

Использованные источники

- ❑ Лекции на д-р Фогелман, Университет – Карлсруе
- ❑ Лекции на д-р Клос, Университет – Карлсруе
- ❑ Лекции на д-р Крокол, Университет – Карлсруе
- ❑ <http://www.solarserver.de/wissen/photovoltaik.html#unt>
- ❑ <http://www.energiwelten.de/elexikon/lexikon/index3.htm>
- ❑ <http://www.elektronik-kompendium.de/sites>
- ❑ <http://www.prof-gossner.de/>
- ❑ <http://vcs.abdn.ac.uk/ENGINEERING/lasers/lasers.html>
- ❑ <http://people.fh-landshut.de/~gsh/>

Използвани означения

- ❑ Тема, която се среща за първи път
- ❑ Тема, която вече е позната

Полупроводникови елементи

- **PN-преход**
- Диоди
- Транзистори
- Загубна мощност, термично съпротивление

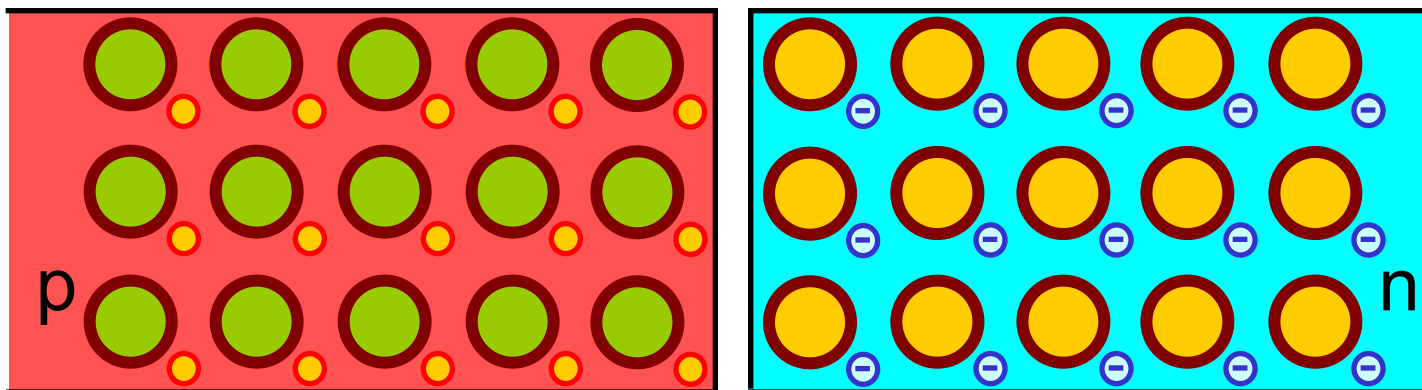
Полупроводникови елементи

Цел разглеждането :

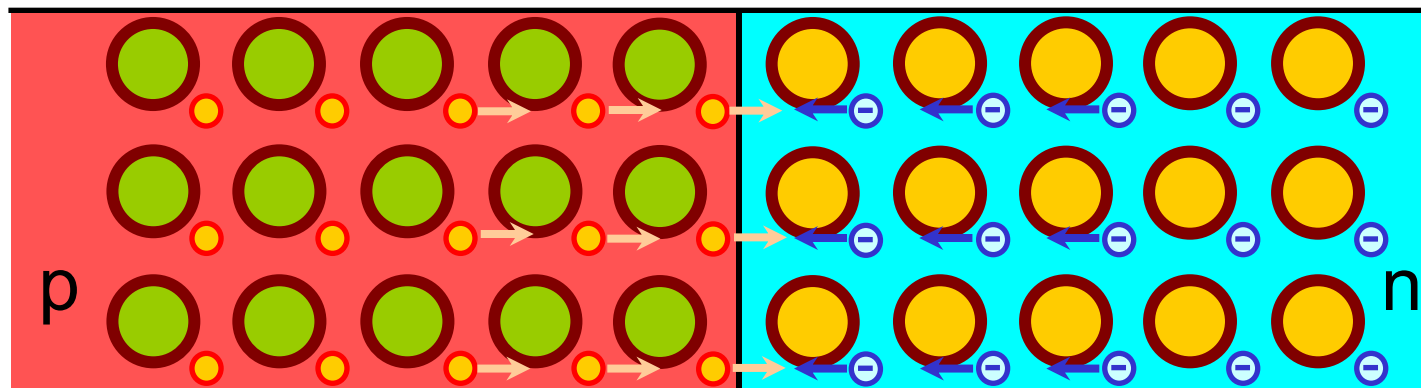
- да може да отговаряте на тези или подобни въпроси:
 - Какво е PN-преход, диод, транзистор;
 - Какви видове диоди и транзистори има;
 - Какви са основните им характеристики;
 - Какви са общите принципи в работата на елементите;
 - Има ли разлики, в какво се състоят?

PN-преход

- За да се получи такъв преход, двата типа полупроводници трябва да се доближат на междоатомно разстояние.
- В N-тип ПП има по един електрон до всеки атом на Phosphor
- В P-тип ПП има по една дупка до всеки атом на Bor



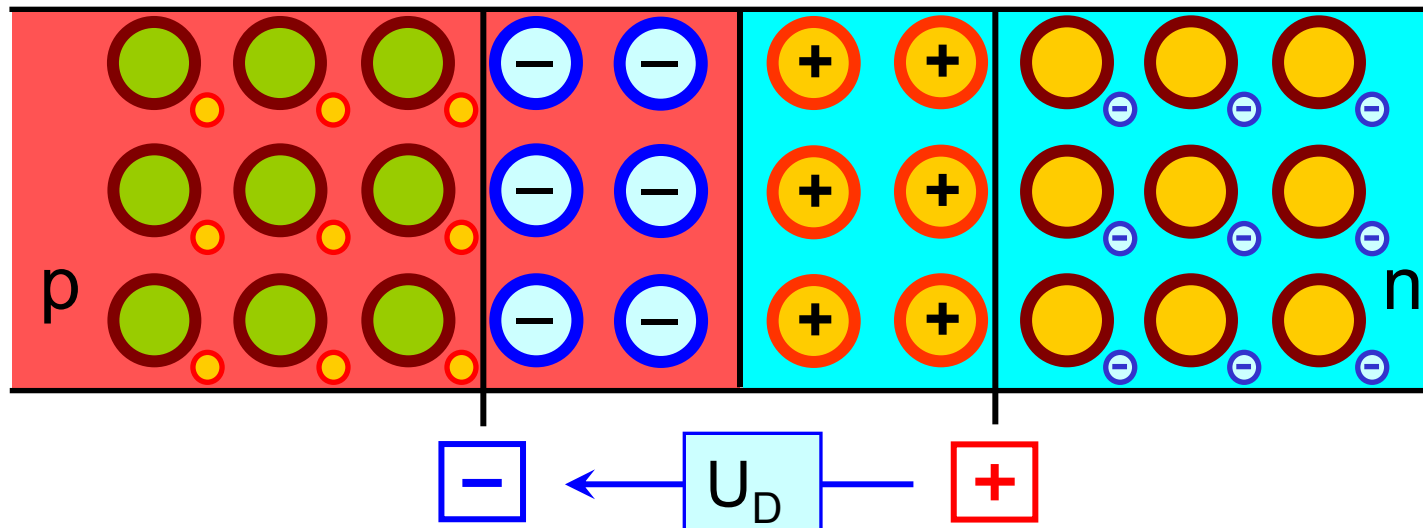
PN-преход



- Вследствие на дифузията на основните токоносители (електрони и дупки) и рекомбинирането им, в близост до pn-прехода няма свободни токоносители \Rightarrow **зона на обемен заряд**
- В n- и p-областите остават некомпенсирани, положително и отрицателно заредени ядра

PN-преход

- Некомпенсираните заряди отблъскват съответните основни токоносители
- Получава се електрическо поле (напрежение U_D), което пречи на по-нататъшното придвижване на основните токоносители



PN-преход

- ❑ Поради тази причина зоната на обемен заряд се нарича още спирац слой или обеднена зона.
- ❑ Тъй като в нея няма токоносители, съпротивлението на зоната е много голямо
- ❑ В реалния случай р- и n-областите са с различна концентрация на примесите.
- От това зависи как ще изглежда зоната на прехода.

Полупроводникови елементи

- *PN-преход*
- **Диоди**
- Транзистори
- Загубна мощност, термично съпротивление

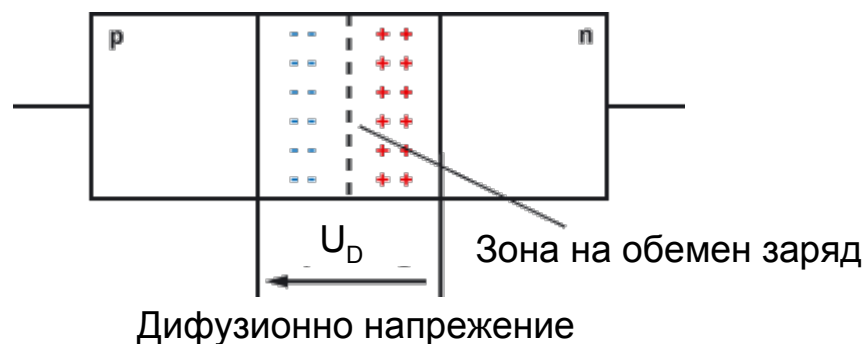
Диоди

- Ако от областите на PN-прехода се изведат електроди, получава се диод.



Символно означение

- Електродът от p-областта се нарича **анод (A)**;
- Електродът от n-областта се нарича **катод (K)**.

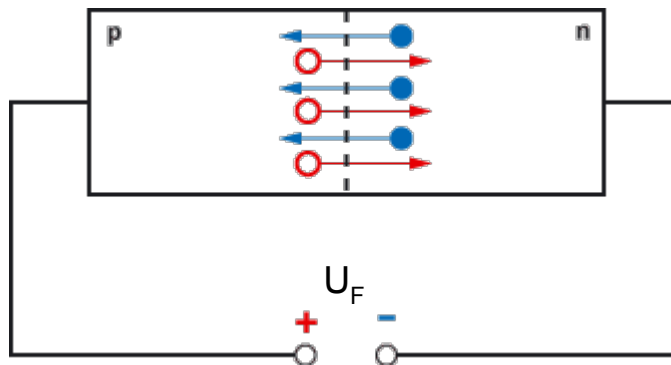


Диод

- В зависимост от това как се подава външно напрежение към изводите на диода са възможни два варианта:
- Свързване в права посока - когато на **анода** се подаде **плюса** на източника на напрежение, а на **катода** – **минуса**.
- Свързване в обратна посока (инверсно свързване) – когато на **анода** се подаде **минуса** на източника на напрежение, а на **катода** – **плюса**.

Диод. Свързване в права посока

- Приложеното външно напрежение U_F има обратна посока на дифузионното напрежение U_D
- При увеличаване на външното напрежение:
 - Зоната на обемен заряд намалява;
 - Все повече основни токоносители (електрони и дупки) могат да преминават през прехода;



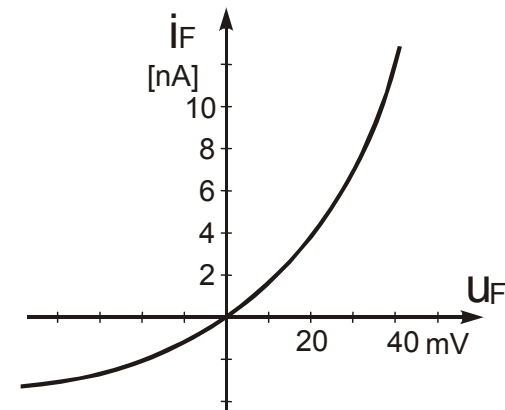
Диод. V-A характеристика

- Токът през диода в права посока I_F ще нараства експоненциално, тъй като се описва с уравнението:

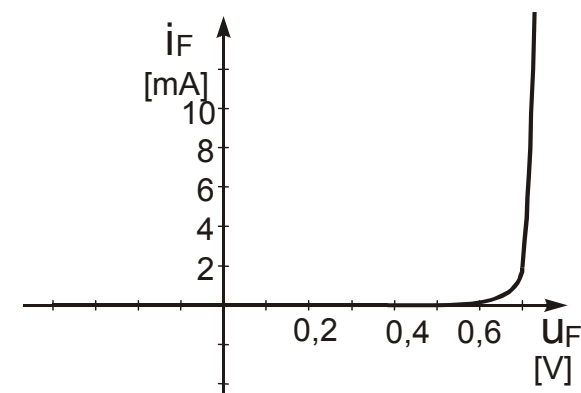
$$I_F = I_S \cdot \left(e^{\frac{U_F}{U_T}} - 1 \right) \approx I_S \cdot e^{\frac{U_F}{U_T}}, \text{ при } U_F > 0,1 \text{ V}$$

$$U_T = \frac{k \cdot T}{q} = 26 \text{ mV}, \text{ при } T = 300 \text{ K}$$

I_S – ток на насищане



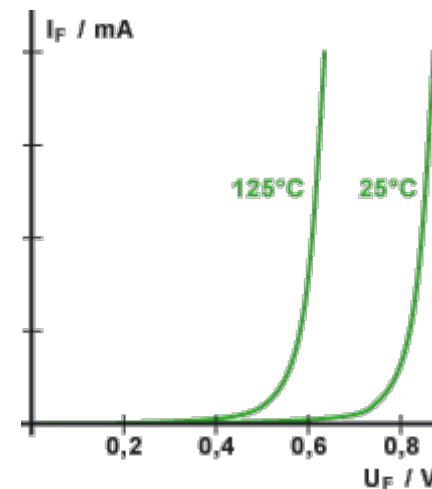
При много малки токове



При големи токове

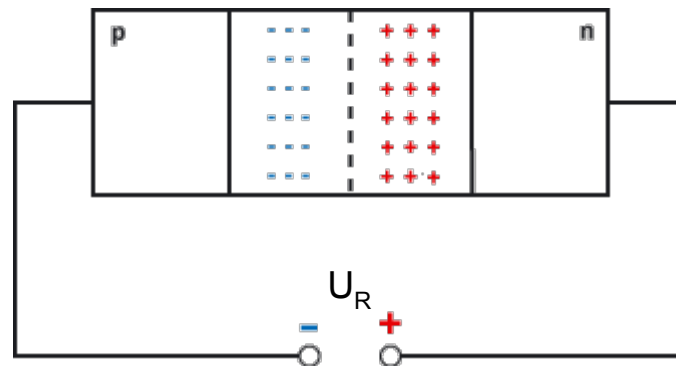
Диод. Температурна зависимост

- При промяна на температурата се променя и характеристиката на диода в права посока.
- Зависимостта $\frac{dU_F}{dT} \approx -2 \frac{\text{mV}}{\text{K}}$ е линейна:
- Тя се използва за измерване на температури в интервала от -20° до $+100^\circ$.
- При постоянен ток през диода напрежението върху диода е право пропорционално на температурата.



Диод. Свързване в обратна посока

- Приложеното външно напрежение U_R съвпада по посока с дифузионното напрежение U_D
- При увеличаване на външното напрежение:
 - Зоната на обемен заряд се разширява;
 - През прехода не могат да преминават основни токоносители (електрони и дупки);

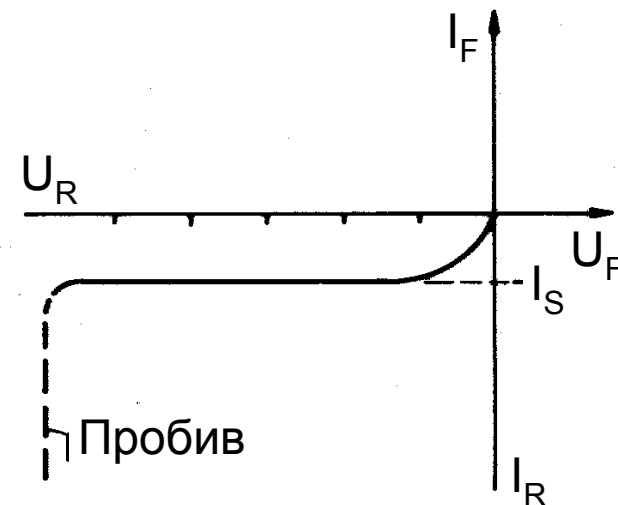


Диод. V-A характеристика

- Токът през диода в обратна посока I_R остава постоянен:

$$I_R = I_S \cdot \left(\frac{1}{e^{\frac{U_R}{U_T}}} - 1 \right) \approx -I_S, \text{ при } U_R \gg U_T$$

- Токът на насищане I_S е силно зависим от температурата, тъй като е резултат от генериране на основни токоносители в зоната на обемен заряд
- Остава постоянен, понеже зоната расте

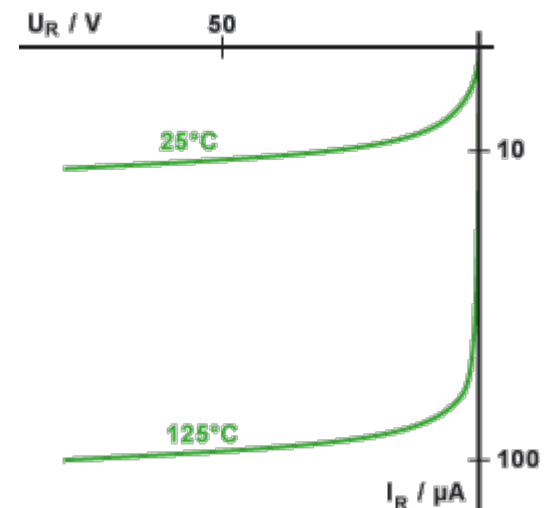


Диод. V-A характеристика

- ❑ При високи инверсни напрежения се достига до пробив, тъй като поради силното електрическо поле електрони лавинообразно напускат валентната зона.
- ❑ Напрежението на пробив е максимално допустимото напрежение при инверсно свързване.
- ❑ Напреженията на пробив са в граници от V до kV.
- Отделената мощност е голяма даже и при малки токове, което води до разрушаване на PN-прехода!

