

дипл.ел.инж. Наташа Божиновска

ЕЛЕКТРОНИКА

за II година

образовен профил
електротехничар - енергетичар

електротехничка струка

Скопје, 2012

Автор:

дипл. ел. инж. Наташа Божиновска

Рецензенти:

Вонр. проф. д-р Весна Чешелкоска,
Технички факултет Битола

Татјана Маленко, дипл.ел.инж.
Професор во СЕТУГС “Михајло Пупин” – Скопје

Петре Николовски, дипл.ел.инж.
Професор во СУГС “Владо Тасевски” – Скопје

Главен уредник:

Наташа Божиновска

Лектура:

Ивана Коцева

Компјутерска обработка, корица и коректура:

Наташа Божиновска
Жарко Божиновски

Издавач:

Министерство за образование и наука на Република Македонија

Печати:

Графички центар дооел, Скопје

Со решение на Министерот за образование и наука на Република Македонија бр. 22-4330/1 од 29.07.2010 година се одобрува употребата на овој учебник

CIP - Каталогизација во публикација
Национална и универзитетска библиотека “Св.Климент Охридски” , Скопје
621.38(075.3)
БОЖИНОВСКА, Наташа
Електроника за II година : образовен профил електротехничар енергетичар
: електротехничка струка / Наташа Божиновска. - Скопје : Министерство за
образование и наука на Република Македонија, 2010. - 148 стр. : илустр. ; 30 см
ISBN 978-608-226-025-9
COBISS.MK-ID 84236810

ПРЕДГОВОР

Учебникот **ЕЛЕКТРОНИКА** за **II година** од електротехничка струка е резултат на промените во наставните програми за училиштата од електротехничка струка за профил на **електротехничар енергетичар**. Учебникот е пишуван во согласност со програмата за предметот ЕЛЕКТРОНИКА за II година изработена 2006 година. При изработката на учебникот е користен прирачникот “**Концепција за учебник за основно и средно образование**” издаден од Бирото за развој на образованието.

За успешно совладување на предметните содржини потребно е претходно знаење од предметите физика, математика, електротехника, електротехнички материјали и елементи и техничко цртање. Согласно со наставната програма, текстот на учебникот е поделен на **5 тематски целини**.

1. **Полупроводнички диоди**. На почетокот се дадени основите на полупроводничката физика, кристалната структура на полупроводниците, формирањето на PN – спојот и неговите карактеристики, со акцент врз силициумскиот полупроводник и разни видови полупроводнички диоди.

2. **Транзистори**. Во ова поглавје се објаснува создавањето на биполарните и на униполарните транзистори со помош на PN – споеви, нивните карактеристики и параметри, начинот на поларизација и нивната улога како прекинувачи.

3. **Тиристорите**. Тиристорите се прекинувачки елементи со широка примена. Овде е изнесена нивната поделба, карактеристики и практична примена.

4. **Термистори и фотоелектрични елементи**. Термисторите, фотоотпорниците, фотогенераторите и фотодиодите се специфични електронски елементи обработени во ова поглавје.

5. **Интегрирани кола**. Појавата на интегрираните кола внесува нови димензии во развојот на електронските кола. Во ова поглавје се разјаснети некои постапки во изработката на интегрираните колаи нивната примена.

По разработката на наставните содржини, има резимеа кои ги истакнуваат најважните моменти од претходно изложениот материјал.

На крајот од секоја тематска целина се дадени прашања за тематско утврдување на истата. Исто така, на крајот од учебникот, дадени се решени примери и задачи за решавање.

Во изнесувањето на содржините се користени упростени математички операции и голем број слики и графички претставувања, кои треба да овозможат полесно совладување на градивото. Водена е сметка за постепено воведување на нови дефиниции, прашања за проверка на знаењето и задачи, со што се задоволуваат потребните дидактички насоки.

Авторот се надева дека учебникот ќе одговори на потребите на наставниците по предметната настава и на потребата на учениците за усвојување и за утврдување на материјалот.

ПОЛУСПРОВОДНИЧКИ ДИОДИ

Со изучување на содржините од оваа тема ти ја учиш "азбуката" на електрониката, ќе стекнеш основни знаења за полупроводничките диоди и ќе можеш:

- да го познаваш предметот на изучување на аналогната електрониката;
- да ја објаснуваш поделбата на електрониката;
- да ги опишуваш електричните својствата на полупроводните материјали;
- да го објаснуваш создавањето на PN-спојот;
- да ја објаснуваш поларизацијата на PN-споевите;
- да ги познаваш параметрите и карактеристиките на полупроводничката диода;
- да ги разликуваш видовите на полупроводничките диоди;
- да го објаснуваш принципот на работа на разните видови полупроводнички диоди;
- да ја анализираш струјно-напонската карактеристика на диодата;
- да ја познаваш практичната примена на полупроводничките диоди.



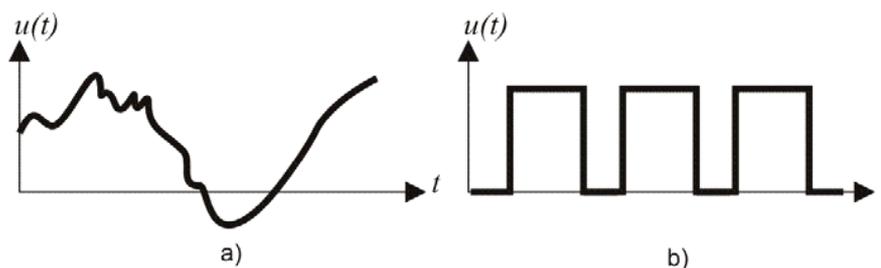
1.1. Предмет и поделба на ЕЛЕКТРОНИКАТА

На поимот "електроника" му се даваат три основни значења:

- а) Електрониката е наука која, како дел од физиката, се занимава со движењето на електроните во празен простор (електронски вакуумски цевки) и во полупроводнички материјали.
- б) Како дел од електротехниката, електрониката се занимава со анализа, развој и производство на електронски елементи, компоненти, уреди и системи.
- в) Електроника, како поим, се користи да означи дел од уред, произведен од електронски компоненти.

Електронска компонента е неделив градбен блок на електронско коло, кој се наоѓа во свое куќиште, со најмалку два извода за поврзување со останатите електронски компоненти. Со поврзување на најмалку две електронски компоненти се добива **електронско коло**. Сите електронски компоненти се делат на активни и пасивни. **Активните компоненти** вршат засилувањето на електричниот сигнал т.е. мала промена на влезниот напон или струја предизвикува голема промена на излезниот напон. Во активни компоненти спаѓаат: биполарни транзистори, фетови, мосфетови, операциски засилувачи, микропроцесори, и други. **Пасивни компоненти** се: отпорници, калеми, кондензатори, диоди, варистори, NTC, PTC-термистори и VDR-отпорници и други.

