

ЕЛЕКТРОНИКА И МИКРОПРОЦЕСОРНА ТЕХНИКА

проф. д-р инж. Стефан Й. Овчаров

– кабинет 1351, лаб. 1359

– приемни часове – понеделник, 13-14 часа

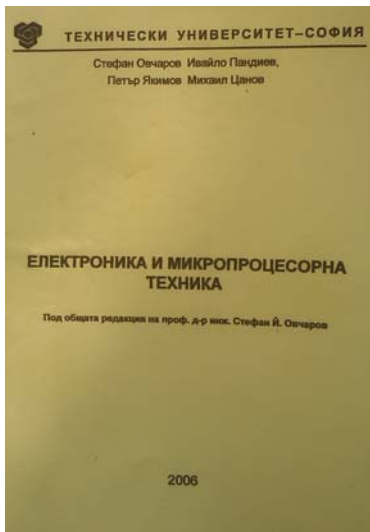
Лекции

- **понеделник, зала 2550**
- **вторник, зала 12630**
- **четвъртък, зала 12608 ???**

Упражнения - **лаб. 1358**

Литература

1. Овчаров Ст., М. Цанов, И. Пандиев, П. Якимов, Електроника и микропроцесорна техника, ИПК на ТУ - София, 2006г.
2. <http://lark.tu-sofia.bg/~ntt/index.html>



Основни раздели
на дисциплината “ЕЛЕКТРОНИКА И МИКРОПРОЦЕСОРНА ТЕХНИКА”

Електронни елементи

Аналогова схемотехника

Импулсна и цифрова схемотехника

Силови преобразователни устройства

Микропроцесорна схемотехника

Що є ЕЛЕКТРОНИКА?

Що е ЕЛЕКТРОНИКА?

- дял от човешката дейност, занимаваща се с изследване и приложение на процесите на пренасяне на електрически заряди.

Основни задачи на ЕЛЕКТРОНИКАТА:

Задача: Изследване на процесите на пренасяне на електрически заряди в различни среди - вакуум, газове, течности, твърди тела.

Предмет е на физическата електроника.

II задача: Разработка и производство на електронни елементи - дискретни елементи /пасивни и активни/ и интегрални схеми.

Част от тази задача, отнасяща се до електронни елементи, основаващи се на пренасяне на електрически заряди в твърди тела, се решава от микроелектрониката.

III задача: Разработка на методи и схеми за приложение на електронните елементи за генериране, усилване и преобразуване на електрически сигнали за нуждите на различни области от човешката дейност.

Тази задача се решава от приложната електроника.

Приложна електроника

Нейните постижения се използват в:

- радиотехниката,
- съобщителната техника,
- изчислителната техника,
- измервателната техника,
- промишлената електроника,
- транспортна и автомобилна електроника,
- битова електроника

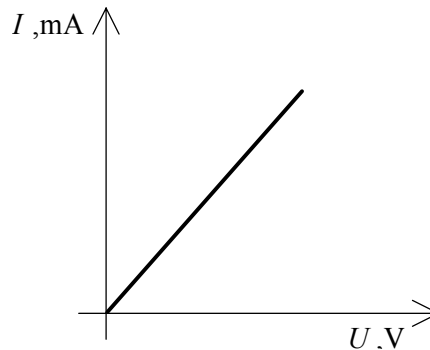
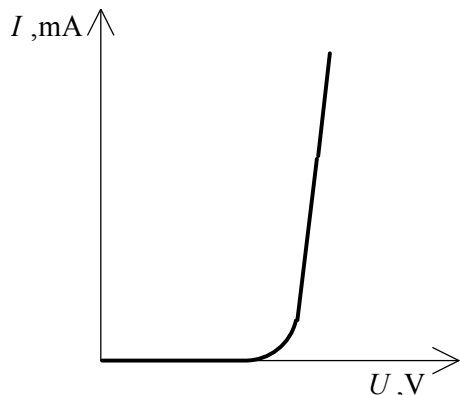
Електронни елементи

Електронните устройства (схеми) служат за генериране, усилване и преобразуване на електрически сигнали. За тяхното изграждане се използват разнообразни електронни елементи.

Пасивни и активни

Основни параметри и характеристики на електронните елементи

Волтамперна характеристика (ВАХ).



Пасивни електронни елементи

Основен параметр

резистор => омично съпротивление,

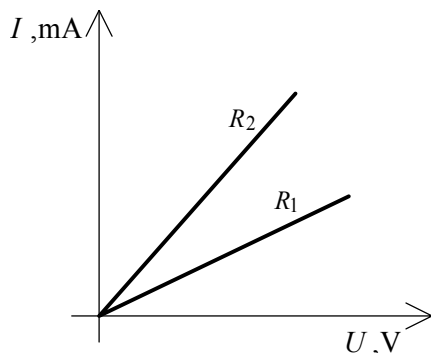
кондензатор => капацитет

бобина => индуктивност

Стандартна номинална стойност

Толеранс.

Резистори



$$(1.1) \quad R = \rho l / S \text{ } [\Omega],$$

l – дължина, S – площ на напречното сечение, ρ - специфично съпротивление на токопроводещия материал.

Номиналната стойност и толерансът

Номиналната мощност

Температурният коефициент на съпротивлението TKR

$$(1.2) \quad TKR = \frac{dR}{RdT} [^{\circ}C^{-1}] \quad \pm 10 \cdot 10^{-6} < TKR < \pm 2000 \cdot 10^{-6} \text{ } ^{\circ}C^{-1}.$$

Според типа на токопревеждащия материал биват: въглеродослойни, металослойни, жични и композиционни.

Според предназначението биват:

- постоянни;
- променливи;
- терморезистори –термистори и позистори;
- варистори;
- фоторезистори.

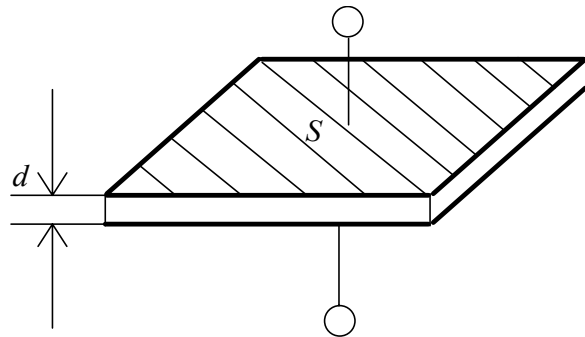
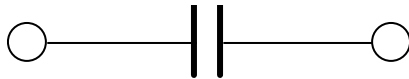
Кондензатори

$$(1.3) \quad C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{S}{d},$$

ϵ_0 – диелектрична проницаемост на вакуума,

ϵ_r – относителна диелектрична проницаемост на диелектрика,

S – площ на припокриване d – разстояние между електродите.



Номинална стойност и толеранс.

Температурният коефициент на капацитета TKC :

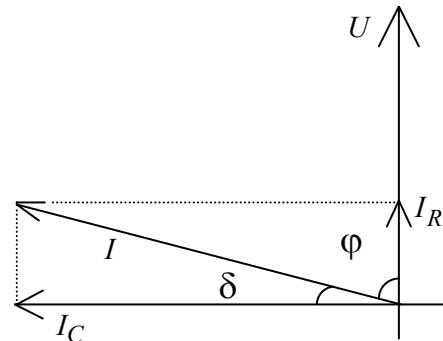
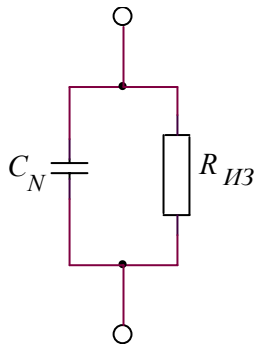
$$(1.4) \quad TKC = \frac{dC}{CdT} \left[^\circ C^{-1} \right].$$

Номиналното напрежение

Мощността на загубите

$$(1.5) \quad P = U^2 \cdot \omega \cdot C \cdot \operatorname{tg} \delta,$$

Коефициент на загубите $\operatorname{tg} \delta$



Според вида на диелектрика биват: книжни, електролитни (алуминиеви или танталови), керамични, тефлонови, слюдени и др.

Според предназначението биват: постоянни и променливи.

Основни зависимости от физиката на полупроводниците

Свободни токоносители

Електрически ток

Основни процеси, протичащи в полупроводниковите материали:

- получаване на свободни токоносители;
- управление на концентрацията им ;
- движение на токоносителите.

Класификация на кристалните тела по електропроводимост. Зонни диаграми на метали, полупроводници и диелектрици

Електропроводимост

концентрация на токоносителите

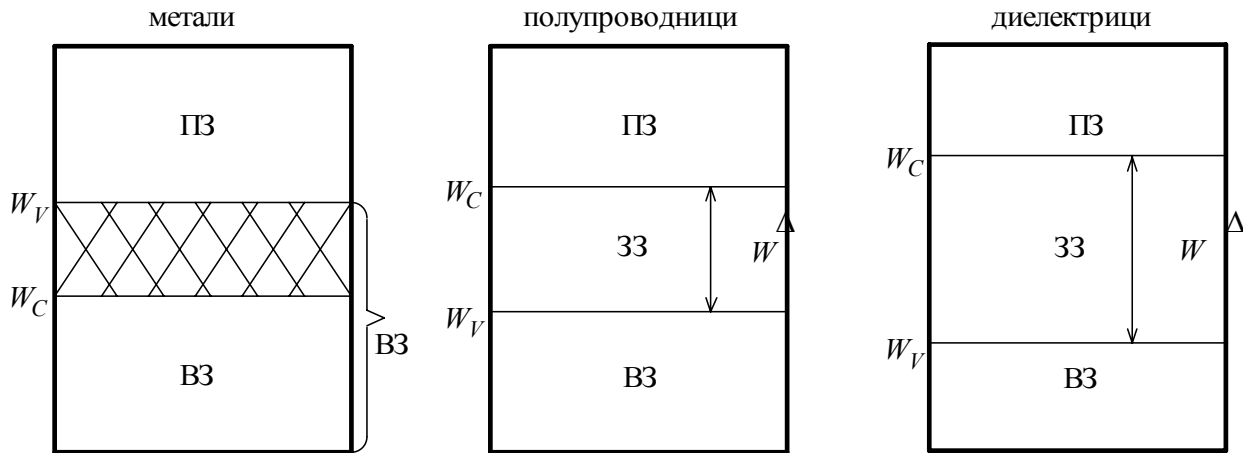
Зонна теория

енергийни нива W_1 , W_2 , W_3 и т.н.

енергийни зони

разрешени зони

забранени зони



валентна зона (B3)

проводима зона (ПЗ)

забранена зона (ЗЗ) $\Rightarrow \Delta W \quad 0, <3eV, >3eV$

Концентрация на свободните токоносители в собствен и примесен полупроводник

Концентрация на токоносителите

а) **собствен** полупроводник
електрон
дупка.

