Амелия Димитрова
29 гр.

①

ПЛЕ – II част (текуща оценка)
доц. д-р Тодор Атанасов
лаб 1438

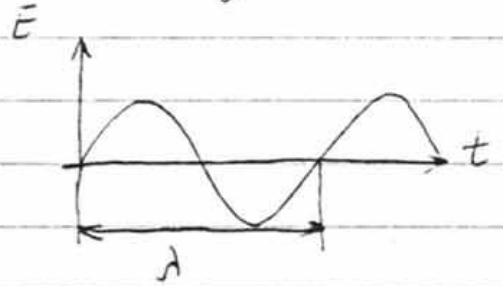
Специални и силови полупроводникови елементи

Опто – електронни полупроводникови елементи

Опто – електронни уреди

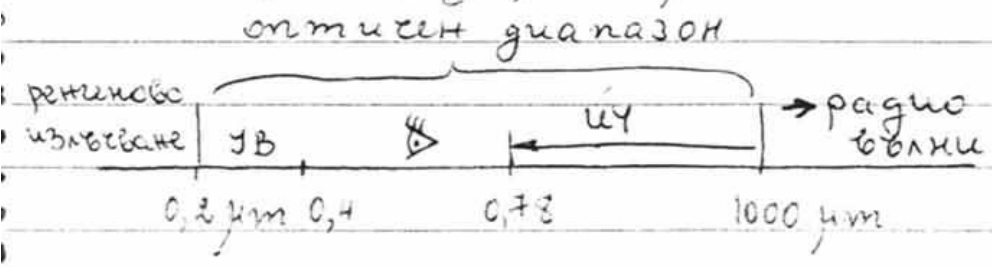
Спектър на електромагнитно излъчване.
Основни понятия и единици за измерване

Една от формите на W е електромагнитното излъчване
Електромагнитното излъчване представлява разпространяващи се електромагнитни вълни, които имат дължина на вълната λ [m] → [μm] = 10^{-6} m



Имаме разпространение във t на две вълни, които са: напрежителна и магнитна

Зависимостта от дължината се нарича спектър
Спектър → разпространение по λ



УКВ	– близка ИЧ зона	Оптичният диапазон
къси	0,78 μm ÷ 2÷3 μm	се дели на няколко
дълги	– средна ИЧ зона	поддиапазона
звукови	3 μm ÷ 8 μm	0,2 μm – 0,4 μm
	– далечна ИЧ зона	0,4 μm – 0,78 μm
	8 μm ÷ 1000 μm	0,78 μm – 1000 μm

до 30, 40 μm

$\lambda \to 0$ монохроматично излъчване – излъчването на лазарните диоди

не монохроматично излъчване

В природата и източници, които не са направени от човешка ръка са немонохроматични източници – електрото

$\lambda = 640\ nm$

$\Delta\lambda = 3\ nm$

$\Delta\lambda \approx 3\ nm$ за ПП

$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{LED}{\lambda = 660\ nm} = 0,66\ \mu m$

$\Delta\lambda = 60\ nm = 0,06\ \mu m$

Кохерентност – излъчване с еднаква дължина и еднаква фаза

Лазарните диоди – трябва да бъдат кохерентни

Двойствено представяне на електромагн. излъчване

$W_{кф} = \frac{hc}{\lambda}\ [J]$

h = константа на Планк

$h = 6,625 \cdot 10^{-34}\ Js$

c – скорост на светлината във вакуум

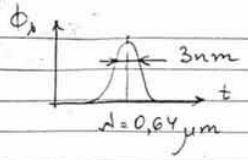
$c = 3 \cdot 10^{8}\ m/s$

1. Параметри на електромагнитно излъчване

* поток на електромагнитно излъчване

$\Phi = \frac{dW}{dt} \Rightarrow \left[\frac{J}{s}\right] \Rightarrow [W]$

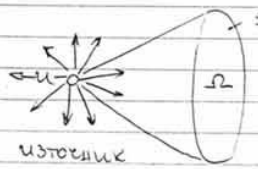
$\Phi = \frac{W}{t}\ [W]$ количеството енергия (генерирана, излъчена, погълнатата) за единица време



$\Phi_\lambda = \frac{d\Phi}{d\lambda}\left[\frac{W}{\mu m}\right]$

спектрална плътност на потока

Пространствена плътност на излъчването – способността на даден източник да насища пространството с електромагнитен поток



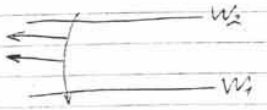
$sr \to$ стерадиан

$I = \frac{d\Phi}{d\Omega} \to$ интензитет на електромагнитно излъчване

$I = \frac{\Phi}{\Omega}\left[\frac{W}{sr}\right]$; $I_\lambda = \frac{dI}{d\lambda}$; $\left[\frac{W}{sr\ \mu m}\right] \to$ интензите

Полупроводникови излъчватели на електромагнитен поток

Луминисценция – процес на излъчване на електромагн. поток при спонтанното преминаване на Sарди от по-високо към по-ниско енергийно състояние



$$\frac{hc}{\lambda} = W_2 - W_1$$

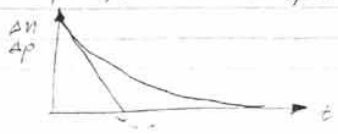
Луминисценцията е процес при който излъчването е немонохроматично и некохерентно в зависимост

- фотолуминисценция – н-с на товши на токон. и получава при облъчване с ЕМ поток
- катодна – обхваща и съответния материал с поток електрони с енергия по-голяма от 10 keV
- електролумин – вид подаване на ток, възбуждането и появяването на Ē на тръгоносителите и доми именно на него

Светодиди – LED

$n = n_0 + \Delta n$
$p = p_0 + \Delta p$ $\quad$ $\Delta n, \Delta p$ – добавъчни концентрации

$\Delta n = \Delta n_{t=0} \exp\left(-\frac{t}{\tau_n}\right)$
$\Delta p = \Delta p_{t=0} \exp\left(-\frac{t}{\tau_p}\right)$ $\quad$ τ – вр. на живот на тръгоносителите



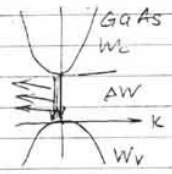
време на живот на ПТ
$\tau = 10^{-8} - 10^{-10}$ s

$$W_c - W_v = \frac{hc}{\lambda} = h\nu$$

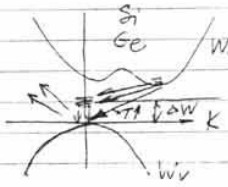
$$K_c - K_v = 0$$

(вълновото число на зоната за провод и валентната зона) = 0

За да имаме рекомбинация → трябва да имаме преход с еднакви вълнови числа в следствие електрон. поток само в зони с еднакви вълнови числа



GaAs – при него е възможно получаването на луминисценция



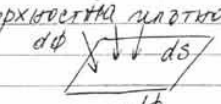
нова и частта със въвеждането на GaF или N за да и получат такива уловители

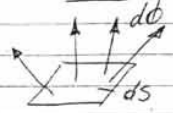
$$\lambda = \frac{hc}{\Delta W}$$

Материали от които се изработват – Светодиоди – най-вече от III и IV гр от Менделеевата таблица

(4)

Повърхностна плътност: $E = \frac{d\Phi}{dS}$ – осветеност, $\left[\frac{W}{m^2}\right]$





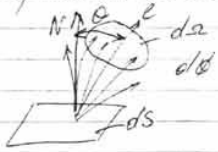
$R = \frac{d\Phi}{dS}$ – светимост, $\left[\frac{W}{m^2}\right]$

$E = \frac{\Phi}{S}$, $R = \frac{\Phi}{S}$

спектрална плътност: $E_\lambda = \frac{dE}{d\lambda}$, $R_\lambda = \frac{dR}{d\lambda}$

каква част от осветеността и года на единична дължина на вълната $\left[\frac{W}{m^2 \mu m}\right]$

Повърхностно силова плътност (яркост) – е спец. за източник на електром. поток и дава представа как един източник



$L = \frac{d^2\Phi}{dS\,d\Omega\cos\theta}$ (яркост)

и насочу площ dS и прост. ъ dΩ как насища това пространство с електром. поток

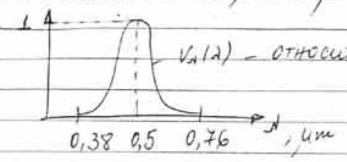
→ единица $\left[\frac{W}{sr\,m^2}\right]$

Ако изтег е концентрирана на 1 дълж. на вълната говорим за спектрална плътност

$L_\lambda = \frac{dL}{d\lambda}$, $\left[\frac{W}{sr\,m^2 \mu m}\right]$

$L = \frac{R}{\Omega\cos\theta}$ или $L = \frac{I}{S\cos\theta}$ – интензитета

– Светлинни параметри на електромагн. излъчване



$V_\lambda(\lambda)$ – относителна видимост на човешко око

Φ_V – лумен

1 лумен – такова видим на чов. око, на източник с $S = 0{,}5305\ mm^2$, $T = 2042\ K$ / в твърдване на плато

$W_V = \Phi_V t$, $[lm\,s]$

– Светлинен интензитет / свет. пространствена плътн.