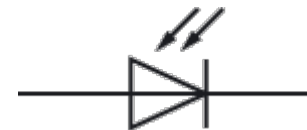
Диод. Температурна зависимост

- При по-висока температура токоносителите се сблъскват по-често и се намалява подвижността им.
- Но при тази висока температура се генерират нови токоносители, което повишава проводимостта.
- Повишаването на проводимостта води до по-голям обратен ток на насищане.
- Токът на насищане нараства почти експоненциално с повишаване на температурата.

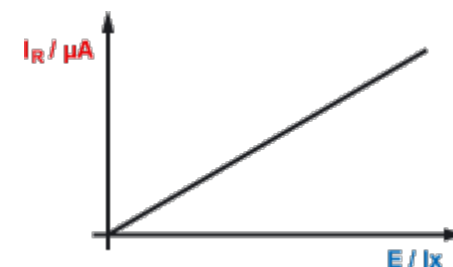
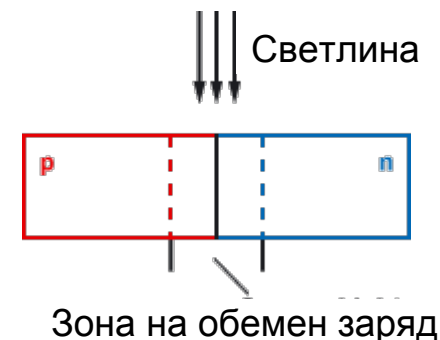


Фотодиод

- ❑ Фотодиодите преобразуват светлина в електрически сигнал
- ❑ Светлината попадайки върху PN-прехода предизвиква генериране на основни токоносители
- Използват се по-често в инверсно свързване
- Зависимостта на обратния ток от осветеността е линейна



Символно означение

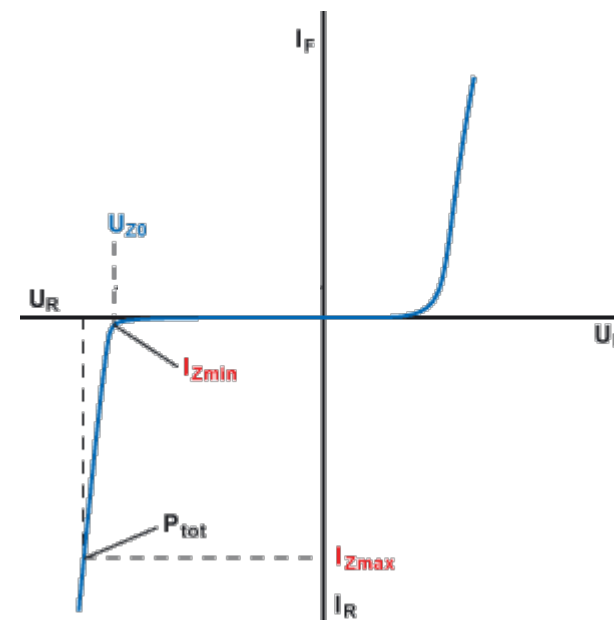


Ценеров диод (стабилитрон)

- ❑ Използва се за стабилизиране на изправено пулсиращо напрежение
 - Свързва се в обратна посока
 - В права посока работи като обикновен диод
- ❑ При изменение на тока от I_{Zmin} до I_{Zmax} напрежението върху диода остава почти постоянно
- ❑ Ако се превиши I_{Zmax} настъпва необратим пробив



Символно означение

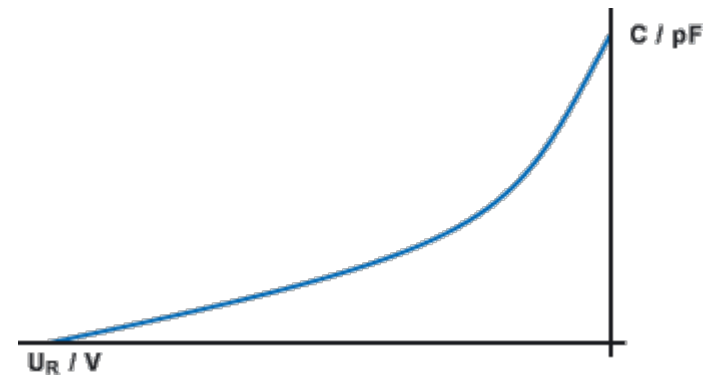


Варикап

- ❑ Използва се като кондензатор за настройка на трептящите кръгове в радио- и телевизионни приемници
- Свързва се в обратна посока
- ❑ Капацитетът зависи нелинейно от приложеното напрежение
- ❑ Това е капацитетът на зоната на обемен заряд, който намалява при увеличаване на напрежението вследствие на разширяването на зоната

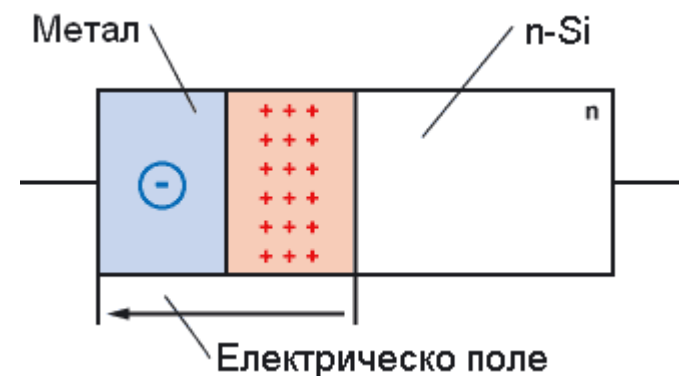


Символно означение



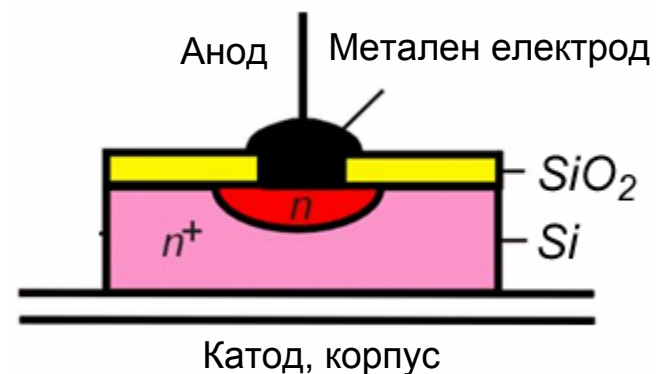
Schottky-диод (Hot-Carrier-Diode)

- ❑ Електроните от n-областта (основните токоносители) преминават в метала
- На границата между метал и n-тип полупроводник също се появява зона на обемен заряд
- ❑ Няма неосновни токоносители (дупки)
- Превключването на диода от запущено в отпушено състояние и обратно става много по-бързо
- Много по-ниско напрежение в права посока \Rightarrow по-малка отделена мощност



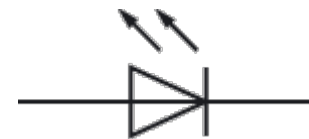
Schottky-диод

- По-ниско напрежение в обратна посока
- По-голям обратен ток \Rightarrow по-големи загуби (мощност)
- Използва се:
 - в интегралната схемотехника заради малкото напрежение в права посока
 - в микровълновата техника заради малките времена на превключване

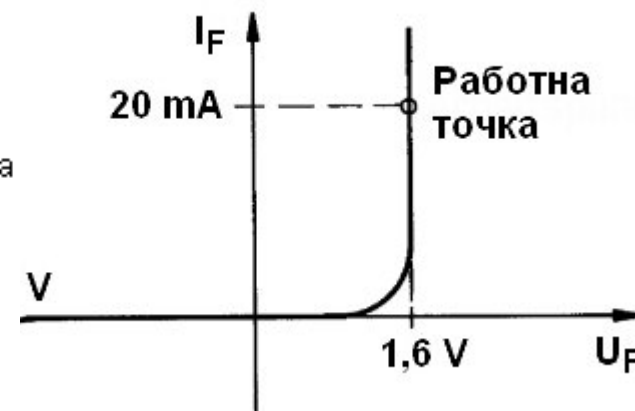
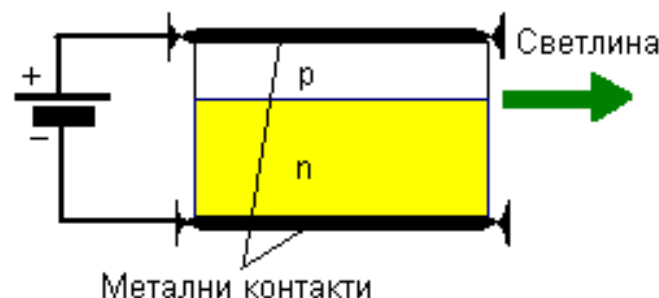
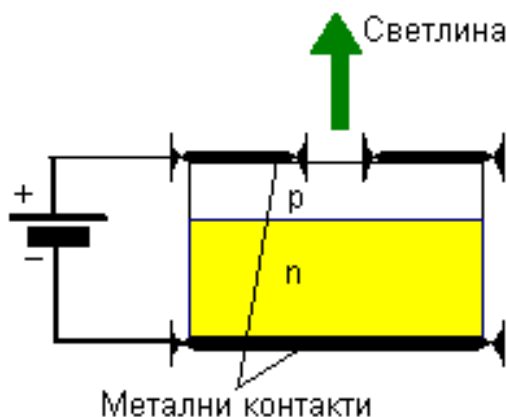


Светодиоди

- ❑ Светодиодите преобразуват електрическата енергия в светлина
- ❑ През тях се пропуска ток от няколко mA в права посока
- При рекомбинирането на електрони и дупки се отделя светлина (през тънката p-област, или странично)

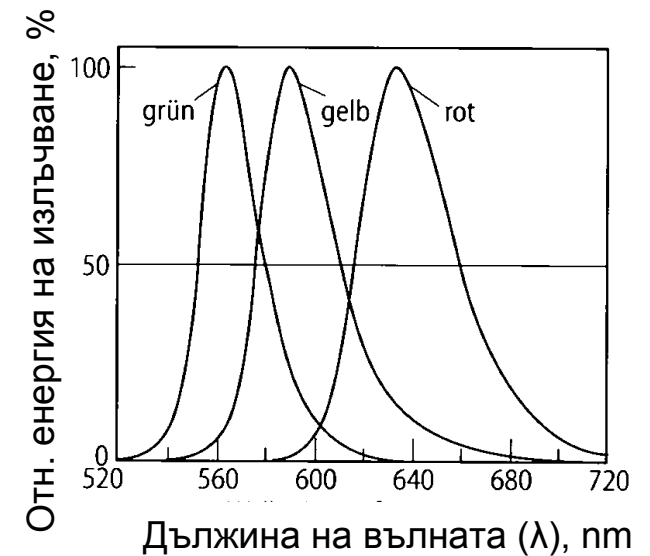


Символно означение



Светодиоди

Цвят	Напрежение U_F при $I_F=20\text{ mA}$	Материал	Дължина на вълната
IR	1,3	GaAs:Si	930 nm
червен	1,6	GaP:Zn,O	690 nm
червен	1,8	GaAs _{0,6} P _{0,4}	650 nm
оранжев	2,0	GaAs _{0,35} P _{0,65} :N	630 nm
жълт	2,2	GaAs _{0,15} P _{0,85} :N	590 nm
зелен	2,4	GaP:N	570 nm
син	4	SiC:Al,N	470 nm
син	4,5	GaN:Zn	440 nm



- Енергията на излъчването се увеличава от инфрачервено към синьо
- Увеличава се и напрежението U_F на светодиодите

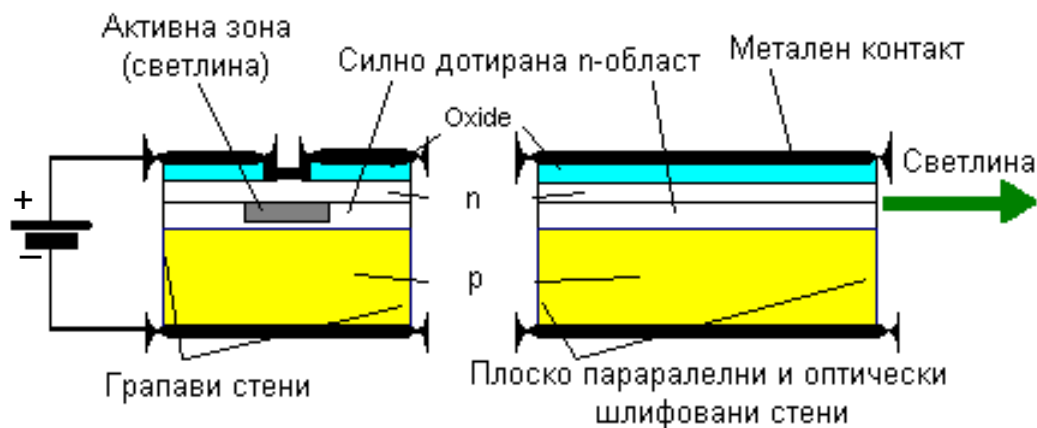
Светодиоди



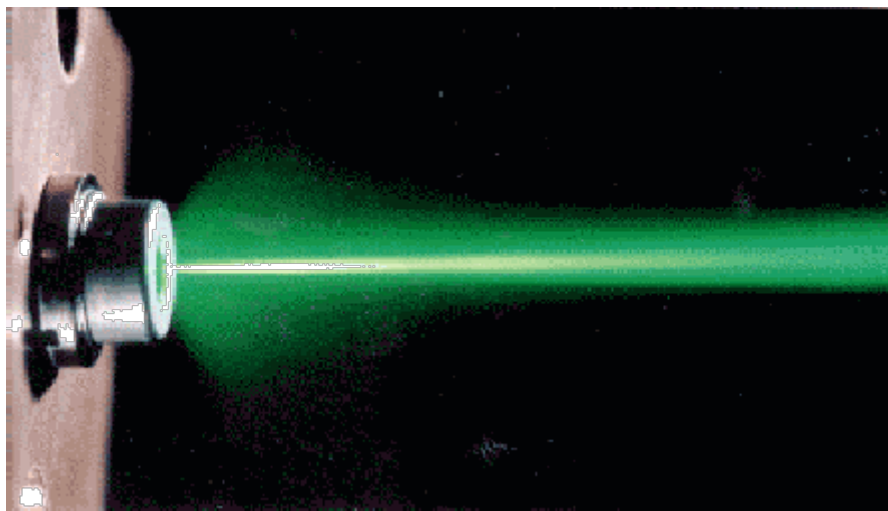
- 7-сегментни светодиодни индикатори
- Различни видове светодиоди

Лазерен диод (LASER)

- Light **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation
- В структурата на LED се добавя n-област с много примеси
- При протичане на ток в зоната на обемен заряд се получава лавинообразна рекомбинация, която се усилва от оптически затворения обем \Rightarrow светлина