Генерация

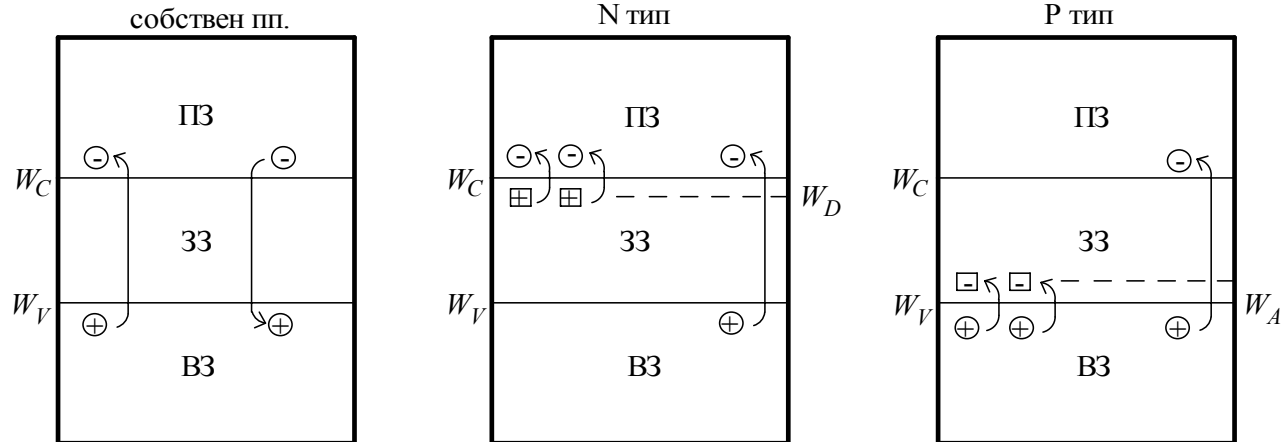
$$n = p = n_i$$

n_i – концентрация на токоносителите в собствен полупроводник,

n – концентрация на електроните и

p – концентрация на дупките.

Рекомбинация



$$n_i = f(T, \Delta W)$$

$$Ge \quad \Delta W_{Ge} = 0,72\text{eV}$$

$$Si \quad \Delta W_{Si} = 1,21\text{eV}$$

$$n_{i Ge} = 2,5 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3},$$

$$n_{i Si} = 1,45 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}.$$

б) **примесен** полупроводник

легиране

$$n_i \ll N_l \ll N_{Si} ($$

N_{Si} – брой атоми в единица обем силиций.

Примесите биват:

донорни – отдаващи електрони и

акцепторни – приемащи електрони.

– N тип полупроводник:

Основните п.п. материали германий (*Ge*) и силиций (*Si*) са от четвърта валентност (т.е. имат четири валентни електрона).

донорни примеси – от пета валентност => *P, As, Sb*.

допълнителни нива W_D в ЗЗ,

$$\Delta W_D = W_C - W_D.$$

$$\Delta W = W_C - W_V.$$

$n_n \gg p_n$ => полупроводник е от N тип.

Електропроводимостта се определя от по-големия брой електрони

ОСНОВНИ токоносители,

НЕОСНОВНИ токоносители.

– P тип полупроводник:

акцепторни примеси от трета валентност (с три валентни електрона) – напр. *B*.

свободна дупка и **неподвижен** отрицателен йон (йонизиран примесен атом).

допълнителни нива W_A в ЗЗ, разположени близо до тавана на ВЗ (W_V).

$$\Delta W_A = W_A - W_V .$$

$$\Delta W = W_C - W_V .$$

$$p_p \gg n_p .$$

Дупките се наричат **основни** токоносители, а електроните – **неосновни** токоносители.

Закон за действащите маси (ЗДМ):

$n_n \cdot p_n = n_i^2$ – за n -тип полупроводник;

$p_p \cdot n_p = n_i^2$ – за p -тип полупроводник

Пример:

В *Si* са въведени донорни примеси с концентрация $N_D = 4 \cdot 10^{17}$.

$$n_n \approx N_D = 4 \cdot 10^{17}.$$

От ЗДМ следва

$$p_n = n_i^2 / n_n = n_i^2 / N_D = 1 \cdot 10^3.$$

Движение на свободните токоносители

- а) *топлинно движение*
- б) *дрейфово движение* или *дрейф*,

Дрейфова скорост V_E .

Посоката на движение

електроните от “-” към “+” на външното електрическо поле, а дупките се движат от “+” към “-”.

Подвижност на токоносителите – μ .

$$V_E = \mu E,$$

E – напрегнатост на електричесото поле

Подвижността μ зависи:

- от вида на п.п. материал ($\mu_{GaAs} > \mu_{Ge} > \mu_{Si}$),
- вида на токоносителите ($\mu_n > \mu_p$),
- температурата (ако температурата нараства, μ намалява),
- концентрацията на примесите и
- напрегнатостта на електрическото поле.

Дрейфовото движение поражда протичане на електрически ток, който се нарича дрейфов ток.

има две съставки

- електронна J_{nD} (дължаща се на движението на електроните) и
- дупчеста J_{pD} (дължаща се на движението на дупките).

$$(1.6) \quad J_E = J_{nE} + J_{pE} = \sigma_n E + \sigma_p E = qn_n \mu_n E + qp_p \mu_p E,$$

където: J_{nE} , J_{pE} са плътностите на електронната и дупчестата съставка, σ_n и σ_p – електронна и дупчеста съставка на σ .

За N–тип п.п.:
$$\sigma = \sigma_n + \sigma_p = qn_n \mu_n + qp_p \mu_p,$$

тъй като $n_n \gg p_p$, то $\sigma_n \gg \sigma_p$ и $\sigma \approx \sigma_n$.

Аналогично за P тип полупроводник $\sigma \approx \sigma_p$.

в) **дифузионно движение**

дифузионен ток J_D

има две съставки

- електронна J_{nD} (дължаща се на движението на електроните) и
- дупчеста J_{pD} (дължаща се на движението на дупките):

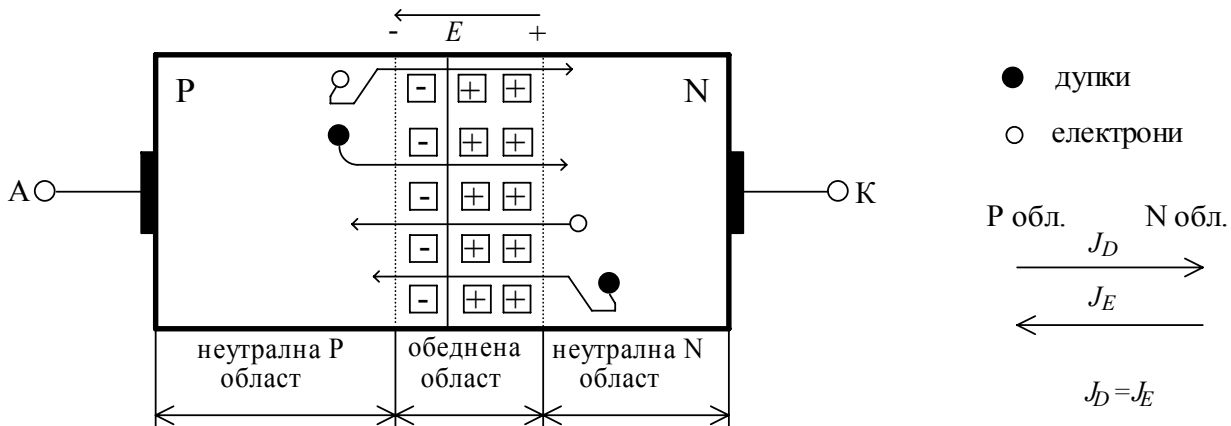
$$(1.7) \quad J_D = J_{nD} + J_{pD} = qD_n \frac{dn}{dx} - qD_p \frac{dp}{dx},$$

където: J_{nD}, J_{pD} са плътностите на електронната и дупчестата съставка;
 D_n, D_p – коефициент на дифузия за електроните и дупките;
 $\frac{dn}{dx}, \frac{dp}{dx}$ – градиент на концентрацията за електрони и дупки.

Полупроводникови диоди

PN преход в равновесно състояние

PN преход



$$J_D = J_E.$$

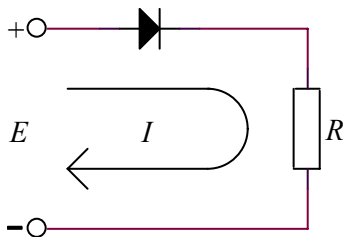
Волтамперна характеристика (ВАХ)

Полупроводниковият диод е двуелектроден полупроводников елемент, чието действие се основава на свойствата на PN прехода.



Диодът е свързан в *права посока*, ако захранващият източник подава на анода А *по-положителен потенциал* от този на катода К.

Външното електрическо поле има посока обратна на вътрешното поле, чийто интензитет намалява и се увеличава дифузионният ток, дължащ се на основните токоносители.

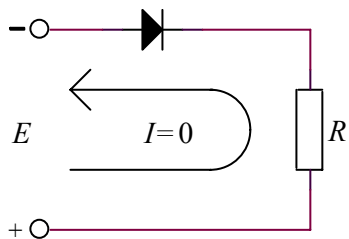


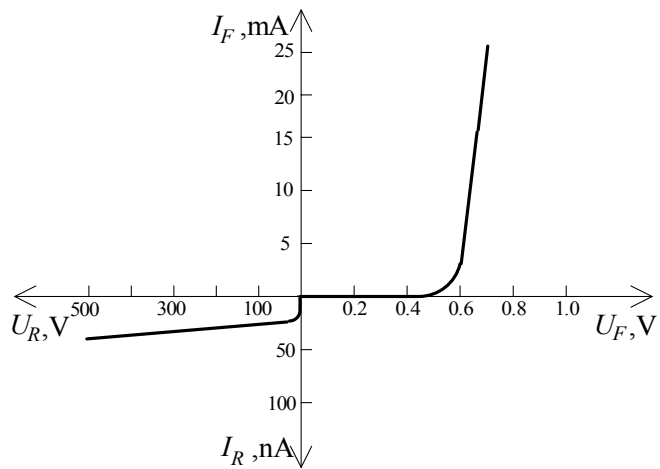
Стойността на протичащият ток се определя от захранващото напрежение, падът върху диода и товарното съпротивление R .

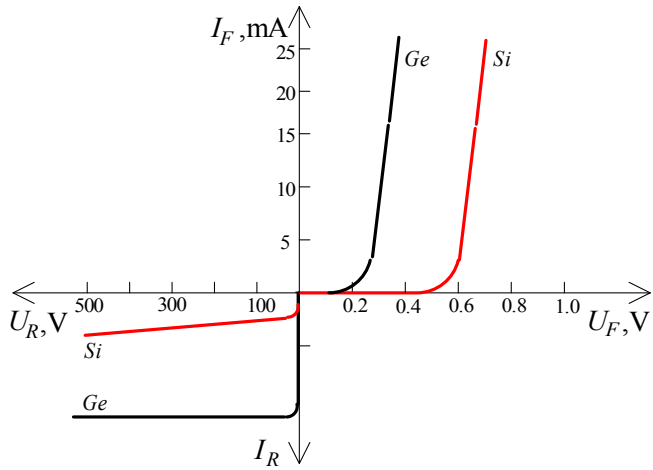
Поради малкия пад върху диода на практика стойността на тока зависи само от захранващото напрежение и товара R .

П.п. диод е свързан в *обратна* посока, ако на анода А (фиг. 1.14) е подаден *пo-отрицателен потенциал* от този на катода К.

При обратно свързване посоките на външното и вътрешното електрическо поле съвпадат и силно се затруднява дифузионното движение на основните токоносители.