$I_V = \frac{\Phi_V}{\Omega}$, $\left[\frac{lm}{sr}\right] = cd$

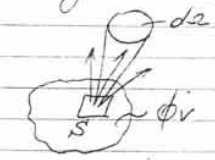
– Светлинната повърх. плътност

$R_V = \frac{\Phi_V}{S}$ $E_V = \frac{\Phi_V}{S}$ $\left[\frac{lm}{m^2}\right]$

max. осветеност в природата ~200 000 lux

за нормална работа са необходими 30 → 50 lux

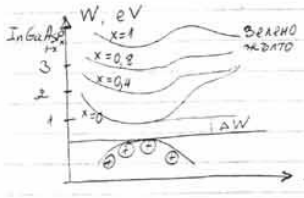
– Светлинна яркост



$L_V = \frac{I_V}{S}$; $\frac{cd}{m^2}$

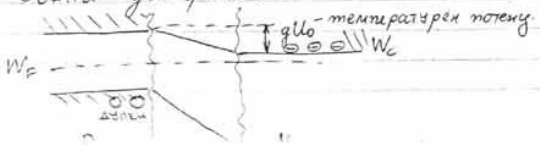
$L_V = \frac{\Phi_V}{S\Omega}$ $\left[\frac{lm}{m^2 sr}\right]$

Вид на материала:	λ, μm	ΔW, eV	Структ	кв. ефектив η %	lm/W
InGaN	0,45 с		2хетер.	3,8	3,6
SiC	0,47 с-з		PN преход	0,03	0,04
ZnCdSe	0,49		2хетер	1,3	1,7
ZnTeSe	0,512		2хетер	5,3	18
InGaN	0,514		2хетер.	2,6	7
GaP	0,555з		PN преход	0,1	0,6
AlInGaP	≈ 0,6		2хетер	5	20
GaAlAs	0,8÷0,9 ич	1,4 ÷ 2	2хетер.		
InGaAsP	1,1 ÷ 1,65		2хетер.		
InGaAsSb	1,7 ÷ 4,4		2хетер.		
PbCdS	2,7 ÷ 4,2		2хетер		
PbSSe	4,2 ÷ 8		2хетер.		
PbSnTe	5,5 ÷ 30		2хетер		

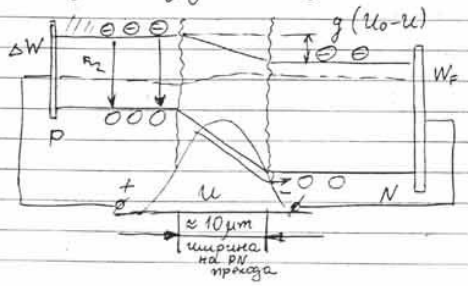


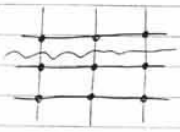
X	ΔW, eV	λ, μm
0	1,43	0,91
0,4	1,92	0,65
0,85	1,55	0,58
1	2,78	0,56

Зонна диаграма:

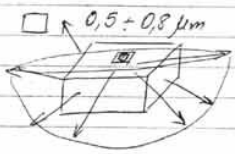


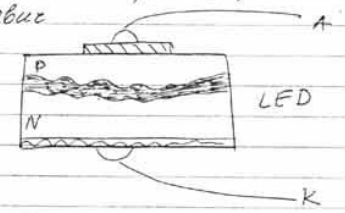
Ако на прехода се подаде потенциал в права посока





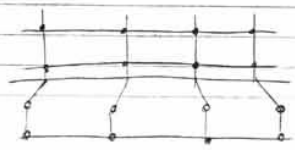
Излъчването на структурата е от ъглата повърхност и най-често се реализира като сандвич





Под хетероструктура се разбира металургичен контакт м/у два полупроводника с разлика но близка стойност на ширината на забраненат зона

1) да имат приблиз. темпер. коеф., близки матер.
!2) да имат близка кристална структура

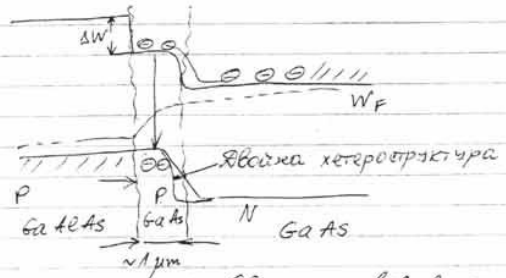


Инжекцията на токонос при хетеропрехода е едностранна

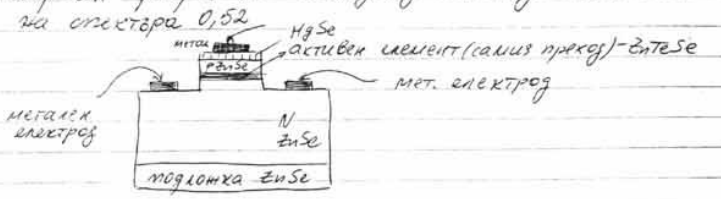
Зонна диаграма на единична хетероструктура

Един. Хетер. структ – разликата в ΔW е само за единия вид токоносители

Двойна Хетер. структ. – разликата в ΔW е и за 2-та вида токоносители



Напречен разрез на Светодиод във видимата част на спектъра 0,52



Параметри на Светодиодите и техните характеристики

Под параметър се разбира число, което описва свойствата на диода

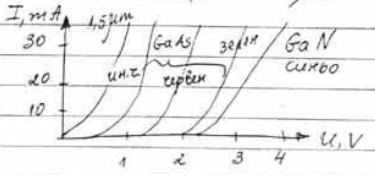
А характеристиката е зависимост (ф-ия на един параметър от друг).

- Електр. пар. и х-ки – описва поведението на LED от електр. страна (захранване, колко ток тегли)
- Оптични пар-тах LED са дърни като източник на електром. излъчване
- функционални параметри и х-ки – подновяване

I. Електрически параметри и х-ки

* Волт-амперна х-ка:

$$I = I_s\left(e^{\frac{U}{m\varphi_T}} - 1\right) \equiv I = I_s\left[\exp\left\{\frac{U}{m\varphi_T}\right\} - 1\right]$$



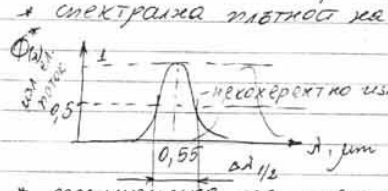
* Max. ток в права посока I_F – тока пропуснат при LED той фокусиращо дълго време

I_F стига до 100 mA за инф. черв. д., за супер червените ZnSe – 50-60 mA

* U_R – светодиодите имат ниско U_R и при по-голяма U_R изгарят.
* C – собствен капацитет от 1 pF до 100 pF

II. Оптични х-ки и параметри

* спектрална плътност на излъчваното



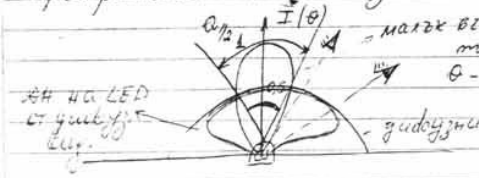
* полуширина на спектъра на излъчване $\Delta\lambda_{1/2}$ от 30 ÷ 60 nm за различен вид LED

0,03 ÷ 0,06 μm

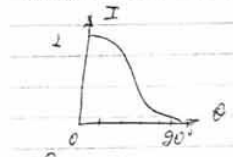
Колкото токът е по-голям толи спектър е ханалъ

Дом. работа: Какъв е механизъма на изгаряне на LED?

Диаграма на насоченост - разпределението в пространството на интензитета на лъчението

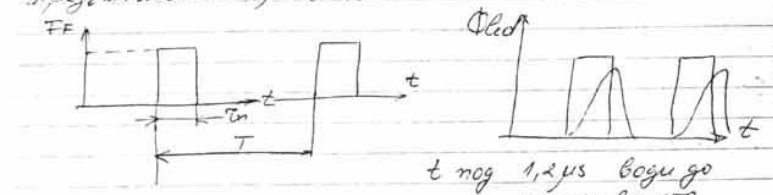


Голяма част от LED се използват за индикация



Електрически параметри:

- честотни с-ва на LED - възможността LED да излъчват електрон. поток когато при тях протича продължително време ток



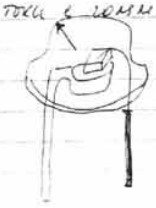
t под 1,2 μs води до размазването

I > I номинален - отриц. последици

1

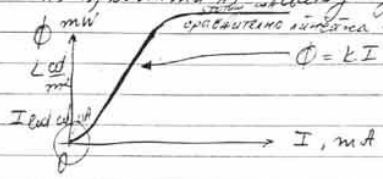
2. ако ток с ниски и честотата е също ниска

0,6, 0,8 mm - размер на кристала



Характеристика - спектрална разпределението на електрон. поток по дължината на вълната

Яркостна х-ка (мощностна) х-ка - зависимост на яркостта на светодиода $L_{ed} = \left[\frac{cd}{m^2}\right] f(I_F)$



$\Phi_{led} = [W] f(I_F)$

при I↑ е ↑T.

