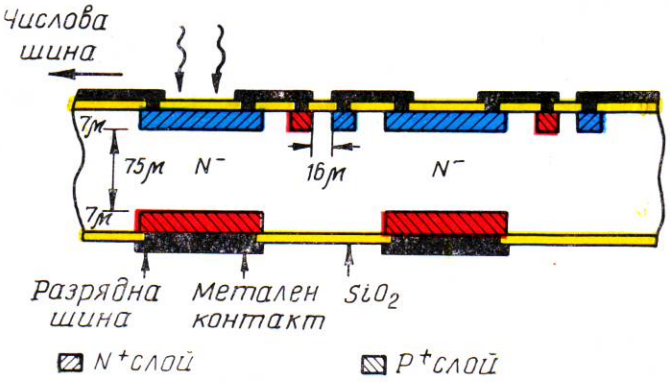
Фиг. 11.82

Фиг 11.83



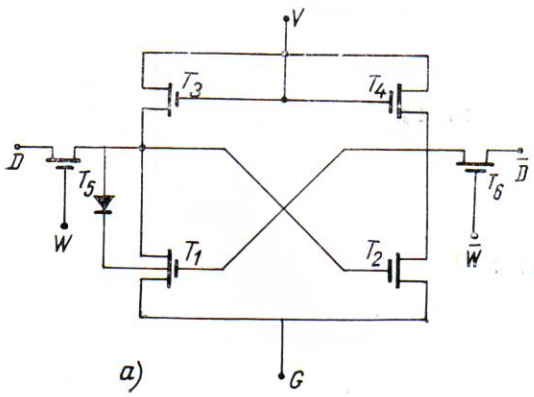
Фиг. 11.84

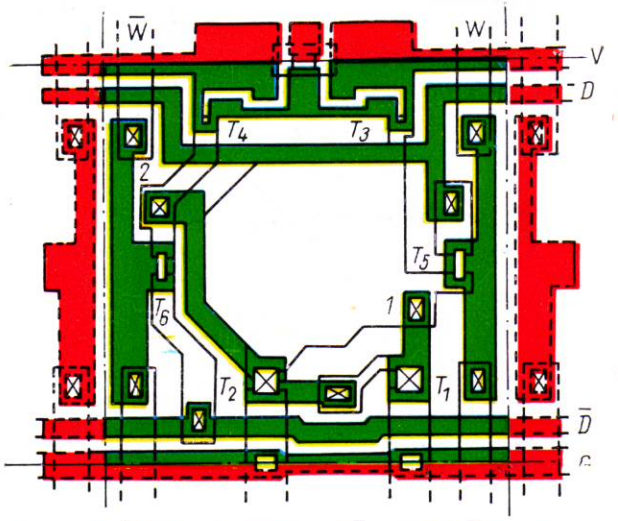




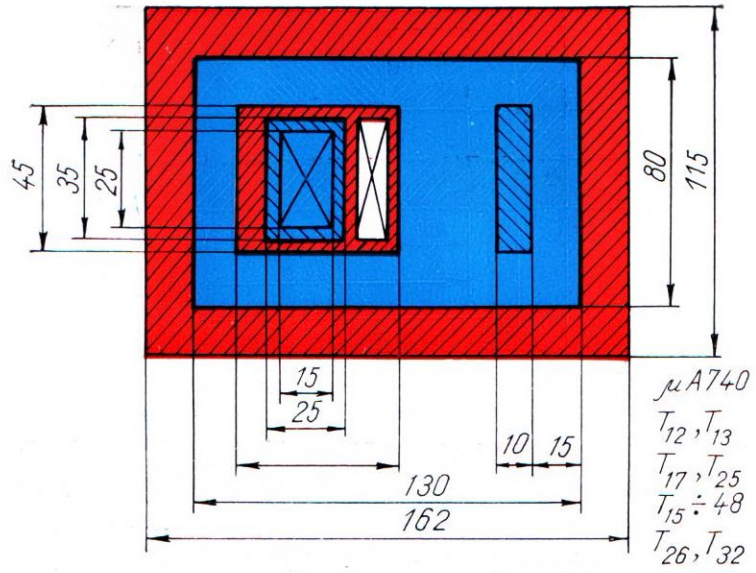
б)