Електронските уреди имаат голема примена, почнувајќи од компјутерски плочи до инструментални системи, од електронски пејсмејкери до електронско управување со разни машини, од радио и ТВ-приемници до комплексни радарски системи и многу други примени. Напон или струја, која се менува на одреден начин со времето за да кодира или за да пренесе информација се вика сигнал. Сигналот може да биде аналоген, ако се менува континуирано со времето (**слика 1.1а**), или дигитален ако се менува меѓу две дискретна нивоа (**слика 1.1б**), означени како високо или ниско или 1 и 0.



Слика 1.1: График на аналоген и дигитален сигнал.

Кај аналогниот сигнал, амплитудата на сигналот $u(t)$ претставува информација во секој момент на времето. За дигиталниот сигнал, информацијата е искажана со присуство или со отсуство на импулс.

Електрониката може да се подели, според видот на сигналот, на аналогна и дигитална електроника.

Аналогната електроника оперира со континуирани сигнали, кои во секој момент на време имаат амплитуда U_m со некаква вредност. **Дигиталната електроника** оперира со дискретни сигнали.

Електронските кола можат да бидат: аналогни, дигитални и хибридни. Во **аналогните кола** се работи со аналогни сигнали, во **дигиталните** со дигитални сигнали, а во **хибридните** и со едните и со другите. Во хибридните кола се прави и премин од аналогни во дигитални сигнали и обратно.

Во **аналогните кола** спаѓаат: засилувачи, осцилатори, модулатори, детектори, мешачи, филтри и други. Во **дигиталните кола** спаѓаат: основни логички кола, комбинациони мрежи, микропроцесори, мемории и други, сите реализирани во разни технологии: TTL, ECL, NMOS, PMOS, CMOS и др.

Електрониката е присутна во многу гранки, како, на пример, во сметачки уреди (хардверски дел), автоматика (контрола и управување со процеси, роботика), телекомуникации, микроелектроника (интегрирани кола), енергетска електроника, оптоелектроника, микробранова електроника и други.

Во текстот се користи следниов начин на означување на напонот и струјата:

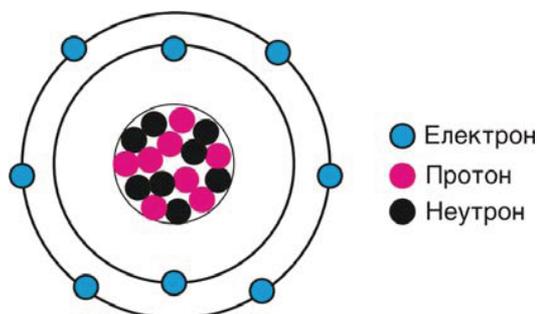
U, I - константна еднонасочна вредност;

$u(t), i(t)$ - моментните вредности на временски променливите компоненти;

U_m, I_m - амплитуда или максимална вредност на синусоидално променлив напон или струја.

1.2. Атомска структура на материјата

Атомот претставува основен елемент на градбата на сите материи. Тој е составен од јадро, во кое се распоредени поситни честички, **протони** и **неутрони**, а околу јадрото кружат други честички наречени **електрони** (слика 1.2). Структурата на атомот прв ја објавил данскиот физичар Нилс Бор, уште во 1913 година.



Слика 1.2: Структура на атомот.

Секој елемент во природата има специфична структура на своите атоми. Јадрото на атомот ја дефинира неговата маса. Позитивно наелектризираните протони и електрично

неутралните неутрони имаат многу поголема маса од негативно наелектризираните електрони. Тие се цврсто врзани за јадрото со јаки нуклеарни сили и во нормални услови не можат да се ослободат и да се движат надвор од јадрото. Бројот на протоните во јадрото на атомот ја дефинира хемиската структура на материјата, а со тоа и видот на материјата. Со промена на бројот на протоните се менува видот на атомот. Така, на пример, атомот на **силициумот** има 14, а атомот на **германиумот** има 32 протони.

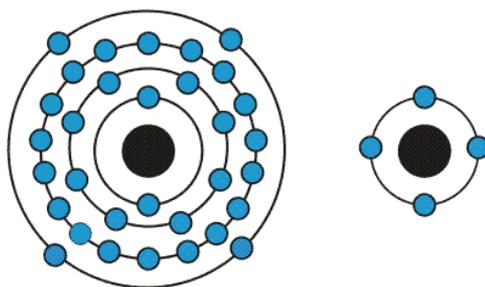
Неутроните имаат многу помало влијание врз хемискиот карактер на материјата од протоните. Тие, исто така, цврсто се врзани со јадрото и за промена на нивниот број е потребна огромна енергија. Со вадење или со додавање неутрони во јадрото, атомот се уште би го задржал истиот хемиски идентитет, само би се сменила неговата маса. Таква промена може да предизвика некои други нуклеарни активности, како што е радиоактивност.

Електроните се носачи на најмал познат електричен полнеж со негативен поларитет, кој изнесува $e = 1,6 \cdot 10^{-19} C$, колку што имаат и протоните, само со позитивен поларитет. Бројот на електроните во атомот е еднаков на бројот на протоните и тие заедно го одредуваат електричното однесување на атомот.

Електроните се распоредени на различни енергетски нивоа. За разлика од протоните и неутроните, електроните имаат значително поголема слобода да се движат околу јадрото на атомот. Еден број електрони се движи блиску до јадрото и со него прави неразделна целина. Мал број од нив, кои се викаат **валентни** електрони, лабаво е врзан со јадрото, а може и да го напушти атомот. Тие се наоѓаат во последната орбита, најоддалечени од јадрото и на највисоко енергетско ниво.

За исфрлање на валентниот електрон од неговата орбита е потребна многу помала енергија. Ако се случи тоа, атомот нема да го смени идентитетот, само ќе настапи промена на електрички неутралната состојба во која се наоѓа атомот. Ако некој електрон го напушти атомот, се создава **празнина** и атомот станува позитивно наелектризиран (позитивен јон). Кога во атомот ќе влезе дополнителен електрон, тој прави вишок на електрони во атомот и атомот станува негативно наелектризиран (негативен јон).

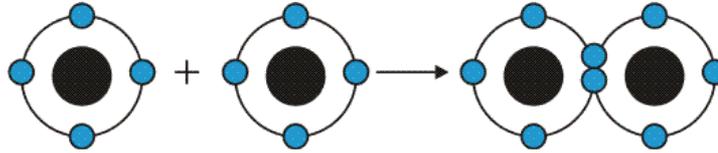
Моделот на атомот на силициум и неговиот упростен модел се дадени на **слика 1.3**.



Слика 1.3: Атом на силициум и неговиот упростен модел.

Тој е составен од јадро и од сите цврсто врзани електрони, освен валентните електрони, сите прикажани со поголемо крукче во средината и од валентните електрони околу тоа

јадро. Сите меѓусебни дејства на атомите се остваруваат преку валентните електрони. На **слика 1.4** е прикажана врската меѓу два атома на силициум. Бидејќи атомот на силициумот има четиривалентни електрони, тој може да се поврзе со уште четири други атома на силициум и сите ќе бидат на иста оддалеченост еден од друг.



Слика 1.4: Валентна врска меѓу атомите на силициум.

РЕЗИМЕ

*Електрониката се занимава со анализа, развој и производство на електронските елементи, компоненти, уреди и системи.