при ниски стойности на I нараства в нелинеен режим

Квантова ефективност на LED

η - коеф. на полезно действие - каква част от e⁻ са излъчили кванти

отношение на излъчения бр. кванти към бр. на токоносителите предизвикали това излъчване

$$\eta = \frac{\frac{\Phi}{h\nu}}{\frac{I_F}{q}} = \frac{q\lambda\Phi_e}{hcI_F}$$

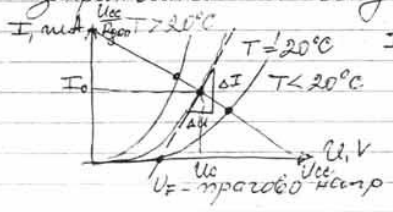
Геометричните размери на излъчващите кристали

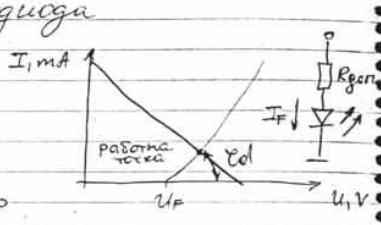
0,6 ÷ 0,8 mm

дебелина 0,1 ÷ 0,2 mm

Ел. захранване на LED

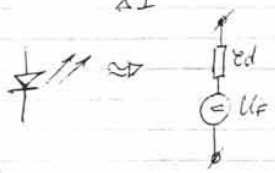
Работна права и работна точка на захранването на светодиода





Стръмност

$$r_d = \frac{\Delta U}{\Delta I}$$



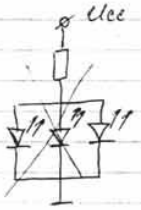
Раб. точка – тази точка от ВАХ която съответства на стойност на прото ток при напрежение U_0

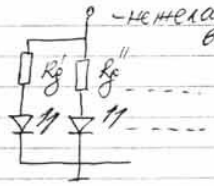
$$I_F = \frac{U_{cc} - N U_F}{R_{доп}}$$

формула за оразмеряване на диода

Включване на няколко светодиода в схема

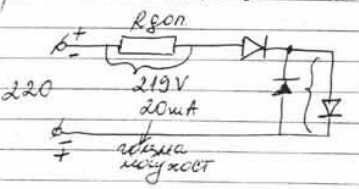
- последователно включване

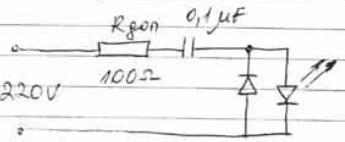




– паралелно включване

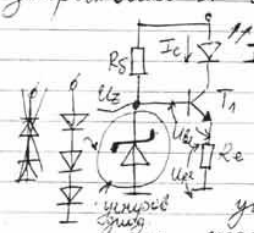
- захранване на LED от 220V





схемно решение рассейваната енергия е реактивна

- захранване от генератор на ток



$I_F = I_c$?

$$I_F = \frac{U_{cc} - N U_F}{R_{доп}}$$

Транз. са елементи, които се управляват по ток $I_c = \beta I_B$

Ако поддържаме const на базата на транз. => на конст. ток. Тъй транзистор е поставен в работен режим. Конст. ток прот. при T протича и при Δ мара б/у Re $U_{ce} = I_F \cdot R_e$

$$U_z = U_{be} + U_{ce} = U_{be} + I_F R_e = 0{,}5 + 30\,10^{-3} \cdot 10^{3} = 30{,}$$

0,5 + 30mA 1kΩ

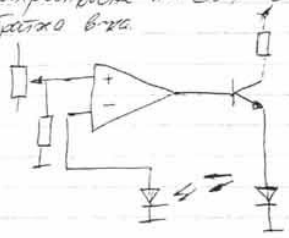
Re - нужва да бъде с голяма стойност, за да е подобрят стабил. с-ва тази схема може да бъде проблемна - да е изисква още един транз. управл. ей мара б/у емитерното съпротив. Когато на стабилизация е достатъчно висок

– Охладен корпус на LED – промяната на излъчваната електромагн. поток при промяна на температурата на корпуса

$$K_t = \frac{\Delta\Phi \cdot 100\%}{\Phi\,\Delta t}, \quad \frac{\%}{°C}$$

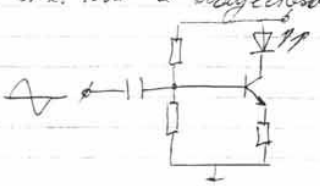
Св. диодите имат K_t в диапазон от $0{,}1 \div 0{,}8\ \frac{\%}{°C}$. Тогава когато е необх. LED да се използват за измерване на елекх. поток – задължително е необходима температурна компенсация на промяната на Φ

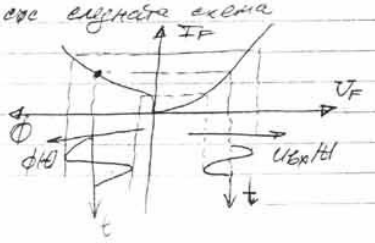
– захранване на LED с константен ток и оптична обратна в-ка.



– Амплитудна модулация на излъчения електромагнитен поток

за да се излъчва св. поток от LED с променящо се честота е процедиране на изход. на електром. поток. Това се осъществява със следната схема

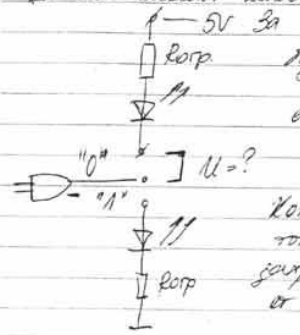




LED се използват в импулсни схеми

– Импулсно захранване на LED

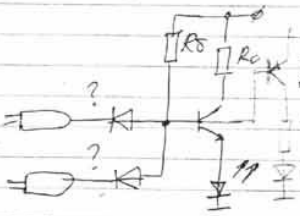
Захранв. на LED се модулира при закъсване на друг тип захранване. Като се интересуваме на ш-х на лог. елемент какъв е пада на напр. б/у него



За избора на ~~от~~ ст. р. R трябва да бъде превишена стойността на захр. V имаме пад на V във вътрешната структура на лог. елемент.

Трябва да е вграден в гнездо шах ток, и шах. товароносимост.

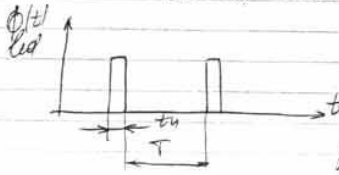
Когато е необх. протичането на по-голям ток през LED, той може да бъде захранен с допълн. хлис, управляван от логическия елемент.



LED свети при логическа "1"

за да свети LED при лог. "0" трябва да е размяна местата на резистора и транзистора (като се процедира спада на ~~размяна местата сем~~)

Импулсно захранване на LED с голям импулсен ток



T – за да може да излъчва диода голям ток (по-голям от max допустимия) в права посока при импулсен режим

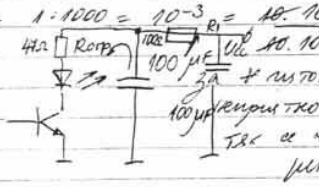
продължителност – $t_и$; $K = \frac{t_и}{T}$ – колко ка запълване

времената $t_и \approx 3 \div 5 \div 10\,\mu s$ (гравително постоянна

честост за множество дистанционни управ./

$T \approx ms$ $T(20, 50)$

$K = 1 \cdot 1000 = 10^{-3}$ $R_1 = \frac{10 \cdot 10^{-6}}{10 \cdot 10^{-3}} = 10^{-3}$



за ↑ мощности на натр, най-

енергийно зад тях е когато от

тях се черпи ток в импулсен

режим

При LED е пропуска по-високо по-голям ток

като има упаковки честости ~~на~~ на тока, т.е.

почти цяла се допуска да 1 пъти над номинален

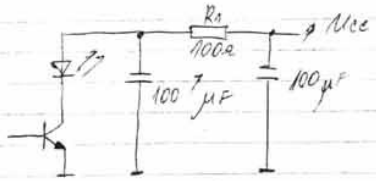
$I_{имп} \approx \sqrt{\frac{1}{K}} \cdot I_{ном\,LED}$ → номинален ток на LED

Тогава хубаво е изгодно да се пропуска много

голям ток – за компенсиращи и предаване на данни

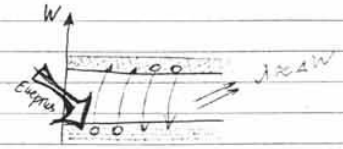
Тогава е типична схемата – (AL 147) в импулсен

режим

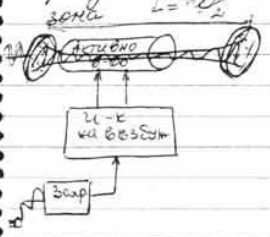


L ight
A mplification
S timulated
E mission
R adiation

светлинно усилване чрез стимулирано излъчване на лъчения

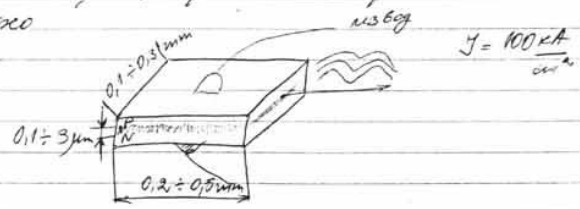


обратна (инверсна) населеност т.е брой на e^- в проводимата зона е по-голям от брой в забранената зона



резонатор – от двете страни фабри Перо (две огледала)

излъчването на лазера е монохроматично и кохерентно



Обикнов полупроводна структура

Лазерите имат стимулирано излъчване

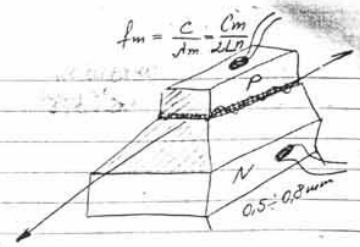
1 - активно вещество

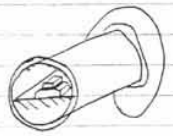
2 - инверсна населеност

3 - обратна връзка, която допълнително да стимулира повишеното енергийно ниво на e^-