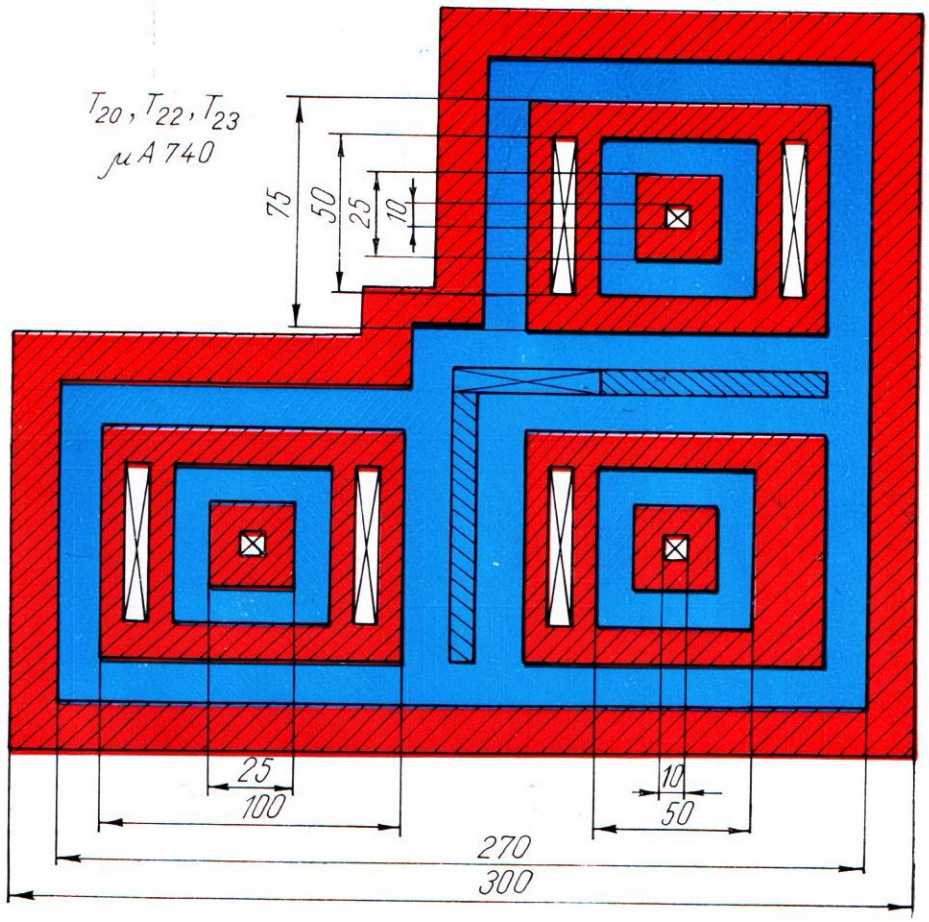
Фиг. 11.85



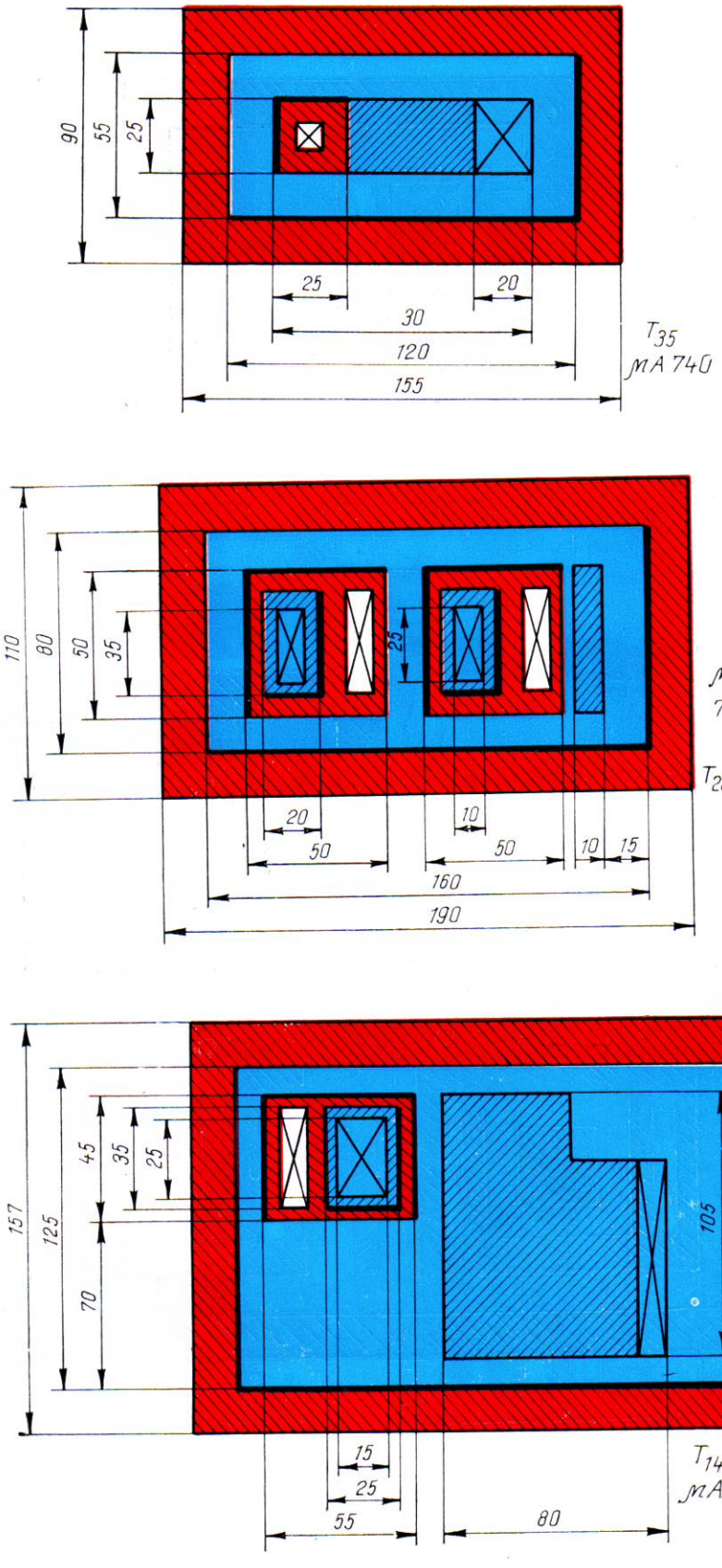


Фиг 11 86

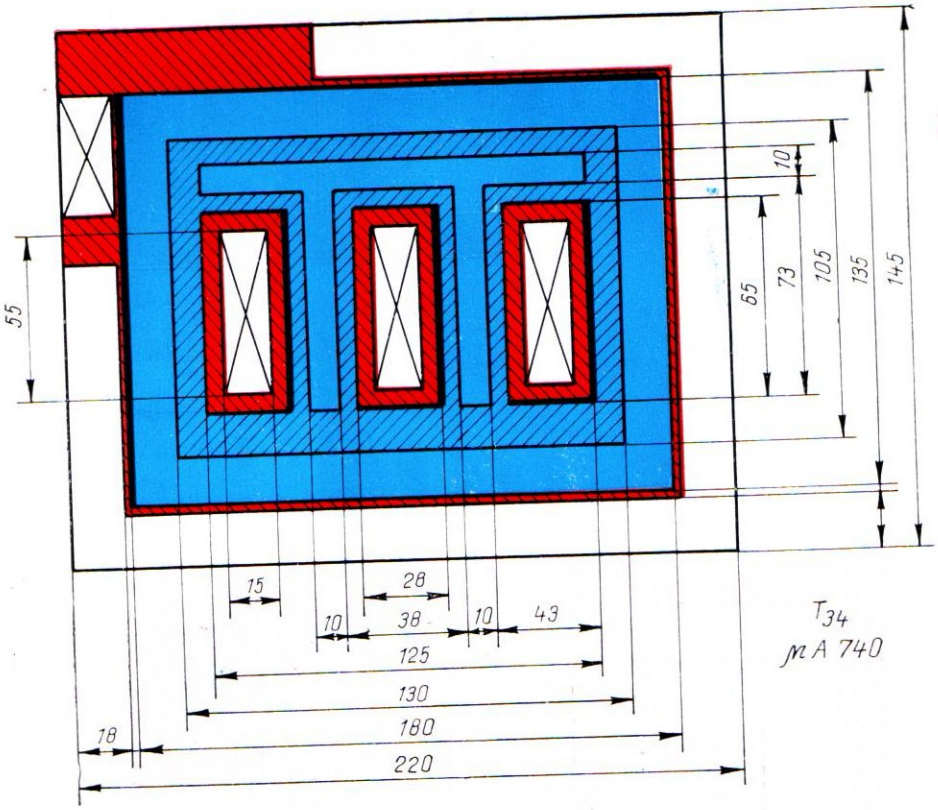

45
35
25
80
115
15
25
10
15
130
162
μA740
T_{12}, T_{13}
T_{17}, T_{25}
$T_{15} \div 48$
T_{26}, T_{32}

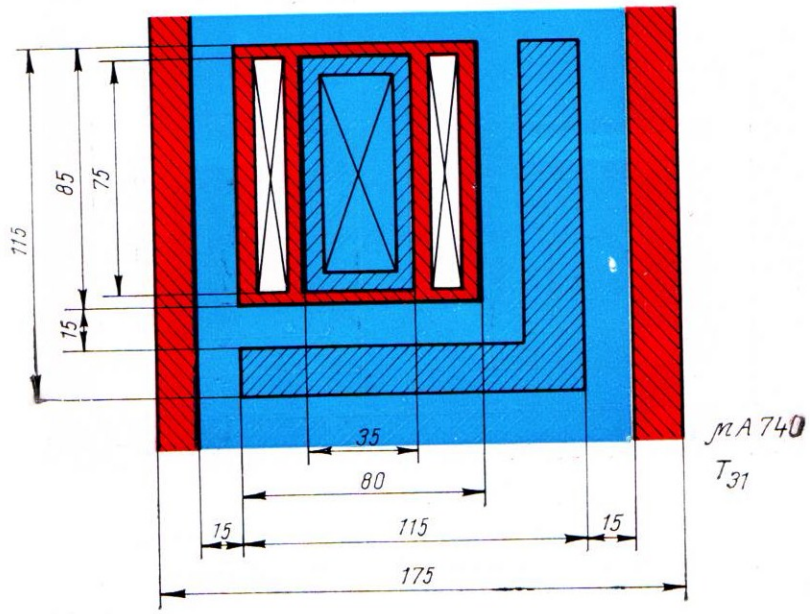

T_{20}, T_{22}, T_{23}
μA740
75
50
25
10
25
100
10
50
270
300

П 11.1.1

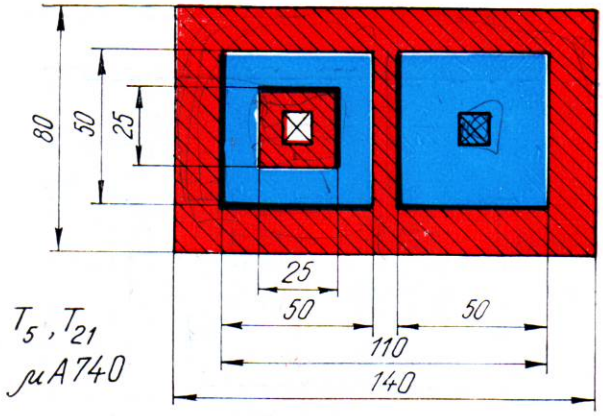

90
55
25
25
20
30
120
155
T_{35}
μA 740
110
80
50
35
25
μA
740
T_{28}, T_{29}
20
50
10
50
10
15
160
190
157
125
45
35
25
70
105
15
25
55
80
T_{14}, T_{24}
μA 740