* Електронските компоненти се делат на активни и пасивни. Активните компоненти вршат засилувањето на електричниот сигнал т.е. мала промена на влезниот напон или струја предизвикува голема промена на излезниот напон.

*Според видот на сигналот кој се обработува, електрониката се дели на аналогна и дигитална.

*Атомот, како основен елемент на градбата на сите материи, е составен од јадро со протони и неутрони и од електрони кои се движат околу јадрото.

*Електронот е носител на најмал електричен полнеж со негативен поларитет.

*Електронот, кој го напуштил атомот, станува слободен електрон, а на неговото место се создава празнина. Празнината е еквивалент на електронот со електричен полнеж со позитивен поларитет.

✓ ПРОВЕРИ ШТО ЗНАЕШ

- Дефинирај го поимот "ЕЛЕКТРОНИКА"?
- Што претставува електронско коло?
- Кои се активни електронски компоненти?
- Кои се пасивни електронски компоненти?
- Како се дели електрониката?
- Какви може да бидат електронските кола?
- Нацртај ја структурата на атомот!
- Колкав полнеж има електронот и со каков поларитет?
- Кои електрони се валентни електрони?
- Кој атом се нарекува негативен јон?
- Како се добива позитивен јон?

1.3. Полупроводни материјали

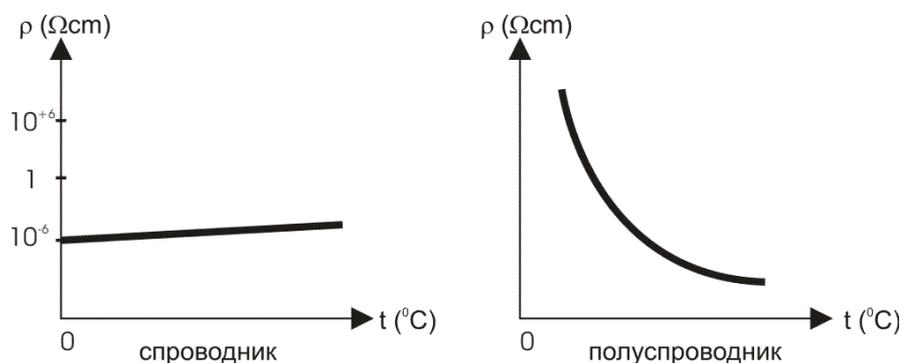
Електрони од разни видови атоми немаат еднаква можност да ги раскинат валентните врски и да станат слободни електрони. Одредени материјали, како што се металите, имаат многу лабаво врзани валентни електрони. За создавање слободни електрони во такви материјали е доволна мала количина на топлинска, светлинска или некој друг вид енергија. За такви материјали е доволно да се најдат во опкружување со собна температура, па да дојде до раскинување на валентните врски и создавање слободни електрони. Слободните електрони тука лесно се движат меѓу атомите, а степенот на слободата на движењето зависи од видот на материјалот.

Кај други видови материјали, како што е стаклото, валентните електрони се врзани поцврсто, се создава мал број слободни електрони, со мала слобода на движење. Способноста за слободно движење на слободните електрони во материјалот се вика спроводливост, а спротивставувањето на движењето се вика отпорност. Материјали со голем број слободни електрони се викаат **спроводници**, а оние со малку или без слободни електрони **изолатори**.

Групата материјали која по своите својства се наоѓа меѓу спроводниците и изолаторите се вика **полупроводници**. Во таа група можат да се вбројат германиумот и силициумот. Полупроводниците се разликуваат од спроводниците и од изолаторите по неколку својства.

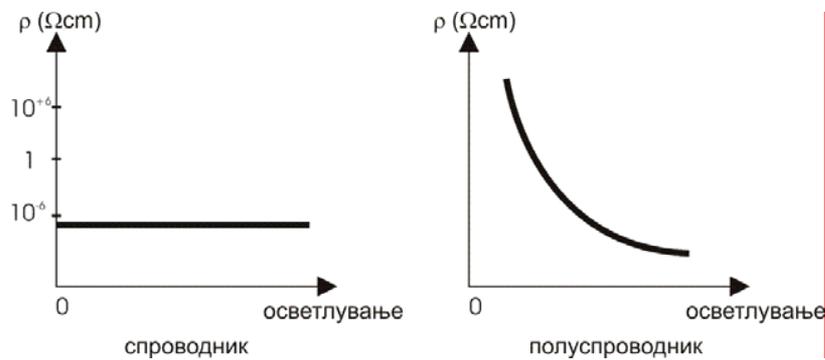
Специфичниот отпор на спроводниците е многу мал и се наоѓа во границите од 10^{-6} до $10^{-5} \Omega\text{cm}$, на изолаторите е екстремно голем и изнесува од 10^6 до $10^8 \Omega\text{cm}$, додека специфичниот отпор на полупроводниците се движи меѓу овие вредности и тоа од 10^{-3} до $10^7 \Omega\text{cm}$.

Отпорноста на спроводниците расте постепено со зголемување на температурата и тоа линеарно. Отпорноста на полупроводниците опаѓа експоненцијално кога расте температурата (**слика 1.5**).



Слика 1.5: Промена на отпорноста со промена на температурата.

Со промена на светлината, отпорноста на спроводниците не се менува, а отпорноста на полупроводниците опаѓа експоненцијално (**слика 1.6**).

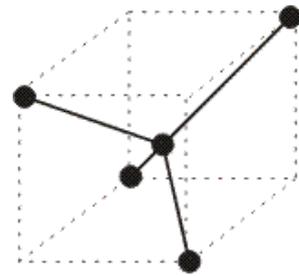


Слика 1.6: Промена на отпорноста со промена на светлината.

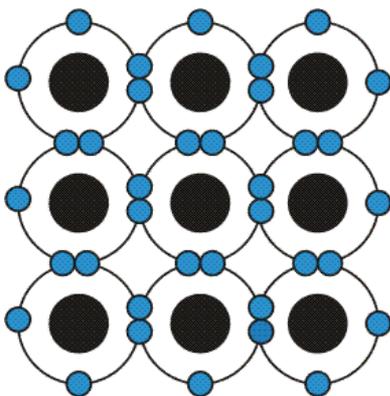
1.3.1. Електрични својства на полупроводните материјали

Ако се направи постојан распоред на атомите според еден правилен тридимензионален модел се добива кристална структура на тој материјал. Во таква структура се остварени сите можни валентни врски од по два електрона. На **слика 1.7** е прикажан модел на еден кристал на силициум.

Тој има форма на коцка, а основниот атом стои во центарот на коцката. Другите атоми од валентните врски на централниот атом се распоредени во четири темиња, така што не се допираат еден до друг. Прикажувањето на валентните врски на поголем број атоми на овој начин е многу комплицирано. Наместо просторното прикажување, поедноставно е прикажувањето во една рамнина, како на **слика 1.8**.



