

ЛАБОРАТОРНО УПРАЖНЕНИЕ №1

Тема: ОПРЕДЕЛЯНЕ ЕЛЕКТРОФИЗИЧНИ ПАРАМЕТРИ НА CCD ПРЕМЕСТВАЩИ РЕГИСТРИ В ЗАВИСИМОСТ ОТ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧНАТА РЕАЛИЗАЦИЯ

Цел: Изучаване на конструктивно-технологичните особености и определяне на основни параметри на преместващи регистри на структури със зарядна връзка

Теоретична част:

Линейните Charge Coupled Devices (CCD) или структури със зарядна връзка (C3B) представляват преместващи регистри формирани от последователно близко разположени електроди на MOS кондензатори върху обща полупроводникова подложка. Прилагането на преднапрежения на MOS електродите води до формиране на локализирани потенциални ями в полупроводника под всеки електрод. Зарядните пакети могат да бъдат ограничени във формираните потенциални ями и премествани по повърхността (при повърхностно-канални SCCD) или в обема (при обемно-канални BCCD) чрез подаване на подходящи по форма тактови импулси към гейтовете.

CCD широко се използват като фотоелектрически преобразуватели, аналогово дискретни филтри, аналогови памети и закъснителни линии (ЗЛ).

Напречен разрез на четирифазен преместващ регистър (ПР) на CCD е показан на фиг.1. В този случай 1 bit информация се съхранява в клетка от 4 гейта. Повечето C3B се реализират като върху полупроводникова подложка (P-Si) се израства тънък слой SiO_2 - $0,1 \pm 0,15 \mu\text{m}$, върху който се разполагат проводящите електроди от метал-Al или полисилициеви. Снимка на топологията на тази структура е показана на фиг.2.

Ако към някой от електродите се приложи положително напрежение в MOS-структурата възниква електрическо поле, под действието на което основните токоносители-дупките се отблъскват от повърхността. В резултат на това се образува обеднен слой, чиято дебелина е няколко μm .

Понеже на повърхността и в обема на ПП има термогенерация на токоносители, то термодинамиката на този процес ще влияе върху характеристиките на обеднения слой. Неосновните носители – електрони, дошли от неутралните области на полупроводника, вследствие на дифузия, се преместват под въздействието на полето към границата полупроводник-диелектрик и се събират в плиткия ($0,01 \mu\text{m}$) инверсен слой. Генерираните в обеднения слой основни носители – дупки – се изтласкват под действието на полето в неутралната област на ПП. Известно време ($1 \div 100\text{s}$) след прилагане на напрежението, MOS-структурата преминава в термодинамично равновесие. Вече е създаден стационарен инверсен слой с постоянна концентрация на токоносителите (Фиг.3). След натрупването си неосновните носители – електроните, частично екранират външното електрическо поле и това довежда до преразпределение на потенциала. Все по-голяма част от външното напрежение започва да пада върху диелектрика, изкривявайки енергетичните нива в полупроводника. Повърхностният потенциал намалява заедно с намаляването на ширината на обеднения слой. След установяване на стационарно положение изкривяването на нивата съответства на изменение на проводимостта на повърхността и на образуването на инверсен слой с дълбочина x_k . Повърхностният потенциал намалява до потенциала на инверсия

$$\varphi_0 = 2\varphi_F = 2 \frac{kT}{q} \ln \frac{N_A}{n_i}.$$

Ако напрежението на гейта се повишива, то повърхностната концентрация на електроните расте експоненциално, а повърхностния потенциал – квадратично нарастващо на ширината на обеднената зона. След установяването на инверсен слой и достигането на максимално широка обеднена област последващото нарастващо на напрежението на гейта се компенсира от движението на електроните в инверсия слой. Там те постъпват от термогенерация, която е сравнително бавен процес. Затова, когато към постоянното напрежение се прибави и малък променлив сигнал с достатъчно висока честота, която електроните не успяват да следят и капацитата на MOS-структурата остава постоянен и равен на капацитата на обеднялата област. Ако честотата на променливия сигнал е по-ниска – под 100 kHz, електроните могат да я “следят” и капацитата на гейта е приблизително равен на капацитата на окиса.