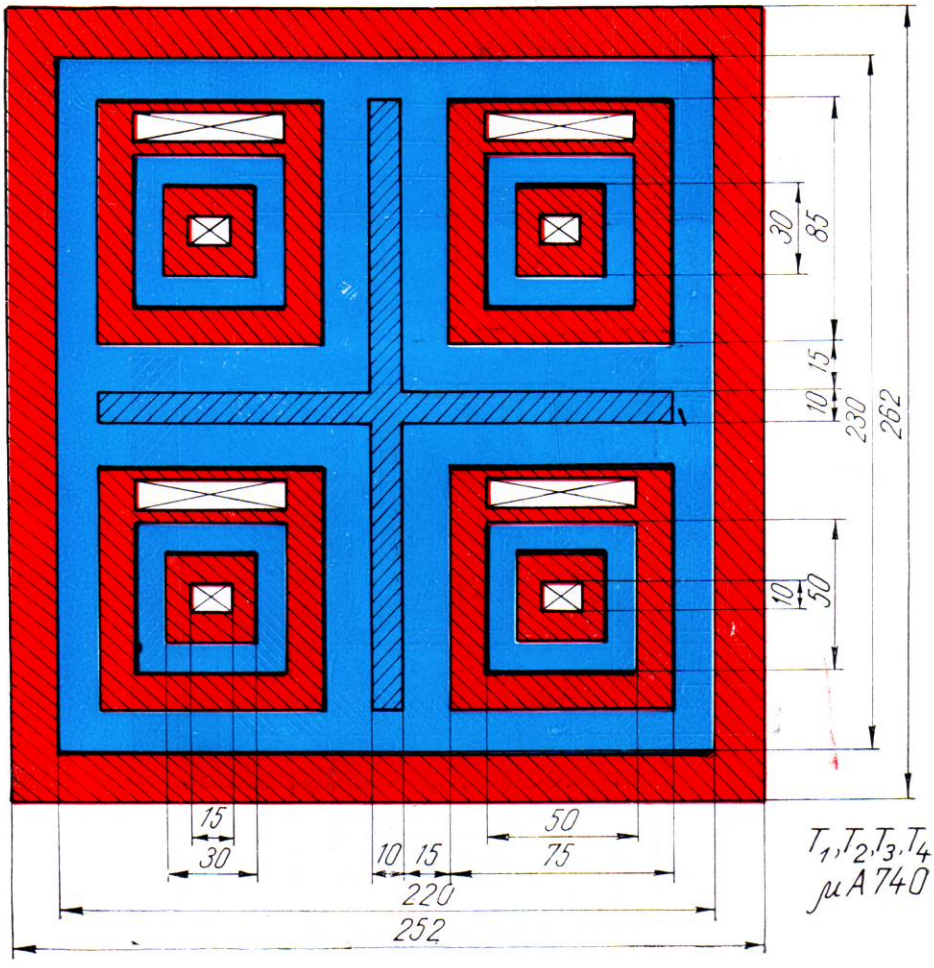
П 11.1.2


55
10
65
73
105
135
145
15
28
10
38
10
43
125
130
180
18
220
Т34
мА 740

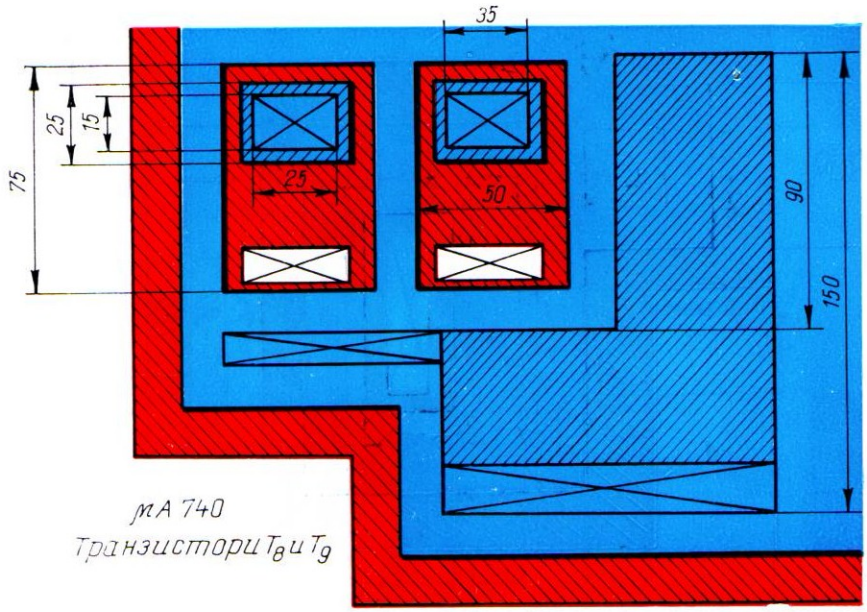

115
85
75
15
35
80
15
115
15
175
мА 740
Т31

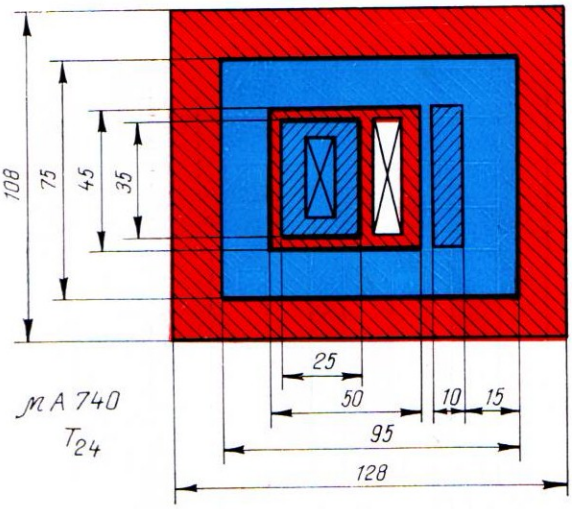
П. 11.13

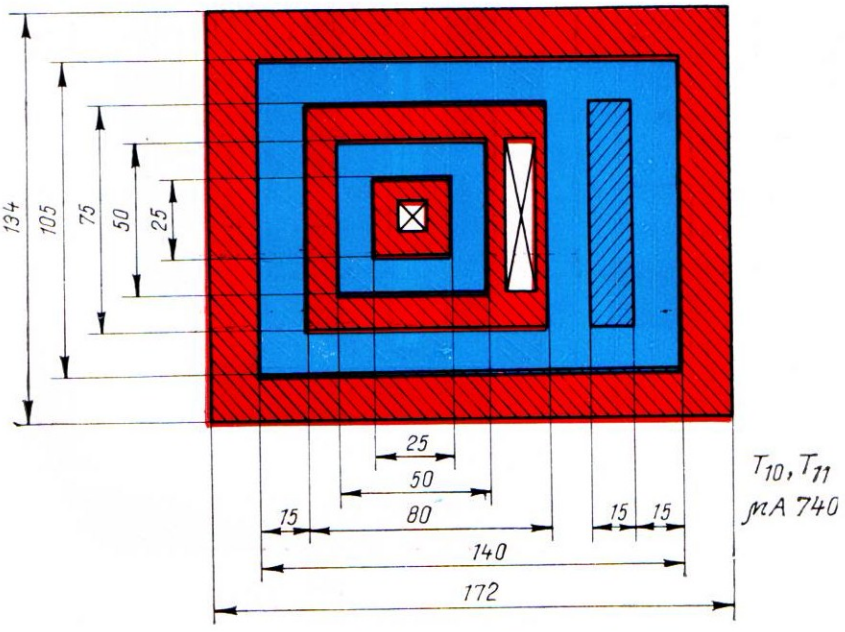

80
50
25
25
50
50
110
140
T_5 , T_{21}
μA740

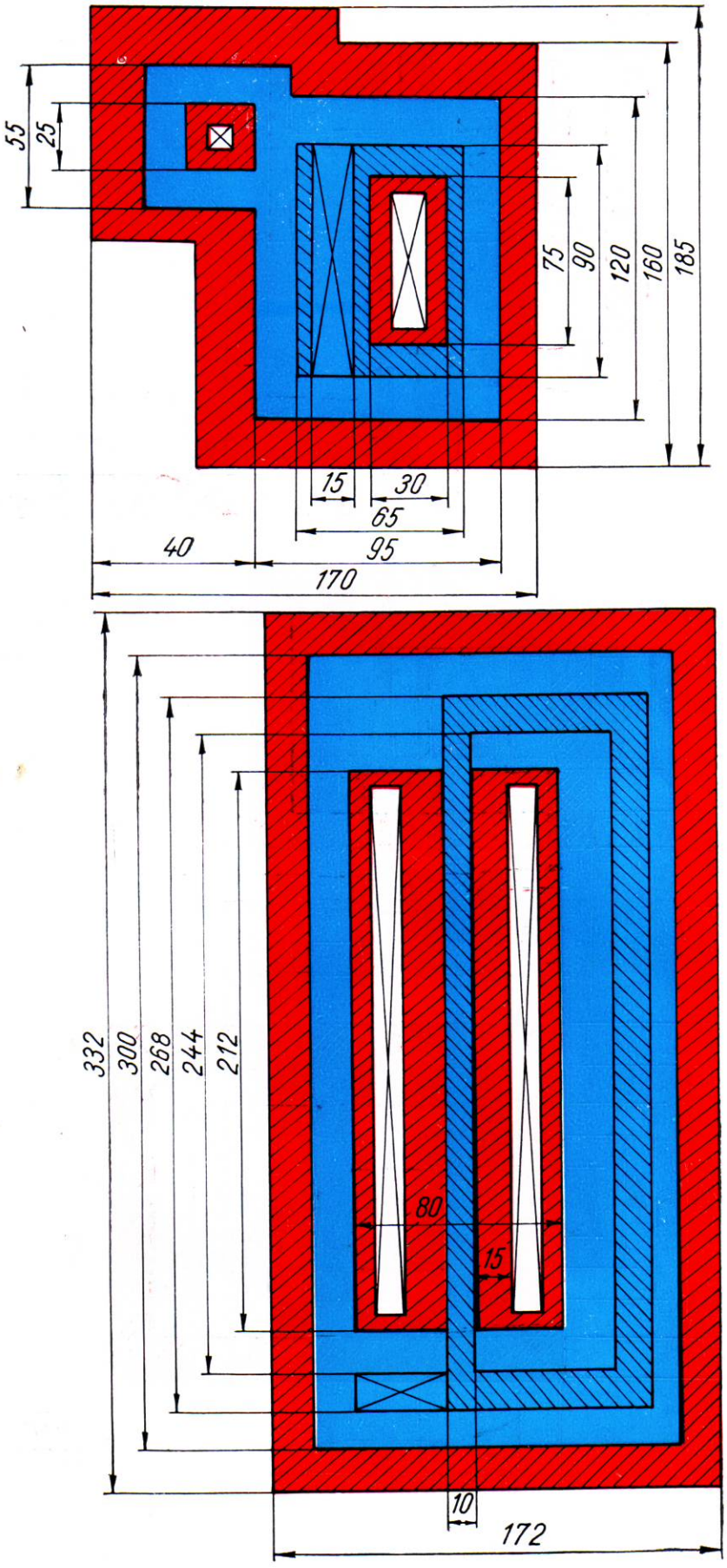

30
85
15
10
230
262
10
50
15
30
10
15
50
75
220
252
T_1,T_2,T_3,T_4
μA740

П 11.1.4

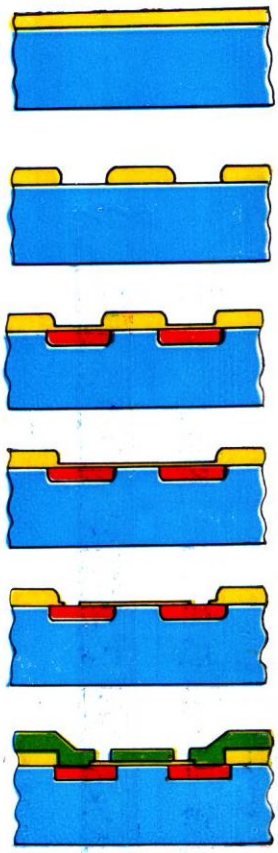