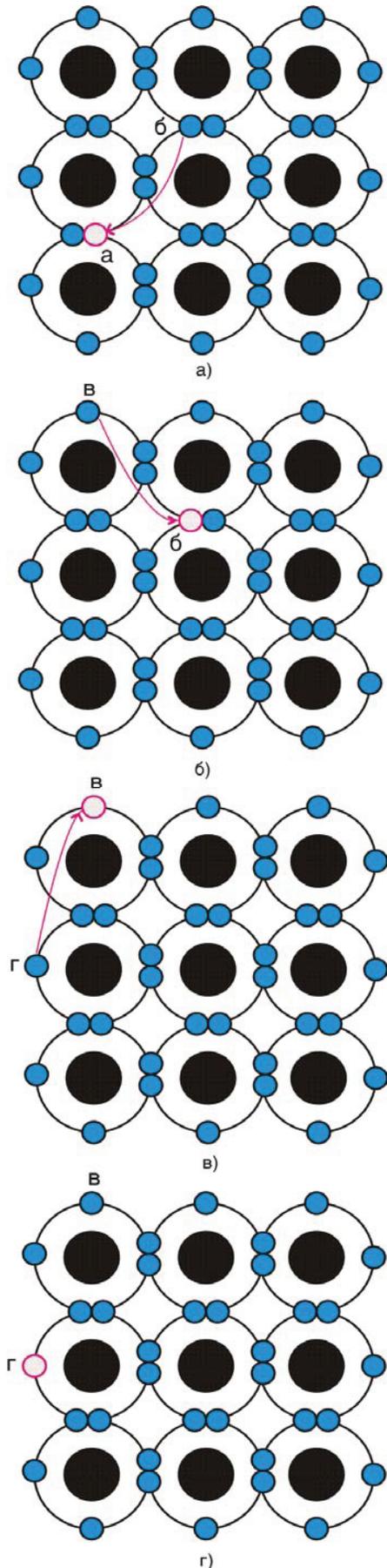
Слика 1.7: Модел на кристал на силициум.



Слика 1.8: Валентни врски на поголем број атоми.

На оваа слика јадрата на упростените модели на атоми се прикажани како поголеми, а валентните електрони како помали кругови. Валентните врски меѓу атомите се дадени со два меѓусебно врзани електрона. Вака претставен, кристалот на силициумот или германиумот е совршен изолатор, во него нема слободни електрони. Но, тоа важи само при температура на апсолутната нула ($-273^{\circ}\text{C} = 0\text{K}$).

При собна температура од 18 до 20°C (300K) се создаваат слободни електрони и кристалната структура веќе не е совршена. Несовршена кристална структура е основа за создавање полупроводнички материјали.



Таа несовершенство може да има: структурен, енергетски или хемиски карактер.

Структурната несовершенство се однесува на атомите на површината на материјалот, кога атомите не можат да ги остварат сите валентни врски.

Енергетските несовершености главно се должат на топлинската енергија. Веќе на собна температура, атомите во кристалната решетка почнуваат да треперат, движејќи се наизменично еден кон друг. При тоа може да дојде до прекинување на валентните врски и до создавање слободни електрони. За извлекување на еден електрон од неговото место е потребна минимална енергија од $0,75\text{eV}$ ($eV = 1,6 \cdot 10^{-19} J$) за германиумот и $1,2\text{eV}$ за силициумот.

Ослободените електрони по кратко време наоѓаат друго испразнето место, предавајќи ја својата енергија на други електрони. Во секој момент во кристалот постои одреден број слободни електрони. Со ослободувањето на електронот соодветната валентна врска останува непотполнета и на тоа место се јавува позитивен полнеж. Секој електрон, напуштајќи го атомот, зад себе остава позитивен полнеж. Во техниката на полупроводниците тој се вика **празнина**. И празнините се движат слично на електроните. Тоа е илустрирано на **слика 1.9**.

Во точката **а** (слика 1.9а) е создадена една празнина со присуство на тровалентен атом, а во точката **б**, со раскинување на валентната врска се ослободува електрон. Слободниот електрон се движи кон празнината во точката **а** и ја пополнува, а на местото **б** се јавува нова празнина (слика 1.9б). Процесот на повторното воспоставување валентна врска се вика **рекомбинација**. На истиот начин се формира и нова празнина во точката **в** (слика 1.9в) и натаму во **г** (слика 1.9г). Крајниот ефект е: празнината од точката **а** е преместена во точката **г**. Од ова произлегува дека насоката на движењето на празнините е спротивна од насоката на движењето на електроните.

Слика 1.9: Движење на празнините.

Со зголемувањето на температурата се зголемува бројот на слободните електрони, но во иста мерка и на празнините. Спроводливоста на полупроводникот расте, но кристалот и натаму останува неутрален.

Енергетските несовршености можат да настапат и под влијание на светлинската енергија, при што се јавува фотоелектричен ефект. Под фотоелектричен ефект се подразбира меѓусебното дејство на фотоните (светлосните кванти) и на електроните од атомот на полупроводникот. Кога фотонот на светлината и електронот вршат размена на енергијата со која располагаат, електронот го менува сопственото енергетско ниво. Ако енергијата, што му ја предава фотонот на електронот е доволна, електронот ќе ја напушти својата патека и ќе прејде во патека со повисоко енергетско ниво, или ќе ја раскине валентната врска и ќе стане слободен. Спротивен процес се одвива кога електронот преминува во патека со пониско енергетско ниво или ако се враќа во валентната врска. Таков премин е следен со емисија на еден квант на светлинска енергија – фотон.

Полупроводници со овој вид несовршености се викаат непримесни, за разлика од примесните во кои несовршеноста се создава по хемиски пат. До хемиски несовршености доаѓа кога во кристалот се внесуваат одредени хемиски примеси, претставени со две групи елементи чии што атоми се интегрираат во кристалната структура на полупроводникот. Елементите од едната група имаат атоми со петвалентни електрони и тоа се фосфорот, арсенот и антимонот. Елементите од другата група имаат атоми со тривалентни електрони. Тука спаѓаат бор, алуминиум, галиум и индиум.

РЕЗИМЕ

***Во однос на движењето на електроните, материјалите се делат на: спроводници, изолатори и полупроводници.**

***Основни материјали на полупроводниците се германиум и силициум во кристална структура.**

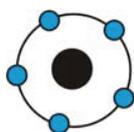
***Материјалите се здобиваат со полупроводнички карактеристики кога кристалната структура станува несовршена.**

***Несовршеноста на кристалната структура може да има структурен, енергетски или хемиски карактер.**

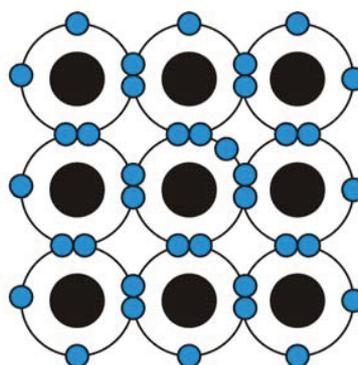
***Примесни полупроводници се добиваат со внесување на атоми на хемиски примеси во кристалната структура на полупроводникот.**

1.3.2. Полупроводник од N-тип

Атомот на фосфорот (слика 1.10) е со петвалентни електрони и има еднакви димензии со димензиите на атомот на силициумот. Тој може лесно да се интегрира во кристалната структура на силициумот. Ако се додаде атом на фосфор на растопена маса од силициум, тој на едно место ќе го замени атомот на силициумот и ќе формира валентни врски со околните атоми. При тоа, еден електрон од атомот на фосфорот останува вишок. Тој не може да влезе во валентна врска, бидејќи сите се пополнети. Електронот е врзан лабаво со атомот на фосфорот и при собна температура станува слободен. За негово ослободување е доволна енергија од 0,05 eV.