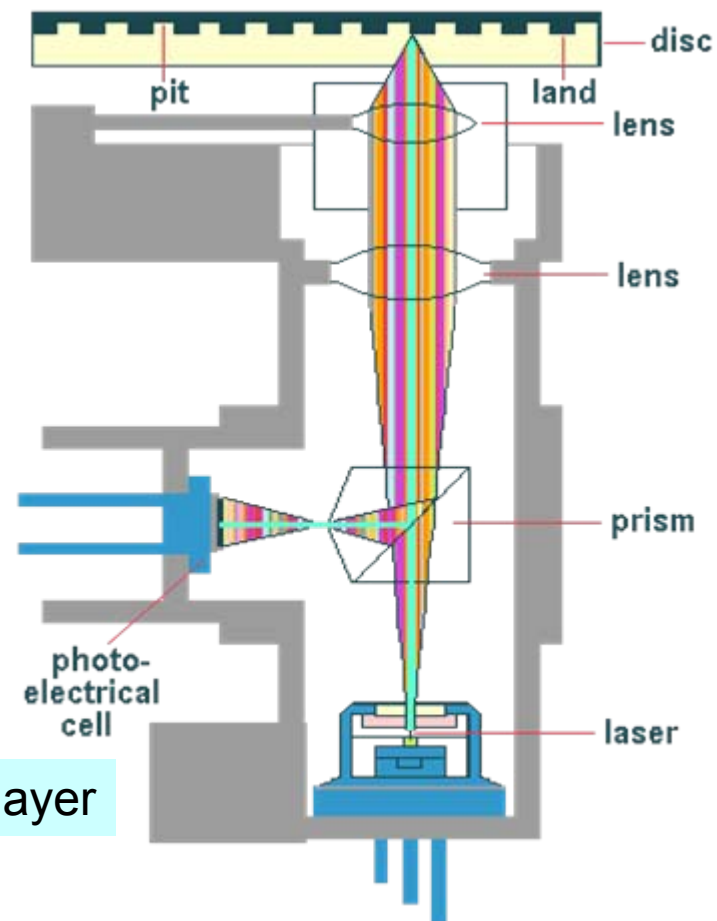


Лазерен диод



Лазерен лъч

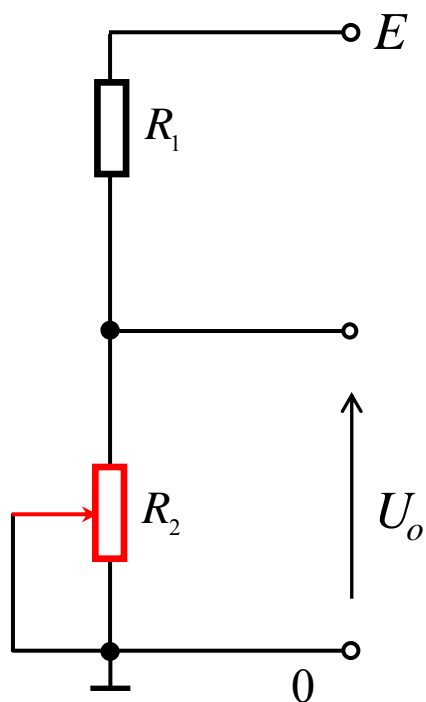
Приложение на лазерен диод в CD-Player



Полупроводникови елементи

- *PN-преход*
- *Диоди*
- **Транзистори**
- Загубна мощност, термично съпротивление

Използване на променлив резистор



$$U_o = E \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

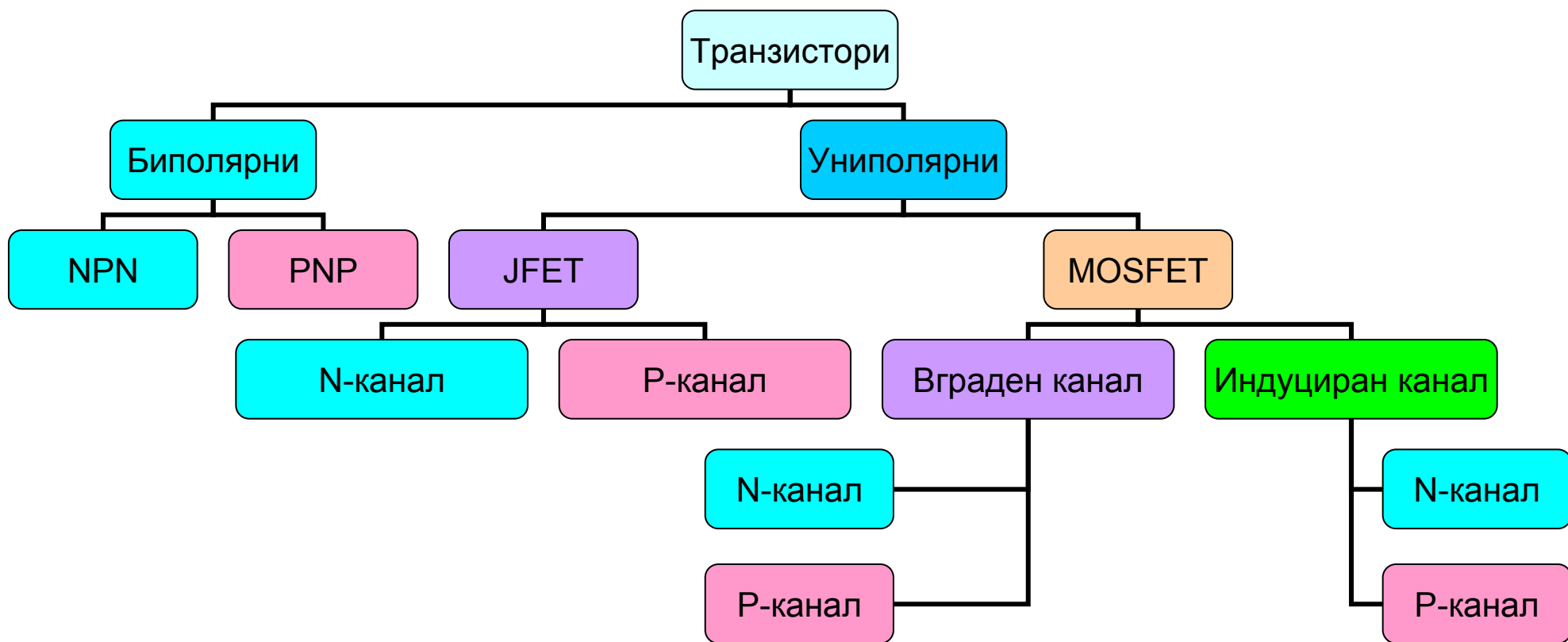
При $R_2 \gg R_1$ (и плъзгачът е най - долу)

$$U_o \approx E$$

При плъзгач най - горе :

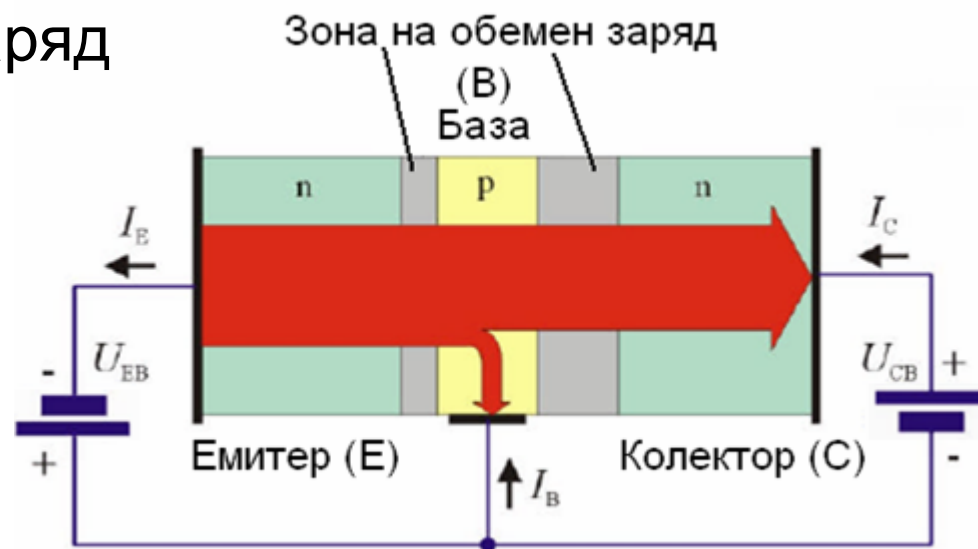
$$U_o = 0$$

Видове транзистори



Биполярен транзистор (NPN)

- ❑ Има две силно легирани (с висока концентрация на примесите) n-области и една ниско легирана и тънка p-област между тях, наречена **база**.
- ❑ Двете n-области се наричат **емитер** и **колектор**
 - Има две зони на обемен заряд
 - Или два PN-прехода
- ❑ Всеки от тях може да бъде свързан в права или обратна посока
- Четири възможни режима на работа

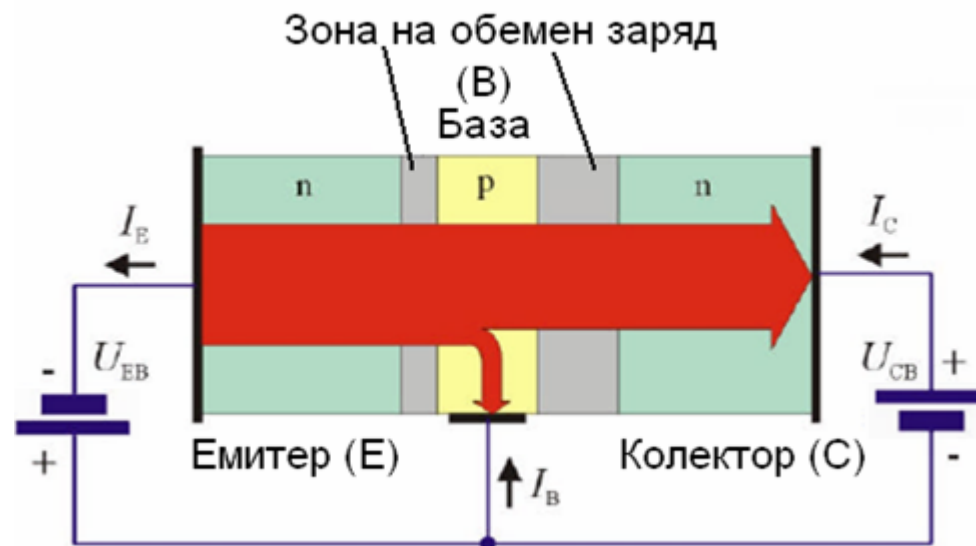


Биполярен транзистор (NPN)

- *Нормален активен режим* \Rightarrow преходът **Е-В** е включен в права посока, докато преходът **С-В** е в инверсно свързване
- *Наситен транзистор* \Rightarrow и двата прехода са свързани в права посока
- *Запушен транзистор* \Rightarrow и двата прехода са свързани в обратна посока
- *Инверсен активен режим* \Rightarrow преходът **С-В** е включен в права посока, докато преходът **Е-В** е в инверсно свързване

Биполярен транзистор (NPN)

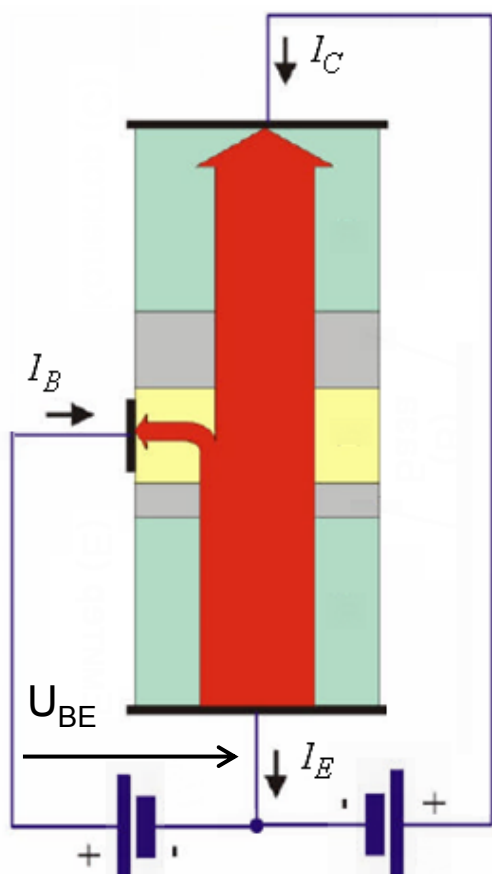
- При *нормален активен режим* от **Е** към **В** се придвижват електрони. От **В** към **Е** се придвижват дупки, но те са значително по-малко, тъй като базата е слабо легирана.
- Има **два типа токоносители**, но свойствата на транзистора се определят от електроните.
- Повечето от тях преди да рекомбинират в базата достигат до зоната на обемен заряд на прехода С-В и се изтеглят към колектора от положителното напрежение С-В.



Биполярен транзистор (NPN)

- Базовият ток е много по-малък както от емитерния, така и от колекторния ток ($I_E = I_C + I_B$)
- В зависимост от това как са подадени напреженията към преходите и кой електрод е общ се различават три схеми на свързване – обща база (ОВ), общ емитер (ОЕ), и общ колектор (ОС) ➡ имат различни свойства
- Коефициент на усилване (предаване) по ток:
 - Отношението на изходния към входния ток
- Стръмност:
 - Отношението на промяната на изходния ток към промяната на входното напрежение

Усилване по ток (схема ОЕ)



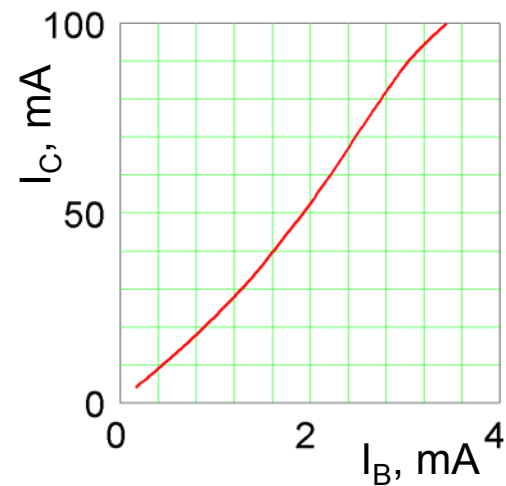
□ Коефициент на усилване:

➤ За постоянен ток (статичен)

$$\bar{\beta} = \frac{I_C}{I_B}$$

➤ За променлив ток (динамичен)

$$\beta = \frac{dI_C}{dI_B}$$

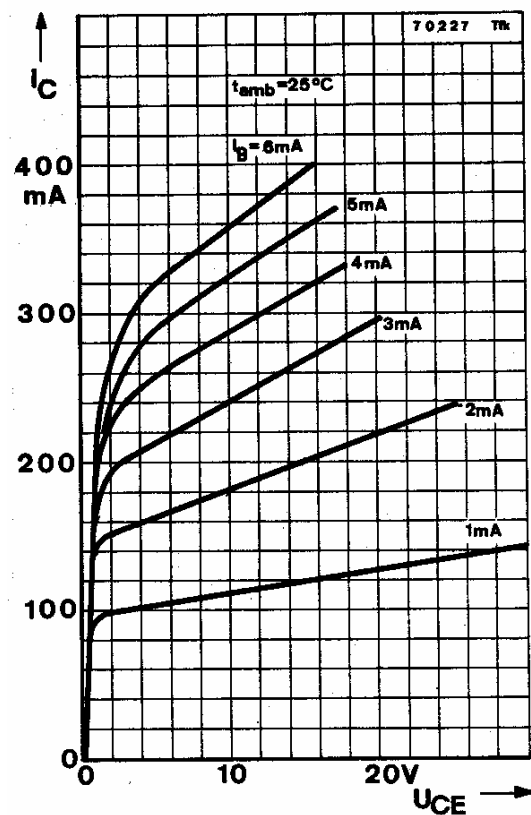


□ Коефициентът на усилване зависи силно от производствените толеранси и може да има големи разлики между отделните екземпляри

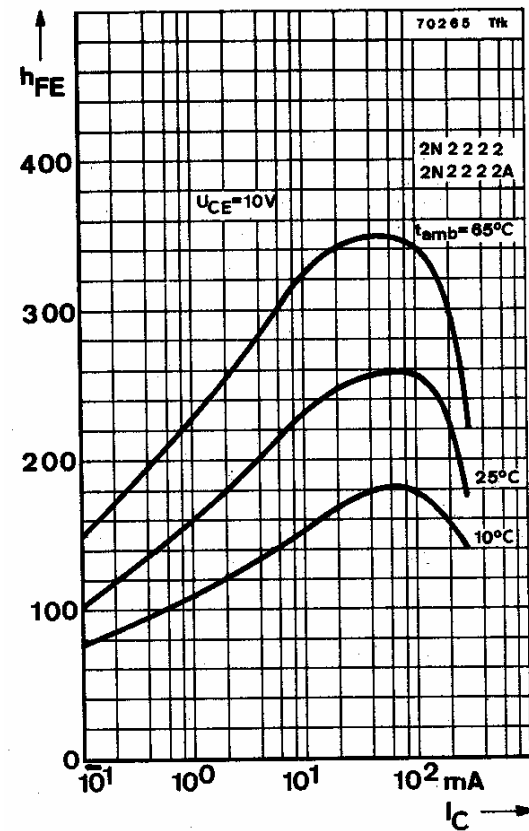
Стръмност (схема ОЕ)