35
25
15
75
25
50
90
150
μA 740
Транзистори T_8 и T_9


108
75
45
35
25
50
10
15
95
128
μA 740
T_{24}

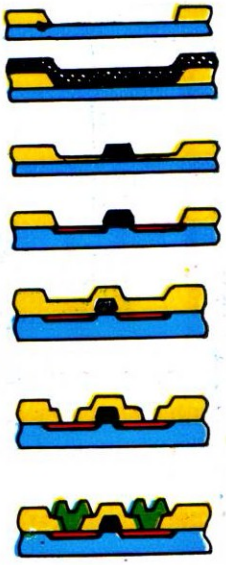

134
105
75
50
25
25
50
15
80
15
15
140
172
T_{10}, T_{11}
μA 740


55
25
75
90
120
160
185
15
30
65
40
95
170
332
300
268
244
212
80
15
10
172

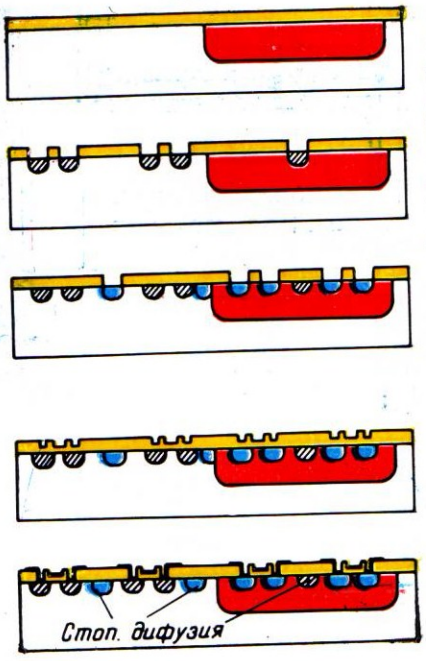
П. III.6



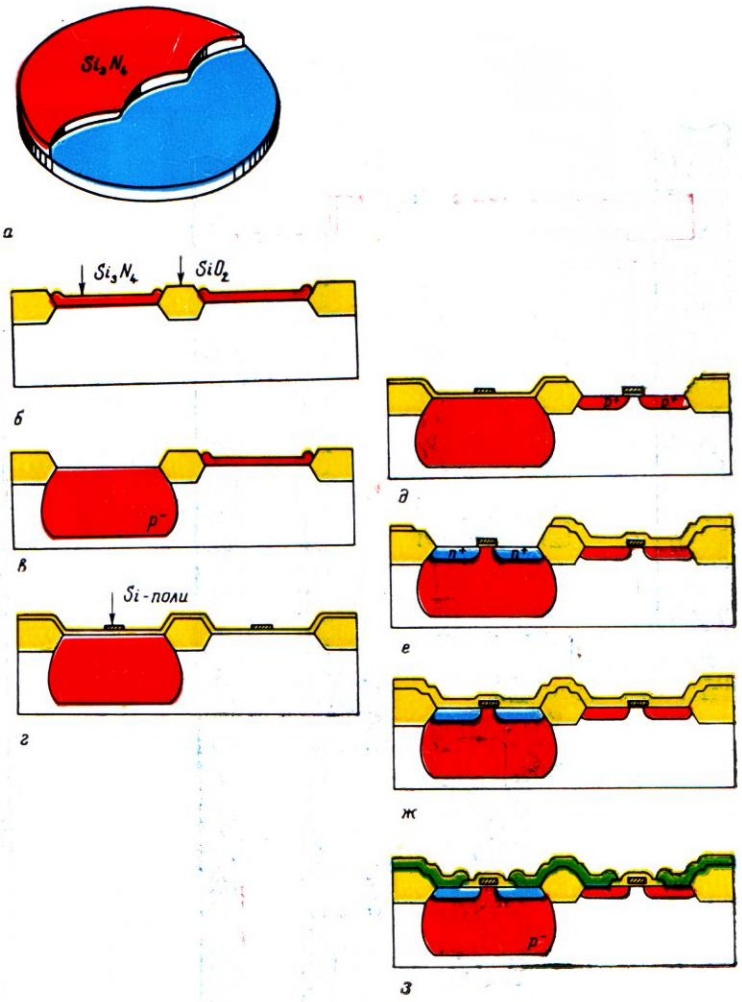
Фиг 12.1



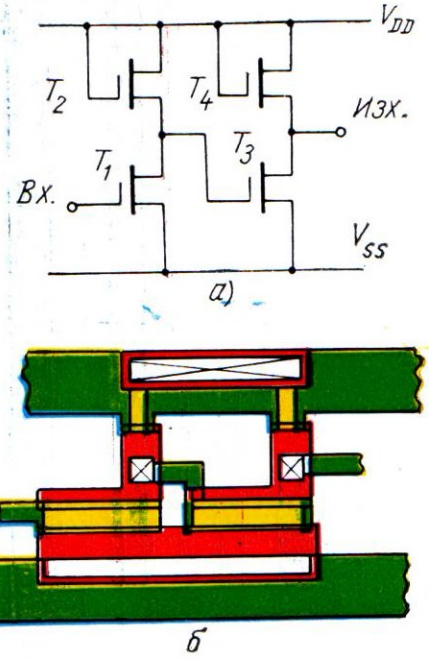
Фиг. 12.2



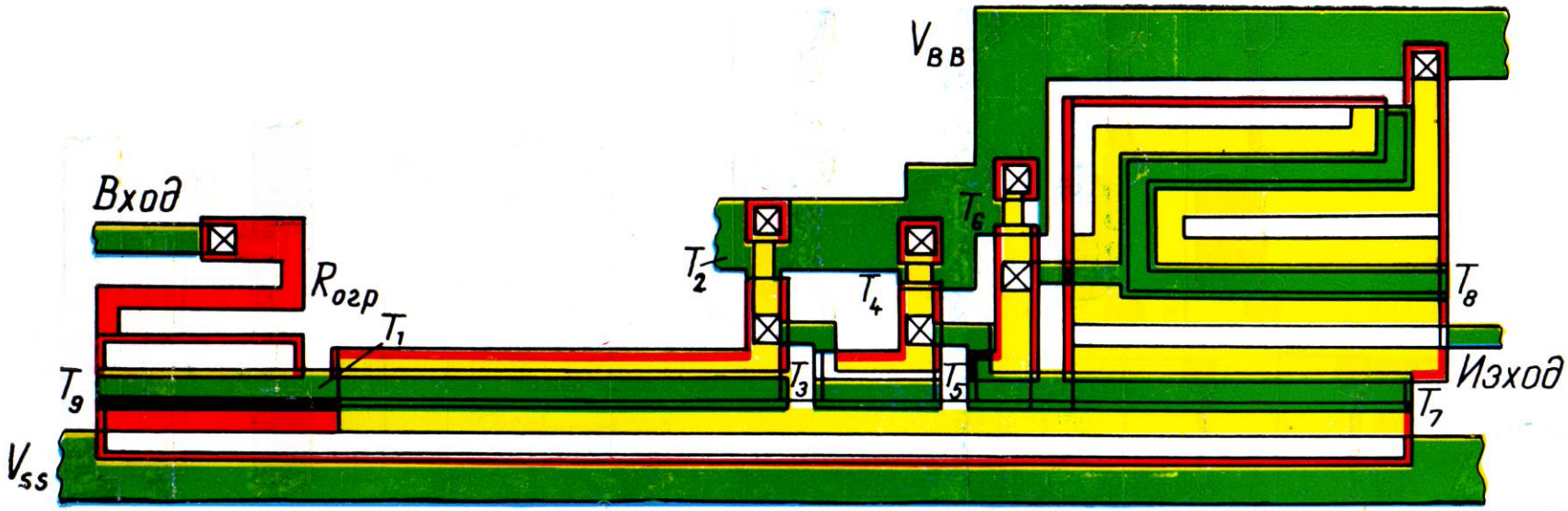
Фиг. 12.3