Слика 1.10: Атом на фосфор.



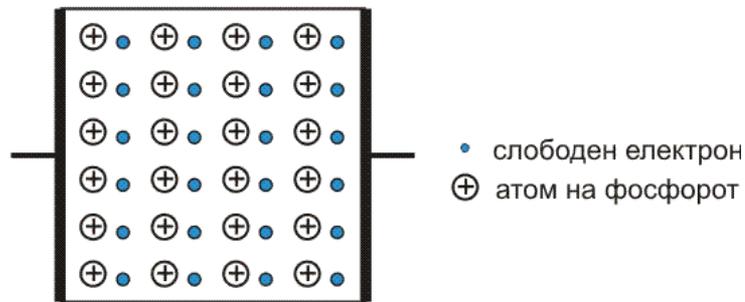
Слика: 1.11: Атом на фосфор во кристална решетка на германиум.

Интегрирањето на атомот на фосфорот во кристалната решетка на силициумот е претставено на слика 1.11.

Со внесување на петвалентни атоми во кристалната решетка на германиум или силициум се добива **полупроводник од N-тип** (негативен), кој има вишок слободни електрони и во кој спроводливоста е резултат на движењето на слободните електрони. Слободните електрони во полупроводник од N-тип се создаат на два начина: едните, со внесување петвалентни атоми на хемиски примеси, а другите со термичко раскинување на валентните врски меѓу атомите. Петвалентните атоми “даваат” слободни електрони, па според латинскиот јазик се нарекуваат **донори**. Донорите кога испуштиле електрон, стануваат **позитивни јони**, не се подвижни и не учествуваат во создавањето на струјата низ полупроводникот.

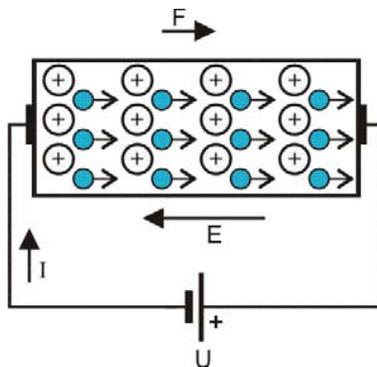
Со термичкото раскинување на валентните врски, покрај слободните електрони се создаваат и празнини. Нивната концентрација е многу помала од концентрацијата на електроните. Поради тоа, **електроните се главни**, а **празнините се споредни** носители на електричниот полнеж.

Шематски приказ на полупроводник од N-тип е даден на слика 1.12.



Слика 1.12: Шематски приказ на полупроводник од N-тип.

Слободните електрони и празнините во полупроводник на температура повисока од апсолутната нула се во постојано хаотично движење, како резултат на нивната термичка енергија. Без какво и да е надворешно влијание, движењето на носителите на полнеж нема никаква одредена насока.



Слика 1.13: Полупроводник од N-тип во електрично поле.

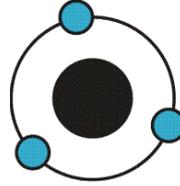
Ако го приклучиме полупроводникот на еднонасочен извор на напојување, како на **слика 1.13**, во полупроводникот ќе се создаде електрично поле со јачина E , насочено од позитивниот кон негативниот приклучок од изворот. Силата F , која се јавува како резултат на дејството на полето E , ги насочува слободните електрони во спротивна насока од насоката на полето. Празнините ќе се движат во насоката на полето E . На тој начин низ колото ќе протече струја од негативниот кон позитивниот пол на изворот преку полупроводникот.

Во сите понатамошни анализи на состојбите во полупроводниците ќе се користи т.н. електронска насока на струјата, која се совпаѓа со насоката на движењето на електроните.

Ако се промени поларитетот на изворот, се менува насоката на електричното поле и слободните електрони и празнините ќе се движат во спротивна насока од претходната, односно се менува и насоката на струјата. Нема посебна причина јачината на струјата да не биде иста во двата примера, што значи дека нема појава на насочување.

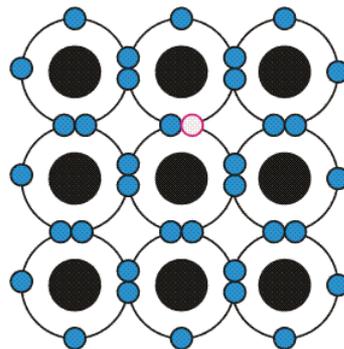
1.3.3. Полупроводник од P-тип

Атомот на борот, прикажан на **слика 1.14**, има исти димензии со атомот на силициум, што значи дека може да се интегрира во нивната кристална решетка.



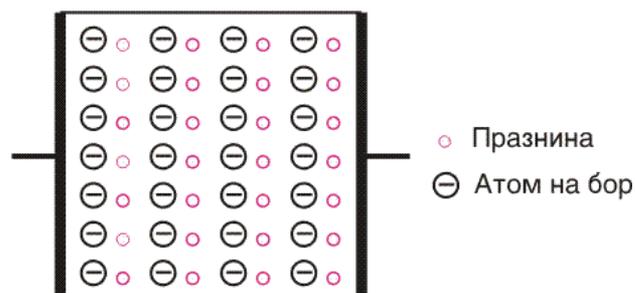
Слика 1.14: Атом на бор.

Тој е тривалентен и остварува тривалентни врски со околните атоми. Во обидот да ја оствари и четвртата валентна врска, тој "присвојува" еден електрон од соседните атоми, ослободен со термичко раскинување на валентните врски. На местото на "присвоениот" електрон **се создава празнина (слика 1.15)**.



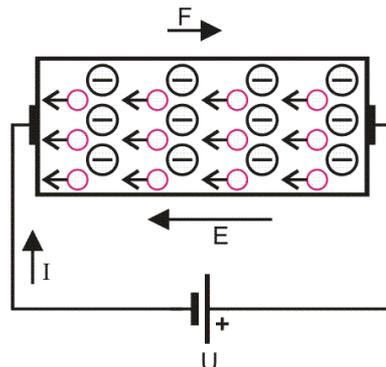
Слика 1.15: Атом на бор во кристална решетка на германиум.

Атомите на тривалентните примеси кои "присвојуваат" електрони се наречени **акцептори**, тие се со негативен електричен полнеж и се неподвижни. Со внесување акцепторски атоми во кристалната структура на германиум или силициум се создаваат празнини како основни носители на позитивен електричен полнеж. На овој начин се добива **полупроводник од P-тип**, прикажан на **слика 1.16**.



Слика 1.16: Шематски приказ на полупроводник од P-тип.