- Преходът В-Е е в права посока, т.е. $I_E = I_S e^{\frac{U_{BE}}{U_T}}$
- Тъй като по-голямата част от електроните, влизащи в базата преминават в колектора ($I_C \approx I_E$), то $I_C = I_S e^{\frac{U_{BE}}{U_T}}$
- $$S = \frac{dI_C}{dU_{BE}} = I_S \frac{de^{\frac{U_{BE}}{U_T}}}{dU_{BE}} = \frac{I_S}{U_T} e^{\frac{U_{BE}}{U_T}} = \frac{I_C}{U_T}$$
- Стръмността слабо зависи от температурата и производствените толеранси
- Коефициентът на усилване по ток и стръмността се определят при $U_{CE} = \text{const.}$

Статични характеристики



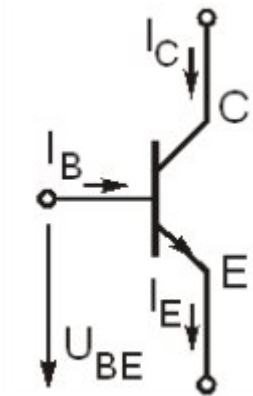
Изходна характеристика



Коефициент на усилване по ток ($h_{FE} = \beta$)

Символни означения

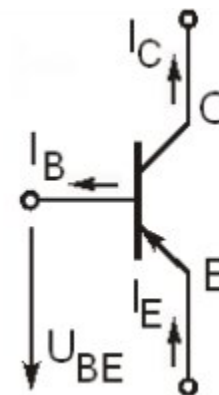
NPN-транзистор



$$0 < U_{BE} < 0,6 \text{ V}$$

$$U_{CE} > 0,6 \text{ V}$$

PNP-транзистор

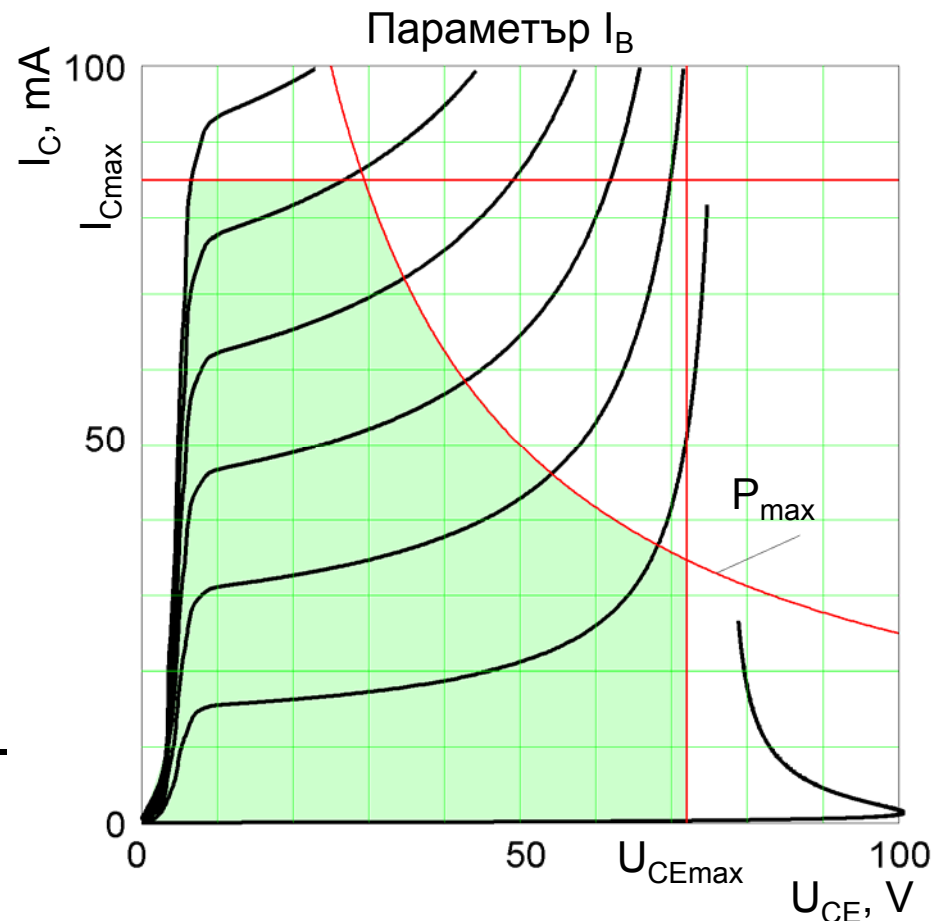


$$-0,6 \text{ V} < U_{BE} < 0$$

$$U_{CE} < -0,6 \text{ V}$$

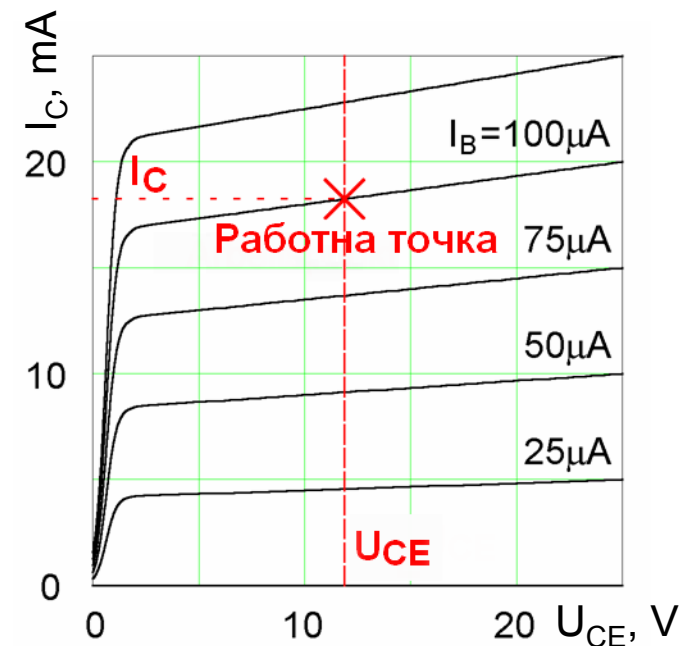
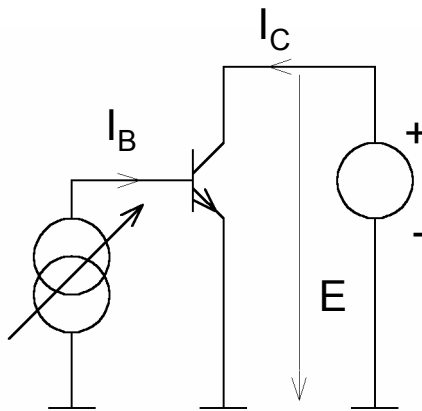
Работен обхват

- ❑ Максималните стойности зависят :
- ❑ ток I_{Cmax} \Rightarrow от дебелината на проводника за бондиране
- ❑ Напрежение U_{CEmax} \Rightarrow от пробивното напрежение
- ❑ Мощност P_{max} \Rightarrow от отделената топлина
- Оградената в зелено работна зона е известна като SOA (Safe Operating Area)



Работна точка

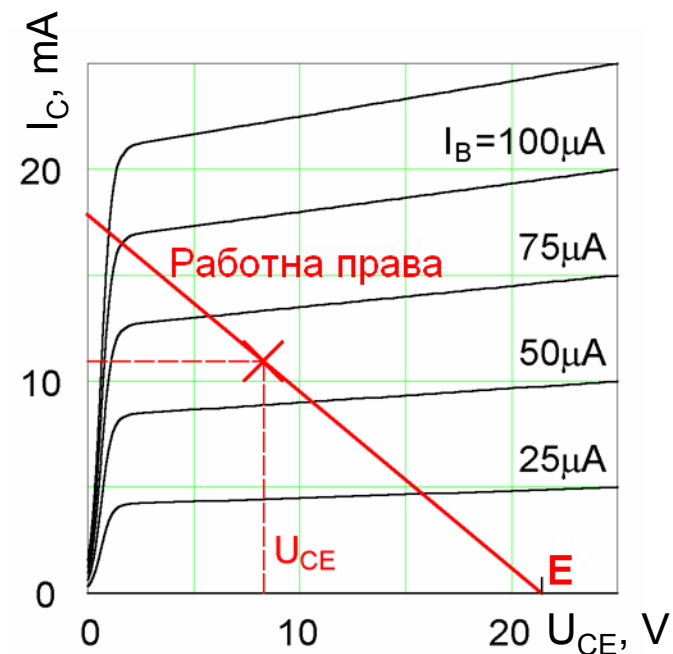
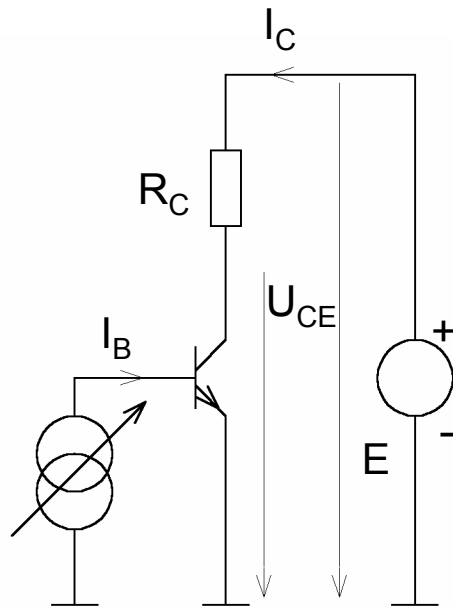
- ❑ Работната точка е произволна комбинация от напрежение колектор-емитер и колекторен ток в разрешения работен обхват на транзистора
- Положението на точката се определя чрез базовия ток



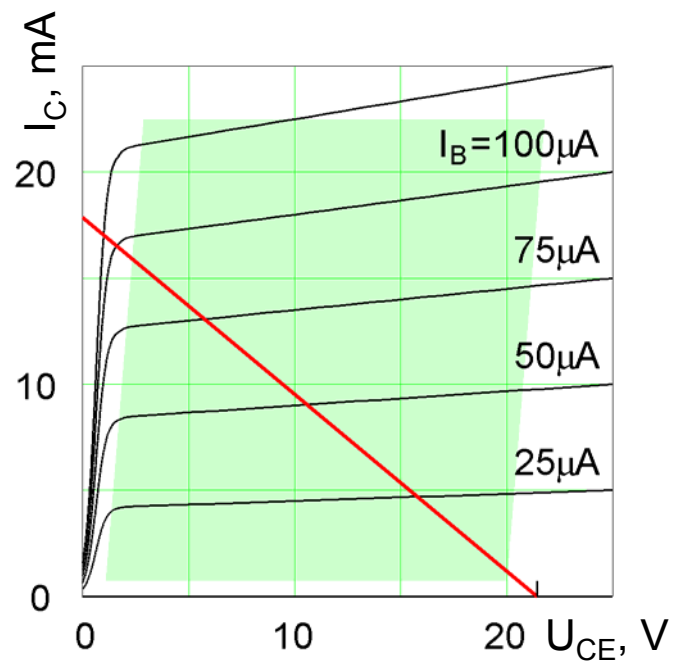
Работна (товарна) права

- ❑ Колекторният ток I_C създава пад на напрежение върху резистора R_C .
- Вследствие на това се изменя напрежението колектор-емитер U_{CE} .

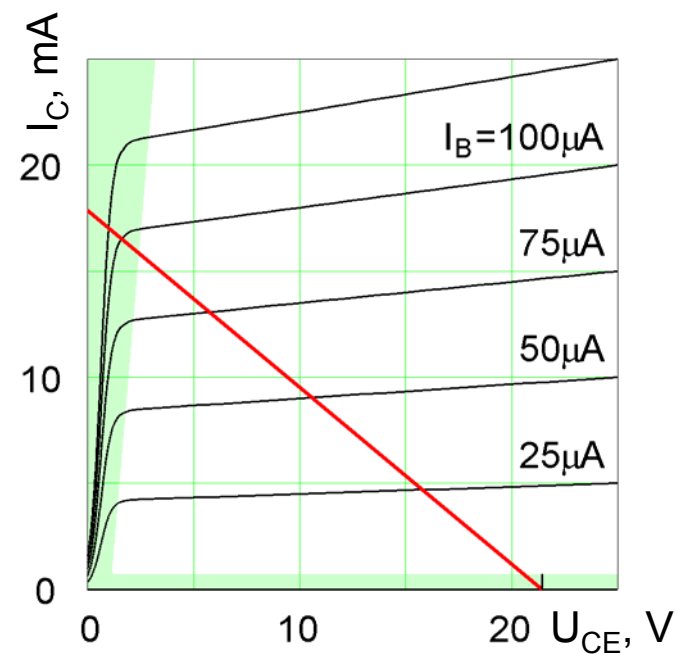
$$U_{CE} = E - R_C \cdot I_C$$



Работни режими

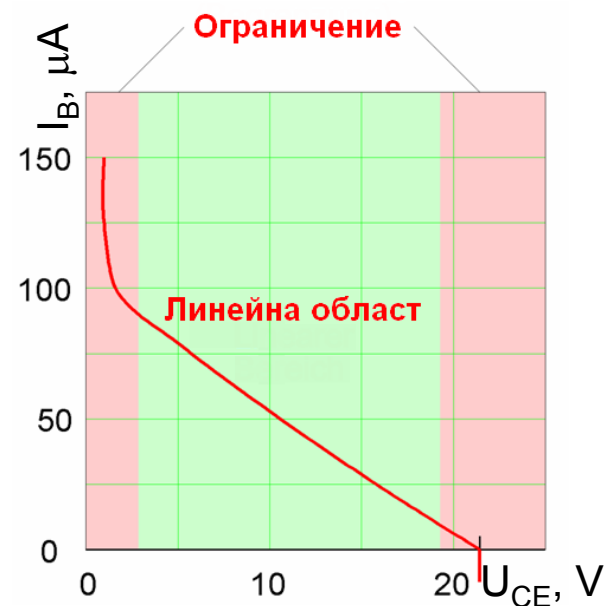
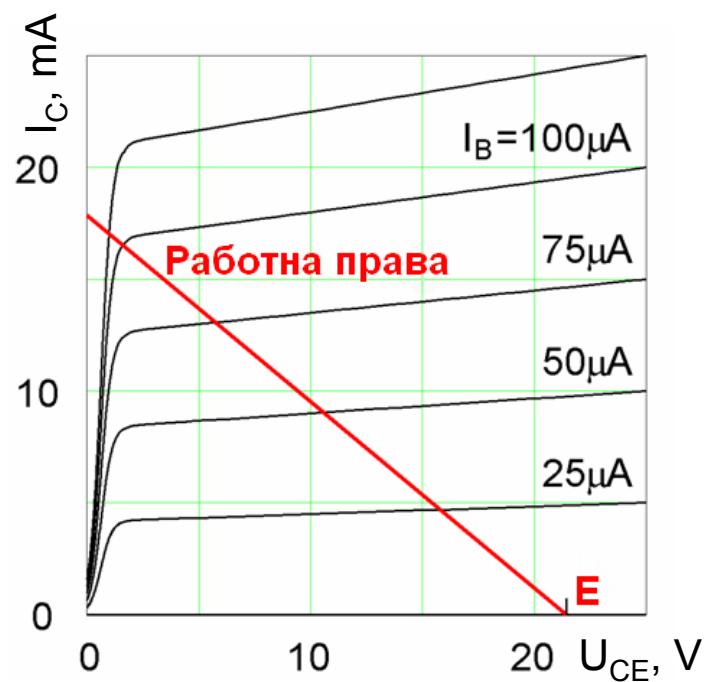


Линеен режим: Изходният сигнал зависи линейно от входния.