В реалните MOS-структури при нулево напрежение на гейта нивата на зонната диаграма са извити, а не плоски. За изправянето им е необходимо да се приложи някакво напрежение, наречено напрежение на плоските зони U_{FB} . Причините за изкривяването на зоните са:

- 1) Различните ротделителни работи на метала и полупроводника;
- 2) Наличието на електрически заряд в изолационния слой – Q_{ss} ;
- 3) Заряди на границата диелектрик-полупроводник Q_{st} .

Понеже $Q_{ss} \gg Q_{st}$, то ще се отчита само N_{ss} . От казаното следва, че $U_{FB} = \varphi_{MS} + \frac{N_{ss}}{C_i}$.

Следователно за праговото напрежение може да се запише

$$U_T = \pm \left(\varphi_{MS} + \frac{N_{ss}}{C_i} \right) + \varphi_s + \frac{1}{C_i} \sqrt{2\epsilon_0 \epsilon_{SiO2} N_a \varphi_s}, \text{ където}$$

$$\varphi_s = 2\varphi_F$$

$$\varphi_F = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_a}{n_i} \quad - \text{потенциал на Ферми}$$

$$C_i = \frac{\epsilon_0 \epsilon_{SiO2}}{d_i}.$$

При P-тип подложки фиксираните заряди в окиса предизвикват намаляване на праговото напрежение, а за N-тип – увеличаване.

За онагледяване на потенциалната яма на MOS-структурата се използва хидравличен модел (Фиг. 4). Това е съд, чието сечение повторя формата на гейта, а дълбочината му е колкото празната потенциална яма $\varphi(0) - \varphi_0$. Въвеждането на заряден пакет в нея съответства на запълването и с течност до определено ниво $\varphi_Q - \varphi_0$. Повърхностният потенциал дава зависимостта между дълбочината на потенциалната яма, напрежението на гейта и плътността на подвижния заряд Q . Технологично φ се определя от степента на легиране на подложката, плътността на повърхностните състояния и качеството на SiO_2 . Разглеждаме случая при квазистационарно равновесие, без да отчитаме процеса на термогенерация. Съгласно теоремата на Гаус за MOS-структурата може да се запише следното условие за електронеутралност $Q_G + Q_s - Q_d - Q_l = 0$.

Специфичният заряд на гейта Q_G се определя като разлика между напрежението на гейта и повърхностния потенциал с отчитане влиянието на контактната потенциална разлика φ_{MS} .

$Q_G = C_i(U_G - \varphi_{MS} - \varphi)$. Зарядът Q_s съществува технологично на границата метал-полупроводник и не зависи от φ . Чрез преобразуване за φ се получава

$$\varphi = \sqrt{U'_G - \frac{Q_i}{C_i} + \frac{a}{4}} - \frac{a}{2}, \text{ където } a = \frac{\sqrt{2q\epsilon_0\epsilon_{Si}N_A}}{C_i} \text{ и } U'_G = U_G - U_{FB}.$$

Зависимостта $\varphi(Q_i, U_G)$ свързва повърхностния потенциал (дълбочината на обеднения слой) на MOS-структурата в обеднено неравновесно състояние с плътността на локализирания подвижен заряд Q_i .

Друг важен параметър, определящ зарядната способност на прибора е дебелината на обеднената област:

$$x_d = \frac{Q_d}{qN_A} = \frac{\sqrt{2\epsilon_0\epsilon_{Si}\varphi}}{qN_A}, \quad x_d \equiv d_d.$$

Един от основните проблеми при производството на CCD матрици, е точното дефиниране на страничните участъци на потенциалните ями, до които трябва да се разпростира заряда (lateral confinement). Това се прави с цел да не се разпилват генерираните електронни извън потенциалната зона, а да останат съсредоточени в нея. В противен случай ще се появят утечки, които рязко ще влошат качествата на CCD схемата.

Като най-добра се е наложила технологията за ограничаване на канала чрез дифузия, защото тя строго фиксира приповърхностния потенциал, което води до много по-прецизно определяне на границите на канала. Идеалният вариант се получава, когато дифузията е внезапна, но със сравнително ниска приповърхностна концентрация (по-малко от 10^{18} cm^{-3}). Ако тя се повиши значително може да се получат увреждания на переходите и те да достигнат до повърхността. Обикновено в практиката се използва комбинация от лека ограничаваща дифузия и дебел слой окис, тъй като последният се получава естествено в стандартния MOS производствен процес.