Изводи:

– токът в права посока се създава от основните токоносители, а токът в обратна посока се създава от неосновните токоносители;

– концентрацията на основните токоносители превишава концентрацията на неосновните токоносители с няколко порядъка, поради което токът в права посока е многократно по-голям от тока в обратна посока;

– при свързване в права посока ВАХ е почти успоредна на ординатната ос (I_F), а при свързване в обратна посока е успоредна на абсцисната ос (U_R) и диодът се отличава с еднопосочна проводимост и има изправително действие;

– съпротивлението на диода в права посока е малко ($1 \div 100 \Omega$), а при свързване в обратна посока е много голямо (над $1 M\Omega$).

Аналитичен израз на ВАХ на диода:

$$(1.8a) \quad I = I_S \cdot \left(e^{\frac{U}{\varphi_T}} - 1 \right), \quad \text{или} \quad U = \varphi_T \ln \left(\frac{I}{I_S} + 1 \right),$$

където $\varphi_T = \frac{k \cdot T}{q}$ се нарича **температурен потенциал**;

$$\varphi_T \approx \frac{T}{11600}; \quad \text{за } T=300\text{K } \varphi_T \approx 26\text{mV};$$

I_S – **ток на насищане**, дължащ се на дрейфа на неосновните токоносители.

При $U_F > 5 \varphi_T$ $e^{\frac{U}{\varphi_T}} \gg 1$ $I_F = I_S \cdot e^{\frac{U_F}{\varphi_T}}$,

а при $U_R < -5 \varphi_T$, $e^{\frac{U}{\varphi_T}} \ll 1$ $I_F = -I_S$

Влияние на температурата

При повишаване на температурата:

- намалява широчината на забранената зона ΔW ,
- нараства собствената концентрация n_i и концентрацията на неосновните токоносители.
- Намалява подвижността на токоносителите μ , а оттам и специфичната електропроводимост σ .

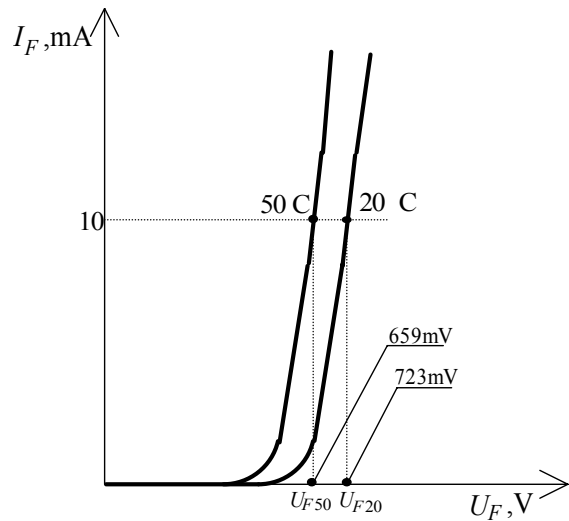
Влияние на температурата при свързване в права посока влияние оказват два фактора:

1. При повишаване на температурата намалява ΔW , увеличава се n_i и като следствие нараства токът на насищане I_S . ВАХ в право свързване се отмества вляво - един и същи ток $I_F = const = 10\text{mA}$ при повишаване на температурата от 20°C на 50°C протича при по-ниско напрежение $U_{F50} < U_{F20}$.
2. При повишаване на температурата намалява подвижността на токоносителите и специфичната електропроводимост σ на п.п. материал, увеличава се съпротивлението r_b на областите извън PN прехода и се увеличава напрежителният пад върху r_b .

Параметърът температурен коефициент на напрежението TKU_F :

$$(1.9) \quad TKU_F = \frac{dU}{dT} \approx \frac{\Delta U_F}{\Delta T} \text{ при } I_F = \text{const.}$$

При практически изчисления за TKU_F се приема стойност $-2\text{mV}/^\circ\text{K}$.



Влияние на температурата при свързване в обратна посока

При повишаване на температурата

- нараства концентрацията на неосновните токоносители,
- и стойността на тока в обратна посока I_S

топлинен ток:

$$I_S = I_{S0} \cdot e^{a(T-T_0)},$$

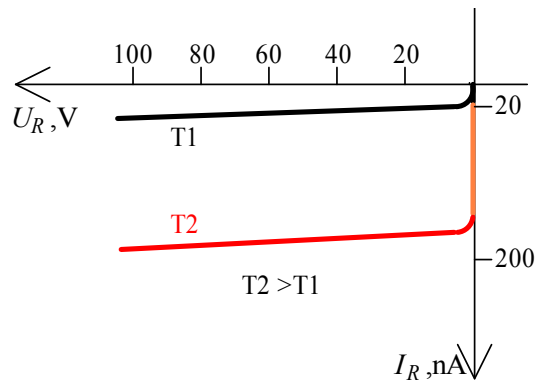
където I_{S0} – ток на насищане при температура T_0 ,
 I_S – ток на насищане при температура T ,
 a – емпиричен коефициент, като $a = 0,1$ за *Si* диоди и $a = 0,07$ за *Ge* диоди.

I_S удвоява стойността си:

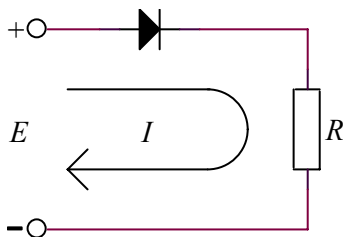
- за *Si* диоди при температурна разлика $\Delta T = 7^\circ\text{C}$,
- а за *Ge* диоди при $\Delta T = 10^\circ\text{C}$.

при промяна на температурата с 10°C

- обратният ток на *Si* диоди се утроява, а на *Ge* диоди се удвоява.



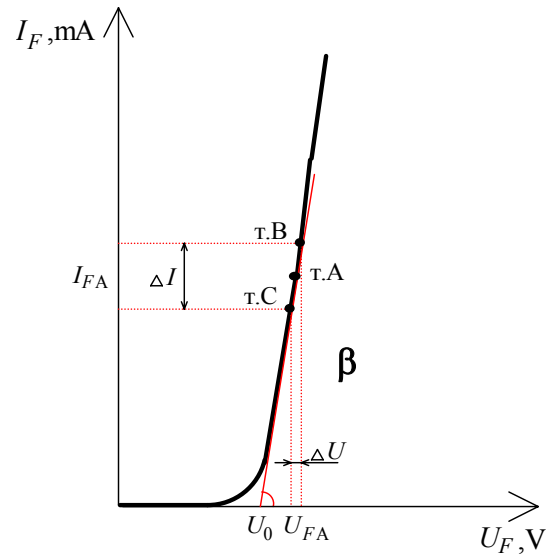
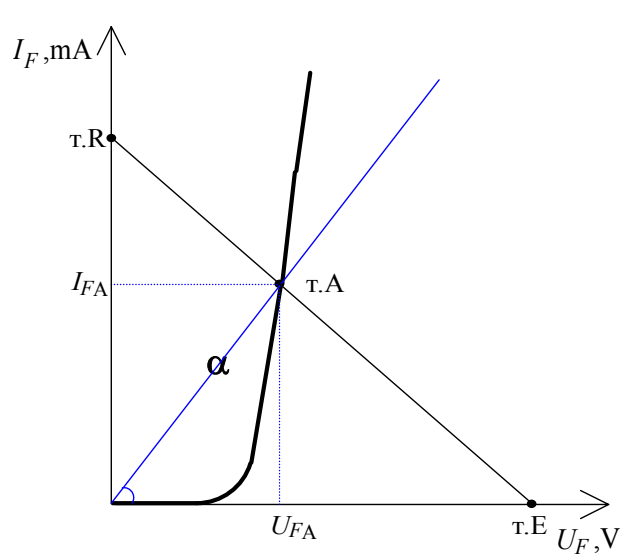
Товарна права и работна точка. Статично и диференциално съпротивление



по II закон на Кирхоф:

$$(1.10) \quad E = U_F + I_F R \quad \text{или} \quad I_F = -\frac{1}{R} U_F + \frac{E}{R}.$$

Изразът (1.10) е уравнение на права линия (**Товарна права**).



Статичното съпротивление е съпротивлението на диода по постоянен ток.

$$(1.11) \quad R_{CT} = \frac{U_{FA}}{I_{FA}} = \frac{\varphi_T \ln(I_{FA}/I_S + 1)}{I_{FA}} \approx \frac{\varphi_T \ln(I_{FA}/I_S)}{I_{FA}}$$

R_{CT} съответства на наклона на правата, преми-наваща през началото на координатната система и т. А (ъгъл α): $R_{CT} = l/\text{tg}\alpha$.

Диференциалното (динамично) съпротивление е съпротивлението на диода по променлив ток. От израза за ВАХ (1.8а) то се определя от

$$(1.12) \quad r_d = \frac{u_{FA}}{i_{FA}} = \frac{dU}{dI} \approx \frac{\varphi_T}{I};$$

r_d съответства на ъгъла, който сключва допирателната към ВАХ в т. А с абсцисната ос: $r_d = 1/\operatorname{tg}\beta$.

два извода:

1. Стойностите на R_{cm} и r_d зависят от работната точка. При промяна на работната точка стойностите им се променят значително – ако I_F нараства, то R_{cm} и r_d намаляват.

Пример: За $I_F=1\text{mA}$ $r_d=26\Omega$ и $R_{cm}=301\Omega$. За $I_F=10\text{mA}$ $r_d=2,6\Omega$ и $R_{cm}=36\Omega$.

2. При една и съща работна точка R_{cm} и r_d имат различна стойност – $\alpha \neq \beta$; $\text{tg}\alpha \neq \text{tg}\beta$.

При свързване на диода в права посока $r_d < R_{cm}$.

Максимално допустими параметри и гранични режими на работа

Максимално допустима температура на прехода T_{jmax}

T_{jmax} е 85-100°C за *Ge* прибори и 150-170°C за *Si* прибори.

Уравнение на топлинния баланс:

$$(1.13) \quad P = U.I = (T_j - T_a) / R_{th} ,$$

където: T_j – температура на прехода,

T_a – температура на околната среда и

R_{th} – топлинно съпротивление на конструкцията на диода.

Максимално допустима мощност P_{max}

$$T_{jmax} \Rightarrow P_{max} = (T_{jmax} - T_a) / R_{th} .$$

Максимално допустим ток в права посока I_{Fmax}

Максимально допустимо обратное напряжение U_{Rmax}

**Пробиви в полупроводниковите диоди – лавинен, тунелен, топлинен.
Влияние на температурата**

Пробив

Пробивно напрежение

електрически и топлинни пробиви

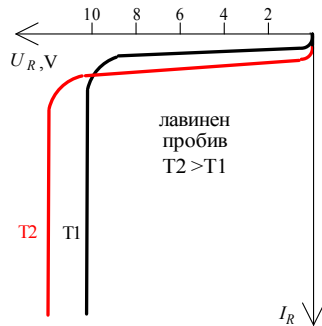
Електрически пробиви:

Лавинен пробив

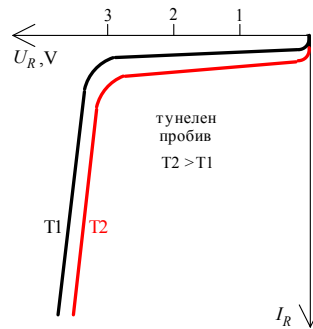
Лавинният пробив настъпва при стойности на обратното напрежение по-големи от $7V$ ($U_{BR} \geq 7V$).