Празнините во овој тип полупроводник се создаваат на два начина: со внесување акцепторски атоми и со термичко раскинување на валентните врски. Како споредни носители овде се јавуваат електроните создадени со термичко раскинување на валентните врски.



Слика 1.17: Полупроводник од P-тип во електрично поле.

Со помош на **слика 1.17** ќе видиме што се случува во полупроводникот од P-тип под влијание на надворешно електрично поле. Со приклучување на еднонасочен извор на напон на краевите на полупроводникот, во него се создава електрично поле со јачина E и со насока од позитивниот кон негативниот пол на изворот. Силата F , која е резултат на полето E , ги насочува празнините да се движат во насоката во која дејствува електричното поле, а електроните во спротивната насока. Со такво насочено движење се воспоставува струја со јачина I .

Движењето на празнините, како што видовме со помош на слика 1.9, е привидно. Физички се поместуваат валентните електрони, а ефектот на тоа движење е појава на празнина на друго место, што е еквивалентно на движење на празнината. На местото на контактот на полупроводникот со доводната жица, празнините извлекуваат електрони од металот и се рекомбинираат, а на спротивниот контакт се создава нова празнина со премин на оној број валентни електрони во контактниот метал колкав што е бројот на рекомбинираниите празнини. Со свртувањето на поларитетот на изворот се менува насоката на полето и празнините се движат во насока спротивна од претходната. Тоа значи дека и во полупроводник од P-тип не постои појава на насочување.

РЕЗИМЕ

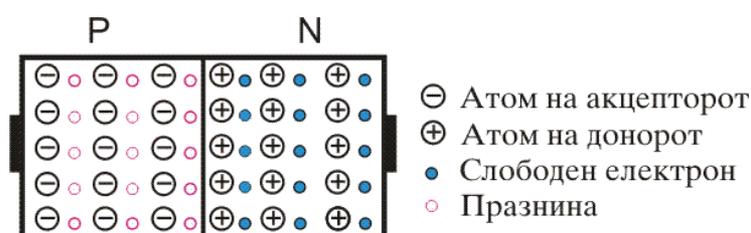
***Полупроводник од N-тип има вишок слободни електрони, создадени со процесот на внесување на петвалентни примеси. Поради вишокот слободни електрони, главни носители во полупроводник од N-тип се електроните а споредни празнините.**

***Полупроводник од P-типот има вишок празнини, создадени со внесување тривалентни примеси. Поради вишокот празнини, главни носители во полупроводник од P-тип се празнините а споредни електроните.**

***Бројот на главните носители е многу поголем од бројот на споредните носители и зависи од бројот на внесените атоми на примеси и температурата на полупроводникот.**

1.4. PN - спој

Полупроводниците од N и од P-тип во прикажаната форма не се од голема полза. Многу поинтересен ефект се добива кога двата типа полупроводници меѓусебно се комбинираат во еден кристал на повеќе начини. Секако дека обично физичко спојување на двата вида кристали не е изводливо, туку на растопен, пречистен кристал од едната страна се додаваат акцепторски, а од другата страна донорски атоми. На тој начин се добива единствен кристал со PN –спој. Тој од едната страна има блок на полупроводник од P-тип, а од другата страна блок на полупроводник од N-тип (слика 1.18). Местото на спојот претставува област со мала дебелина.



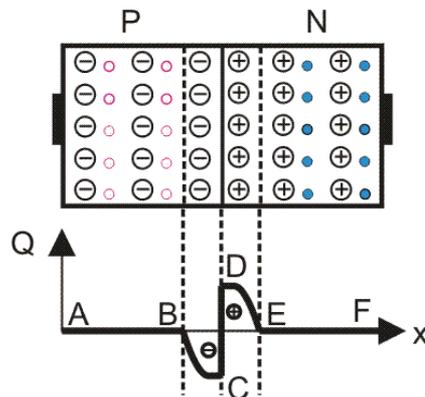
Слика 1.18: PN-спој составен од два кристала во моментот на создавање.

Во N-подрачјето бројот на слободните електрони е многу поголем од бројот на празнините, а во P-подрачјето бројот на празнините е многу поголем од бројот на електроните. Состојбата, прикажана на слика 1.18, постои само во моментот на создавањето на спојот, потоа веднаш се менува. Таква концентрација на електрони и празнини предизвикува движење на електроните од N-подрачјето и тие навлегуваат во P-подрачјето. Празнините од P-подрачјето пак се движат во спротивна насока кон N-подрачјето. Ова движење е дифузно, што подразбира физички принцип по кој честички од подрачје со поголема концентрација се преместуваат во подрачје со пониска концентрација се до изедначувањето на концентрациите, без какво и да е влијание од надвор.

Во двете подрачја доаѓа до рекомбинација: електроните дојдени од N-подрачјето се рекомбинираат со празнините од P-подрачјето, а празнините дојдени од P-подрачјето се рекомбинираат со електроните од N-подрачјето.

Електроните не можат да навлезат длабоко во P-подрачјето. Тие бргу се рекомбинираат и во P-подрачјето блиску до спојот остануваат само акцепторските атоми. Истото се случува и со празнините, па во N-подрачјето, блиску до спојот, остануваат само донорските атоми. Акцепторските и донорските атоми не можат да ја сменат положбата. Тие се неподвижни. Во

P-подрачјето, негативните акцепторски атоми формираат негативен просторен полнеж, чијашто концентрација опаѓа со оддалечувањето од спојот. Во N-подрачјето, донорските атоми формираат позитивен просторен полнеж и неговата концентрација опаѓа со оддалечувањето од спојот.



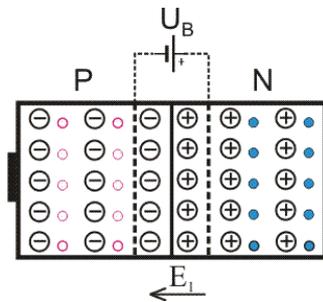
Слика 1.19: Распределба на густината на полнежи.

На **слика 1.19** е даден дијаграм на распределбата на густината на полнежот Q по должина на PN-спојот. Во оддалечениот дел на P-подрачјето не можат да се пробијат електроните од N-подрачјето. Таму владее рамнотежа на електричните полнежи како во стандардниот P-полупроводник и тоа е делот AB од карактеристиката. Со доближување кон спојот се зголемува густината на негативните полнежи. Одреден број електрони, дојдени од N-подрачјето, се рекомбинираат со празнините, а останува исто толкав број акцепторски атоми и тие ја зголемуваат густината на негативните полнежи (дел BC од карактеристиката). Во преодната зона, густината на негативните полнежи е максимална, бидејќи тука веќе нема празнини.

Истото се случува и во N-подрачјето. Таму постои област на рамнотежа (делот FE), потоа зголемување на густината на позитивните полнежи претставени со донорските атоми (делот ED) и на крајот максимална густина на позитивните полнежи во точката D. Меѓу точките C и D имаме нагла промена од максимална негативна густина до максимална позитивна густина на полнежите. На спојот се јавува потенцијална разлика, наречена потенцијална бариера. Таа ги дефинира двете карактеристики на PN-спојот: внатрешното електрично поле E_1 и сопствениот капацитет на спојот.