$f_m = \frac{c}{\lambda_m} = \frac{c_m}{2Ln}$

Първият лазер – рубинов





фотодиода монтиран отзад и камера монитори

Материали за полупроводникови лазерни диоди

$\Delta f = f_m - f_{m-1}$

$\Delta\lambda \approx \frac{\lambda^2}{2Ln}$

$f_н = 352$ THz

$\Delta f = 41$ GHz

GaAs $L = 0,5$ mm

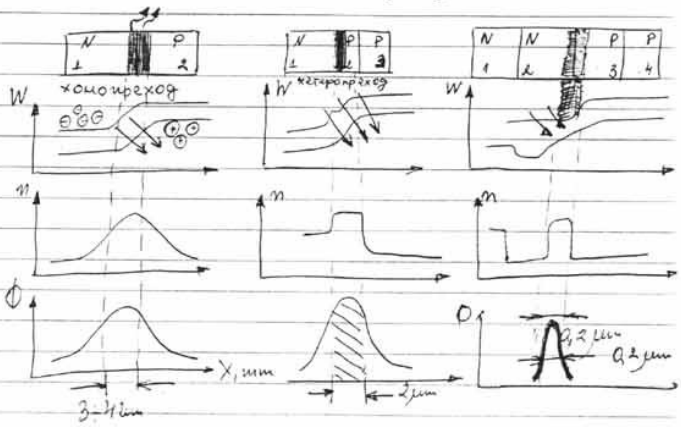
$\lambda = 0,85$ μm

$\Delta\lambda = 0,2$ nm

↓ 4230 полувълни

Материал	λ, μm
GaN/AlN	0,4 ÷ 0,5
ZnSSe	0,45 ÷ 0,48
ZnCdSe	0,49 ÷ 0,525
AlGaInP/GaAs	0,62 ÷ 0,68
GaAlAs/GaAs	0,67 ÷ 0,69
GaAs/GaAs	0,75 ÷ 0,87
InGaAs/InP	0,98 ÷ 1,05
PbCdS	2,7 ÷ 4,2
PbSSe	4,2 ÷ 8,0
PbSnSe	8 ÷ 30

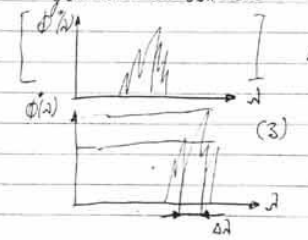
Вид на прехода от който е правен лазерен диод



Параметри на полупроводниковите лазери

– оптични параметри и характеристики

1) λ, μm 2) → полуширина на спектъра на излъчване Δλ, ъгъл на дължина на вълната



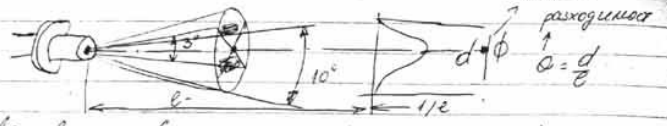
(3)

Δλ зависи от вида на материала и качеството на резонатора

3) поток на излъчване – Φ, mV

4) енергията в J – W (10⁻⁵J)

5) разходимост на лазерното излъчване – пространственото разпръскване в пространството направление в което се разпространява лазерния сноп



Гаусови снопове при което лазарното излъчване се разпространява като гаусоида.

Мод разходимост - никога не се говори за интензитет, за яркост и светимост.

Под разходимост се разбира ъгловото светлинение на ъгловите параметри на разстояние ℓ

В плоскостта σ се образува петно

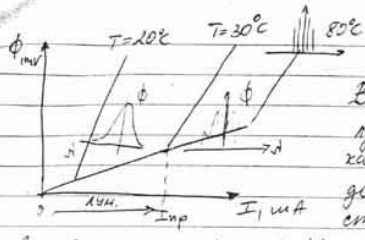
$$\Phi(y) = \Phi_0 \exp\left\{-\frac{y^2}{a}\right\}$$

a - параметър показващ разширението на петното

Модова структура – Moda

В идеалния случай лазарния сноп в пространството трябва да прави петно, но това практически не е така. На определени места лазарното петно може да има две гърбици, това ще се отчита от шах и нарича модова структура (мода). Тези модови структури са различни в перпендикулярно и лазарно направление. Полупроводниковите лазери трябва да имат само една модова структура

Мощностна х-ка - изразява зависимостта на излъчения електромагнитен поток от лазера от пропусканият ток през диода



В интервала до $I_{пр}$ – имаме луминисценция, диода излъчва като светодиод, в момента като достигне праговия ток имаме стимулирано излъчване

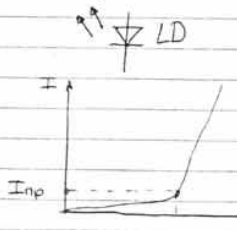
в резултат на което (λ') спектъра се промяна, излъчения поток се увеличава, а спектъра придобива вида (3)

$I_{пр} = 50 \div 200 mA$

$I_{пр}\left(\frac{\Delta T}{T_0}\right) = I_{пр}\big|_{T_0} \cdot \exp\left(\frac{\Delta T}{T_0}\right)$ ΔT - промяната в °C от номиналната температура T₀

при T1 се увеличава и мощността на лазерно излъчване

- Електрически параметри и характеристики



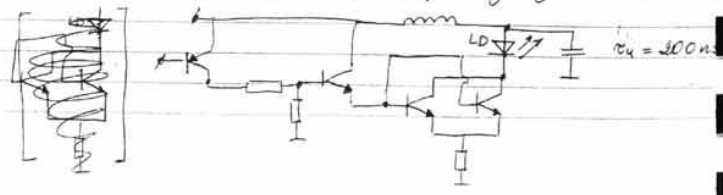
1) $I_{пр}$.
2) max допустим ток в права посока
3) max. допустим обратно напр и ток
Лазерните диоди не се включват обратна посока
4) max. допустим импулсен ток

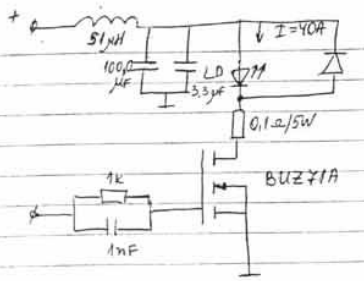
Електрически схеми на захранване

Мониторен фотодиод

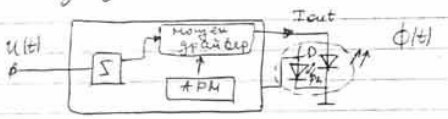
Импулсно на къси импулси - такива импулси имат от няколко десети до 100-уи - ns

Схема на захранване на лазарни диоди





Драйверна схема за захранване на лазарни диоди

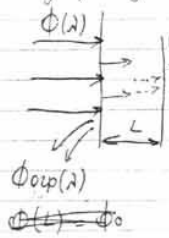


АРМ – автоматично регулиране на мощността

Полупроводникови фотоприемници

Полупров. фотоприемници – ПП елементи, които генерират сигнал в зависимост от това какъв електромагнитен поток е паднал в/у тях

Взаимодействие на електрон. излъчване с полупроводниковите материали



1) част от ел. поток падкал в/у тази повърхност още на границата и вроща като отразен

$\Phi(\lambda) - \Phi_{отр}(\lambda)$ – навлиза в ПП материал

Една част от падналия ел. поток се поглъща, а др. се разсейва от дължината на вълната

Закон на Бугер Ламбер – дава зависимостта какъв ще бъде потока на дълбочина L на материала, ако на входа е падкал Φ_0

$$\Phi(L\lambda) = \Phi_0(\lambda)\exp\{-\alpha(\lambda).L\}$$

- $\alpha(\lambda)$ – специфичен коеф. на поглъщане на
- L – дълбочина (оптична);
- за навлизане в дълбочина може да се промени спектъра

10 IV. 2001 год.

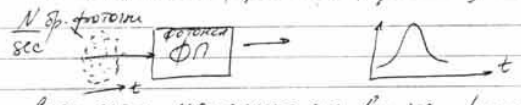
Различните ПП материали имат различен коеф. на поглъщане

Класификация на фотоприемниците

Те биват 2 големи типа

// в зависимост от тия, какъв вид енергия преобразуват

* квантови (фотонни) фотоприемници



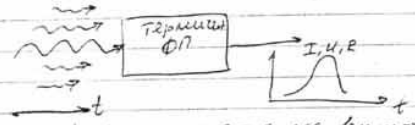
След като попадат на вх. на фотонния приемник и тях му е генерира ел. с-л, който представлява обвивка на разл. бр. фотони.

Типични представители – ПП прибори, фотодиоди, фотоелектронни умножители и ...
фоторезистори, фото транзистори

* Термични фотоприемници

Следващия вид фотоприемници са термични фотоприемници при които в/у фотоприемника действа топлинна енергия въз

времето ТП или, ФП поглъща



При терм. фотопр. – по остта на времето в/у фотопр действа термична енергия, във времето ТП или ФП поглъщат терм. енергия и повишава енергийността си → показват се промени в ел. му п-ри и на тях отново във ф се пропия изходен п-р в зависимост от промяната му термично състояние

Най-често срещаните фотоприемници:

– болометри → резистори

Основни параметри на фотоприемниците

3-ри групи параметри:

* 1-ва гр. параметри – параметри, които х-рат чувствителността на ФП към падащото облъчване

– интегрална – токова чувст. – S_i (на ген. ток спрямо падащото облъчване)
– интензивна – волтова чувств. – S_u
– $S_{\lambda max}$ – монохром. чувств. – чувств. към определена дълж. на вълната
– интервална чувств. – S_{min}
– коефициент на използване на потока – η дава представа каква част от потока, който облъчва фотоприем. ефективно генерира сигнал
– ефективна ширина на спектъра на използваме – $\Delta\lambda_{ефк}$
→ S_{min} – чувст. на ФП когато в/у него падат лъчевания във вид на импулси за определено време
→ $\Delta\lambda_{ефк}$ – характеризира ФП като преобразувател.