Лавинният пробив има положителен температурен коефициент:

$$TKU_{BR} = \frac{dU_{BR}}{dT \cdot U_{BR}} > 0.$$



Тунелен пробив

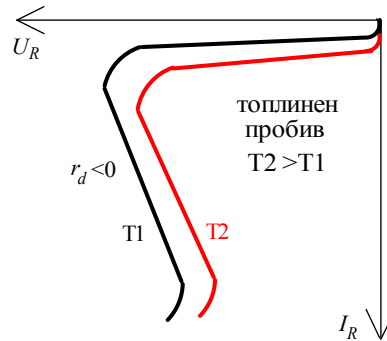


Има отрицателен температурен коефициент:

$$TKU_{BR} = \frac{dU_{BR}}{dT \cdot U_{BR}} < 0 .$$

Тунелният и лавинният пробив са обратими пробиви.

Топлинен пробив

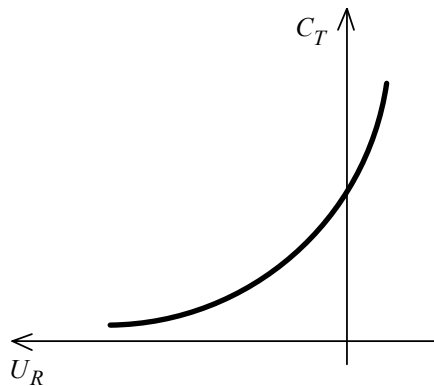


ВАХ има участък с отрицателно диференциално съпротивление

Топлинният пробив има отрицателен температурен коефициент

Капацитети на PN прехода

PN преходът има два вида капацитет – дифузионен и бариерен



Варикапи

Видове диоди

Изправителни диоди

параметри:

I_{Fmax} – максимална стойност на тока в права посока;

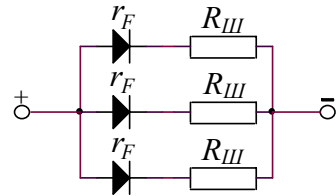
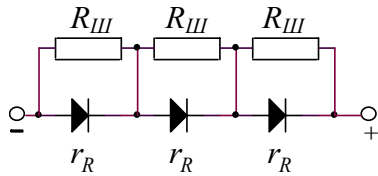
I_0 – максимален изправен ток;

U_{Fmax} – максимален пад на напрежението в права посока;

U_R – максимално допустимо обратно напрежение;

I_R – обратен ток (при определено U_R);

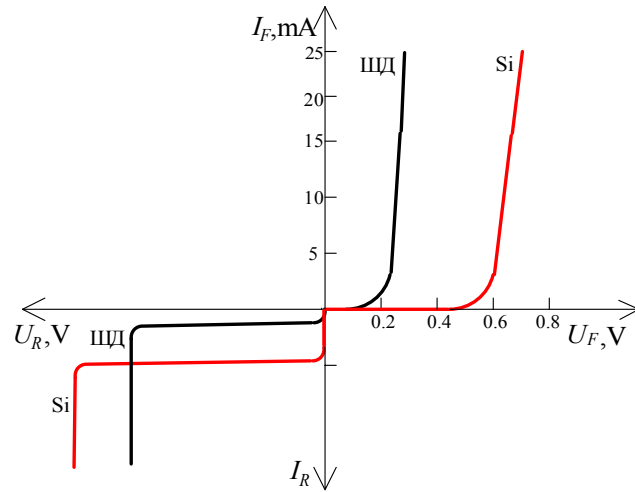
P_{max} – максимално допустима мощност и др.



Шотки диоди (ШД)

особености:

1. Малък пад на напрежението в права посока (U_F) – $0,2\div 0,3$ V.
2. По-стръмна ВАХ.
3. По-малък обратен ток и по-малко пробивно напрежение.
4. Голямо бързодействие (тъй като PN преходът е от N тип Si и метал, при тях липсва натрупване и разсейване на неосновните токоносители).



Исправителни – за честоти до 200kHz
 Импулсните ШД - малки времена на превключване

Ценерови диоди - стабилитрони

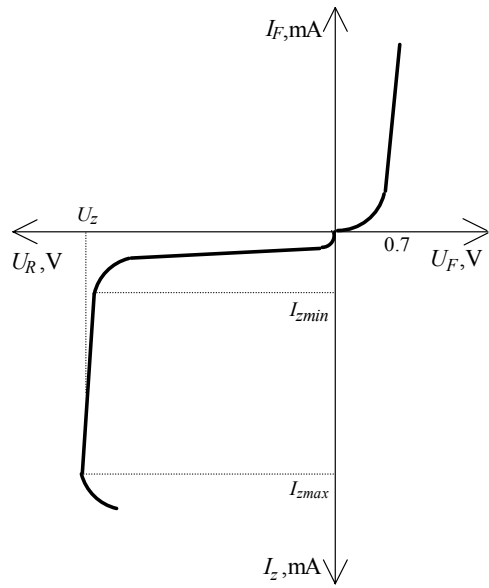
П.п.диоди, работещи в областта на електрически пробив и служещи като източник на стабилно (опорно) напрежение.

Използват се лавинният и тунелният пробив

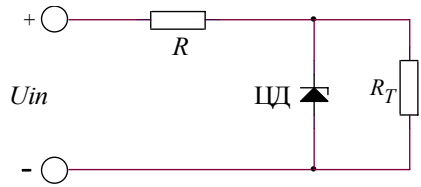
параметри:

- U_Z – напрежение на стабилизация
- I_{Zmin} – минималната стойност на тока в обратна посока
- I_{Zmax} – максимално допустима стойност на тока
- r_Z – диференциално съпротивление $r_Z = \frac{dU_Z}{dI_Z} \approx \frac{\Delta U_Z}{\Delta I_Z}$
- TKU_Z – температурен коефициент на напрежението на стабилизация.

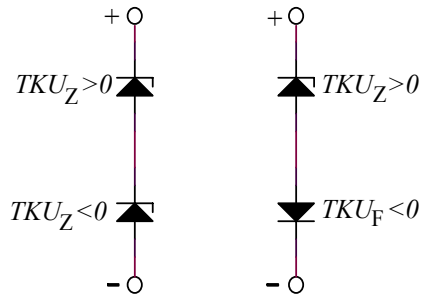
$$TKU_Z = \frac{dU_Z}{dT \cdot U_Z} 100 \approx \frac{\Delta U_Z}{\Delta T \cdot U_Z} 100 \left[\frac{\%}{C} \right], \text{ при } I_Z = \text{const} .$$



a) BAX



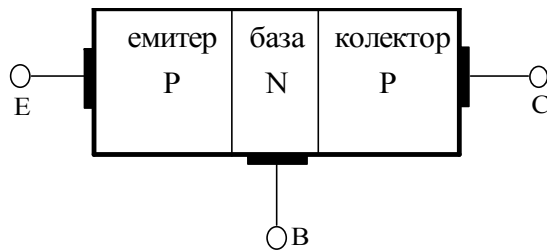
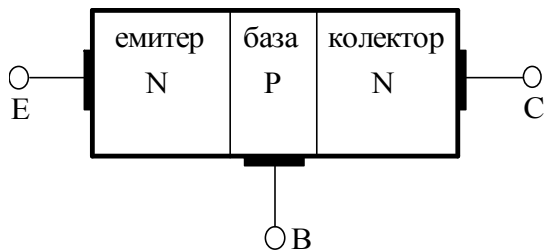
б) схема на свързване



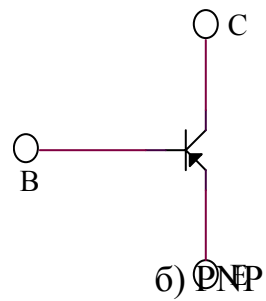
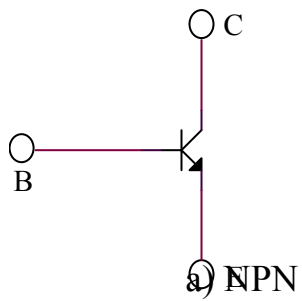
в) температурно компенсирани ЦД

Биполярни транзистори

Структура



Фиг. 1.27



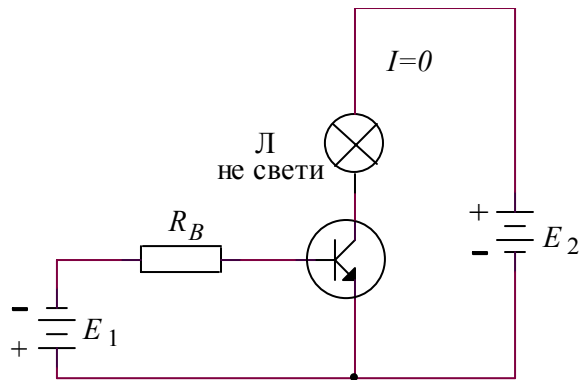
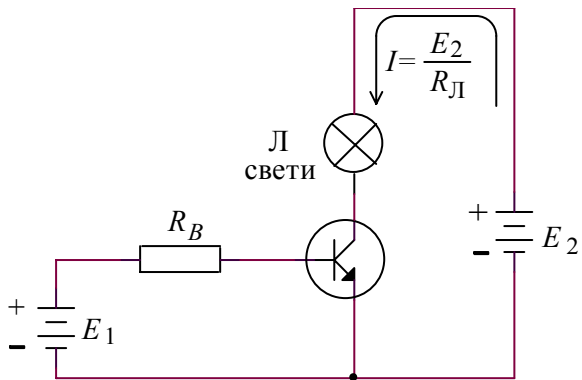
Режими на работа

Активен –

Насищане –

Отсечка –

ключов режим

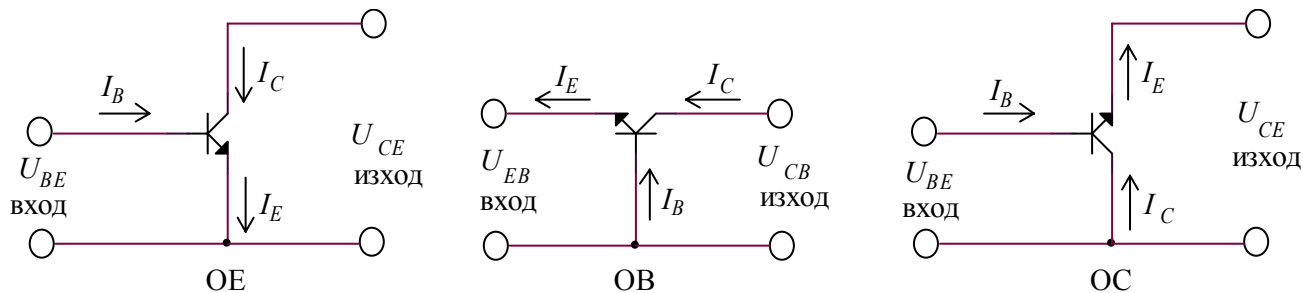


Схеми на свързване

Биполярният транзистор има три извода.