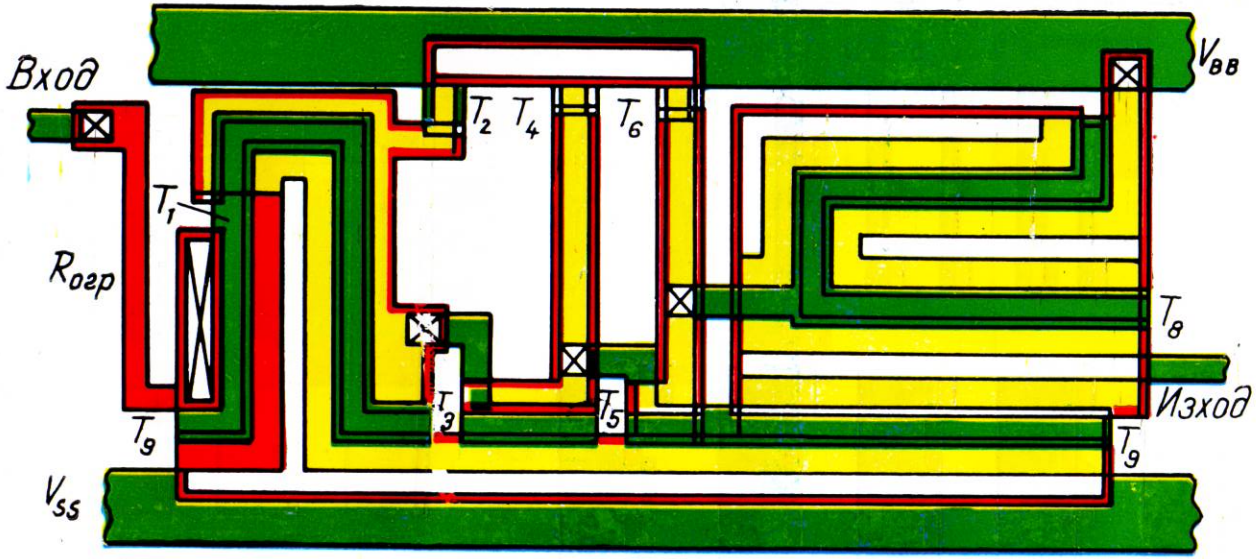
Фиг 12.4



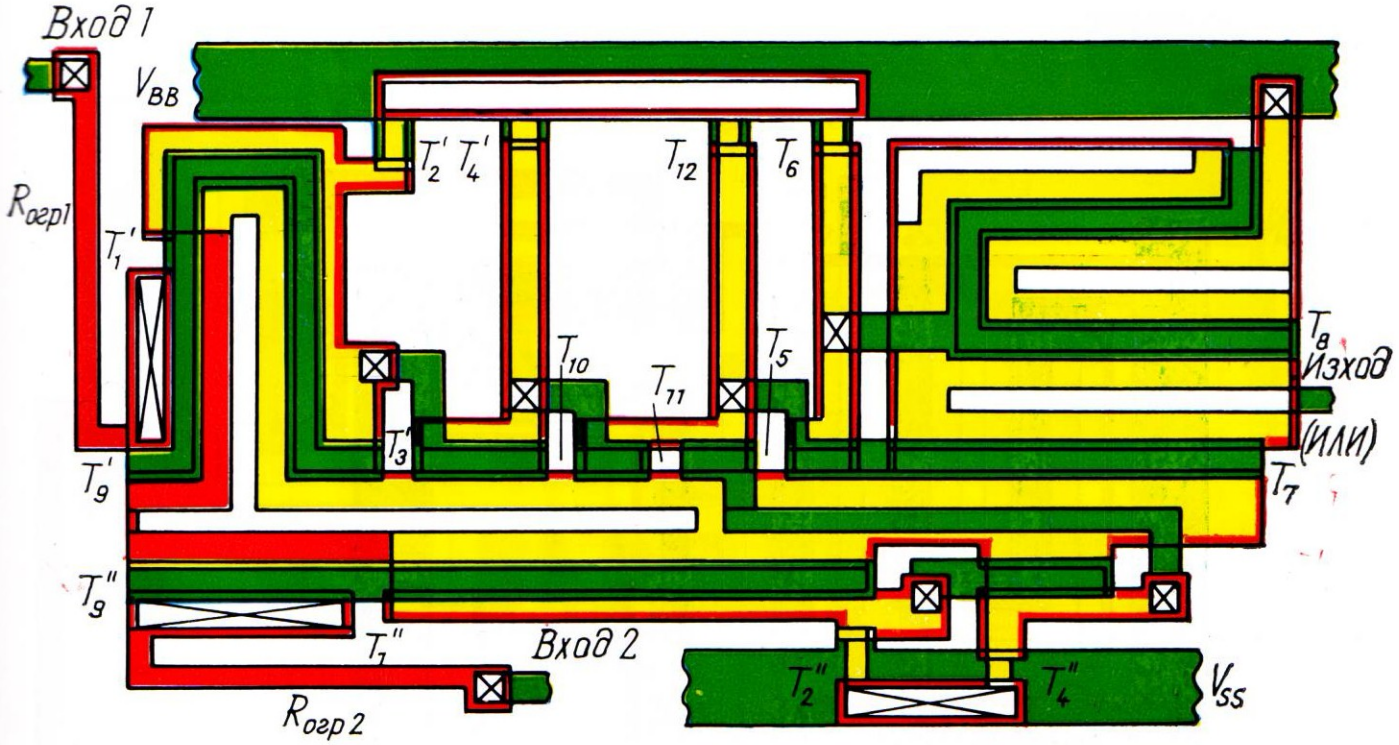
Фиг 12.5



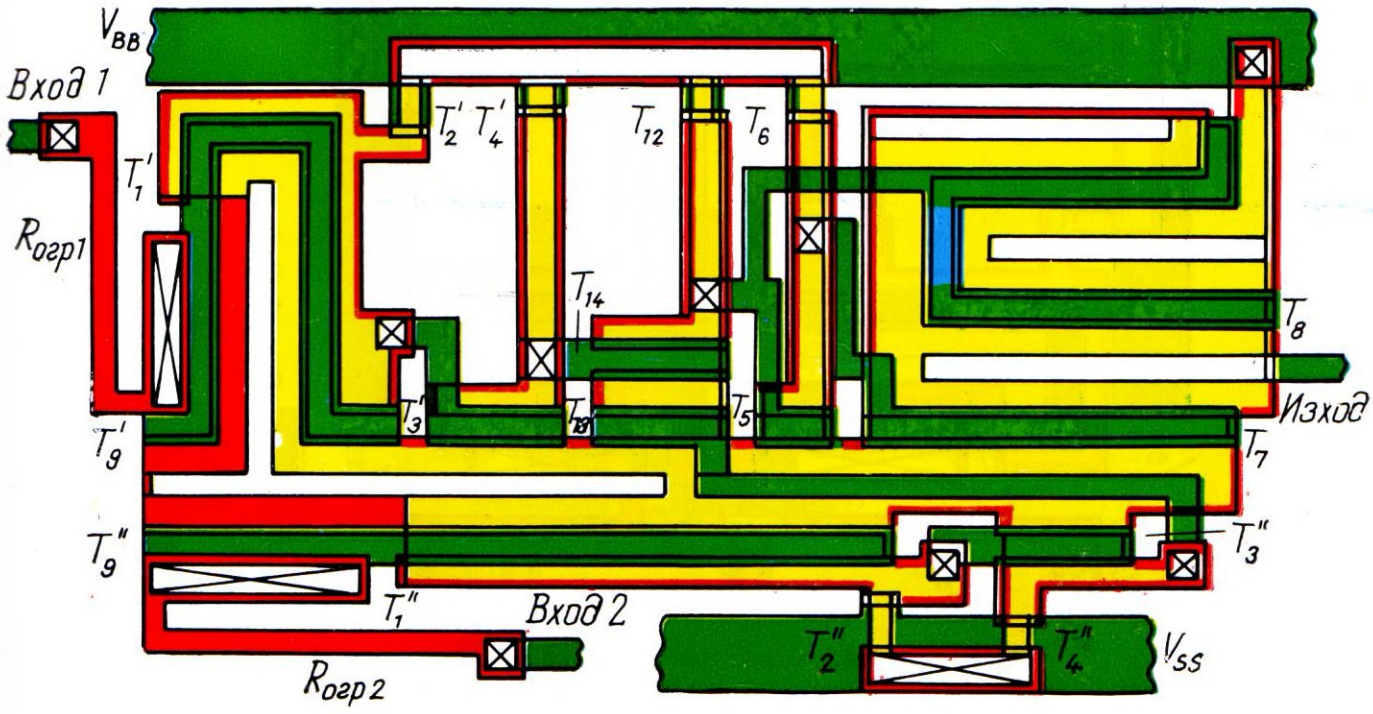
Фиг. 12.17



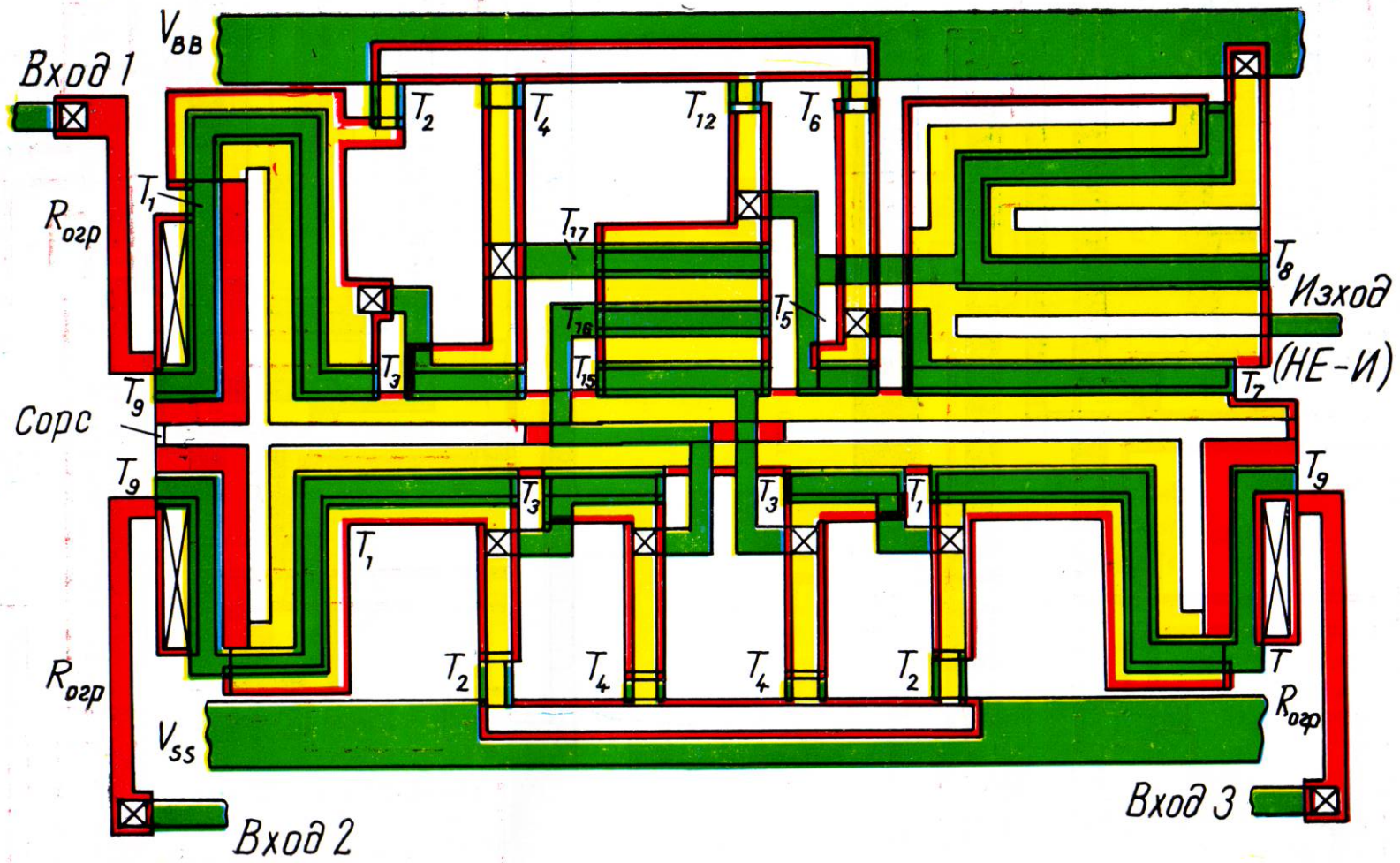
Фиг. 12.18



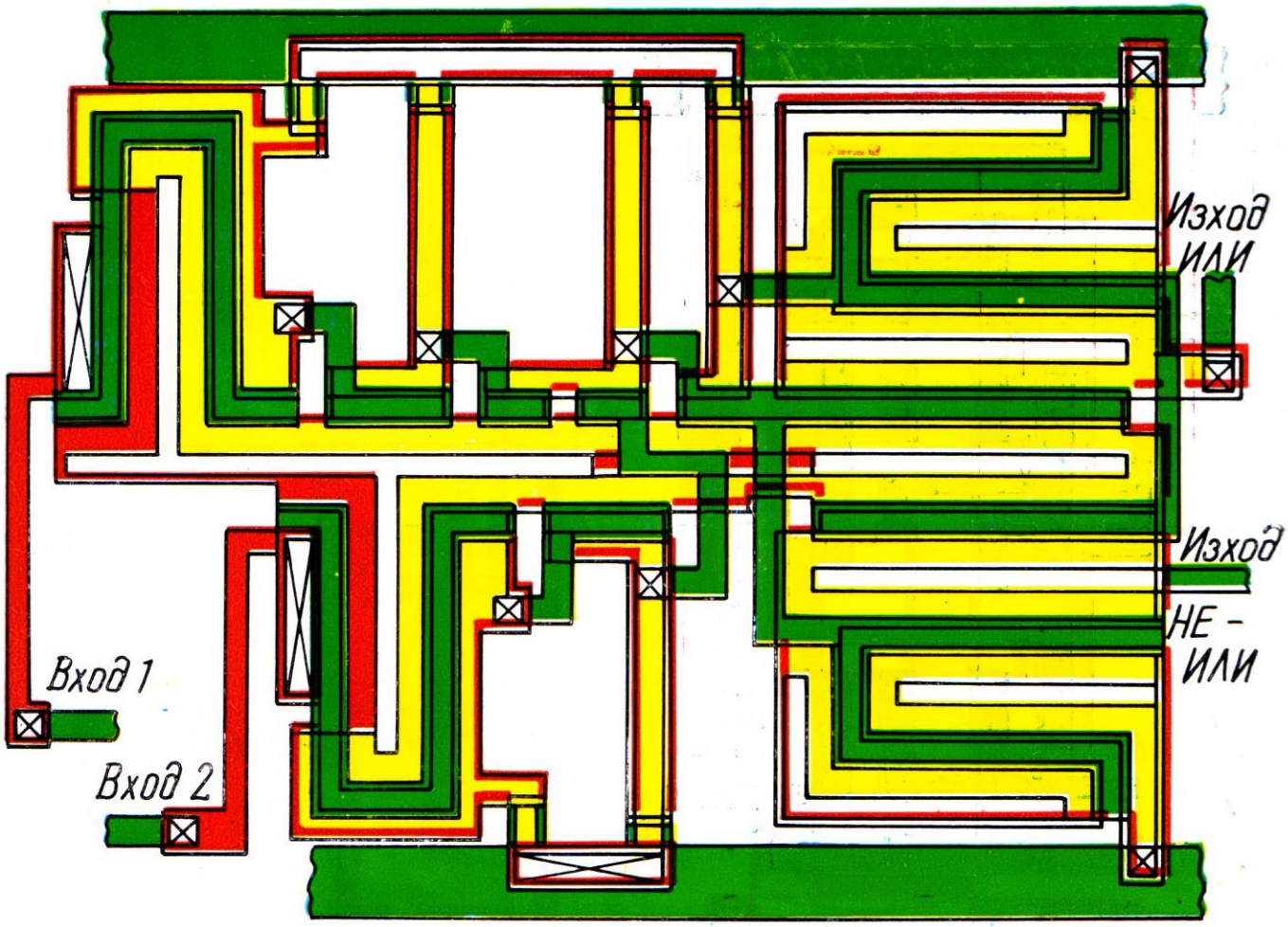
Фиг. 12.20



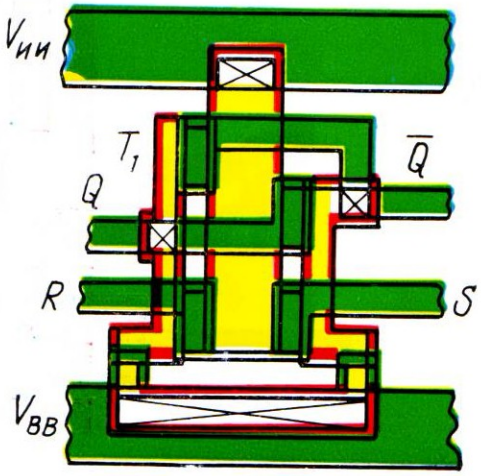
Фиг. 12.23


V_{BB}
Вход 1
T_2
T_4
T_{12}
T_6
T_1
$R_{огр}$
T_{17}
T_8
Изход
(НЕ-И)
T_5
T_{16}
T_3
T_{15}
T_7
T_9
Сорс
T_9
T_3
T_3
T_1
T_1
T_2
T_4
T_4
T_2
$R_{огр}$
$R_{огр}$
V_{SS}
Вход 2
Вход 3