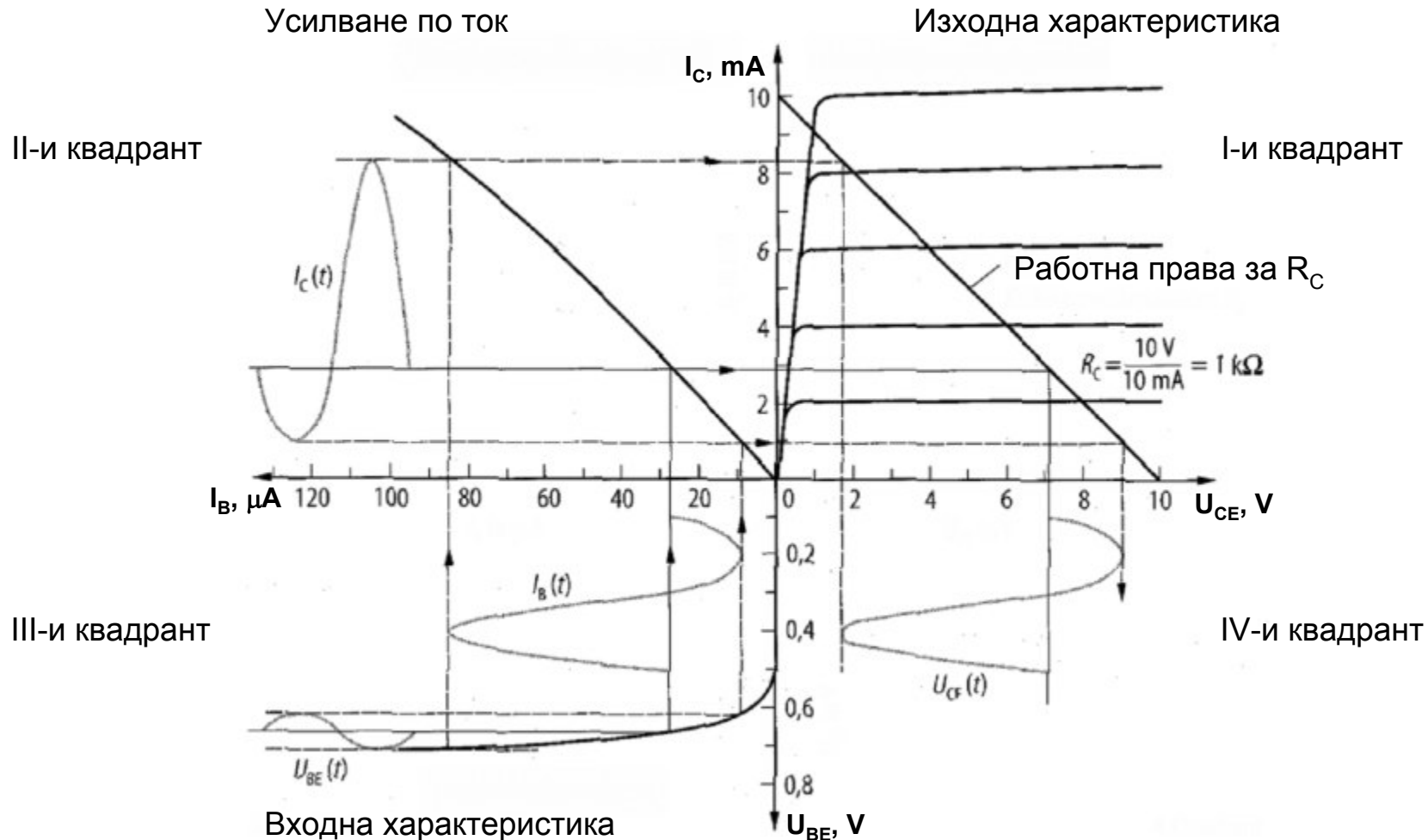
Режим на ограничение: Изходният сигнал не следва изменението на входния.

Работни режими

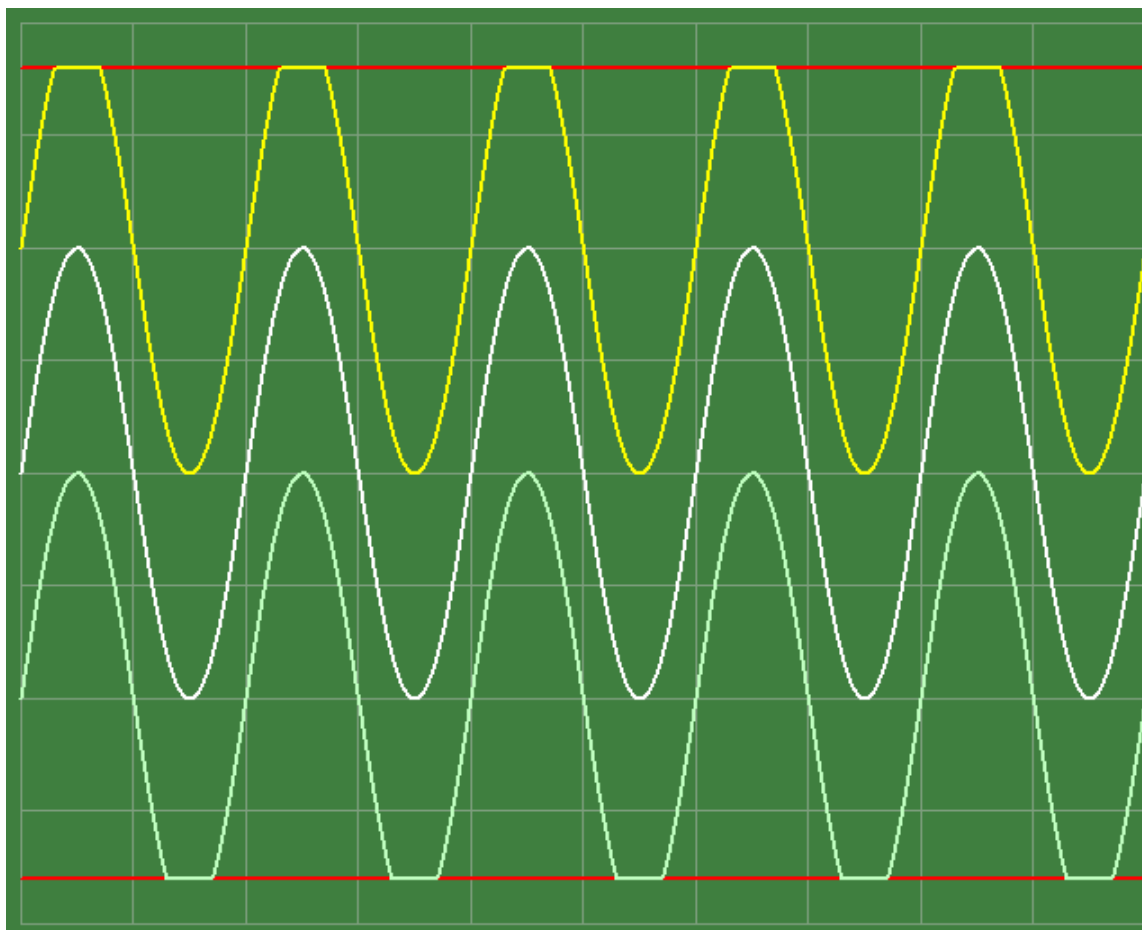


С нарастване на базовия ток работната точка се премества по работната права от запушено състояние на транзистора (дясна зона на ограничение) през линейната област до наситено състояние (лява зона)

Работа в линеен режим (усилване)

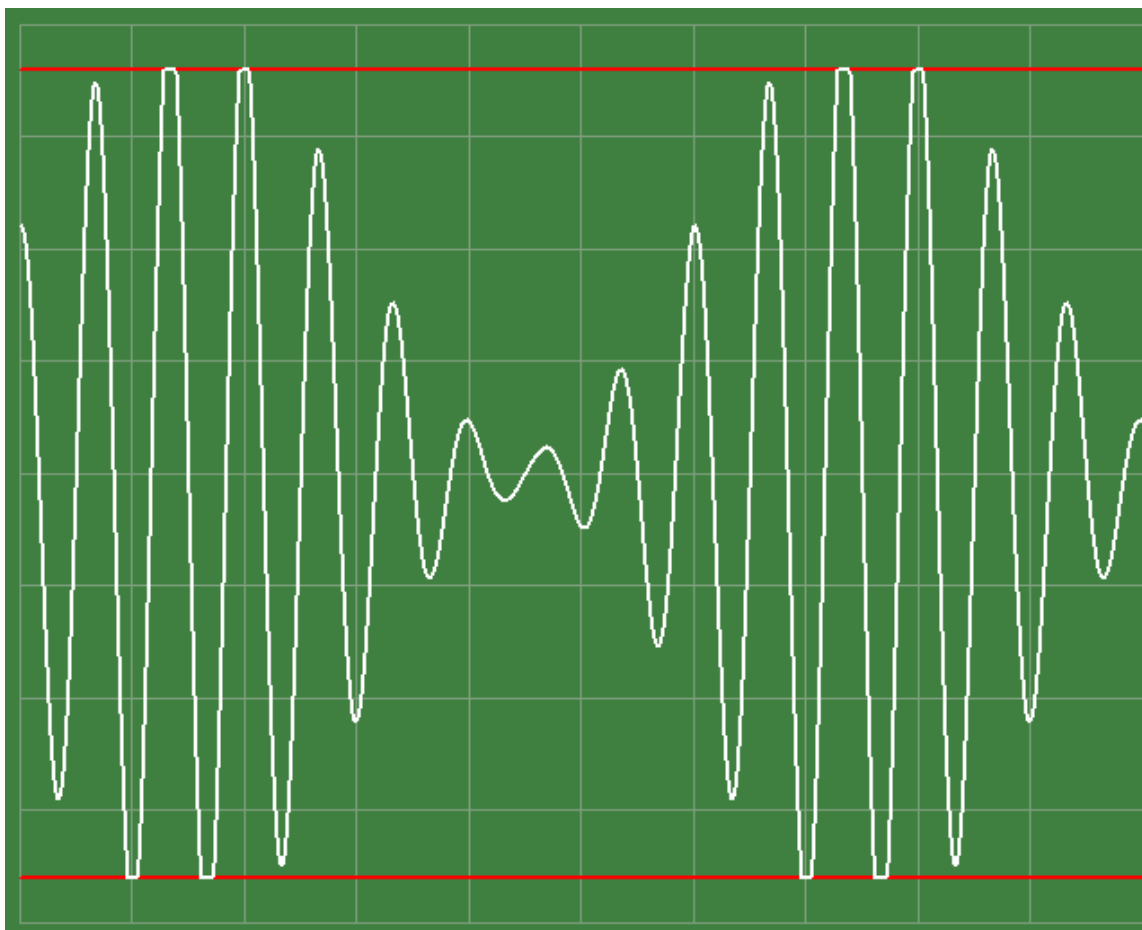


Усилен синусоидален сигнал



- червено: ограничение
- бяло: не изкривен сигнал.
- жълто: сигнал, ограничен отгоре, поради запусване на транзистора.
- зелено: сигнал, ограничен отдолу, поради насищане на транзистора.

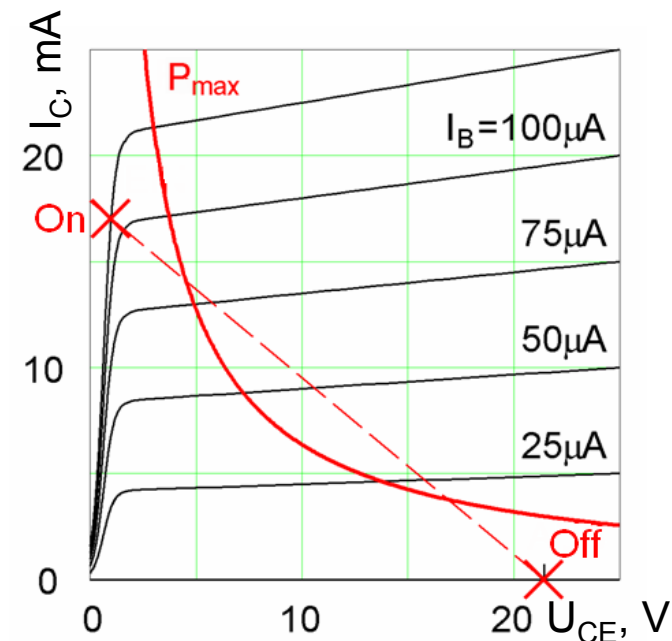
Амплитудно модулиран ВЧ сигнал



- При прекомерно усилване настъпва ограничение от двете страни

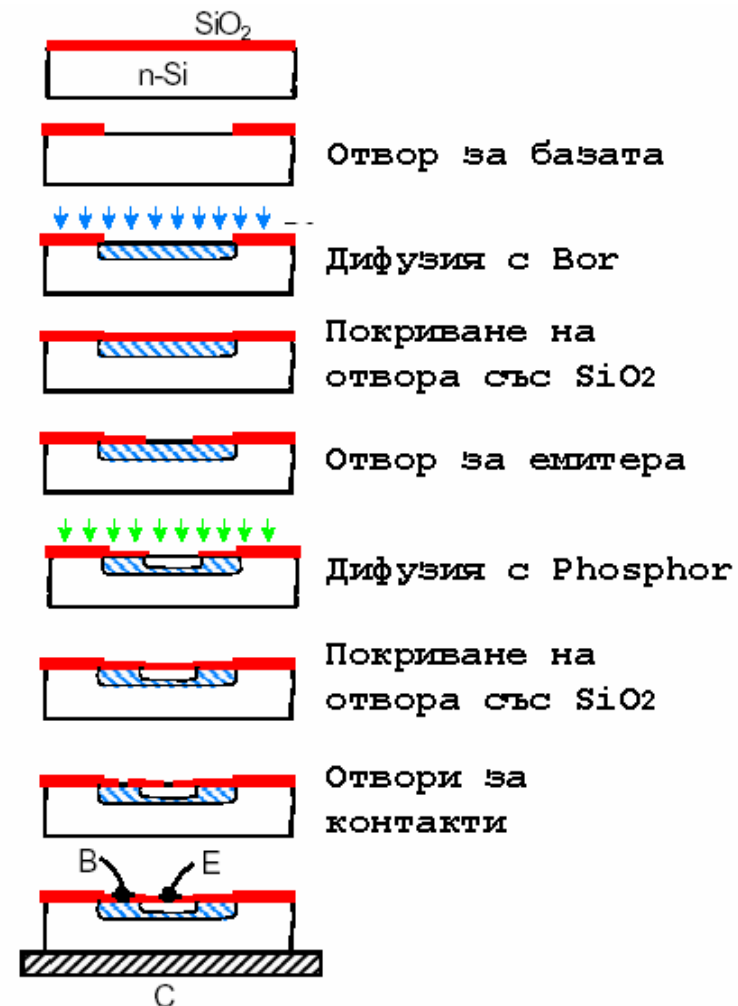
Работа в режим на ограничение

- ❑ Използват се само две състояния на транзистора:
- ❑ Използва се като ключ
 - Запушен (Off, Изкл.)
 - Наситен (On, Вкл.)
- ❑ Тези две състояния могат да представят двоичните числа в цифровата техника (1Bit)
- ❑ В двете крайни точки се отделя малко загубна мощност
- ❑ Работната точка трябва бързо да преминава през линейната област (там загубната мощност е голяма)



Изработка на транзистор (NPN)

- Върху шайбата с чист ПП се провеждат поредица от операции за да се произведат необходимите елементи
- Транзистори, диоди, резистори, ...
- Направата на отвори след дифузията включва:
оксидиране, покриване с фотолак, осветяване през маска, промиване, ецване

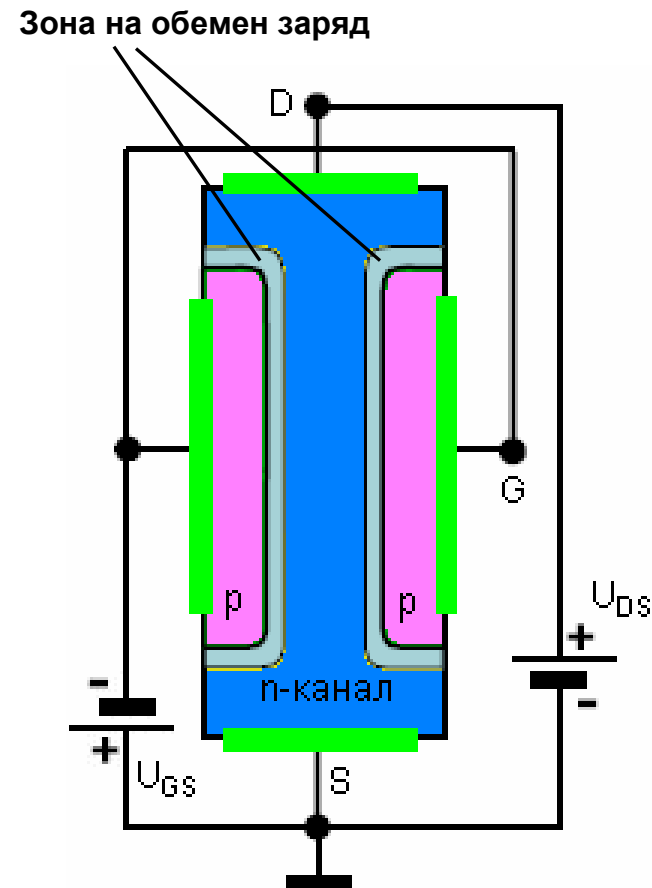


Униполярни транзистори

- ❑ Биполярните транзистори се управляват с ток чрез инжектираните от PN-прехода токоносители
- ❑ Униполярните транзистори се управляват с **напрежение (поле)**, затова по-често се наричат
 - FET (**F**ield **E**ffect **T**ransistors) ⇨ полеви транзистори
- ❑ J е означението на английски за PN-преход
 - JFET е полеви транзистор, управляван чрез инверсно свързан PN-преход
- ❑ MOS (**M**etal **O**xide **S**emiconductor)
 - MOSFET е полеви транзистор, управляван през изолиращ слой