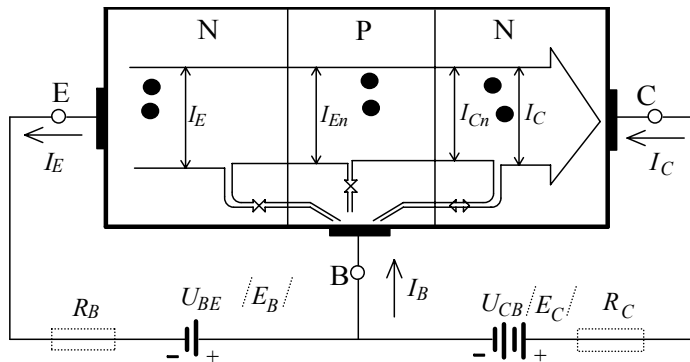
Входът има два извода.

Изходът има два извода.



Три схеми на свързване – общ емитер (ОЕ), общ колектор (ОК) и обща база (ОБ).

Принцип на действие. Уравнения на изходния ток



Действието на БТ се основава на следните явления:

1. Инжекция на токоносители от емитера Е в базата В
2. Пренасяне на токоносителите през базата В
3. Прехвърляне (екстракция) на токоносителите от базата В в колектора С

$$I_E = I_{En} + I_{Ep} \quad I_{En} \gg I_{Ep}$$

коэффициент на инжекция γ

$$I_{En} = \gamma I_E, I_{Ep} = (1 - \gamma) I_E$$

За повечето транзистори $\gamma > 0,99$.

коэффициент на пренасяне κ

. Необходимо е $\kappa \approx 1$, за да може почти всички навлезли в базата електрони да достигат до колектора –

$$I_{Cn} = I_{En} \cdot \kappa = I_E \cdot \gamma \cdot \kappa$$

$$(1.14) \quad I_C = \bar{\alpha} I_E + I_{CBO}, \text{ където } \bar{\alpha} = \gamma \kappa.$$

$\bar{\alpha}$ се нарича коэффициент на предаване по ток при схема ОВ

по първия закон на Кирхоф:

$$(1.15) \quad I_E = I_C + I_B, \text{ или } I_B = I_E - I_C.$$

$$I_E > I_C \gg I_B.$$

за схема ОЕ

$$\text{От} \quad I_C = \bar{\alpha} I_E + I_{CB0} = \bar{\alpha}(I_C + I_B) + I_{CB0} \quad \text{следва}$$

$$(1.16a) \quad I_C = \frac{\bar{\alpha}}{1 - \bar{\alpha}} I_B + \frac{I}{1 - \bar{\alpha}} I_{CB0} \quad \text{или}$$

$$(1.16б) \quad I_C = \bar{\beta} I_B + I_{CE0},$$

където

$$(1.17) \quad \bar{\beta} = \frac{\bar{\alpha}}{1 - \bar{\alpha}} \text{ и}$$

$$(1.18) \quad I_{CE0} = (\bar{\beta} + 1) I_{CB0}.$$

$\bar{\beta}$ се нарича коефициент на предаване по ток при схема ОЕ.

I_{CE0} се нарича обратен колекторен ток при схема на свързване ОЕ или обратен колекторен ток при отворена база

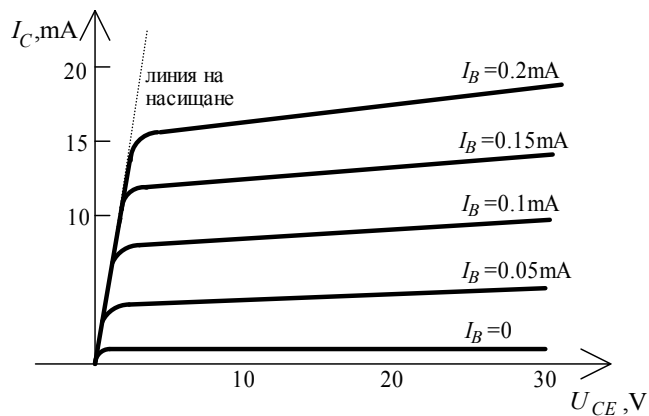
За схема общ колектор

$$(1.19) \quad I_E = (\bar{\beta} + 1)I_B + I_{CE0}.$$

Статични характеристики

Статични характеристики при схема ОЕ

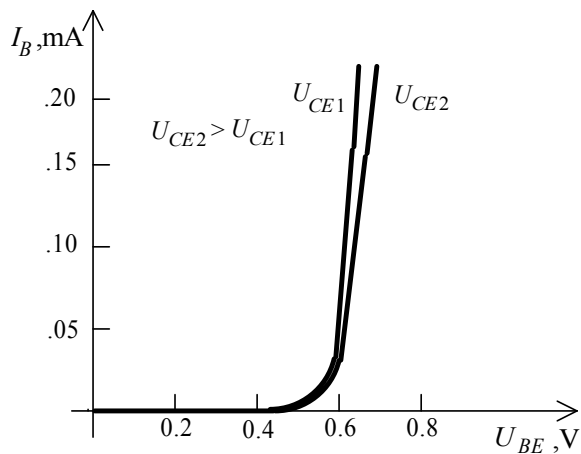
Исходни характеристики



$I_C = f(U_{CE})$ при $I_B = \text{const}$

$$(1.20) \quad r_{\text{ИЗХ}} = r_C = \frac{dU_{CE}}{dI_C} \approx \frac{\Delta U_{CE}}{\Delta I_C}, \text{ при } I_B = \text{const}.$$

Входни характеристики

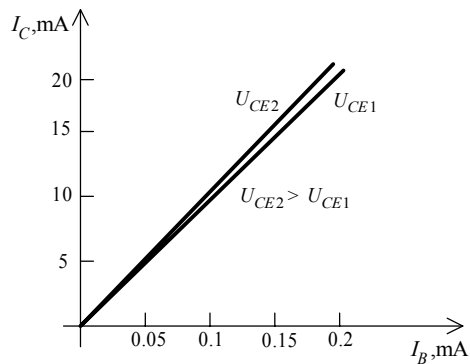


$U_{BE} = f(I_B)$ при $U_{CE} = \text{const}$

$$(1.21) \quad r_{BX} = r_B = \frac{dU_{BE}}{dI_B} \approx \frac{\Delta U_{BE}}{\Delta I_B}, \text{ при } U_{CE} = \text{const.}$$

$$(1.22) \quad r_B = \frac{\varphi_T}{I_B}.$$

Характеристики на предаване по ток



$$I_C = f(I_B) \text{ при } U_{CE} = \text{const}$$

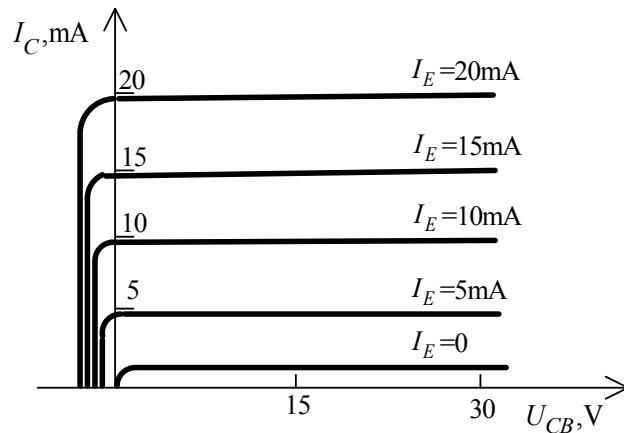
$$I_C = \beta I_B + I_{CE0}$$

диференциален коефициент на предаване по ток:

$$\beta = \frac{dI_C}{dI_B} \approx \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}$$

Статични характеристики при схема ОВ

Исходните характеристики

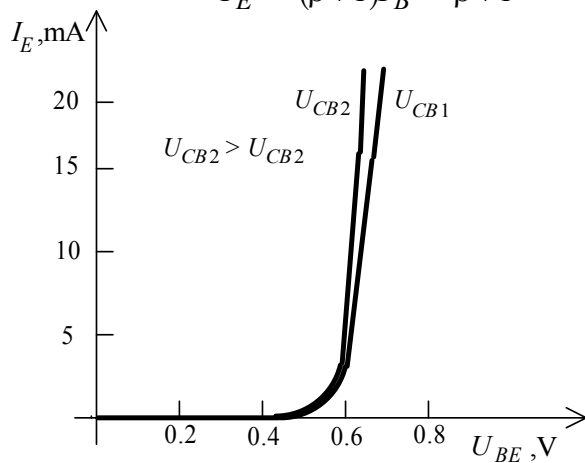


$I_C = f(U_{CB})$ при $I_E = \text{const}$

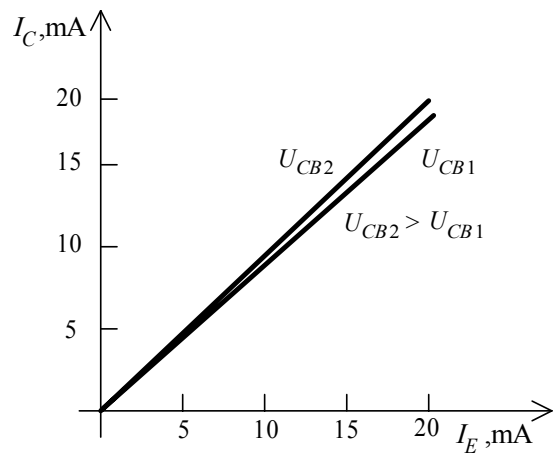
Входни характеристики

$U_{BE} = f(I_E)$ при $U_{CB} = \text{const}$

$$(1.24) \quad r_E = \frac{\Phi_T}{I_E} = \frac{\Phi_T}{(\beta + 1)I_B} = \frac{r_B}{\beta + 1}.$$



Характеристики на предаване по ток



$$I_C = f(I_E), \text{ при } U_{CB} = \text{const}$$

Пробивни напрежения в транзистора

Пробивите в транзисторите обикновено са лавинни.

Дефинират се три пробивни напрежения:

- U_{BREBO} – пробивно напрежение между емитера и базата при отворен колектор.
- U_{BRCBO} – пробивно напрежение между колектора и базата при отворен емитер.
- U_{BRCEO} – напрежение между колектора и емитера при отворена база.

$$U_{BRCBO} > U_{BRCEO} > U_{BREBO}.$$

Максимално допустими параметри

- U_{EBmax} – максимално допустимо напрежение между емитера и базата;
- U_{CBmax} – максимално допустимо напрежение между колектора и базата;
- U_{CEmax} – максимално допустимо напрежение между колектора и емитера;
- I_{Cmax} – максимално допустим колекторен ток;
- P_{Cmax} – максимално допустима колекторна мощност.

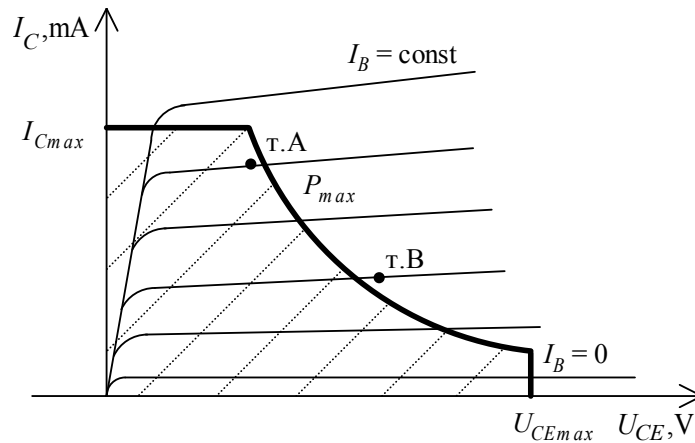
Максимално допустима мощност

$$(1.25) \quad P_{Cmax} = (U_{CE} I_C)_{max} = \frac{T_{jmax} - T_a}{R_{th}} .$$

Максималната мощност зависи:

- от максимално допустимата температура на прехода T_{jmax} (150-200°C за Si),
- от температурата на околната среда (1.25) и
- от топлинното съпротивление между прехода и околната среда R_{th}

Област на безопасна работа (ОБР)



I_{Cmax} , U_{CEmax} и P_{Cmax} заграждат област на безопасната работа (ОБР).