1.4.1. Поларизација на PN - споевите

По завршувањето на процесот на формирање на PN-спојот и престанокот на дифузното движење на главните носители преку спојот, се добива состојба како на **слика 1.20**.



Слика 1.20: Потенцијална бариера во PN-спој.

Внатрешното електрично поле E_1 е насочено од N кон P-подрачјето на PN-спојот. Со дејството на ова поле престанува дифузионото движење на главните носители преку спојот. Полето дејствува така што ги придвижува електроните од спојот кон внатрешноста на N-подрачјето, а празнините кон внатрешноста на P-подрачјето. На самиот спој е формирана зона на попречување, во која нема слободни носители на полнеж, ниту, пак, постои можност за нивно преминување преку зоната. Ширината на зоната на попречување изнесува околу 1 μm . Потенцијалната бариера може да се претстави со замислен извор на еднонасочен напон U_B , како што се гледа на слика 1.20. Постоенето на потенцијалната бариера го прави спојот изолатор. Во присуство на внатрешното електрично поле спојот добива својство на капацитет. Капацитетот на спојот се одредува според:

$$C = \frac{\varepsilon \cdot S}{4 \cdot \pi \cdot d} \dots\dots\dots(1.1)$$

каде што S претставува површина на спојот, d неговата ширина, а ε диелектрична константа.

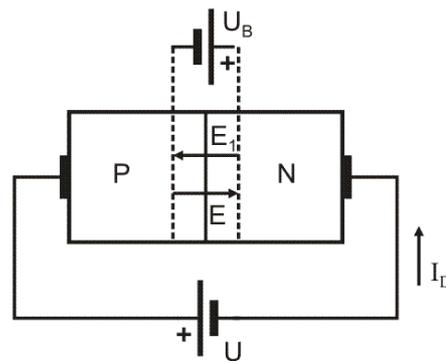
Што се однесува до споредните носители, внатрешното електрично поле го овозможува нивното преминување преку спојот и се формира струја на споредни електрони и струја на споредни празнини. Двете струи се со спротивни насоки, па како краен резултат се добива дека во PN-спој без надворешна поларизација, во кој и да е пресек на плочката на кристалот, средната густина на струјата е нула.

1.4.2. PN-спој во надворешно електрично поле

Ако се стават метални приклучни места на краевите на кристалот на PN-спој и на тие места се приклучи извор на еднонасочен напон, во внатрешноста на кристалот ќе се создаде електрично поле E , коешто понатаму ќе го викаме надворешно. Под негово влијание, во PN-спојот ќе настапат различни промени, во зависност од тоа како изворот е приклучен.

Директно поларизиран PN-спој

Ако се поврзе позитивниот пол на изворот со приклучокот на P-подрачјето, а негативниот пол на приклучокот на N-подрачјето (слика 1.21), надворешното електрично поле E ќе има спротивна насока од внатрешното поле E_1 . Бидејќи надворешното поле E има поголема јачина, резултантното поле ќе биде насочено од P кон N-подрачјето.



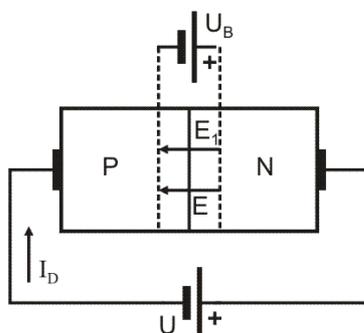
Слика 1.21: PN-спој поларизиран во спроводна насока.

Под влијание на резултантното поле, празнините од P-подрачјето ќе преминуваат во N-подрачје, а електроните од N-подрачјето преминуваат во P-подрачје. Потенцијалната бариера се намалува или се губи зависно од големината на напонот на изворот и протекува струја I_D . PN-спојот станува спроводлив, односно станува поларизиран во спроводлива насока.

За PN-спојот да стане спроводлив, потребно е струјата I_D да има јачина најмалку $1 \mu A$. Напонот, при кој ќе протече оваа струја се вика напон на вклучување и неговата вредност зависи од материјалот на полупроводникот. За германиумот тој изнесува $0,3V$, а за силициумот $0,7V$.

Инверзно поларизиран PN-спој

При свртувањето на поларитетот на изворот се свртува и насоката на надворешното поле E (слика 1.22) и неговата насока се совпаѓа со насоката на внатрешното поле E_1 . Сега потенцијалната бариера станува поголема, зоната на попречување поширока, па електроните и празнините уште потешко ќе можат да ја поминуваат.



Слика 1.22: PN-спој поларизиран во неспроводна насока.

Во оваа состојба, PN-спојот е поларизиран во неспроводна насока. Во неспроводно поларизираниот PN-спој, сепак, тече мала струја. Тоа е струјата на споредните носители на полнежите, празнините во N-подрачјето и електроните во P-подрачјето. Оваа струја има многу мала вредност, затоа што е мал бројот на споредните во однос на главните носители на полнежите. Таа расте со зголемување на температурата.

РЕЗИМЕ

*На местото на спојот на N и P-полупроводник се создава зона на попречување, испразнета од слободните електрони и празнини, потенцијална бариера и внатрешно електрично поле.

*Директно поларизиран PN-спој се добива со приклучен позитивен пол на изворот за напојување на P, а негативен пол на N-типот и тој спроведува струја.

*Инверзно поларизиран PN-спој се добива со приклучен позитивен пол на изворот за напојување на N, а негативниот пол на P-типот и тој не спроведува струја.

*Во инверзно поларизиран спој тече само струјата на споредните носители, тоа е инверзна струја на спојот.

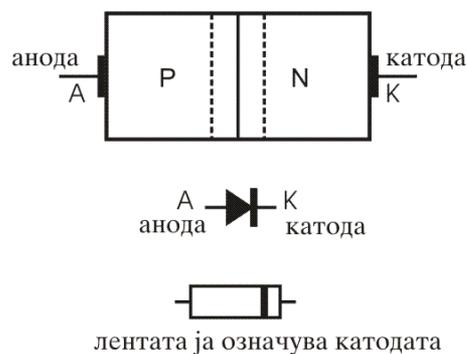
✓ ПРОВЕРИ ШТО ЗНАЕШ

- Како се делат материјалите?
- Од што зависат електричните својства на материјалите?
- Како се однесува полупроводникот при собна температура, а како при апсолутната нула?
- Како се создава празнина?
- Кои полупроводници се примесни полупроводници?
- Како се добива полупроводник од N-тип?
- Кои атоми се наречени донори?
- Нацртај полупроводник од N-тип приклучен на надворешен извор и објасни што се случува!

- Како се добива полупроводник од P-тип?
- Кои атоми се наречени акцептори?
- Нацртај полупроводник од P-тип приклучен на надворешен извор и објасни што се случува!
- Кои носители се главни, а кои споредни кај полупроводникот од N-тип?
- Кои носители се главни, а кои споредни кај полупроводникот од P-тип?
- Што претставува PN-спој?
- Како може да се поларизира PN-спојот?