При реализирането на СЗВ линията е използван следния технологичен ред:

1. Изходна подложка p-Si, ориентация $<100>$ и $N_A=6.10^{24} \text{ cm}^{-2}$;
2. Оксидение за дебел SiO_2 $d = 0,5 \mu\text{m}$;
3. Фотолитография и ецване на отвори на p+ стоп-канална дифузия;
4. Дифузия на бор от (газов източник) – двуетапен процес;
5. Сваляне на SiO_2 и израстване на нов слой диелектрик със същата дебелина;
6. Фотолитография и ецване за йонна имплантация;
7. Йонна имплантация на бор (B) ;
8. Сваляне на маската и израстване на тънък $\text{SiO}_2 - 0,125 \mu\text{m}$;
9. Отлагане на поликристален Si за гейтове на фотоприемната част;
10. Фотолитография и ецване за отстраняване на излишния материал;
11. Израстване на тънък $\text{SiO}_2 - 0,125 \mu\text{m}$;
12. Метализация и ецване за прехвърлящи гейтове и другата част от преместващия регистър;
13. Оксидение отново на тънък $\text{SiO}_2 - 0,125 \mu\text{m}$;
14. Метализация и ецване за прехвърлящи гейтове и другата част от ПР;
15. Оксидение за защитата 0,8 μm ;
16. Отлагане на Al или W за защита на прехвърлящите гейтове и ПР от светлинам
17. Следват процесите контрол, скрайбиране, херметизация, измерване. Готовите структури се подлагат на изпитвания за надеждност, измерват се и се сортират.

Експериментална постановка: Микроскоп, чипове на СЗВ закъснителни линии

Задачи за изпълнение:

1. Наблюдавайте под микроскоп и начертайте в мащаб топологията на една CCD клетка от изследваната структура на преместващия регистър.

2. Изчислете праговото напрежение за изследваната структура при зададени стойности съответно за:

$$q = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

$$\varphi_{MS} = 0.25 \text{ V за Al гейт}$$

$$\varphi_{MS} = 0.6 \text{ V за поли-Si гейт}$$

$$d_i = 0.125 \mu\text{m}$$

$$N_{ss} = 9 \cdot 10^{10} \text{ за ориентация } <100>$$

$$N_A = 6 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$$

$$n_i = 1.5 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$$

$$\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-14} \text{ F/cm}$$

$$\epsilon_{SiO_2} = 12$$

$$kT/q = 0,0258 \text{ V за } 300^\circ \text{ K}$$

3. Оценете зарядната способност на разглежданата СЗВ линия и представете графично зависимостта $\varphi = f(x_d)$ от напрежението на гейта.