Полеви транзистори

Три електрода – сорс (S), дрейн (D) и гейт (G).

Особености:

– действието им се дължи на един вид токоносители – основните за материала (N или P тип), от който е изграден каналът (с P-канал и с N-канал);

– управляват се с напрежение;

– гейтът е изолиран от канала, поради което имат много голямо входно съпротивление и пренебрежимо малък входен ток;

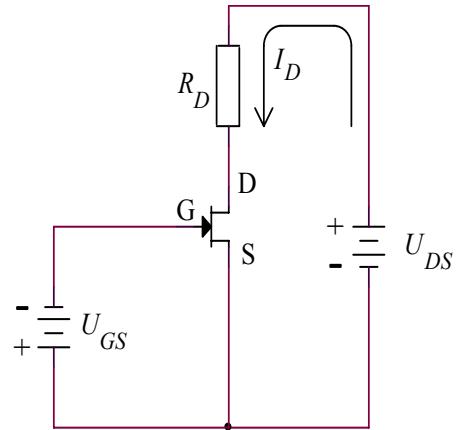
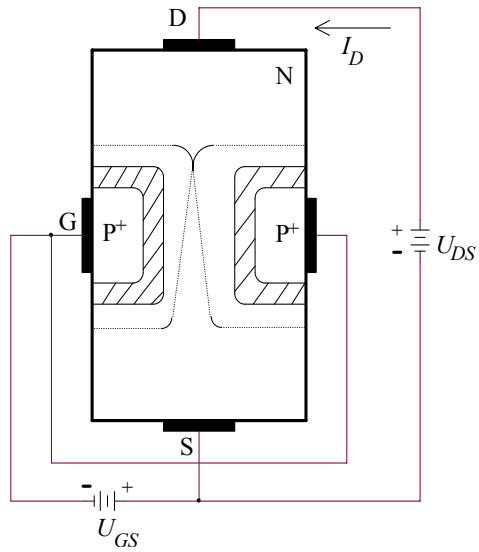
– между дрейна и сорса протича само дрейфов ток, дължащ се на движението на свободните токоносители под действието на електрическо поле.

Два основни типа:

- полеви транзистори в управляващ PN преход (JFET) и MOS транзистори (IGFET).

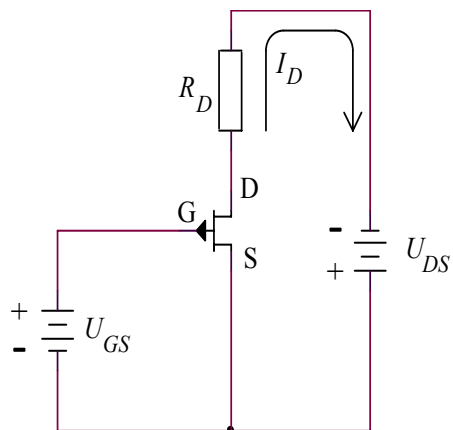
Полеви транзистори с управляващ PN преход

Структура на полеви транзистор с N канал



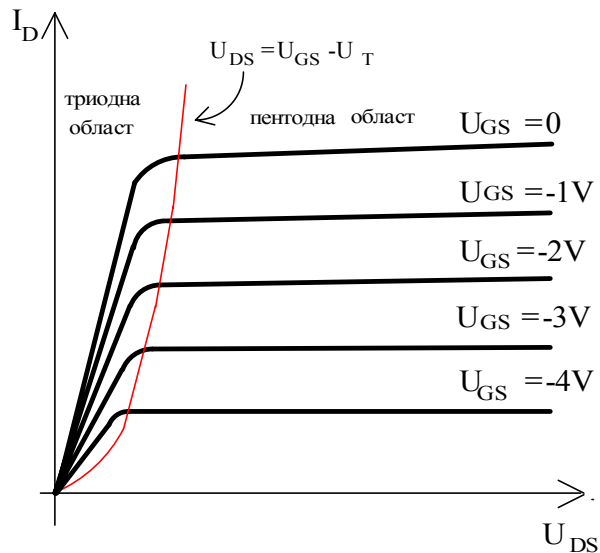
порогово напрежение U_T

Полеви транзистор с управляващ PN преход и P канал



Статични характеристики

Исходни статични характеристики



$I_D = f(U_{DS})$ при $U_{GS} = const$

$U_{DS} = I_D \cdot R_{DS}$, където R_{DS} е съпротивлението на канала.

$$U_{PN} = U_{DS} + U_{GS}$$

$$U_{PN} = U_{GS} + U_{DSsat} = U_T$$

$$U_{DSsat} = U_{GS} - U_T$$

Точката U_{DSsat} разделя изходната характеристика на две области:

- линейна (омична) или триодна област
- област на насищане или пентодна област

Парабола на насищане $\Rightarrow U_{DSsat} = U_{GS} - U_T$.

Максимален дрейнов ток I_{DSS} протича при $U_{GS} = 0$ и $U_{DSsat} = |U_T|$.

Пробивно напрежение \Rightarrow зависи от U_{GS} .

Динамично изходно съпротивление на транзистора:

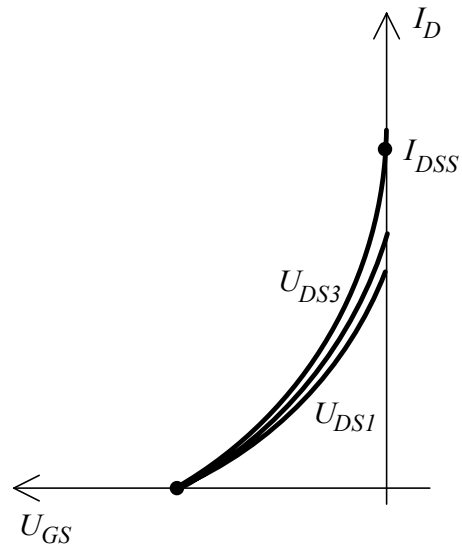
$$r_{ds} = \frac{u_{ds}}{i_d} = \frac{dU_{DS}}{dI_D} \approx \frac{\Delta U_{DS}}{\Delta I_D} \text{ при } U_{GS} = \text{const.}$$

Дрейновият ток се определя от зависимостите:

$$I_D = \frac{I_{DSS}}{U_T^2} [2(U_{GS} - U_T)U_{DS} - U_{DS}^2] \quad \text{за триоден режим} - U_{DS} \leq U_{GS} - U_T;$$

$$I_D = \frac{I_{DSS}}{U_T^2} (U_{GS} - U_T)^2 \quad \text{за пентоден режим} - U_{DS} \geq U_{GS} - U_T;$$

Предавателни (проходните) характеристики



$$I_D = f(U_{GS}) \text{ при } U_{DS} = \text{const}$$

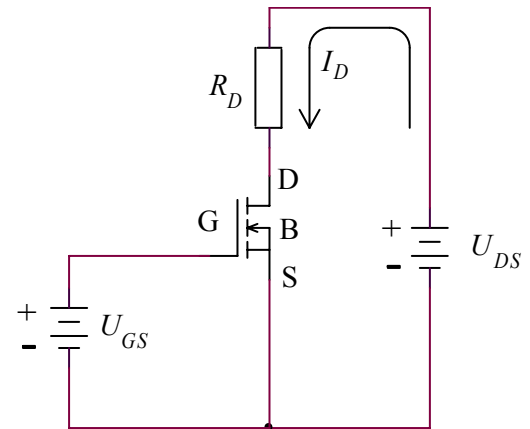
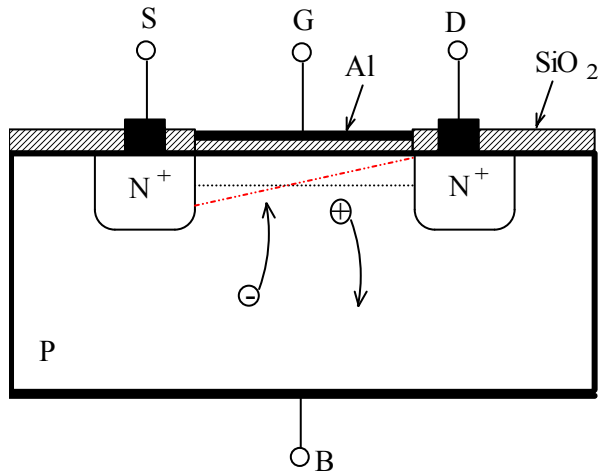
От предавателните характеристики се определя
Стръмност на ПТ s :

$$s = \frac{i_d}{u_{gs}} = \frac{dI_D}{dU_{GS}} \approx \frac{\Delta I_D}{\Delta U_{GS}} \text{ при } U_{DS} = \text{const.}$$

MOS транзистори

Управляващият електрод (G) е изолиран от канала чрез диелектрик – например SiO_2 .

Структурата на MOS транзистор с индуциран N канал



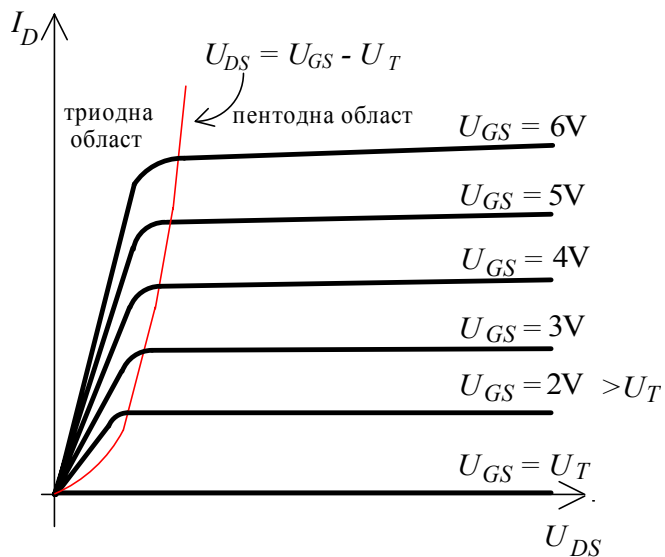
При $U_{GS} = 0$ не съществува проводящ канал между D и S

За формиране на проводящ канал трябва да се подаде напрежение с подходящ поляритет и големина между G и S (U_{GS}).