* 2-ра гр. – прагови и шумови параметри:

Х-ра мах. възможности и качества на фотопр.
– праговия поток – такова с-ст на ЕН поток при който генерира сигнал на фотопр. е = ср. кв. ст-ст на шума – Φ_n
– относителен праговия поток Φ_n^* → $10^{-13} \div 10^{-14}$ W
– откриваща (детектираща) способност – D (в праговия поток като с-ст е малка – 10^{-13} показва кога ще открием такъв поток

$$D \approx \frac{1}{\Phi_n} \quad [1/W]$$

– относителна откриваща способност – D^*

$$D^* \approx \frac{1}{\Phi_0^*}$$

– шумово-ток – ср. кв. стойности на тока – σ_i
– шумово-напр. – ср. кв. стойности на напр. – σ_u
– динамично съпротив. – Rd
– собствен капацитет – C

* 3-та гр. м-ри – оптични параметри:

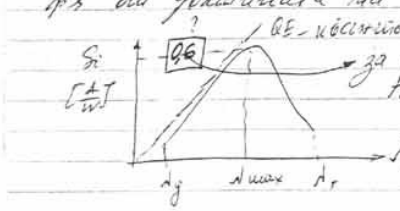
– λ_{max} – дължината на вълната при която чувствителността е max
– λ_d – ламбда долна граница
– λ_r – ламбда горна граница

Експлоатационни параметри –

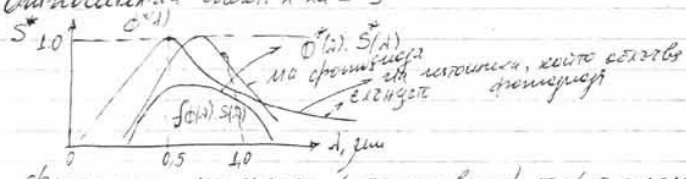
– max. допуст. ν
– интервал. диапазон
– max. разсейвана мощност

Характеристики – зависимост на 1 параметъра от промяната на друг

* Спектрална х-ка: - чувствител. на фотодр. във фз би дължината на вълната



Относителна спект. х-ка - S^*



Формиране на сигнал (начисляване) от фотодиода

Отчетоха щари х-ки

Когато ги взем с ги нося в/у фотодиода

между Φ(λ).

$$i_{sig} = \int_{\lambda=0}^{\infty} \Phi(\lambda).\, S(\lambda)\, d\lambda$$

S(λ) - спектрална чувств.

$$i_{sig} = \max\{\Phi(\lambda)\} \max\{S(\lambda)\} \int_0^{\infty} \Phi^*(\lambda).\, S^*(\lambda)\, d\lambda$$

Калиброване / Еталониране

* фотоприемници да могат да се използват не трябва да имат грешки параметри (т.е) - спектралната чувствителност
- източник тип А - източници, които имат чувств. температура ≈ 850 °K
- инфрачервената остат се използват тип В чувств. температура 500 °K

чувств. мощна ≈ чистота при която е измерено измерваното

S = (1300, 500, 3)

Δf - честотна лента

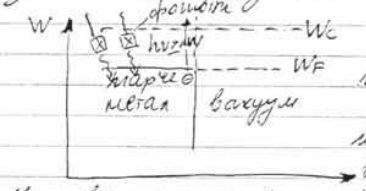
~~в зависимост~~

Фотонни фотоприемници - ффф

Те работят на базата на фотоефект в рамките на фотоефекта и наблюдава външен и вътрешен фотоефект

фотоефекта е свързан от вълната

фотоефект - това е повишаване енергията на e^- при които се предоставят собствена E, и преонагат забранената зона и остват в зоната на проводимост като е енергия.....

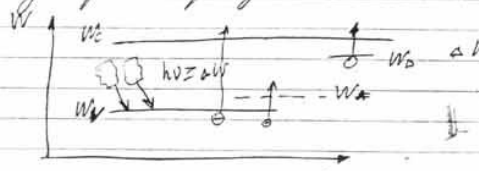


$\Delta W = W_c - W_F$

При външния фотоефект електроните преодоляват E и напускат метала

При вътрешния фотоефект, това е чувств. в вътре в материала и e^- го напускат на основата на

- собствена проводимост
- акцепторна проводимост } примеси
- донорна проводимост



$\Delta W_D = W_c - W_D$
$= W_A - W_V$

При примесната проводимост имаме 2 донора тип - W_A и W_D

(16)

- Червена граница на чувствителността – горната граница на дължината на вълната λ на която енергията на квантите остава равна на ширината на забранената зона

$\mu m, \lambda_{red} = \frac{hc}{\Delta W} = \frac{1,242}{\Delta W, eV}$ $\nu = \frac{c}{\lambda}$

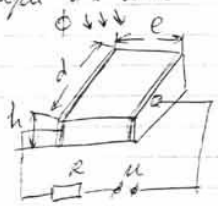
Фоторезистори

фотоприемници, принципа на които е основава на фотопроводимост

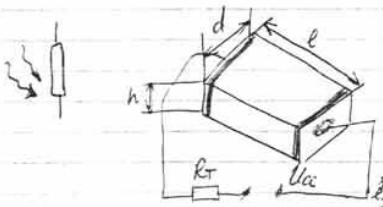
При фоторезисторите няма преход, моса метални електроди.

Означават се:

Практически фоторезистора представлява ПП материал, който има формирани изводи, ПП има размери $b \times d \times l$



За допълнение:
Да се изведе матем. зависимост за пр-вдимостта на тъв материал ПП. Всъщ. фя е концентрацията на токоносителите и техното време на живот



$n = n_0 + \Delta n$

$p = p_0 + \Delta p$

Проводимостта $\longrightarrow \sigma = eN(\mu_n \tau_n + \mu_p \tau_p) = 2eN\mu_n\tau_n$

$N, \frac{1}{cm^3}$

заряд на електрона; подвижност; време на живот; бр. на токоносители

Тип полупроводник – $\mu_n \tau_n \gg \mu_p \tau$

Коефициент на усилване G – отношение на вр. на живот на основ. токонос. към времето необходимо за преминаване на токоносителя от единия край до другия

$G = \frac{\tau_n}{t_{nl}}$ За усилването $\boxed{G = \frac{\mu_n \tau_n U_{cc}}{l^2}}$

$t_{nl} = \frac{l^2}{U_{cc}\mu_n}$ Основна зависимост, от която произтичат следствия

Пример: Най-често използваните ПП материали $\mu_n = 300\ cm^2/V_s$ $U_{cc} = 1,2V$ получаваме $G = 900$

$\tau_n = 10^{-3}, s$

$l = 0,2\ mm$

Чувствителност на фоторезистора към електромаг. поток –

$I = I_0 + \Delta I = \sigma \cdot \frac{dh}{l} U + \Delta\sigma \frac{dh}{l} U$

където d, h и l са габаритите на кристала

При него чувств. ще бъде по-голяма колкато ΔI е по-голямо $\Rightarrow \Delta I \Rightarrow \Delta\sigma \frac{S}{l} U$

$S = dh$, промяната ΔI е обратно пропорц. на дължината l

Промяната $\Delta R \approx \frac{l}{d}$

Фоторезисторите трябва да бъдат с по малка дебелина и по-голяма дължина – l

Изменява се заедно технология.

керамика

бу мъ̀ста с нанесен електронен слой, който от едната страна е формиран единен проводник а от др. изваф. по средата бръд изпарени с сам

площоча слой който

Материали за фоторезистори

	μm	λ_{max} μm	T	D^* cm$\sqrt{Hz}$/W	τ s
ZnS	0,34 ÷ 0,4 μm	0,38	300K	3.10^{14}	10^{-9}
CdS	0,45 ÷ 0,67 μm	0,6	—"—	3.10^{14}	10^{-2}
Si:Au	0,5 ÷ 1,1	1,0	—"— ст.	5.10^{12}	0,1
PbS	0,5 ÷ 3,5(5)	1,0	300(77)	2.10^{11}	500
InSb	0,5 ÷ 31	20	77	10^{8}	0,01
HgCdTe	1,0 ÷ 25	4÷21	77	2.10^{10}	0,1

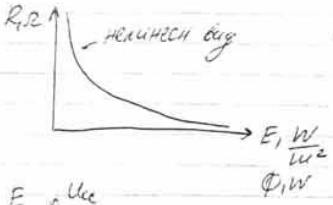
Най-често използваните материали за реализация на фоторезистори.

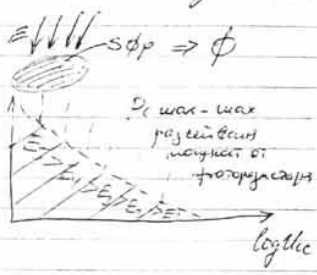
Основни параметри и х-ки:

Постоянна на времето – фоторезисторите е голяма

- Съпротивлението на тъмно $R_{T\,фр}$
- Мин. съпротивл. което може да има когато бъде него попада поток

$R_{фр} = f(E)$; $f(\Phi)$





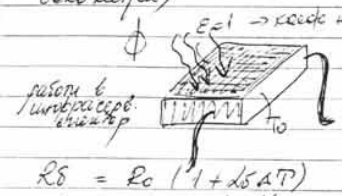
$I = K U_{cc}^{\alpha} E^{\gamma}$

α – близо до 1 ; E – осветеност

$\alpha \approx 1$ γ – зависи от вида фоторезистор

Полупроводников болометър

Промяна проводимостта си в следствие на поглъщане на фотони и йонизиране на примеси, но ↓ фоторезистори намиращи стойността в резултат на термодинамично неравновесие (термични – фотоприемници болометри)



$R_б = R_0 (1 + \alpha_б \Delta T)$

$\alpha_б \approx 3{,}2 . 10^{-2}, \frac{1}{°C}$

$\Phi_0 \Rightarrow T_0 + \Delta T$

ΔT промяна в температурата породена от Φ

Както бързодействие така елементи са еквивалентни болти

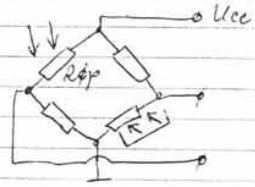
Примерни схеми с фоторезистори.