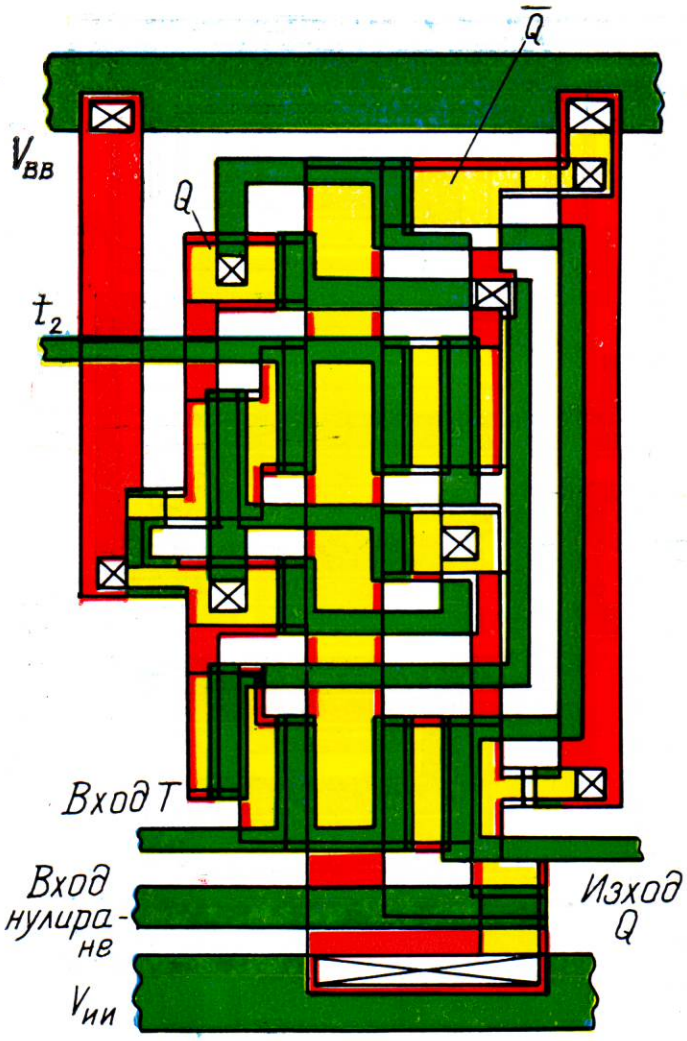
Фиг. 12.24



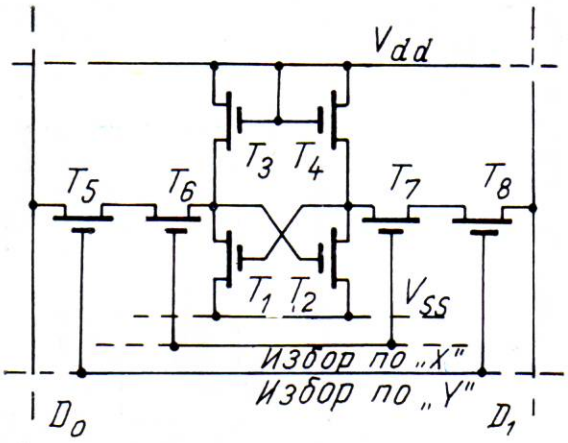
Фиг. 12.26



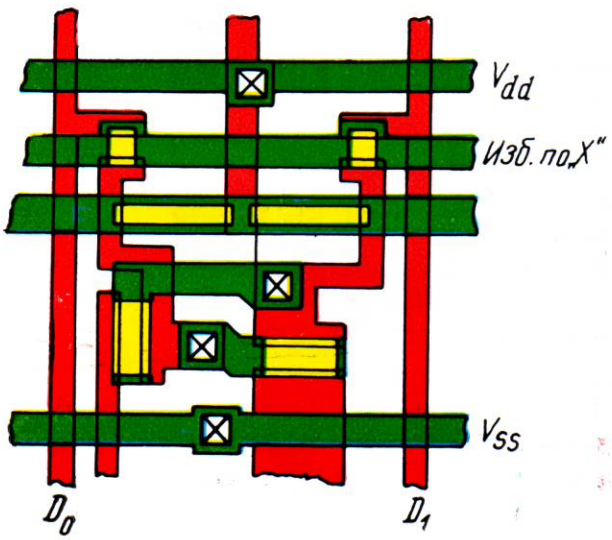
Фиг. 12.28



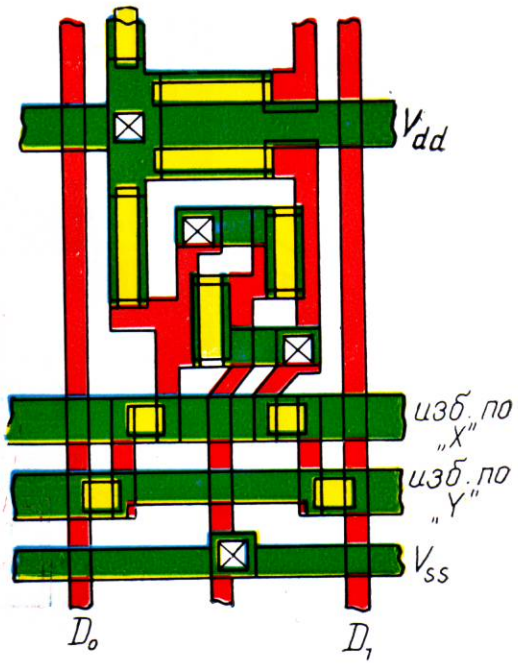
Фиг. 12.30



а)

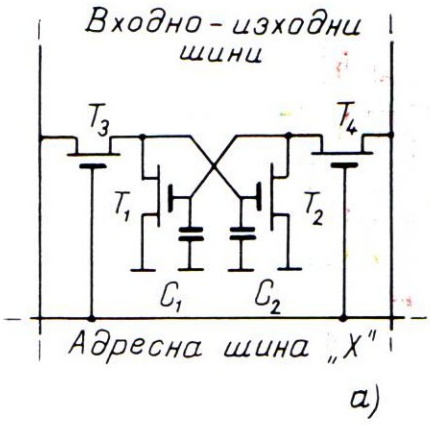


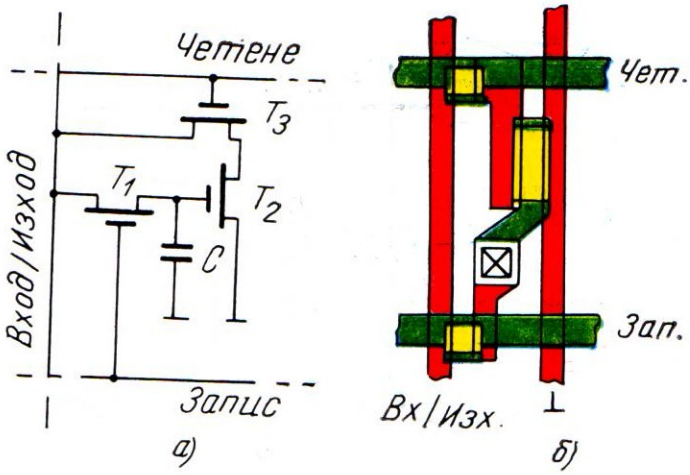
Фиг. 11.45



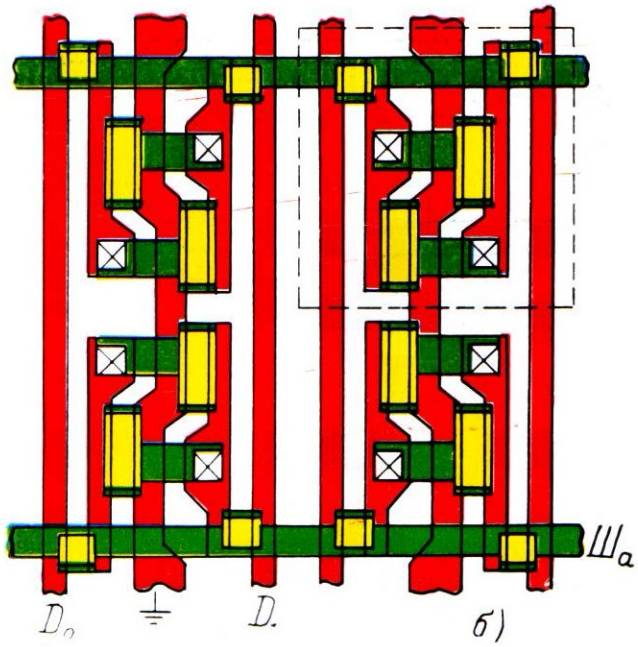
б)