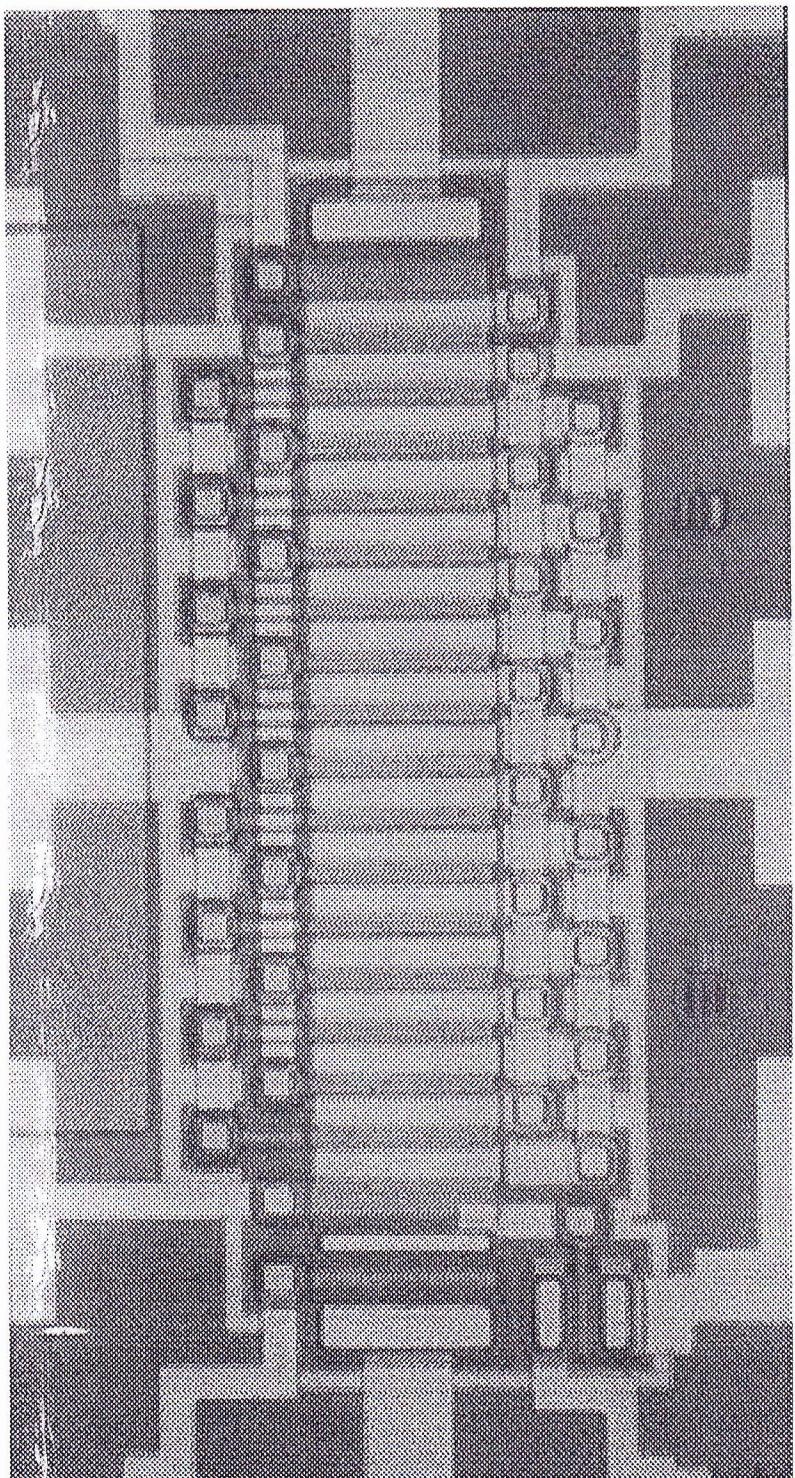
4. Представете графично зависимостта при различни стойности на $Q_{oc} = f(\varphi)$ при различни стойности на гейтовото напрежение : 8V; 10V; 12V; 15V. Анализирайте как се променя зарядната способност

5. Изчислете с колко ще се промени специфичния заряд на гейта Q_G за повърхностен потенциал $\varphi = 6 \text{ V}$, при $U^H_{Gmin} = 6 \text{ V}$ и $U^H_{Gnom} = 9 \text{ V}$, и $U^H_{Gmax} = 12 \text{ V}$.

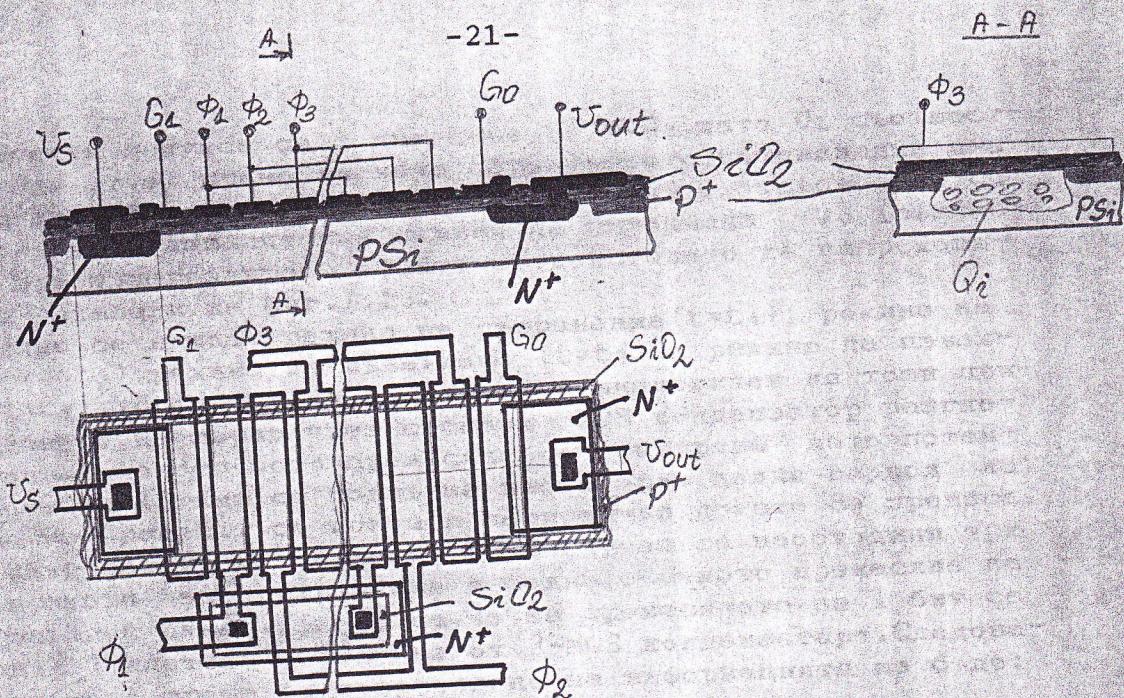
6. Начертайте напречни разрези на СЗВ клетка от ПР след всеки основен технологичен етап.