– Делителна схема

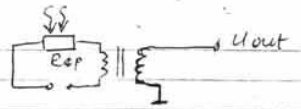
Uout – нелинейна ф-я от падащия електромагн. поток върху фоторезистора

Бележка → max $R_T \approx R_{фр}$

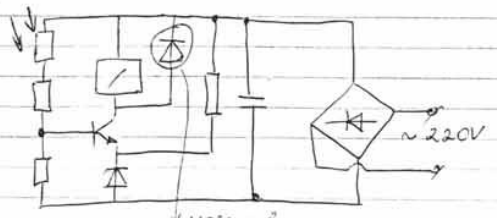
– Мостова схема



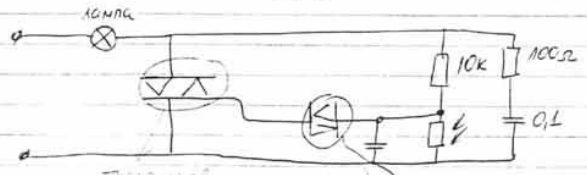
фоторезисторите са силно чувствителни от околната температура ~ фоторезистори подходящи за снемане на променливотокови сигнали



Фоторезисторите се използват в особено сложни схеми за автоматика.
Фоторезисторите се използват като фоторелета да включват осветеността когато осветеността е малка

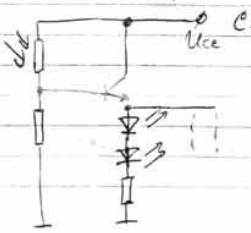


предназначава транзистора при превключване на реле за ги пазари от ЕДН на самоиндукция



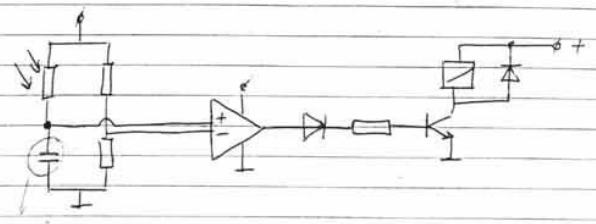
Триак (двоен тиристор) — Три крака

диак - два крака



С-ма за управл. на светодиодна индикация

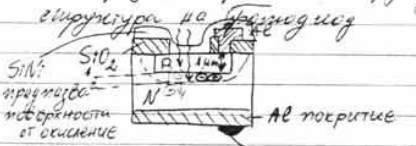
фототранзистора като сензорен елемент в схема с компаратор.

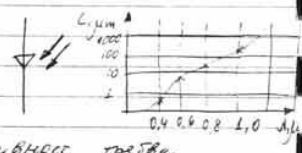


задава превключването на компаратора

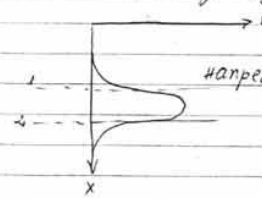
Фотодиоди

Най-разпространената структура е планарно-диф. структура на диод





За да имаме по-голяма ефективност трябва фотоните щото да бъдат поглъщани.

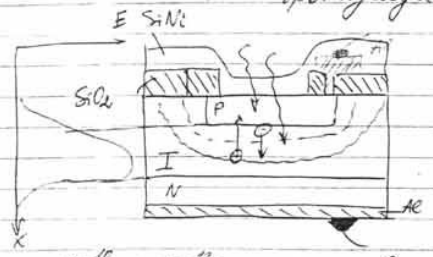


напрегнатостта в PN прехода е най-висока

постоянната на време $10^{-5} \div 10^{-6}$ μs

ПИН фотодиоди

PIN фотодиоди



Капацитетът на PIN фотодиода е много малък. Изтощават се 90÷95% от ⊥ диоди

$10^{-10} \div 10^{-12}$ s → мост. по време

Материали за фотодиода:

	Δλ	λmax, μm
Ge	0,4 ÷ 1,8 μm	1,5
Si	0,4 ÷ 1,1 μm	0,8

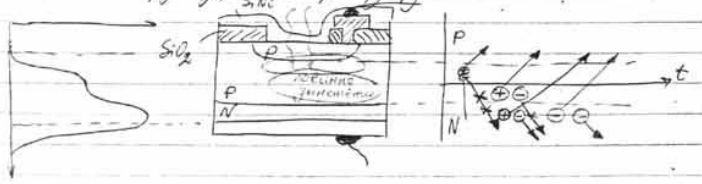
най-често се използва за фотоприемници

InGaAs	0,5 ÷ 20 μm	1,0 ÷ 1,6 μm
InSb	3 ÷ 5 μm	4
HgCdTe	3 ÷ 15 μm	8 ÷ 14 μm

Други видове фотодиодни структури

I. Лавинни фотодиоди – бързат своя действие на основата на допълнително вътрешно усилване при напрежение 10^5 V/m е възможно допълнителна йонизация

Лавинна структура на фотодиод



Коефициент на лавинно умножение

M = показва колко пъти фотоотока е умножен за да се формира

$I_{Aphl} = M I_{ph}$

$$M = \frac{1}{1 - \left(\frac{U_{обр\ зона}}{U_{лав.\ пр}}\right)^n}$$

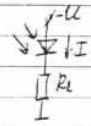
$1,4 < n < 6$ и зависи от вида материал и технологията

$U_{обр.\ зона} = U - IR_L$

$M = f(T)$

$M = f(U)$

$U_{закр} = 50 \div 150V$



Материали

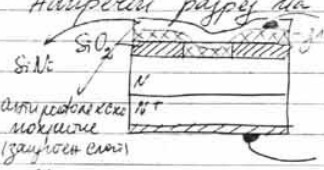
лав. фотодиоди – могат да бъдат реализирани в целия спектър

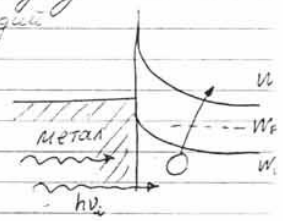
Повърхностно-бариерни фотодиоди

Шотки – фотодиоди

Шотки-ф.д → ПП прибори без инжекция на PN-преход

Напречен разрез на Шотки фотодиод





Шотки приборите имат бързодействие от порядъка на 1ns

Дебелината на слоя метал-злато за да бъде Шотки прибора е в порядъка на 10÷20nm

Параметри на фотодиода

① Оптични параметри
② Електрически параметри

1. Оптични парам.

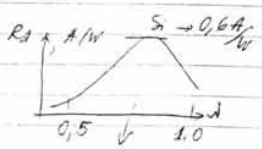
* Квантова ефективност - параметър който показва качеството на фотодиода когато ду кво генерар N ф. фотони → брой е са участвали в генерирането на ток вт взаим. вероят.

$\eta = f(\lambda)$

$$\eta = \frac{R_\lambda}{R_{\lambda\,идеален}} = \frac{R_\lambda \cdot}{1.} \frac{hc}{\lambda q} = \frac{1{,}24 \cdot R_\lambda}{\lambda\,\mu m}, \quad A/W$$

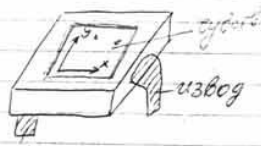
* чувствителност - монохроматична - R_λ
* Интегрална чувств. - R_i

$$R_i = \frac{i_{ph}}{\int_\lambda \Phi(\lambda)d\lambda} = \frac{\int_\lambda R_\lambda \cdot \Phi(\lambda)d\lambda}{\int_\lambda \Phi(\lambda)d\lambda}$$

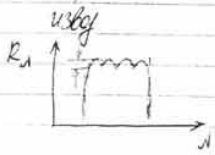


R_i - интегралната чувств. е едно число за целия спектър.

* неравномерност на чувствителността по площадката на фотодиода



Чувств. в отделни точки на площадката не е еднаква



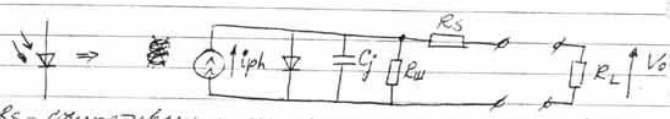
* линейност на фотоотклика

$\Phi_0 \to i_{ph_0}$ — мащабна на $\pm i_j$ — мемкийност е от

$\Phi_0 + \Delta\Phi \to i_{ph_0} + \Delta i_{ph}$

Електрически параметри и характеристики

1. Еквивалентна схема

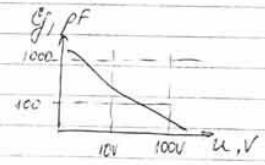


R_s - съпротивление на контактите от 100 до 1 kΩ

$i_{ph} = R_i \Phi$

C_j - бариерен капацитет от 50 ÷ 500 pF

$C_j = f(U)$



Волт-амперна характеристика

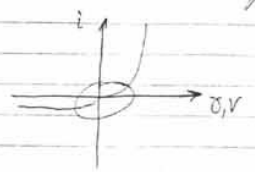
Обхватване СВЧ

300 MHz ÷ 3 GHz – най-нисък обхват – дециметрови

3 GHz ÷ 30 GHz – сантиметрови

30 ÷ 300 GHz – милиметрови – най-високи

>300 GHz – субмилиметрови

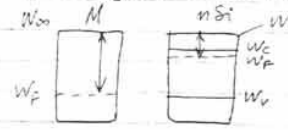


Нелинейната част от характеристиката на диода се използва за модулация и демодулация

Шотки диода – до kHz

Преход метал – ПП

Работна на отделни – W_S – енергията при която ~~свобо~~ свободното e^- в nSi

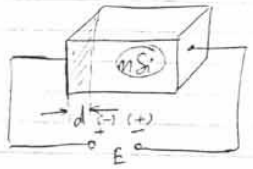


$W = W_\infty - W_F$

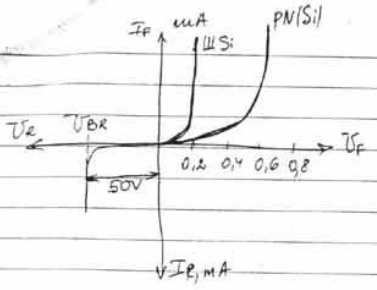
W_∞ – енергия, която и отделя

$W_{S(nSi)} < W_{S(M)}$

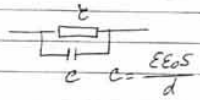
условие за получаване на изправителен Шотки диод.