Фиг. 12.51

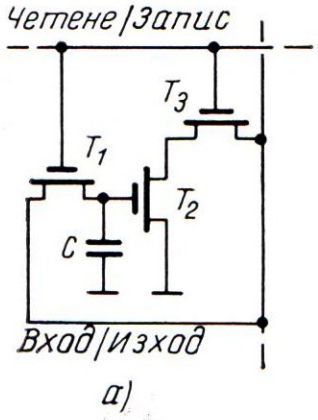


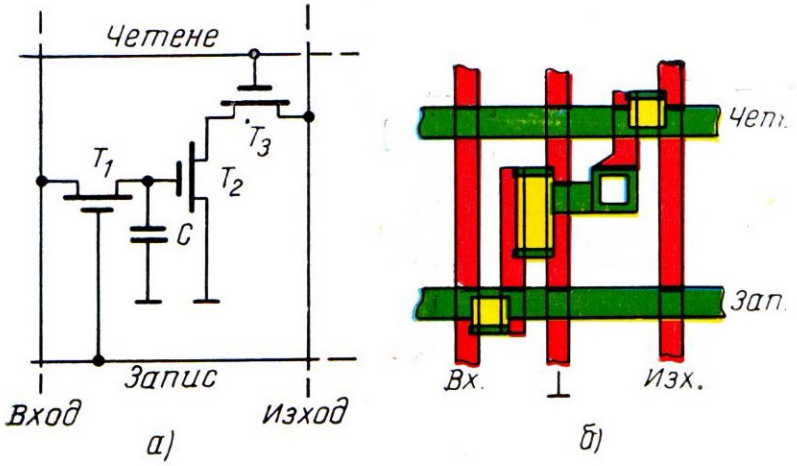


Фиг. 12.54

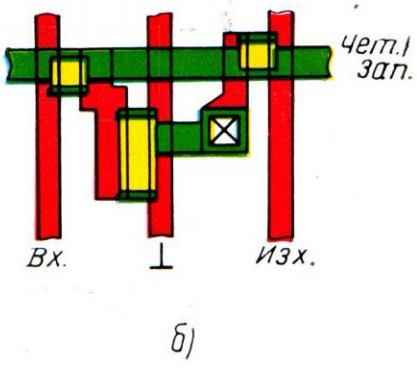


Фиг. 12.52

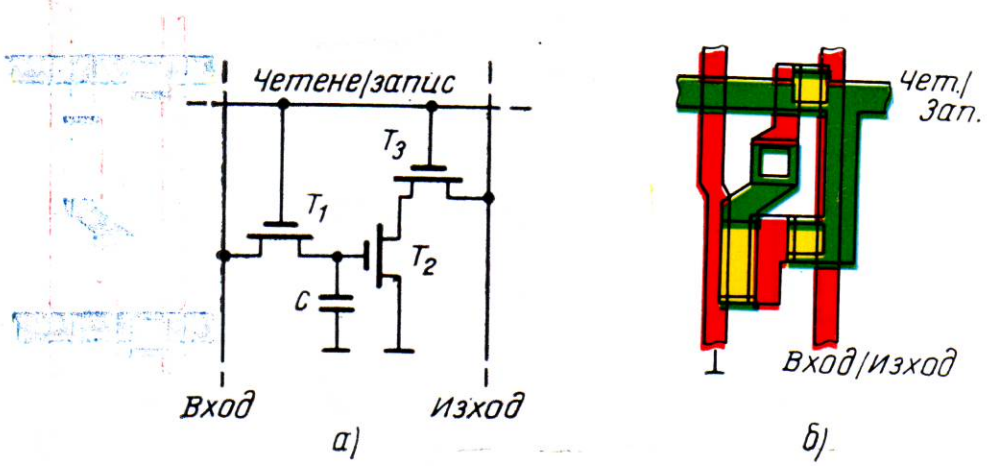




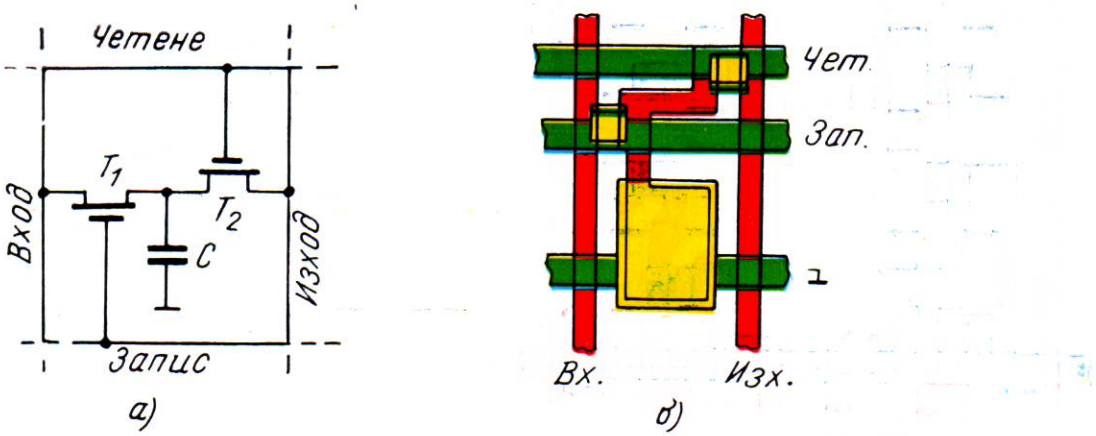
Фиг. 12.53



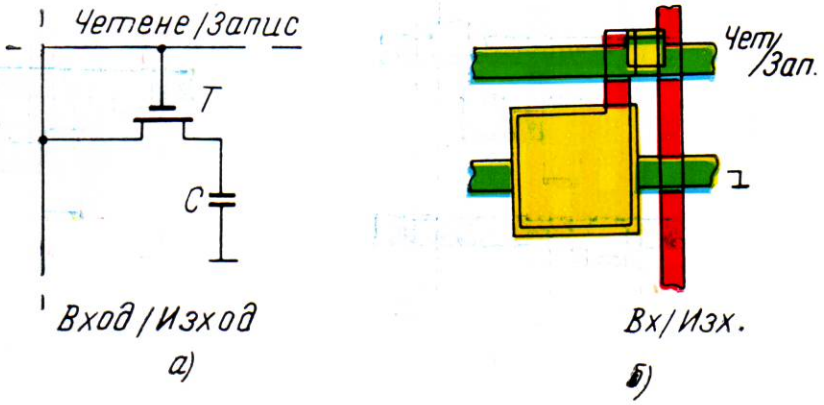
Фиг. 12.55



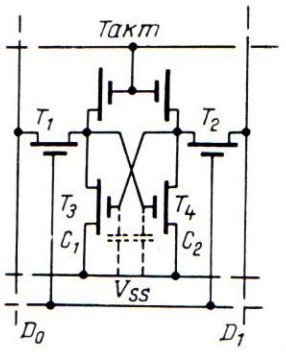
Фиг. 12.56



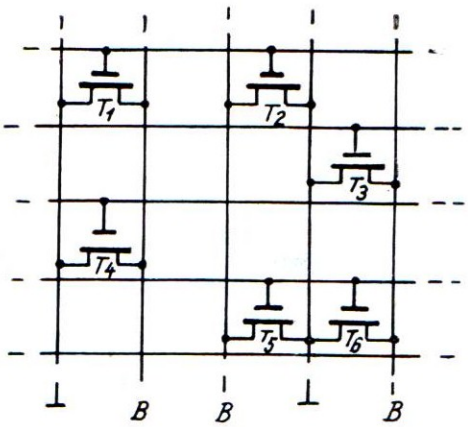
Фиг. 12.57



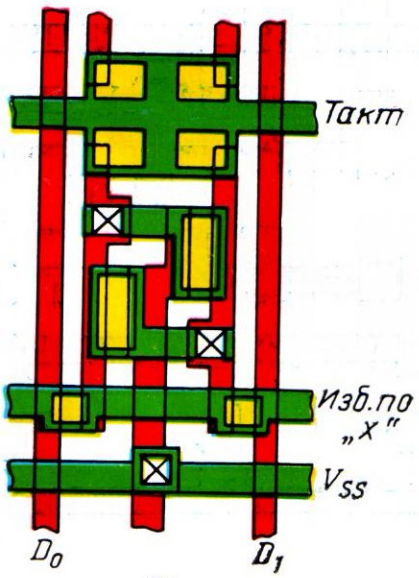
Фиг. 12.58



а)

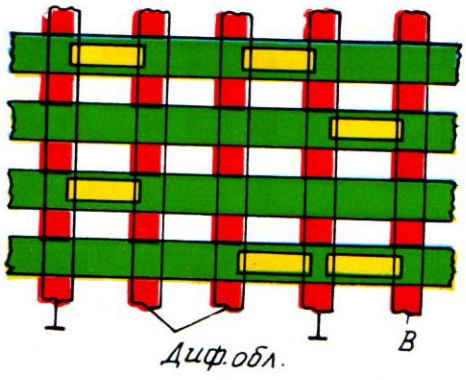


а)



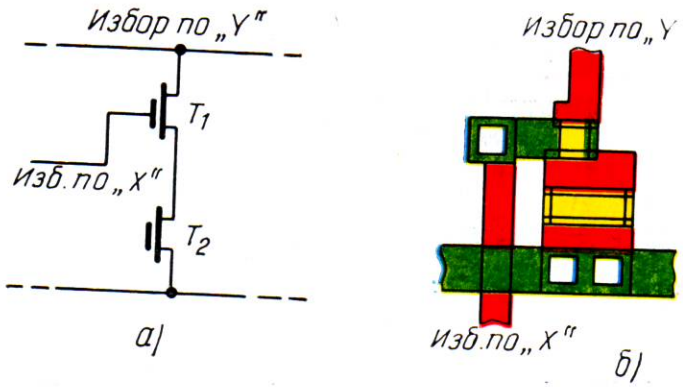
б)

Фиг. 12.64

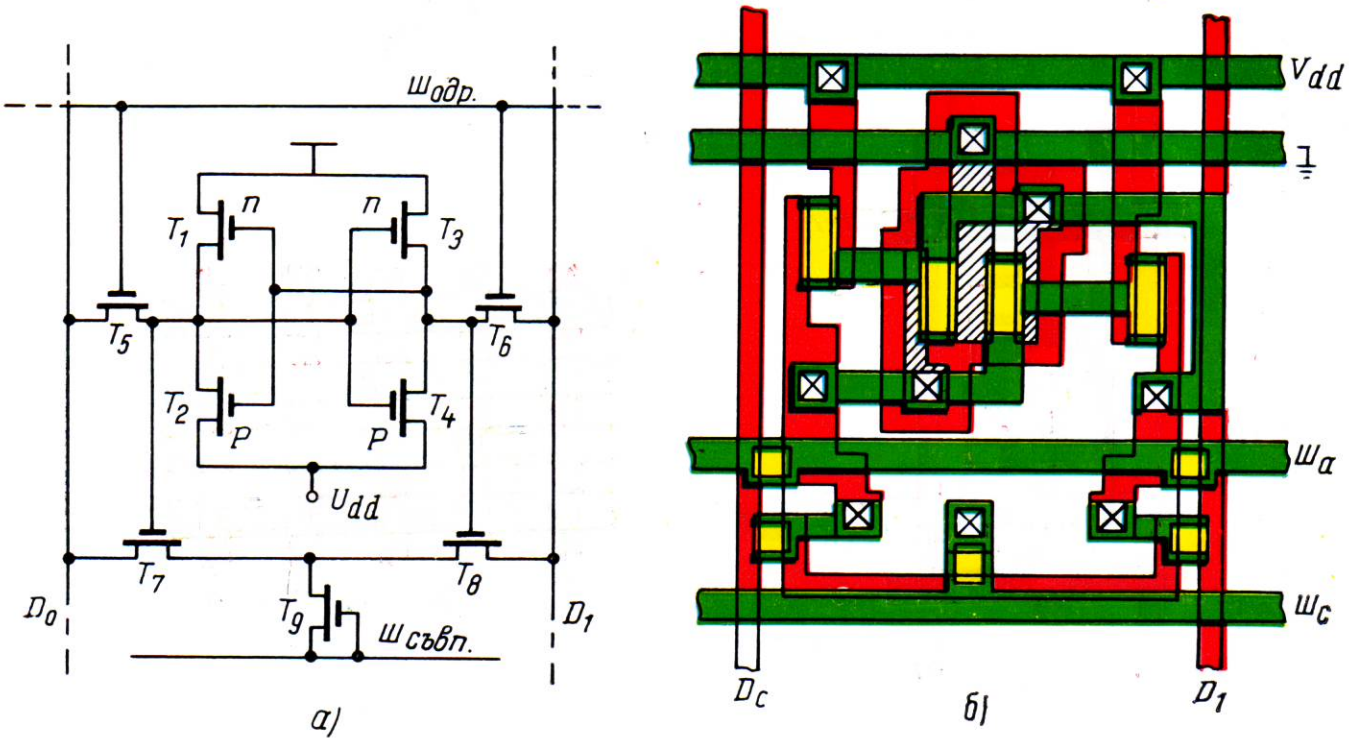


б)