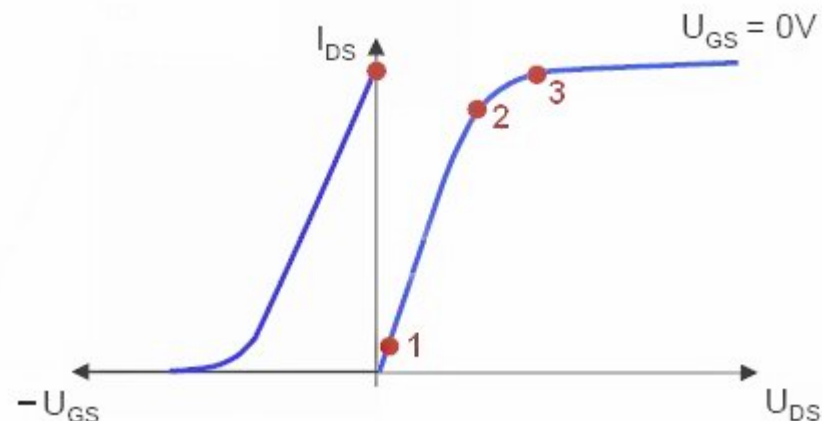
JFET (n-канал)

- Каналът е от n-тип ПП, в него има само един вид токоносители – електрони
- В двата края на канала са изведени изводи (**S**ource – давам, **D**rain – събирам)
- Управляващият електрод, свързан към двете p-области, се нарича **G**ate



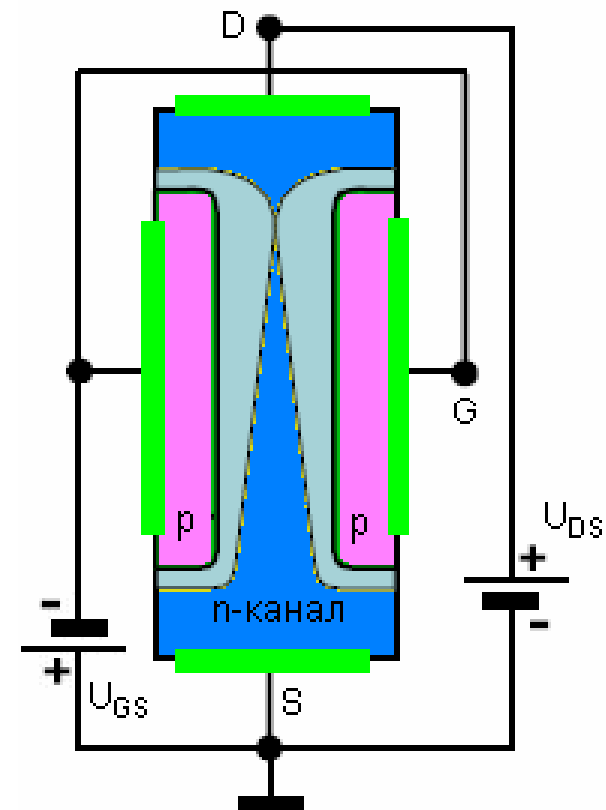
JFET (n-канал)

- Ако $U_{GS} = 0 \text{ V}$ каналът е проводящ
- При подаване на $U_{DS} > 0 \text{ V}$ електроните ще се придвижват от S към D.
- С увеличаване на U_{DS} токът през канала ще расте като се подчинява на закона на ОМ (затова зоната от началото през т.1 до т.2 се нарича **омична зона**).
- Нарастващото напрежение U_{DS} предизвиква изкривяване на зоната на обемен заряд:



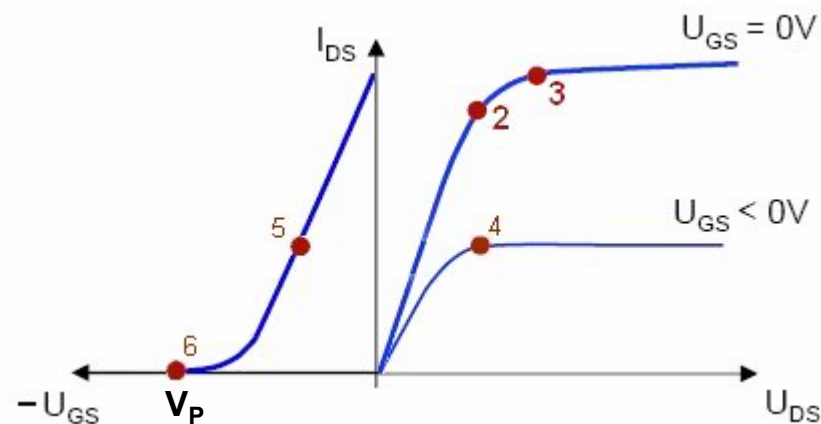
JFET (n-канал)

- Каналът се стеснява
- Токът вече не се изменя съгласно закона Ом (зоната между т.2 и т.3)
- ❑ След т.3 каналът вече е прищипан изцяло ($U_{DS} > U_{DSP}$) и токът се ограничава – достига се max. възможен ток за транзистора I_{DSS} – ток на насищане
- P от Pinch off



JFET (n-канал)

- При $U_{GS} < 0 \text{ V}$ (т. 5 и т.4):
 - Зоната на обемен заряд ще се разшири допълнително симетрично по цялата дължина на канала
 - При подаване на U_{DS} ще се повторят същите процеси, само че насищането ще стане при по-малък ток
- При напрежение $U_{GS} = U_P$ (т. 6) през транзистора не може да протече ток, независимо от U_{DS}
 - U_P се нарича напрежение на запушване (Pinch off voltage)



JFET (n-канал). Характеристики



$$R_{DS} = U_{DS} / I_D$$

Проходна
(предавателна)
характеристика

Изходни характеристики

JFET (n-канал). Работни условия

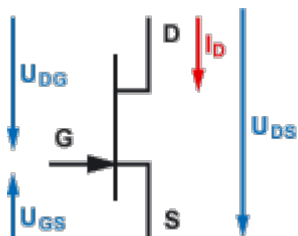
- ❑ Принципите на работа на **полевите транзистори** са същите като при биполярните транзистори
 - Линеен режим
 - Режим на ограничение
 - Използва се по аналогичен начин уравнението за товарната права
- ❑ При тях обаче е възможен още един режим на работа:
 - При напрежения $U_{DS} < 1 \text{ V}$ се използват като променливо съпротивление $\Rightarrow R_{DS} = U_{DS}/I_D$

JFET (n-канал). Работни условия

- ❑ Положението на работната точка се определя от подаденото напрежение между гейта и сорса (U_{GS})
- ❑ Работният обхват също се определя както при биполярните транзистори
- ❑ Полевите транзистори също могат да се свързват по три вида схеми \Rightarrow в зависимост от това кой електрод е общ за входа и за изхода:
 - OS, OD, OG

JFET. Символни означения

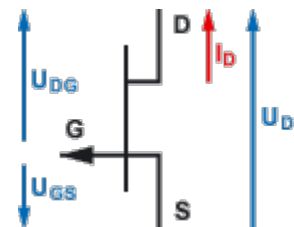
n-канален транзистор



$$U_P < U_{GS} < 0 \text{ V}$$

$$U_{DS} > 0 \text{ V}$$

p-канален транзистор

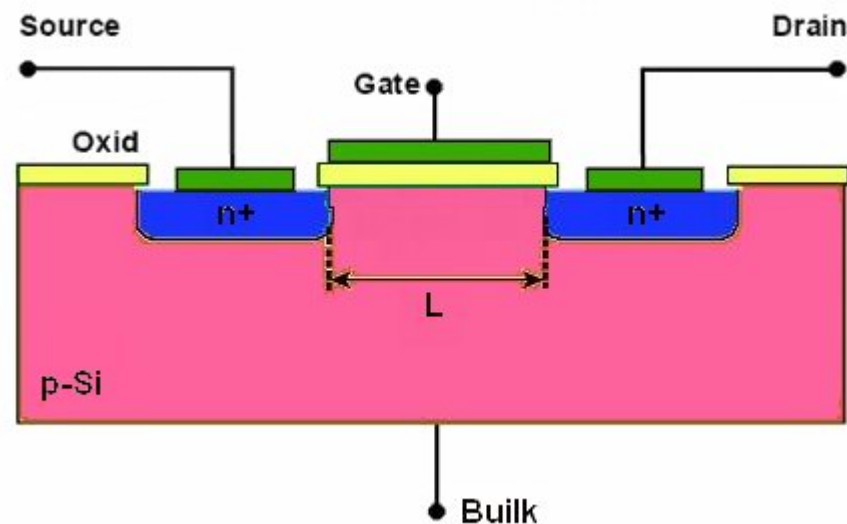
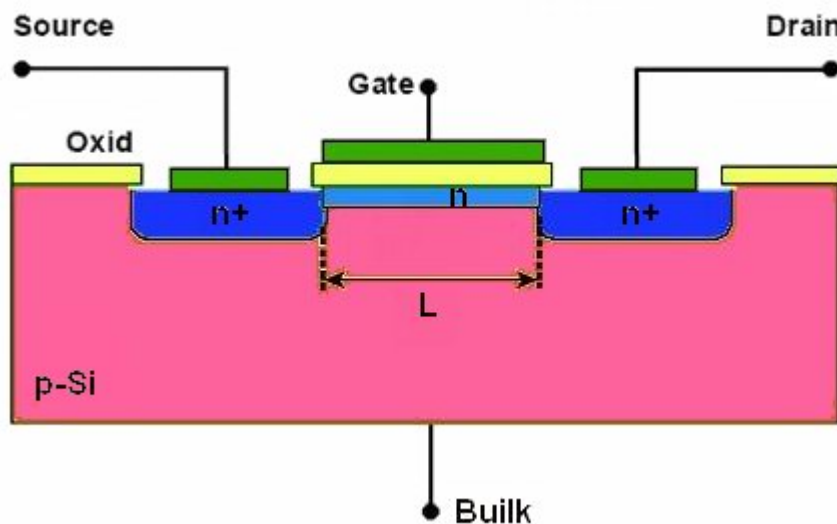


$$0 \text{ V} < U_{GS} < U_P$$

$$U_{DS} < 0 \text{ V}$$

MOSFET (n-канал)

- Върху p-силициева подложка (B) са разположени две силно легирани (n+) области (S,D).
- Вграден канал \Rightarrow физически създадена n-връзка
- Индуциран канал \Rightarrow получава се едва след прилагане на подходящо управляващо напрежение



MOSFET

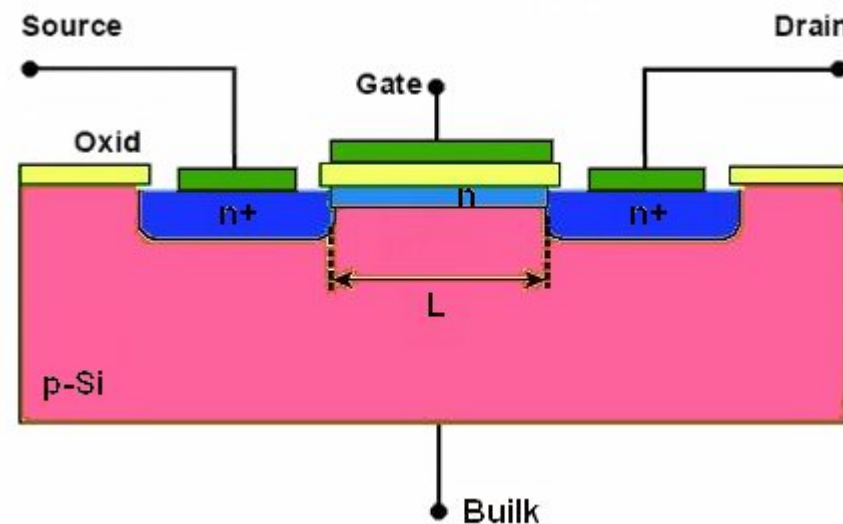
- ❑ Подложката трябва да бъде свързана към такъв потенциал, че да се получат PN-преходи в инверсно свързване
- За **n-канални** FET подложката се свързва към сорса или към по-отрицателно напрежение от сорса
- За **p-канални** FET подложката се свързва към сорса или към по-положително напрежение от сорса
- ❑ Структурата на транзисторите е симетрична, така че сорсът и дрейнът може да разместват местата си, ако подложката не е фабрично свързана към сорса!!

MOSFET

- ❑ MOSFET с n-канал имат две съществени предимства спрямо MOSFET с p-канал:
 - В n-канала токоносителите са електрони, а тяхната подвижност е пъти по-голяма от тази на дупките, т.е. тези FET работят при много по-високи честоти
 - Съпротивлението на n-канала (R_{DSon}) е повече от два пъти по-малко от това на p-канала, което е предимство при работа в ключов режим

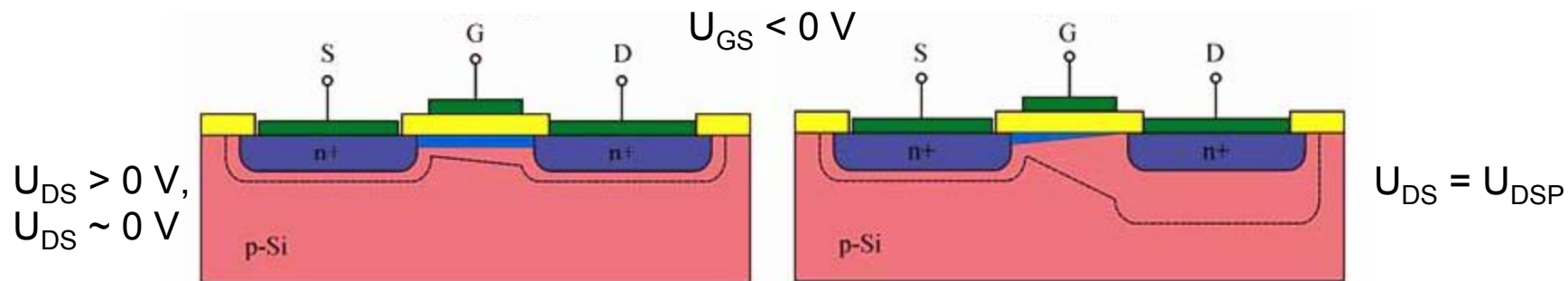
MOSFET (вграден канал – n)

- ❑ Управляващият електрод (Gate) е разположен върху канала през изолиращ слой, който припокрива двете n⁺-области (използва се и **IGFET** – Insulated Gate FET)
- ❑ Принципът на действие, както и характеристиките са като на JFET
- ❑ На G тук може да се подава и положително напрежение, но технически това е безсмислено