Ако подадем външно U със съотв. полярност променяме когато и направи допир м/у метал и ПП в следствие на подадено U получаваме V-A х-ка – нелинейна х-ка



Падението в права посока е много малко



$C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d}$

За да е малък С площа му трябва да ↓

Шотки диода работи в обл. на GHz

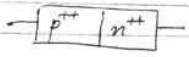
Особености – f↑ до десетки GHz

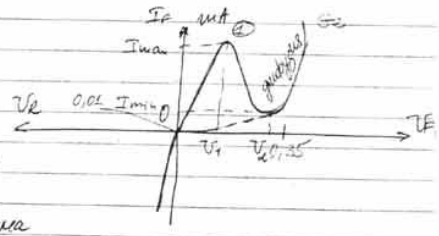
Прехода и звена на самата повърхност ⇒ до големи токове I↑, външно охлаждане

– Падението $U_{DF} \approx 0,2$ V

Когато Ш-диода се прави в дискретно изпълнение

Тунелни диоди

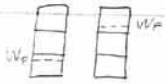


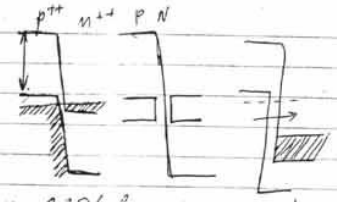


Тунелния ток е дължи на квантов ефект.

Две области с много висока концентрация на примесите Прехода е много тънък 10^{-8}

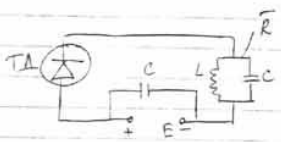
Тунелния ефект – при много тънък преход е преминава от двете страни





При 0,35V вече има дифузна част, до 0,35 е тунелния ток
В обратна част тока също е тунелен
Използва се за
формира се т. нар отрицателно съпр.

$$\bar{R} = \frac{V_2 - V_1}{I_{max} - I_{min}}$$



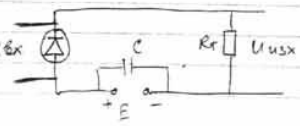
ТД е двуполюсник

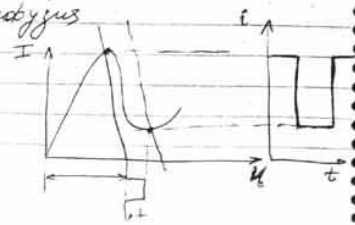
$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Отриц. съпр. компенсира полож. и трептенията остават незатихващи.

Тъй като двете части са полупроводник не се вмъкт от околната температура. Издържа и на радиация
$\Delta T = 600°$ (GaAs)

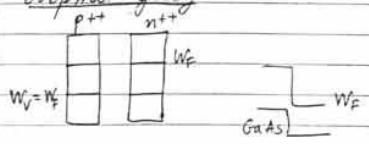
Недостатък – малка мощност, за да се получи този много тънък преход да е резек. Прави се по сплавна технология, не чрез дифузия

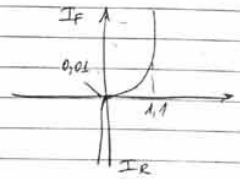


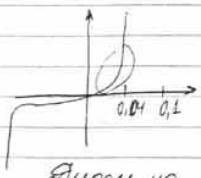


Превключването от едно положение в друго става в nS

Обърнат диод

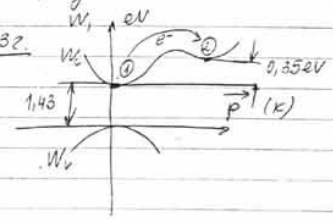






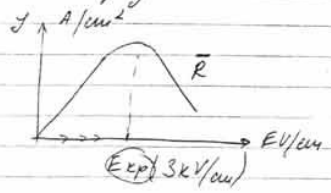
Диоди на Гън – те се базират на "обемна" неустойчивост във GaAs

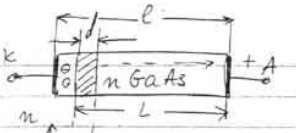
1963г.



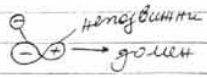
В първия тип е- имат малка ефективна маса
$m^* = 0{,}07\, m_0$
$\mu_1 = 5000\ cm^2/V.s$
и висока подвижност
„леки"
в втория тип
$m^* = 1{,}12\, m_0$
$\mu_2 = 100\ cm^2/V.s$
„тежки"

$$\vec{J} = \sigma_n E = q n \mu_n \vec{E}$$

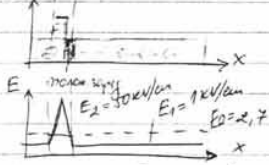




$E = \frac{dU}{dx}$ – напрежението

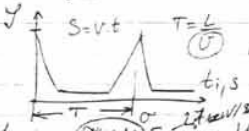


домена се ликвидира като достигне до А.



нужен люди домен e^- се движат с $v_1 = \mu_1 E_1$, но тя се управлява със скоростта на тежките $v_2 = \mu_2 E_2$

$\mu_1 \uparrow > \mu_2 \downarrow$ но $E_1 < E_2$ $\quad \mu_1 E_1 = \mu_2 E_2$



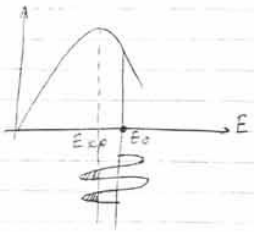
от дължината на образеца и получаваш импулсите

$J_{max} = q n \mu_2 E_0$ $\quad 2,7 kV/cm$

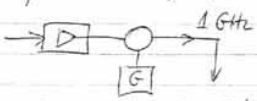
$J_{min} = q n \mu_2 E_2$ $\quad \mu_1 E_1$

$J_{min} = q n \mu_1 E_1$ $\quad 1 kV/cm$

Домена, който се образува е само един.
Един диод монтиран в обемен резонатор
Обемен резонатор е у-ство

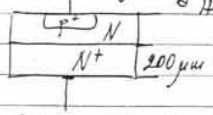


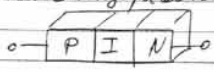
Горен конвертор



независима мощност от честота

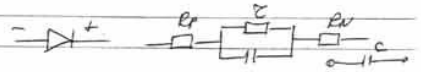
PiN диод — I-собствен → няма никакви управителни с-ва



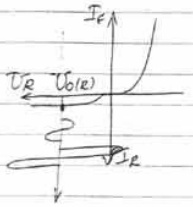


$C = \varepsilon_0 \varepsilon \frac{S}{d}$

а) обратно свързване



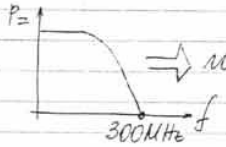
в обратна посока – пх представлява бариерен капацитет



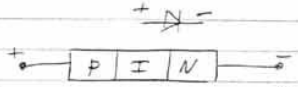
PiN (2÷5 pF) в обратна посока

$\omega\tau < 1$; $T < \tau$

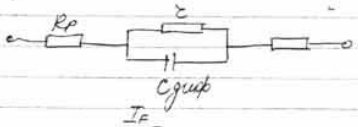
PIN диода работи СВЧ обхвата.

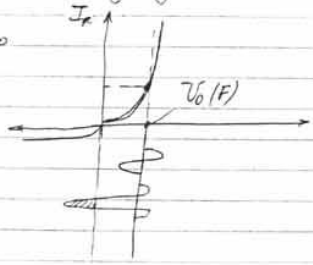


⇒ МИН диоди



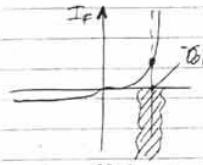
в права посока екв схема на PIN диода е:





Амплитудна модулация

Промяна на амплитудата в такт с ниската честота



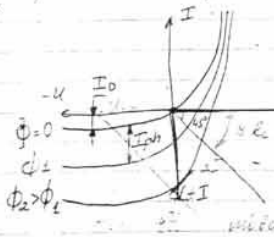
Амплитудната модулация става с PIN диод.

За какво служи PIN диода?
PIN диода работи в областта на СВЧ, по нала управителни с-ва

Фотодиоди

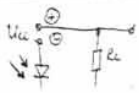
10 фирми - сериозни производители на оптоелектронни прибори

Електрически характеристики:
- ВАХ

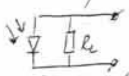


- Iдс - диференциално съпротивление
и отрязъка при $U_{ph}=-U_{ml}$
$I_{ph}=I$

$R_{ph}=\frac{\Phi_{ml}}{I_{ph}-I_{ml}}$



разглеждаме два режима на работа на фотодиод:
- фотоволтаичен режим (нкв)



- фотодиоден режим (зкв)

При фотодиоден режим
- подава се външно напрежение в обратна посока, товарната характеристика няма вида.