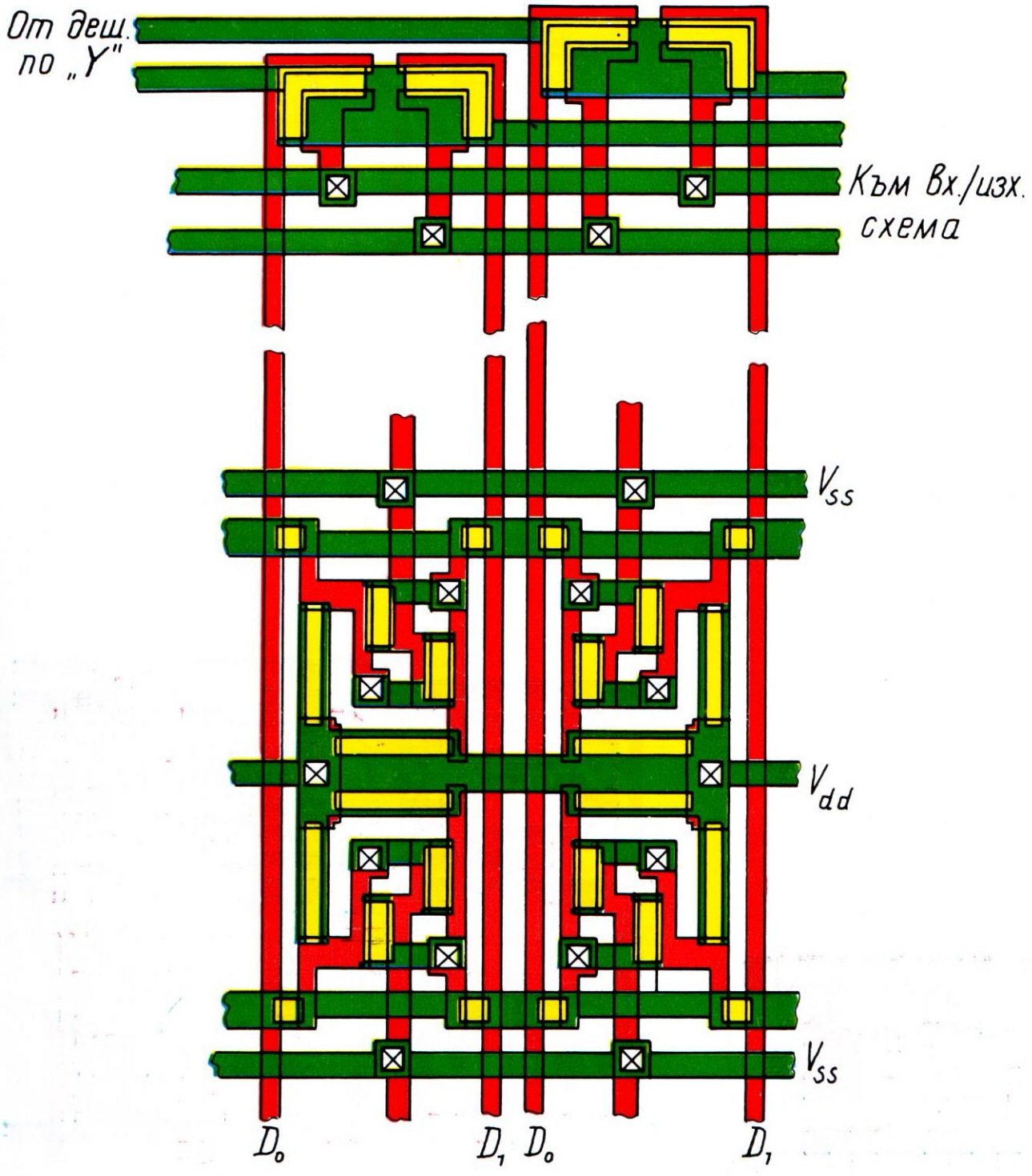
Фиг. 12.66



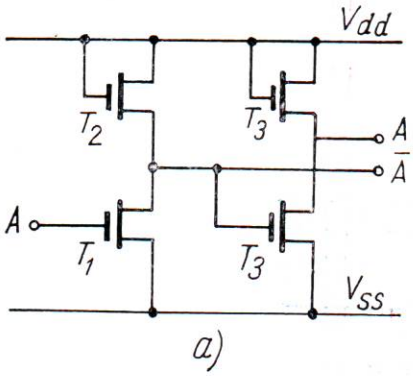
Фиг. 12.67

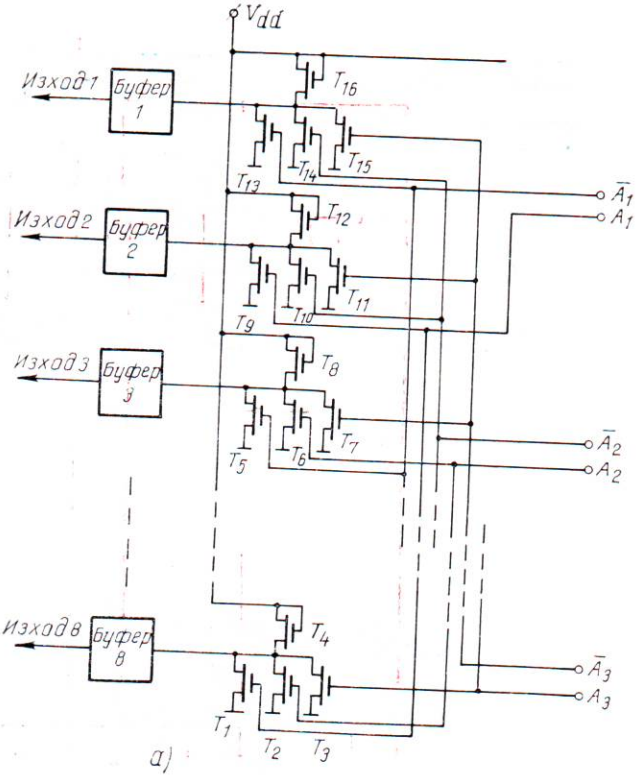


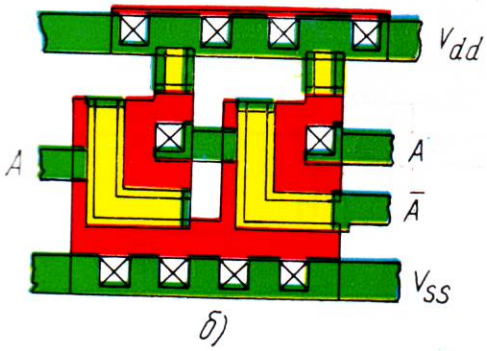
Фиг. 12.68



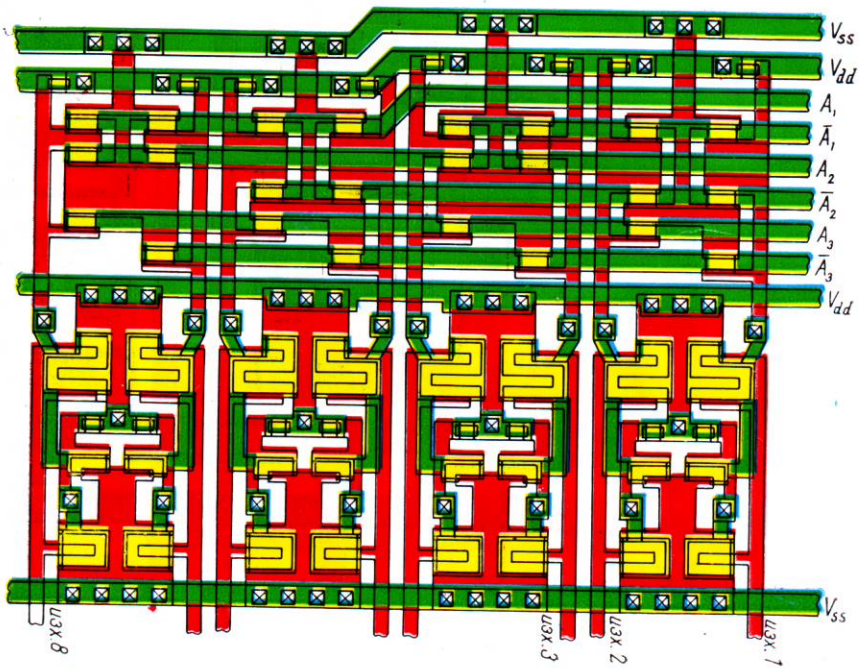
Фиг. 12.71







Фиг. 12.72



б)
Фиг. 12.74

ЗАБЕЛЯЗАНИ ПЕЧАТНИ ГРЕШКИ В КНИГАТА

Конструкции и технолгия на полупроводниковите прибори

Стр.	Ред	Напечатано	Да се чете	По вина на
33	18 д. дясно	псставят	доставят	автор, ред.
34	13 г. ляво	4 NHCl	4 NH Cl	„
41	3 д. ляво	фиг. 5.1	фиг. 5.2	„
42	2 г. ляво	фиг. 5.2	фиг. 5.1	„
51	7 г. дясно	AL	Al	„
51	23 г. дясно	Na AL F_6	Na Al F_6	„
51	26 г. дясно	SiO	SiO_2	„
51	27 г. дясно	TiO	TiO_2	„
161	8 г ляво	β (T)	β, (T_c)	„
162	22 д. ляво	$\sqrt{\text{изх. max}}$	$\sqrt{\text{изх max}}$	коректор
167	27 г. ляво	2.2 . 10-4, 12.5 . 2.40	2.2 . 10-4, 12.5 . 240	автор, ред.
167	36 г. ляво	V_{BB}	V_{DD}	коректор
167	5 д. ляво	4. 33.	4. 33.	автор, ред.
167	2 д. ляво	1 . 6	1. 6	коректор
168	19 г. ляво	h, $/L_1$	b, $/L_1$	„
168	14 д. ляво	16 nm	160 nm	печатницата
168	10 г. дясно	$t_{\text{разр}}$ $C_{\text{вх}}$ + $t_{\text{изкл}}$ T_1	$t_{\text{зар}}$ $c_{\text{вх}}$. $t_{\text{зкл}}$. T_1	автор ред.
168	11 г. дясно	25 . 2 . 10-9	25 . 2 . 10-2	„
168	14 г. дясно	t разр с изх	t зар C изх	„
168	15 д. ляво	600 mm	600 nm	печатницата