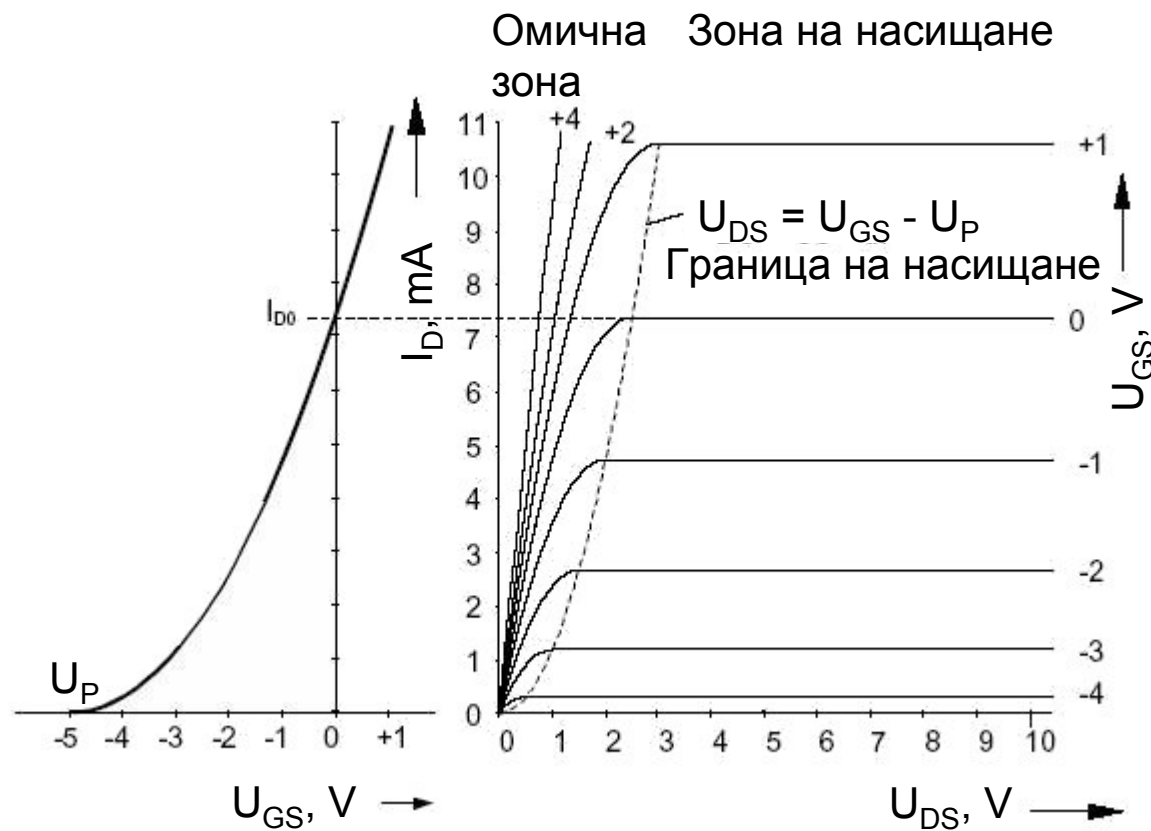


MOSFET (вграден канал – n)

- Двете напрежения U_{GS} и U_{DS} влияят по следния начин на работата на транзисторите:
- U_{GS} стеснява канала по цялата дължина и определя максималния ток
- U_{DS} променя ширината на зоната на обемен заряд, което води до прищипване на канала в близост до дрейна (води до насищане)



Характеристики (вграден канал – n)

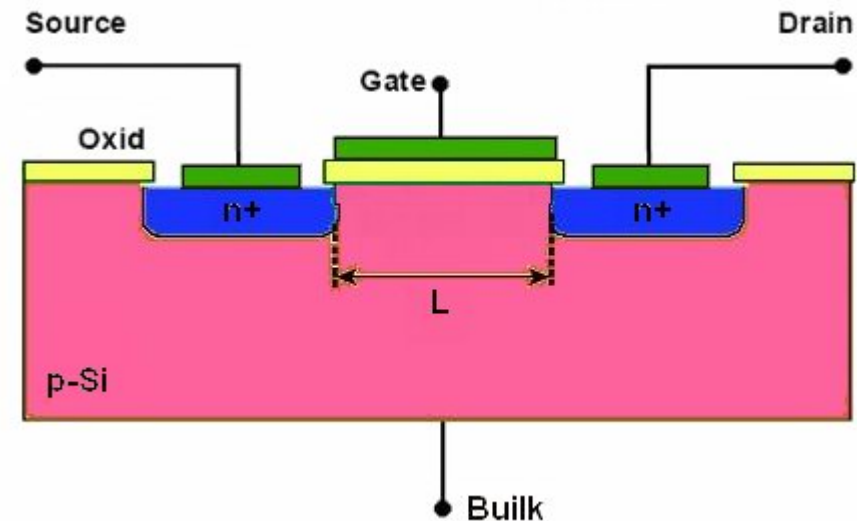


Прходна
характеристика

Изходни характеристики

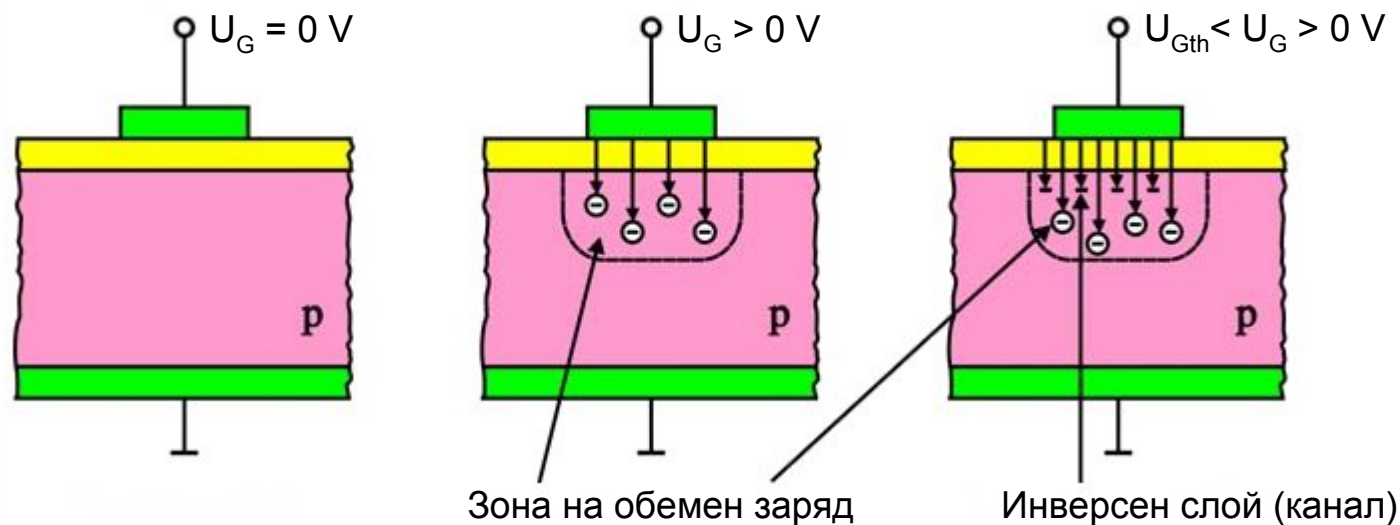
MOSFET (индуциран канал – n)

- Управляващият електрод (Gate) е разположен между двете n⁺-области, като ги припокрива (използва се и **IGFET** – Insulated Gate FET), върху изолиращ слой
- Каналът, който ще свърже двете n⁺-области се появява (индуцира) след прилагане на подходящо по полярност и големина напрежение
- При $U_{GSth} < U_{GS} > 0 \text{ V}$



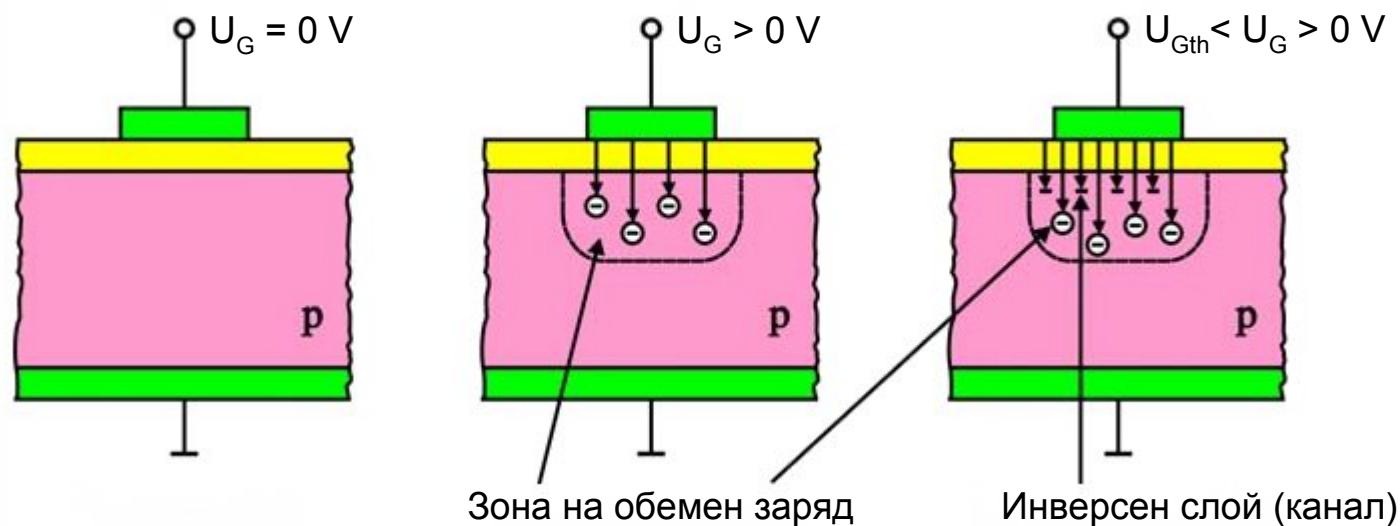
Принцип на получаване на канала

- При малко положително напрежение на G електрическото поле отблъсква подвижните дупки в Si подложка и под изолацията се образува зона на обемен заряд
- В нея остават само неподвижните отрицателно заредени акцептори



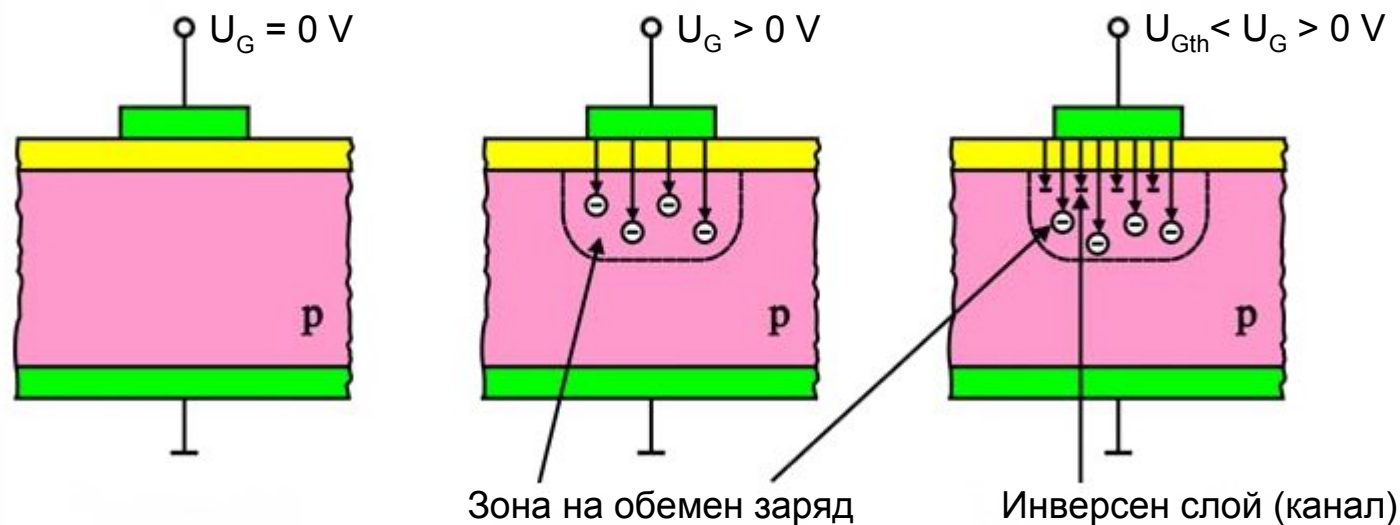
Принцип на получаване на канала

- При по-голямо напрежение дебелината на зоната расте
- Когато U_G надмине една прагова стойност U_{Gth} под изолационния слой се получава тънък слой от подвижни електрони (инверсен слой)



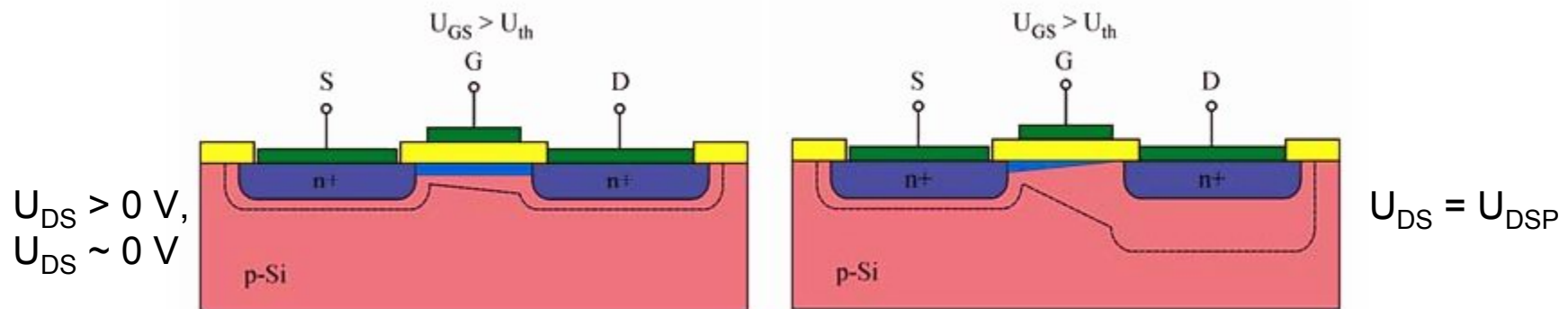
Принцип на получаване на канала

- При увеличаване на напрежението дебелината на зоната на обемен заряд не се променя
- Нараства само плътността на подвижните електрони
- Този слой се нарича инверсен слой и представлява индуцирания п-канал

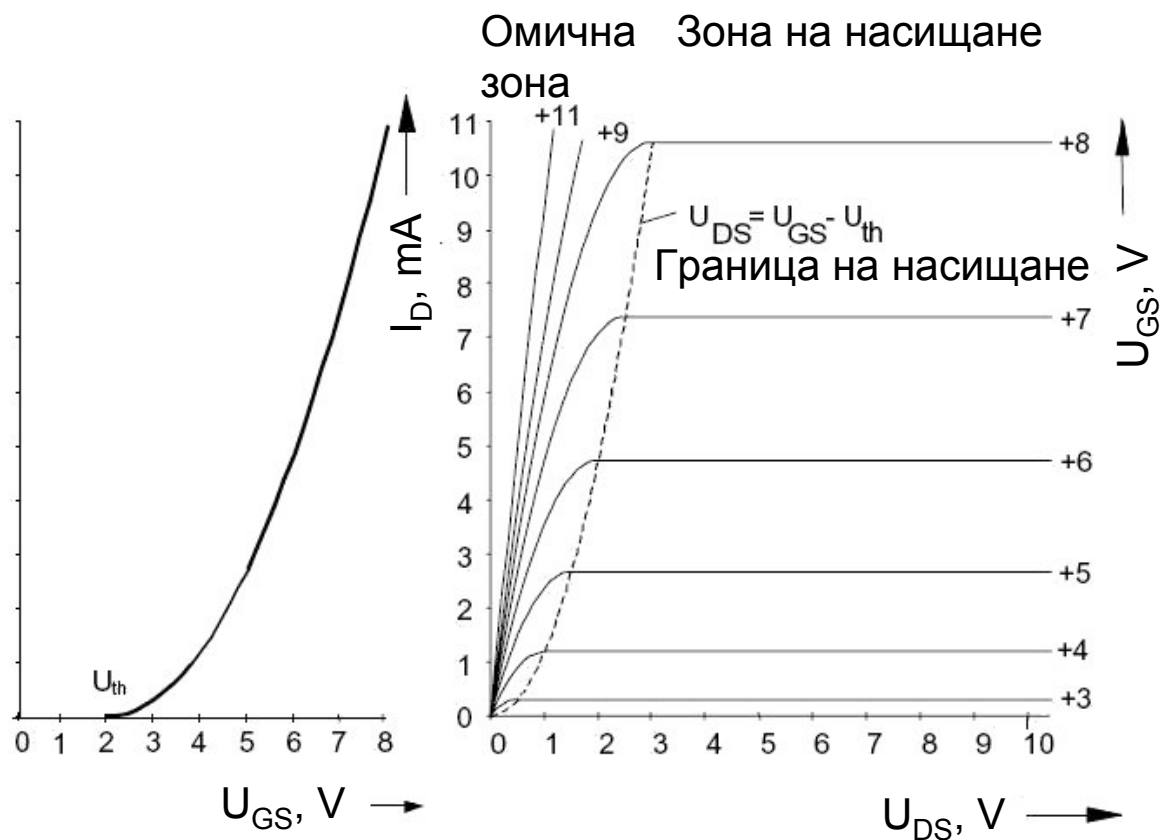


MOSFET (индуциран канал – n)