При фотоволтаичен режим:

$$I=I_S\left\{\exp\left(\frac{q\,U_{R_L}}{kT}\right)-1\right\}-I_{ph}$$

$U_{R_L}=I R_L$

При фотодиодния режим трябва да отразим, че фотодиода е поляризиран в обратна посока

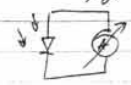
При фотодиоден режим:

$$I=I_S\left\{\exp\left(q\,\frac{(U_{R_L}-U_{CC})}{kT}-1\right)\right\}-I_{ph}$$

При фотоволтаичен режим
Имаме два гранични случая:
1) - когато товарното съпр. R_L // тъда съответства на случая, когато фотодиода е включен без предпаметнение към 1 ~~товарен~~ волтметър (товарната права съвпада с абсцисната ос)

Напрежение на празен ход
$$U_{пр}=\frac{kT}{q}\ln\left(\frac{S_{iph}\Phi}{I_S}+1\right)$$

2) - когато към фотодиода е подключен амперметър (с безкрайно малко съпр) би ерно имали къс съп. (товарната права съвпада с ординатната ос)



$I_{ph}=R_{ph}\cdot\Phi$

В миниатюрните полупроводникови елементи се генерира ток и под въздействие на фотодиода и падането на товарната праволинейна фотогенериращ режим трябва да бъде фотогенераторен режим

- свързваме на ниско сгъв е част от този режим
- при подаване на обр предварителнетие, капацитета намалява => времеконстантата τ и фотодиода работи при честоти от стотици MHz фотодиоден режим
- фотодиода е 10 пъти по чувст. отколкото в режим на ниско сгъв
- Шумове на фотодиодите - подробни не измерваме и изчисляват, като ограничава възможностите на електр. схеми
- дробов шум - ел. ток е свързан от непрекъсваемо число е⁻, които преминат в отделен момент от време

$$I_{sh\,dp} = \sqrt{2q(I_{ph} + I_{darc})\Delta f}\ ,\ \frac{A}{\sqrt{Hz}}$$

тока на фотодиода; тока на тъмно

- топлинен шум - (Шум на Джонсон)

$$I_{nj} = \sqrt{\frac{4kT\Delta f}{R_{sh}}}\ ;\ \frac{A}{\sqrt{Hz}}$$

Този шум, който е по-голямо във вериги, когато в сравнение на t°, спротивлението пропуска стойностите си.

- сумарния шум

$$\Sigma I_n = \sqrt{(I_{ndp})^2 + (I_{nj})^2}$$

Снемане на сигнал от фотодиод

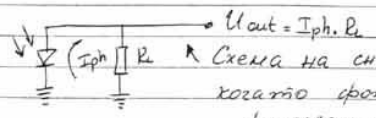
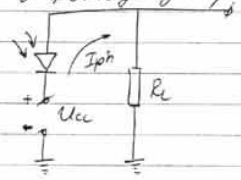
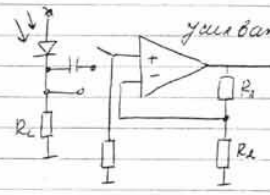


Схема на снемане на сигнал, когато фотодиода е в фотогенераторен режим

в фотодиоден режим



За да бъде линейна схемата R_L трябва да бъде малко

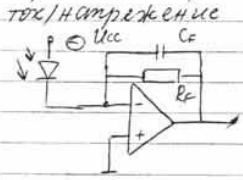


усилвател по U

$$U_{out} = I_{ph}.R_L\left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right)$$

$R_L = 50 \div 200\,\Omega$ (гарантира е линейн на схемата и нормалн работа)

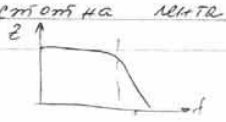
Диференциално трансформиране чрез преобразувател ток/напрежение



$U_{out} = -I_{ph}.Z_f$ Z_f - импеданс

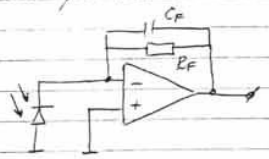
$R_F < R_{sh}$

Честотна лента



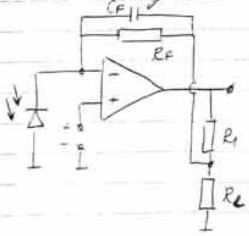
$$f_{гр} = \frac{1}{2\pi R_F C_F}$$

След граничната честота усилването пада
За режим на къс съед. схемата добива вида:



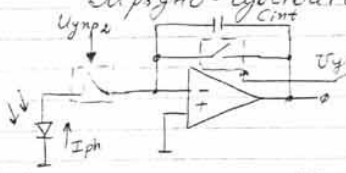
Най-често използваната схема за отчитане на сигнал от фотодиода.

входното съпротивление $R_i = \frac{R_F}{(A+1)}$
R_F от порядъка на $M\Omega$
Какво и получава след премахване на C_F?



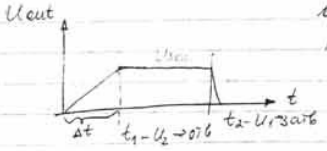
По голямо усилване:
$U_{out} = -I_{ph} \cdot Z_f \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right)$

Зарядно-чувствителна схема



управляем интегратор

$U_{out} = -\frac{1}{C_{int}} \int_{\Delta t} I_{ph} \cdot dt$



използва се на ниски нива на осветеност

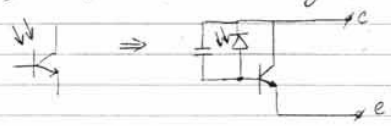
при $\Delta t = 10ns$ $C_{int} = 100pF$ $A_v \equiv$ съпротива 6 GB от 1 GΩ

Определяне на амплитудата на сигнала в изхода на схемата
фотодиод – усилвател

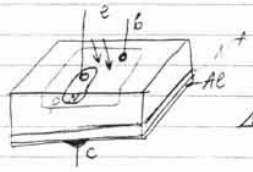
Вземаме предвид импулсните с-ва на фотодиода и стъпалата реализиране след него.

Фототранзистори

фототранзистора се основава на вътр. фотоефект и допълн. усилване от вътр. структура. Зависими влияния влияят від помкт. ток на фототранз.



Изпълняват се по планарна епитаксиална структура



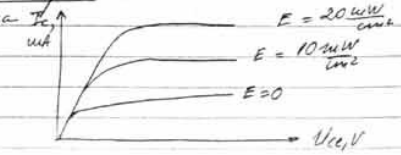
$I_C = (1 + h_{21e})(I_{ph} + I_{CEO})$
$\approx h_{21} I_{ph} + I_{CEO}$
$\boxed{I_C \approx h_{21} I_{ph}}$

⚠ колекторният ток е в по-голям от тази на фотодиода!

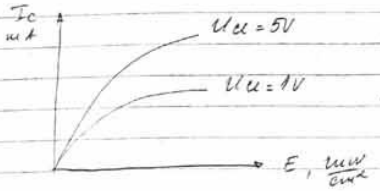
При поглъщане на електромагн. поток се генер. двойки заряди, които се разделят от полетото. ---

Параметри на фототранз.

1. V-A характеристика



Предавателна х-ка – зависимости на $I_c = f(E)$ във р-я от осветеността.

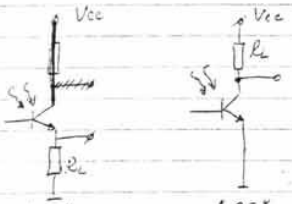


ФТ – бавни фотоприемници, завис. $I_c(E)$ е нелинейна х-ка

Използват се в нелинейни и импулсни сигнали и схеми, дистанционно управл.

Постоянна на вр. 10μs – бавни фотоприемници

Схеми на включване на фототранзистора



"ОК" "ОЕ"-инвертира

$\Phi = \Phi_0 \sin(\omega t)$

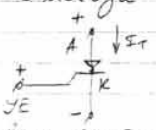
$U_{out} = I_c R_L = h_{21} I_{ph} R_L$

- фазата на с-ла съвпада с вх. с-ла

Тиристори

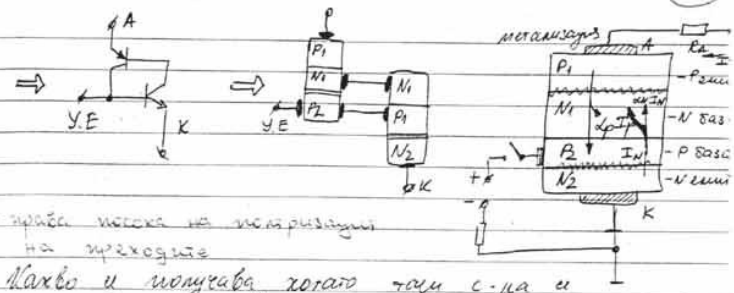
Ив. Ив. Шабаков, 1957г. издателство: Техника

Тиристор – ПП прибор с четири слоя с редуващо се последователност PNPN има три PN-прехода и има 3 извода



⇒ разл. като два свързани разнородни транзистори

управл.ващ електрод



- пробив поради поляризация на преходите

Какво и получава когато тази с-ра е вкл. + към А, – към Катода

$I_p(1 - \alpha_p) - I_{op} = \alpha_N I_N + I_{ON}$

α_p и α_N -> са коеф. на предаване по ток

$I_T = I_p = I_N$

$$I_T = \frac{I_{co}}{1 - (\alpha_p + \alpha_N)}$$

тиристора съответства на импулсно устройство