Контролни въпроси:

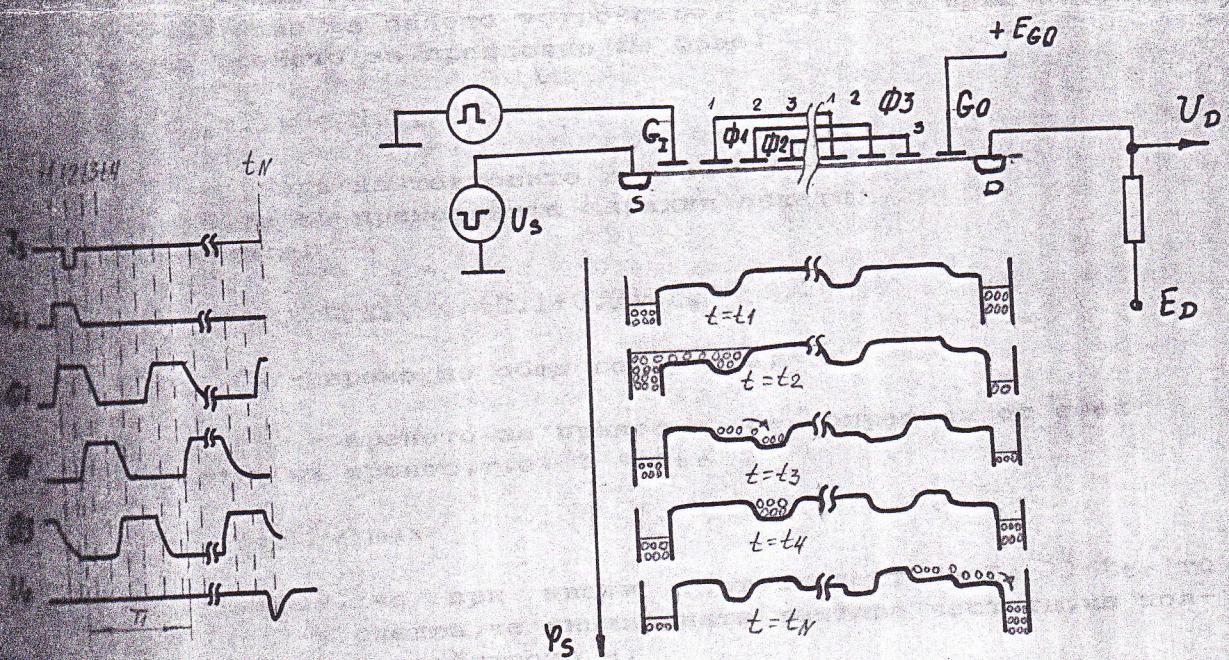
1. При еднакви електро-топологични параметри сравнете зарядните способности на СЗВ с дву- и четири-фазно управление.
2. Съобразете знака пред събирамето в скобите за израза при определяне на праговото напрежение – първи случаи знакът е положителен и в кои-отрицателен.
3. Кои са смущаващите фактори в реална СЗВ структура водещи до $U_{FB} \neq 0$?