- Напреженията U_{GS} и U_{DS} влияят върху индуцирания канал по същия начин както при вградения канал:
- U_{GS} стеснява канала по цялата дължина и определя максималния ток
- U_{DS} променя ширината на зоната на обемен заряд, което води до прищипване на канала в близост до дрейна (води до насищане)



Характеристики (индуциран канал – n)

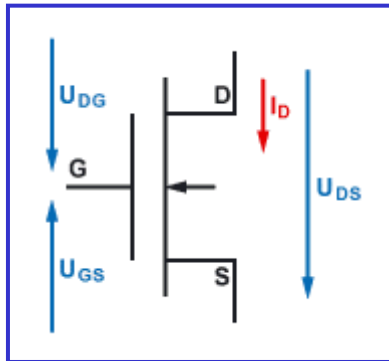


Проходна
характеристика

Изходни характеристики

MOSFET. Символни означения

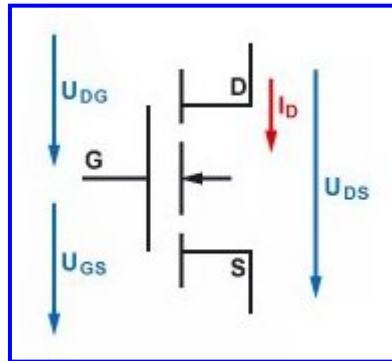
п-канал
вграден



$$U_P < U_{GS}$$

$$U_{DS} > 0 \text{ V}$$

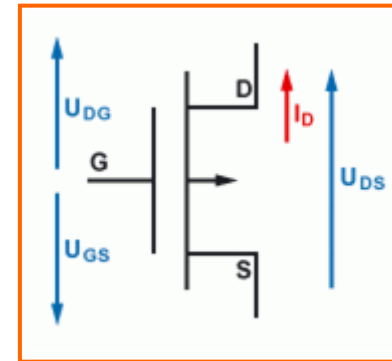
п-канал
индуциран



$$U_{th} < U_{GS}$$

$$U_{DS} > 0 \text{ V}$$

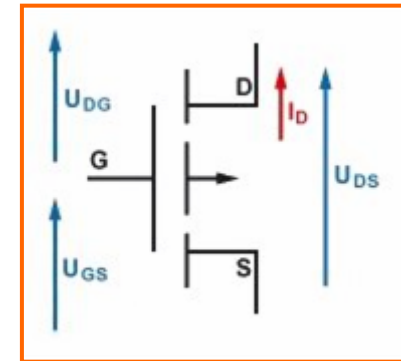
р-канал
вграден



$$U_{GS} < U_P$$

$$U_{DS} < 0 \text{ V}$$

р-канал
индуциран

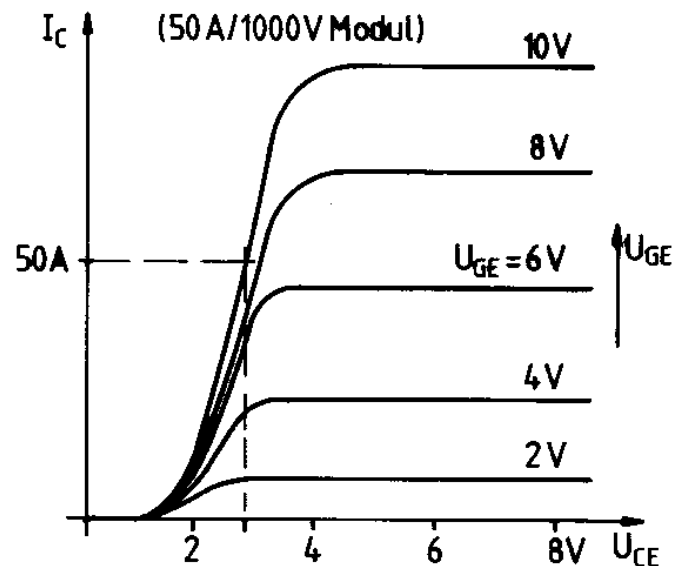
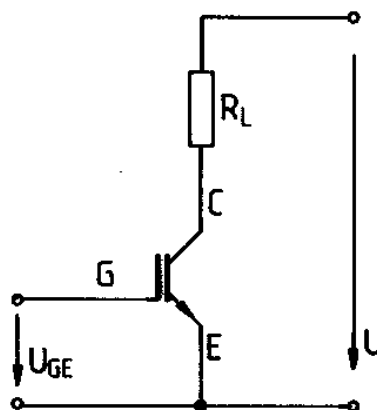


$$U_{th} < U_{GS}$$

$$U_{DS} < 0 \text{ V}$$

Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT)

- ❑ Намират все по-голямо приложение, тъй като обединяват предимствата на двата типа транзистори:
 - Управление само с напрежение (0 до 20 V), т.е. много малка входна (управляваща) мощност (MOS или IG)
 - Много по-малко напрежение на насищане в ключов режим
- ❑ Модули за токове до 400 A, напрежение до 1200 V



Полупроводникови елементи

- ❑ *PN-преход*
- ❑ *Диоди*
- ❑ *Транзистори*
- ❑ **Загубна мощност, термично съпротивление**

Загубна мощност

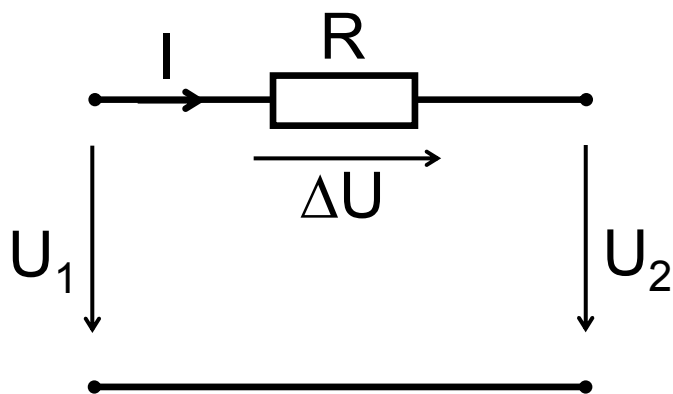
- ❑ При работата на всеки ПП елемент, вследствие на приложеното напрежение и протичащия ток в кристала се отделя мощност (загубна) P_D , която се превръща в топлина
- ❑ Ако тази топлинна енергия не бъде изведена навън температурата на кристала ще надвиши допустимата
- Следва разрушаване на кристала (елемента)
- ❑ Веригата, по която става разсейването на топлинната енергия е кристал – корпус – околна среда

Загубна мощност

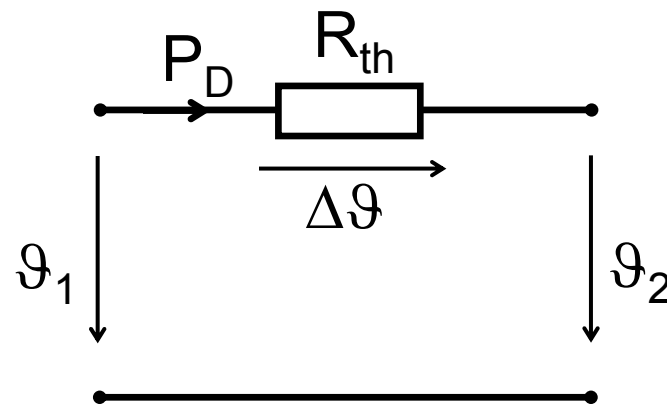
- Най-висока ще бъде температурата на кристала, на корпуса ще бъде по-ниска, а най-ниска – на въздуха
- Условията за отделяне на топлината зависят от най-вече от топлинната проводимост на корпуса и разликата в температурите на кристала и на околната среда
- Реципрочната стойност на топлинната проводимост е известна като **термично съпротивление**

Термично съпротивление

- Аналогия между електрическо и термично съпротивление



$$R = \frac{\Delta U}{I} = \frac{U_1 - U_2}{I}$$



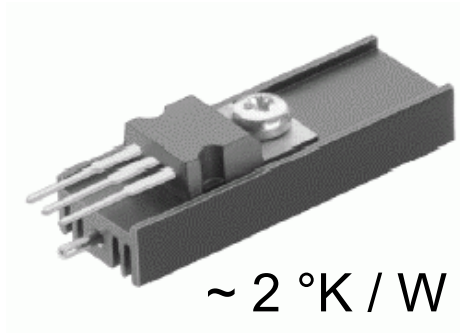
$$R_{th} = \frac{\Delta \Theta}{P_D} = \frac{\Theta_1 - \Theta_2}{P_D}$$

- При серийно свързване $R_{th} = R_{th1} + R_{th2}$

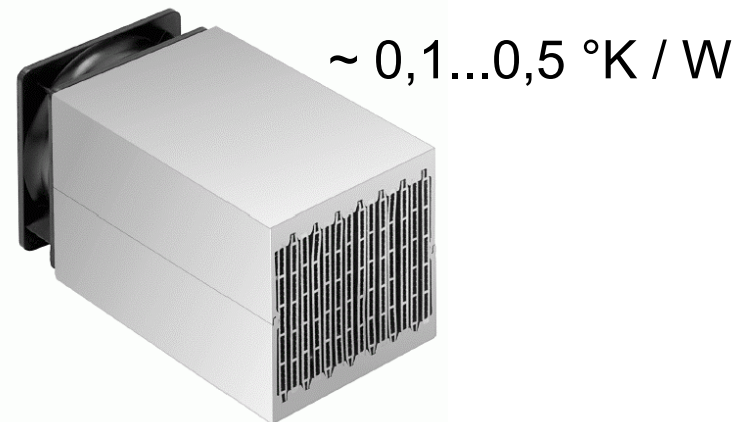
Охлаждане (радиатори)

- Когато отделената топлинна енергия няма да може да се отдели се прибегва до охлаждане чрез радиатори
- Ако тази мярка не помогне, може да се приложи принудително охлаждане (въздушно или водно)

Алуминиев профилен радиатор



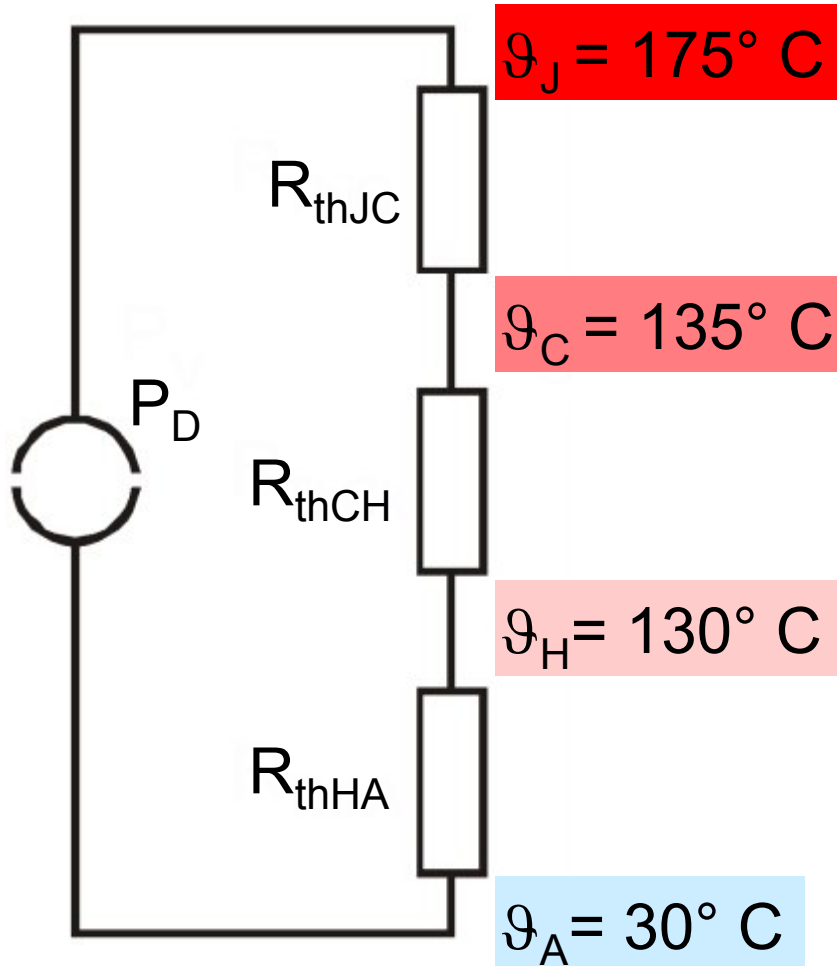
Радиатор с вентилатор



Пример

- ❑ В един транзистор се отделя загубна мощност $P_D = 50 \text{ W}$ при околна температура $\vartheta_A = 30 \text{ }^\circ\text{C}$.
- ❑ Термичното съпротивление между:
 - Силициевия кристал (Junction) и корпуса (Case) е:
 $R_{thJC} = 0,8 \text{ }^\circ\text{K/W}$;
 - Корпуса и радиатора (Heatsink) е $R_{thCH} = 0,1 \text{ }^\circ\text{K/W}$;
 - Радиатора и околната среда (Ambient) е $R_{thHA} = 2^\circ \text{ K/W}$.
- ❑ Как се разпределят температурите?
- ❑ Температурата на кристала трябва да бъде $< 150^\circ \text{ C}$

Пример

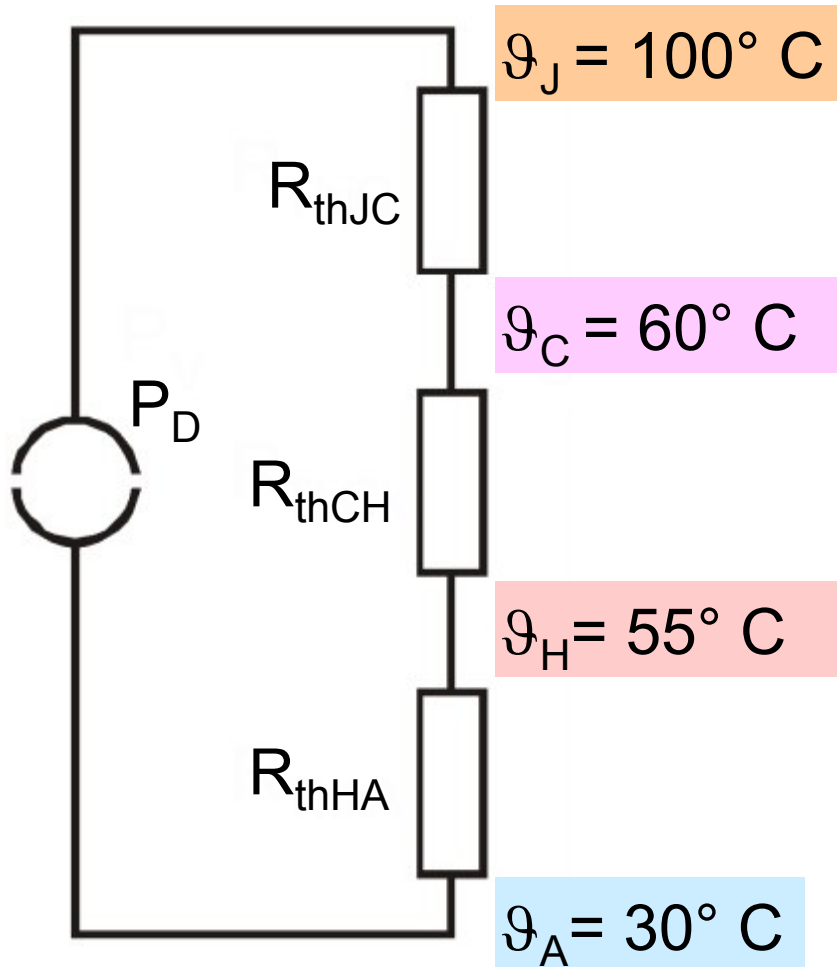


$$\Delta T = R_{thJC} \cdot P_D = 0,8 \frac{^\circ K}{W} \cdot 50 W = 40^\circ K$$

$$\Delta T = R_{thCH} \cdot P_D = 0,1 \frac{^\circ K}{W} \cdot 50 W = 5^\circ K$$

$$\Delta T = R_{thHA} \cdot P_D = 2 \frac{^\circ K}{W} \cdot 50 W = 100^\circ K$$

Пример



$$\Delta T = R_{thJC} \cdot P_D = 0,8 \frac{^\circ K}{W} \cdot 50 W = 40^\circ K$$

$$\Delta T = R_{thCH} \cdot P_D = 0,1 \frac{^\circ K}{W} \cdot 50 W = 5^\circ K$$

$$\Delta T = R_{thHA} \cdot P_D = 0,5 \frac{^\circ K}{W} \cdot 50 W = 25^\circ K$$