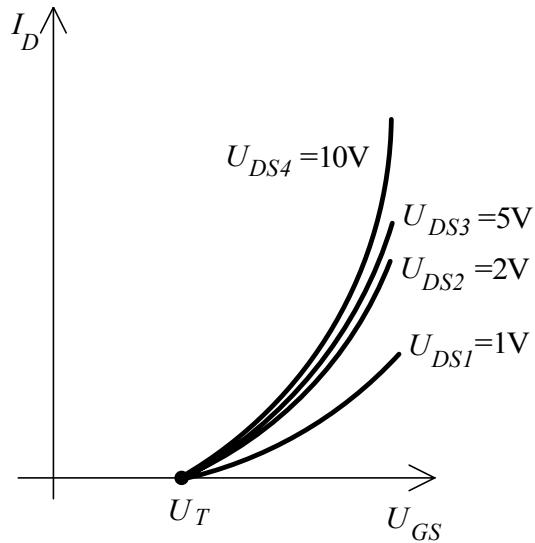
прагово напрежение U_T

Статични характеристики

Исходните статични характеристики
 $I_D = f(U_{DS})$ при $U_{GS} = \text{const}$



Предавателните (проходните) характеристики



$$I_D = f(U_{GS}) \text{ при } U_{DS} = \text{const}$$

Стръмност s на MOS транзистора : $s = \frac{i_d}{u_{gs}} = \frac{dI_D}{dU_{GS}} \approx \frac{\Delta I_D}{\Delta U_{GS}}$ при $U_{DS} = \text{const.}$

Видове MOS транзистори

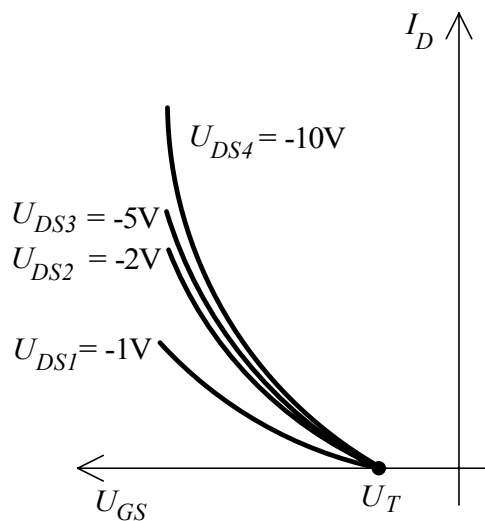
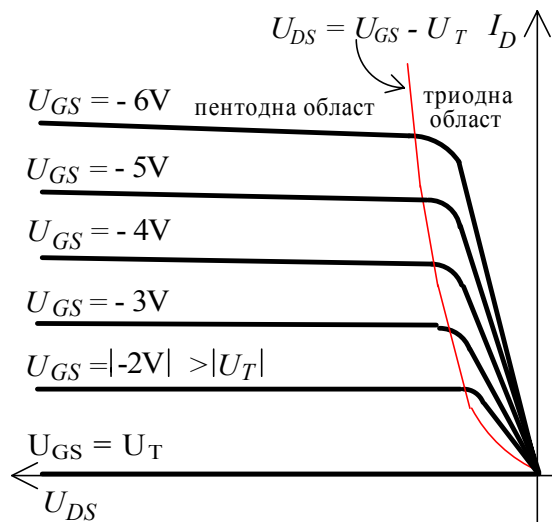
Според начина на създаване на проводящия канал между D и S:

- с вграден и индуциран канал.

Според проводимостта на канала:

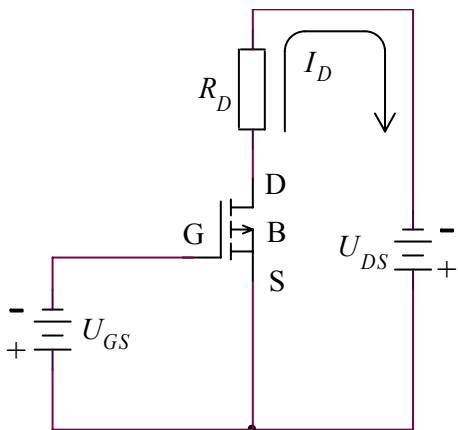
- с N канал и P канал.

MOS транзисторът с индуциран P канал

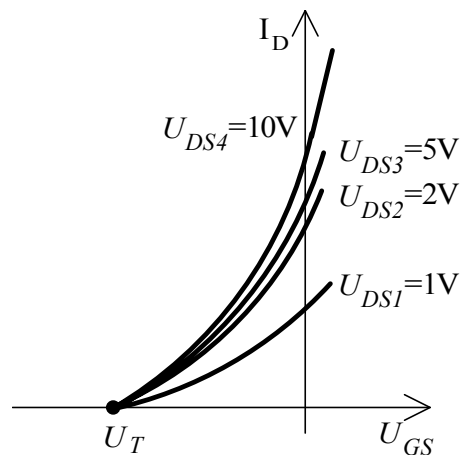
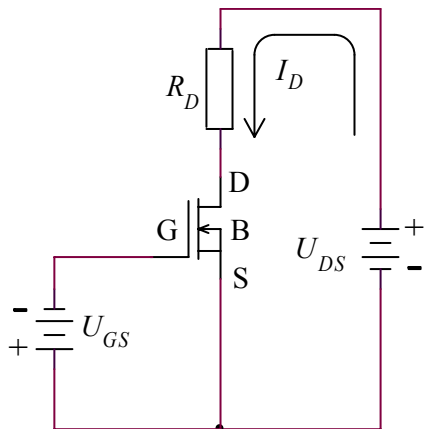


MOS транзистор с индуциран P канал

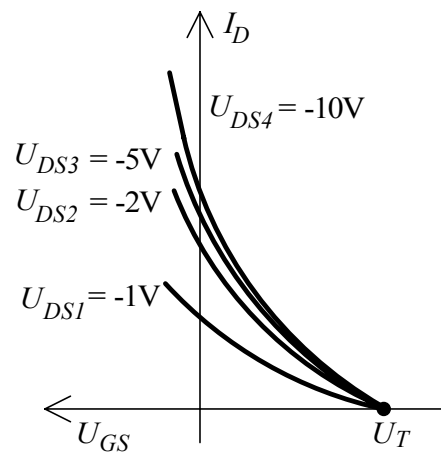
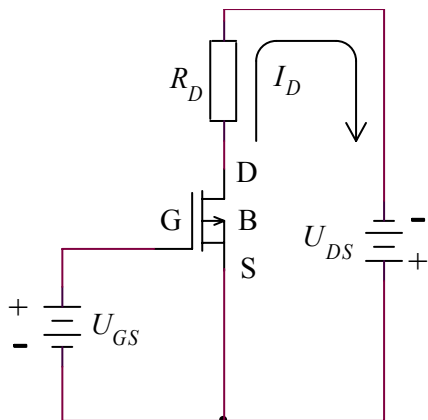
Схема на свързване



MOS транзистор с вграден N канал

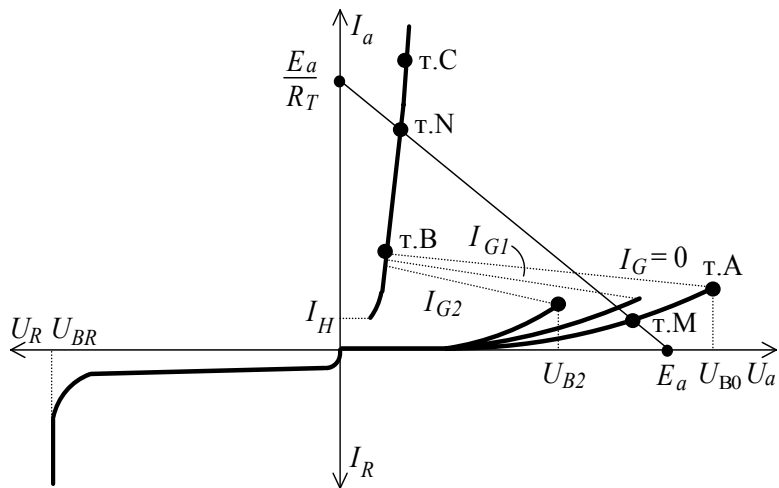
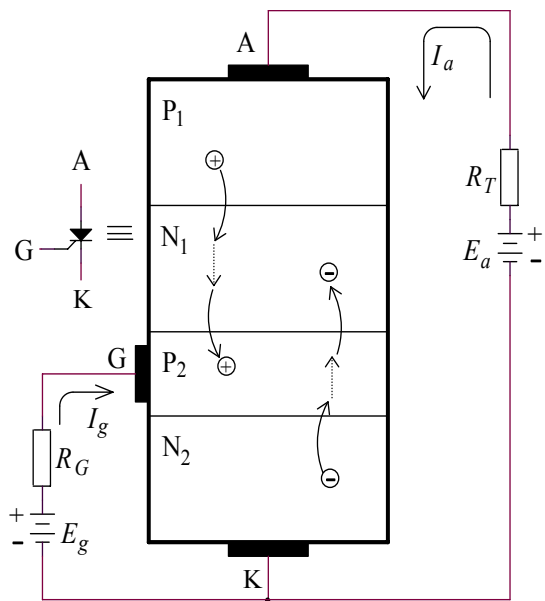


MOS транзистор с вграден P канал



Тиристоры

Устройство и принцип на действие. ВАХ



напрежение на включване

ток на удържане I_H

ток на включване.

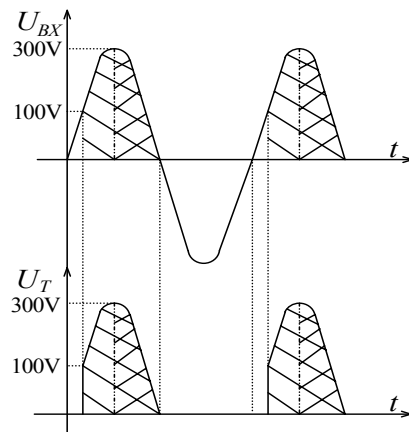
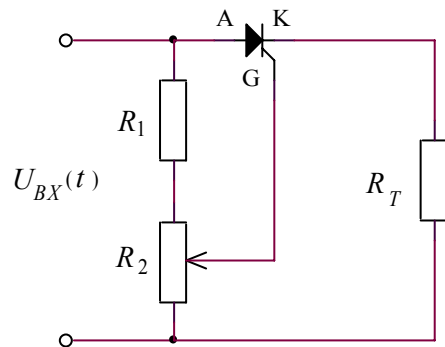
свързване в права посока

свързване в обратна посока

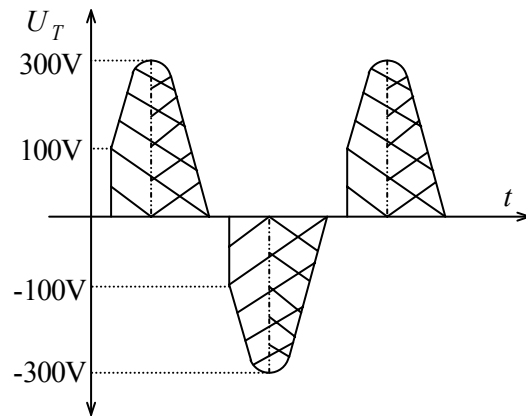
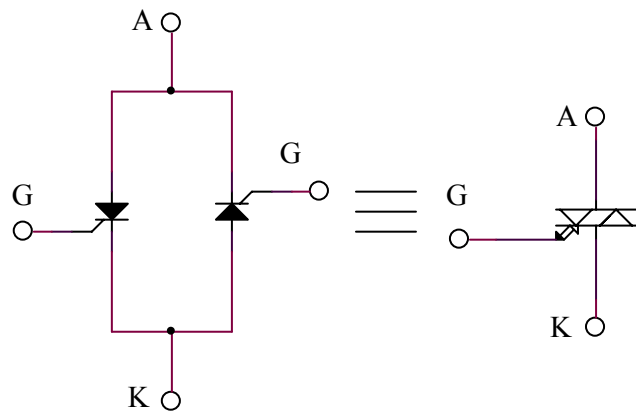
Динистор - конструкцията на тиристор само с два електрода – А и К.