Фиг. 3. Топологична снимка на четирифазна CCD структура

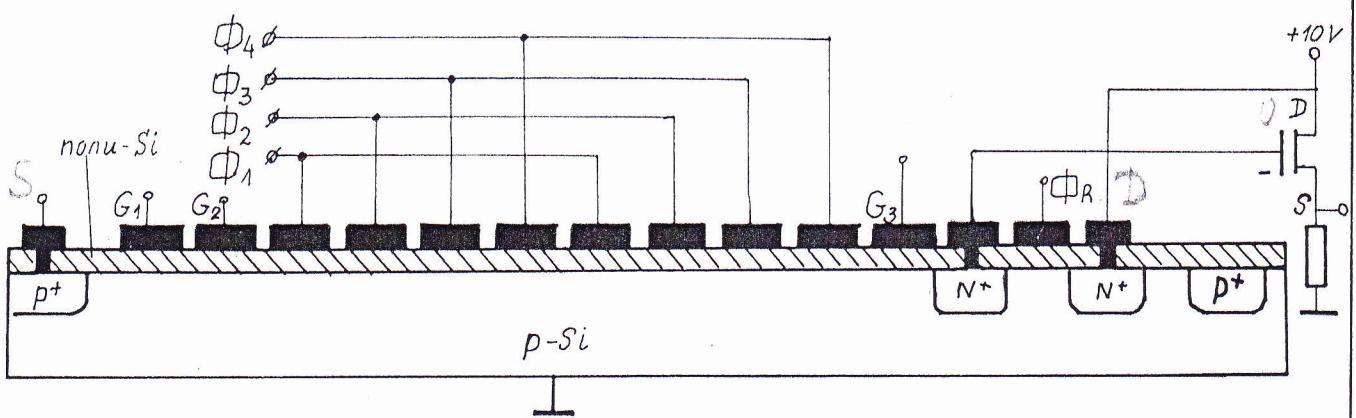


Фиг. 1.12.

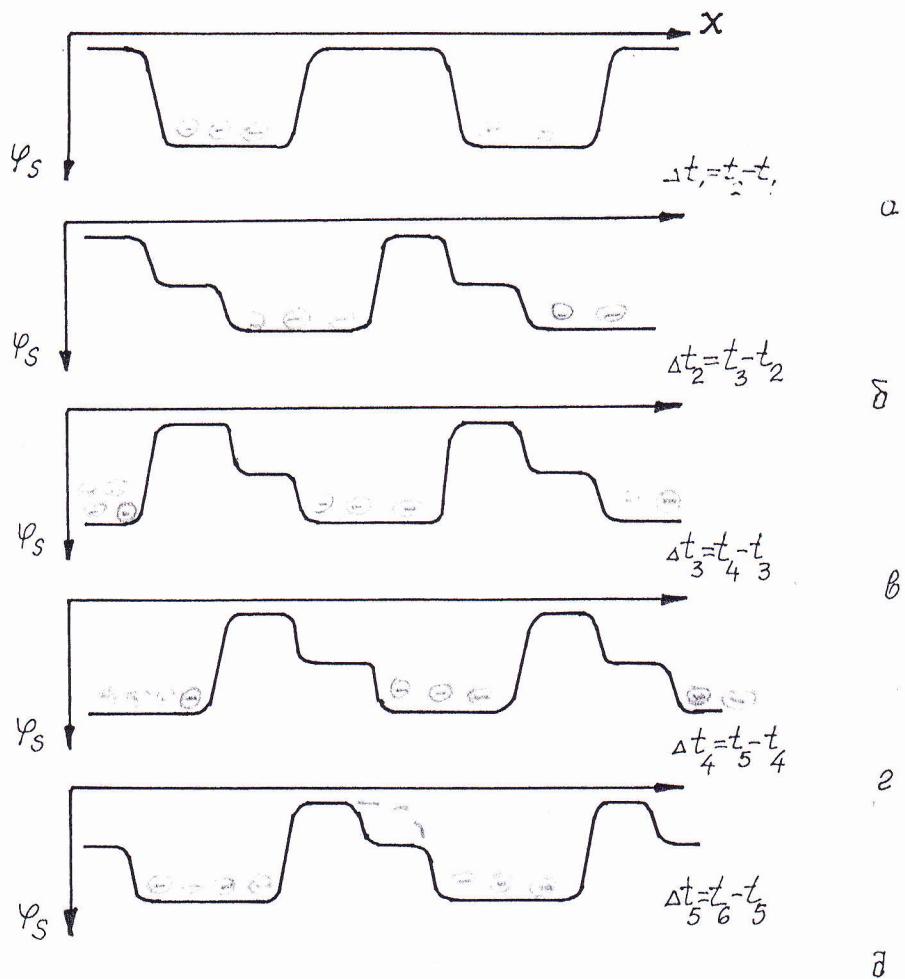


a)

Фиг. 1.13.

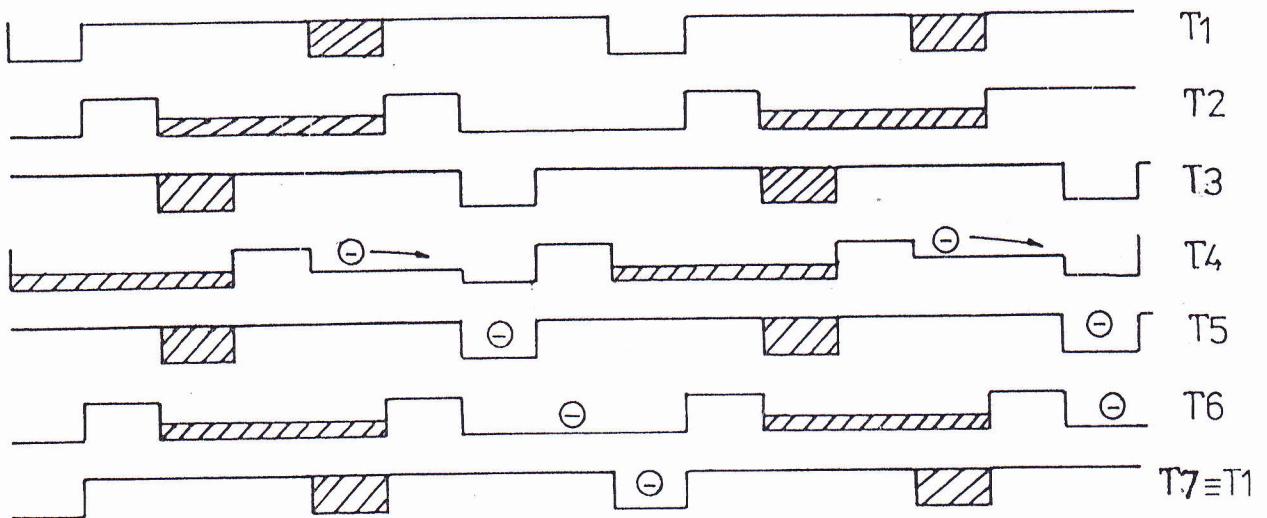


4 1 2 3 4 1 2 3

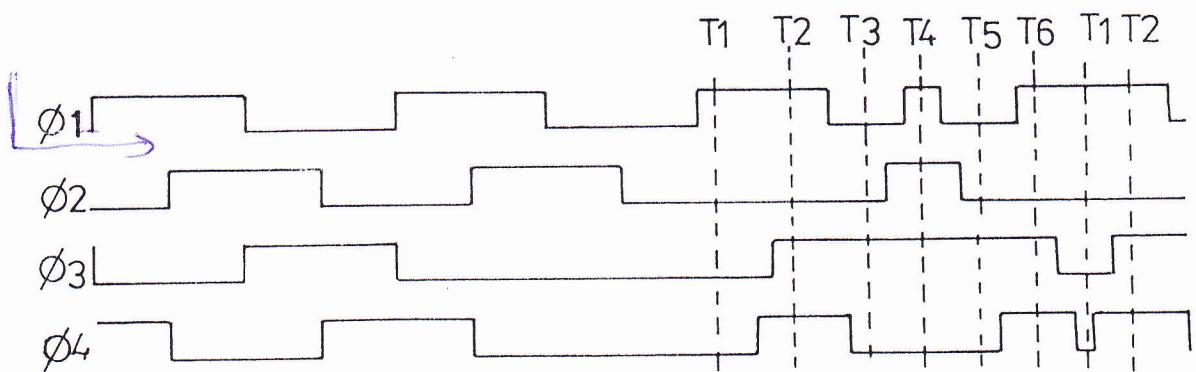


фиг. 21. Потенциални диаграми.

$\phi_1 \phi_2 \phi_3 \phi_4 \phi_1 \phi_2 \phi_3 \phi_4 \phi_1 \phi_2 \phi_3 \phi_4 \phi_1 \phi_2 \phi_3$



Фиг. 2.10. а



Фиг. 2.10. б.

СИМВОЛЫ