Тиристорът се изключва само, когато се подаде обратно анодно напрежение ($U_a < 0$).

Приложение



Триак (симметричен тиристор)



Оптоэлектронни прибори

Светодиоди (СД)

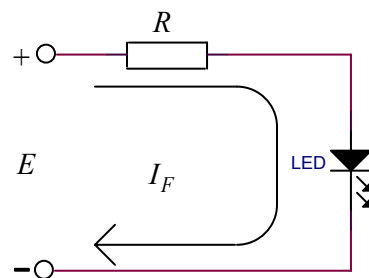
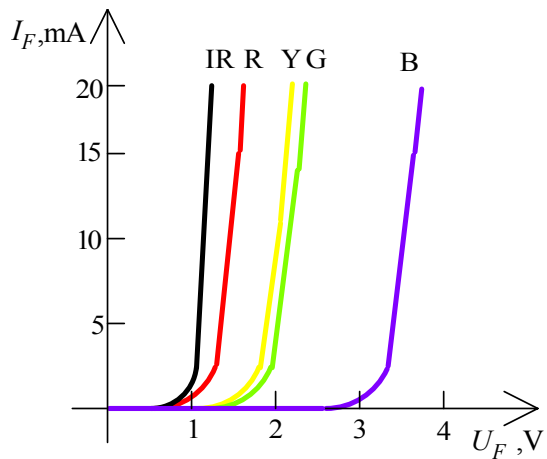
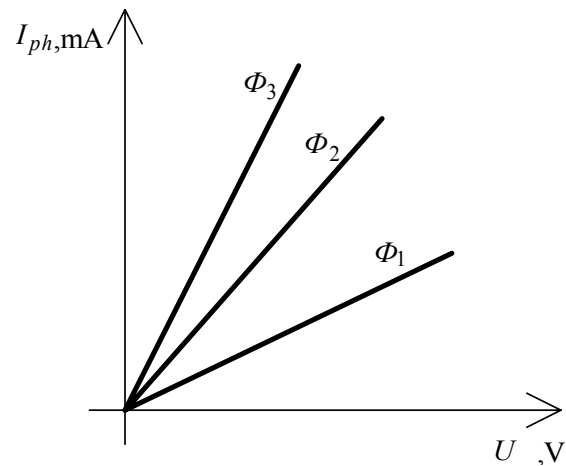
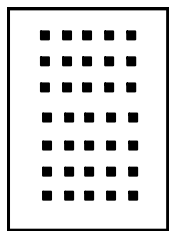
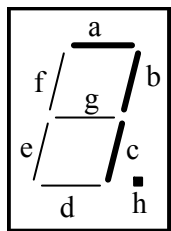


схема на свързване на СД – оразмеряване

$$R = \frac{E - U_0}{I_F},$$

където I_F е необходимата стойност на тока през СД (от нея зависи яркостта на светене), а U_0 – напрежителният пад върху СД при ток I_F .

Седемсегментни и матрични индикатори.



Фотоприемници

Фоторезистори (ΦR)

$$\Phi_3 > \Phi_2 > \Phi_1$$

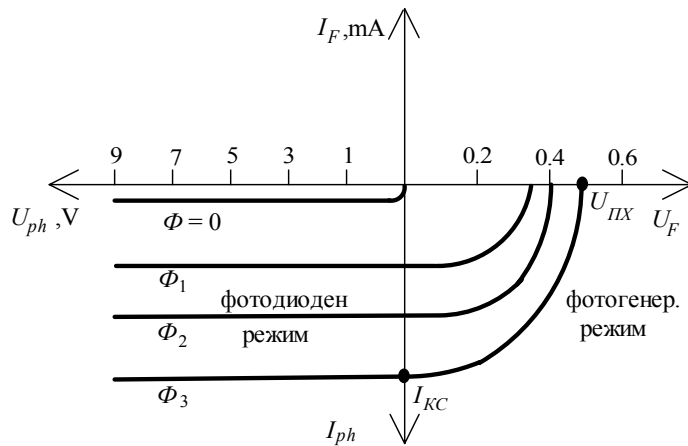
ВАХ се отместват нагоре по посока на по-големите токове.

Основните параметри на ΦR са: съпротивление на тъмно (при $\Phi = 0$) – от 10^7 до $10^{11} \Omega$; светлинна характеристика – $I_\phi = k_0 \sqrt{\Phi}$ при $U_\phi = const$; интегрална чувствителност k_0 – от $100 \mu A/lm$ до $1,2 A/lm$; спектрална характеристика – зависимостта на чувствителността k_0 от дължината на вълната на светлинния поток и др.

ΦR се отличават с висока чувствителност, но имат много ниско бързодействие, поради което се използват при ниски честоти – до $1 kHz$.

Фотодиоди (ФД)

Фотодиодът е полупроводников диод, обратният ток на който зависи от светлинния поток .



$$I = I_S \left(e^{\frac{U}{\varphi_T}} - 1 \right) - I_\phi,$$

където I_ϕ е фототокут на светлинно генерираните токоносители.

При $|-U| > 4\varphi_T$ $I = -(I_\phi + I_S) \approx I_\phi,$

Светлинна характеристика на ФД:

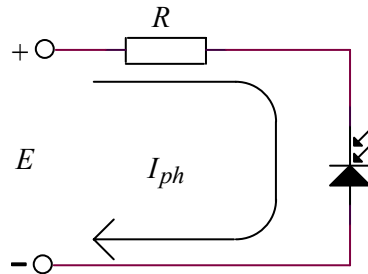
$$I_{КС} = k_0 \Phi,$$

където k_0 е интегрална чувствителност с дименсия $\frac{A}{W}$.

Свойства на ФД:

Спектрална чувствителност и
Бързодействие

Фотодиоден режим

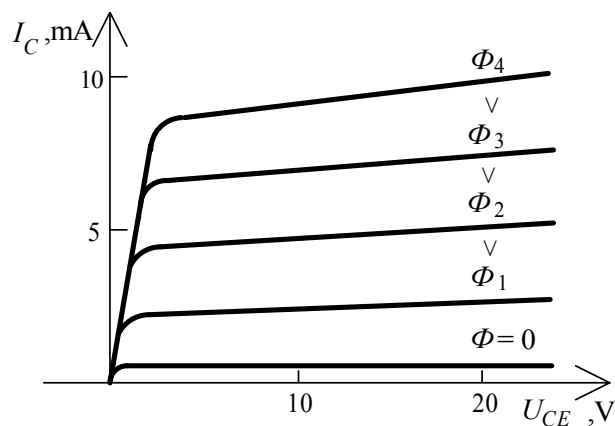
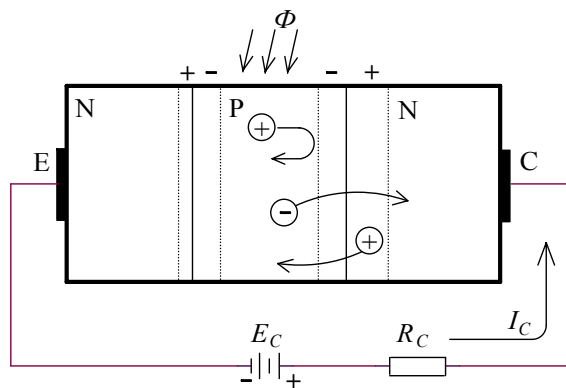


Фотогенераторен режим

вътрешното съпротивление и
к.п.д (до $10 \div 15 \%$).

Фототранзистори (ФТ)

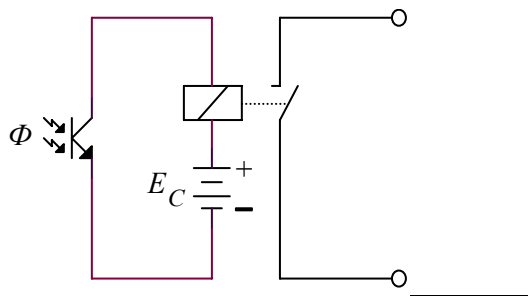
$$I_C = (\beta + 1)(I_\Phi + I_{CBO}) \approx \beta I_\Phi + I_{CEO}.$$



Фототранзисторът има $(\beta + 1)$ пъти по-висока чувствителност от фотодиода.

Има по-ниско бързодействие от ФД

ФТ се използва като фотодатчик



Оптрони

особености:

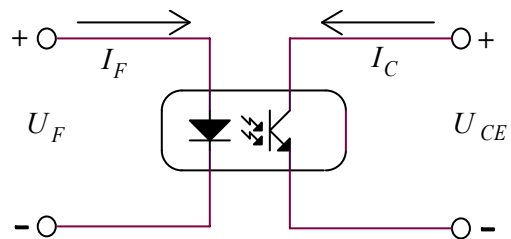
– независимо че оптронът е оптоелектронен елемент, светлината не фигурира в характеристиките в явен вид, а е междинна величина. На входа и на изхода на оптрона има само електрически величини (ток и напрежение);

– входната и изходната верига са галванично разделени, поради което оптронът има много голямо изолационно съпротивление ($10^{12} \div 10^{16} \Omega$).

Според вида на фотоприемника оптроните биват:

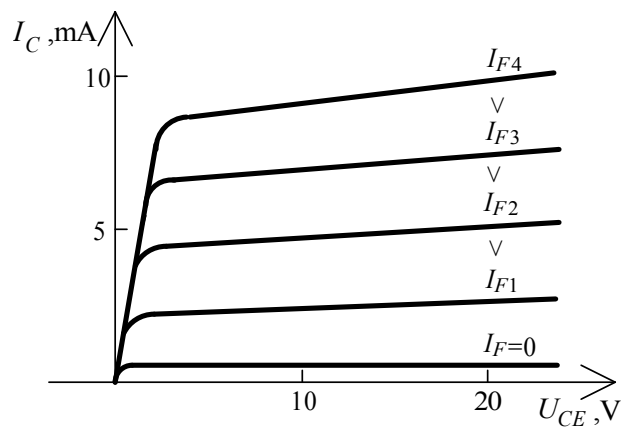
- фоторезисторен,
- фотодиоден,
- фототранзисторен и
- фототиристорен.

Фототранзисторен оптрон.

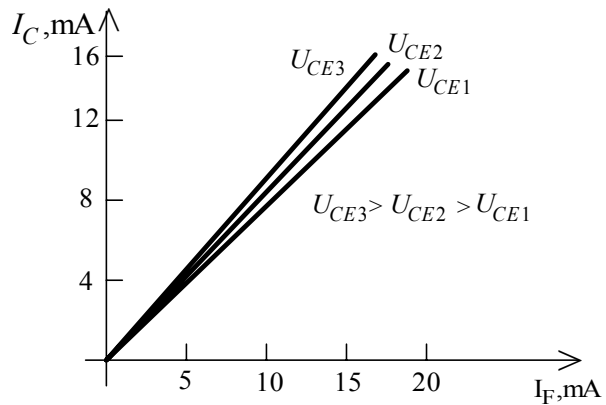


Исходни характеристики

$I_C = f(U_{CE})$ при $I_F = \text{const}$



Предавателни характеристики



$I_C = f(I_F)$ при $U_{CE} = const.$

коэффициент на предаване по ток на оптрона

- не е голям – $0.6 \div 1$.