1.5. Полупроводнички диоди

Прв и основен претставник на PN-спојот меѓу електронските елементи е полупроводничката диода. Структурата и електричниот симбол на диодата се дадени на **слика 1.23**.



Слика 1.23: Структура и електричен симбол на диодата.

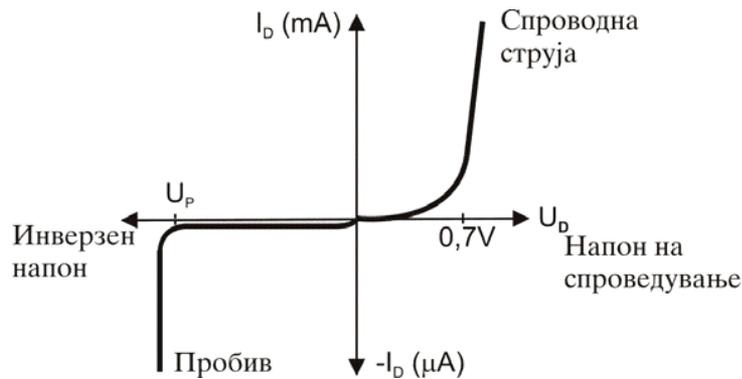
Металниот приклучок на P-делот е анода и се означува со A, а на N-делот е катода означена со K. Основната карактеристика на диодата е како и кај PN-спојот, да ја пропушта електричната струја само во една насока од анодата кон катодата.

Диодата е поларизирана во спроводна насока или директно, кога позитивниот пол на изворот за напојување е врзан со анодата, а негативниот со катодата. Инверзна или неспроводна поларизација имаме кога позитивниот пол на изворот е врзан со катодата, а негативниот со анодата на диодата.

1.5.1. Статичка карактеристика

Статичката карактеристика на диодата (**слика 1.24**) најдобро ја опишува состојбата при директната и при инверзната поларизација на диодата. Тоа е струјно-напонска

карактеристика која ја претставува зависноста на струјата на диодата од еднонасочниот напон на нејзините краеве, при одредена константна температура на околината.



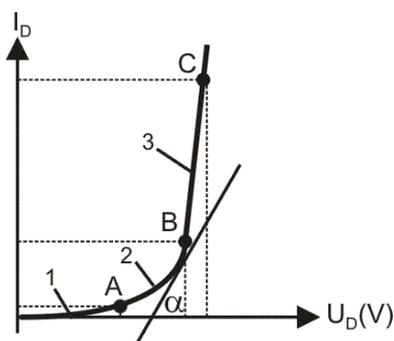
Слика 1.24: Статичка карактеристика на диодата.

Карактеристиката на директно поларизирана диода е прикажана во првиот квадрант. Таа може да се подели на три зони (слика 1.25).

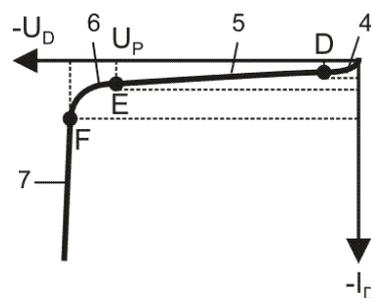
Првата зона, од координатниот почеток до точката A, е подрачје на многу мали напони. Тука се работи за напони од неколку десетини mV, при што струјата достигнува вредност од неколку десетини mA. Блиску до координатниот почеток таа е праволиниска, а потоа преминува во парабола.

Во втората зона формата на карактеристиката најмногу одговара за процесот на детекција. Таа се протега од точката A до точката на напонот на вклучувањето на диодата (B), кој, да повториме, за германиумот изнесува $0,3V$, а за силициумот $0,7V$.

Третата зона, од точката B до точката C, претставува подрачје на големи струи. Овде напонот на краевите на диодата не се менува значително во еден поширок опсег на промена на струјата.



Слика 1.25: Карактеристика на спроводно поларизирана диода.



Слика 1.26: Карактеристика на инверзно поларизирана диода.

Отпорот на диодата се менува со промена на директниот напон, донесен на диодата. Тој е одреден со тангенсот на аголот α што го зафаќа тангентата на карактеристиката во таа точка.

Карактеристиката на инверзно поларизираната диода е прикажана во третиот квадрант на координатен систем. И таа може да се подели на неколку зони (слика 1.26).

Зоната број 4, од 0 до точката D, е идентична со зоната број 1, спојот во двете зони се однесува симетрично и поради тоа при мали напони нема појава на насочување.

Во зоната број 5, од точката D до точката E, инверзната струја се доближува кон една константна вредност, наречена инверзна струја на заситување. Отпорот на диодата во оваа зона е многу голем, но никогаш не станува бесконечен.

Зона 6, од точката E до точката F, е подрачје на коленото на карактеристиката. Тука при мал пораст на инверзниот напон, инверзната струја многу се зголемува. Кај диодите од силициум оваа зона е многу тесна, а кај германиумови диоди е поширока. Вредноста на максималниот инверзен напон U_p се наоѓа на почетокот на коленото на карактеристиката.

Во зоната 7 настапува пробив на PN-спојот на диодата, при што инверзната струја многу се зголемува.

1.5.2. Пробивање на спојот на диодата

До пробивањето доаѓа од термички и од електрични причини. Термичкиот пробив настапува кога се нарушува термичката рамнотежа на PN-спојот. При големи јачини на струјата во внатрешниот отпор на диодата се создава топлина, која плочката на кристалот ја пренесува на околината. Најголемата дозволена работна температура на диодата зависи од полупроводничкиот материјал од кој е направена. За германиумот таа изнесува од +70 до +90°C, а за силициумот од +120 до +150°C. Кога е развиената топлина на плочката поголема од онаа што таа може да ја пренесе на околината, плочката се прегрева и може да се стопи, односно диодата да се уништи. Во врска со тоа, производителот ја пропишува максималната јачина на струјата, I_{max} , која во текот на работата не смее да се надмине. Електричниот пробив може да има лавински и тунелски или зенеров ефект.

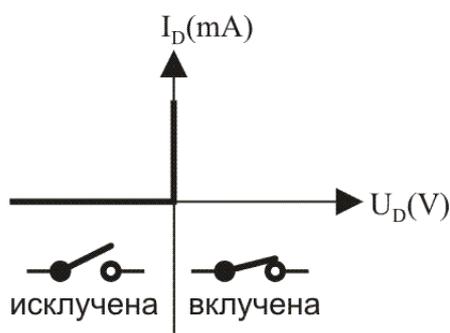
Лавинскиот ефект се јавува во споеви со поголема ширина на запречниот слој. При големи инверзни напони во запречниот слој се создава јако електрично поле, кое на електроните што се движат преку тој слој им дава голема кинетичка енергија и забрзување. Кога таа енергија ќе достигне одредена граница, доаѓа до раскинување на нови валентни врски, бројот на слободните електрони се зголемува и се создава лавина од слободни електрони (слично на снежна лавина). Инверзната струја може да достигне голема вредност и да дојде до пробив на диодата. За да не дојде до оштетување, за секој тип на диоди производителот го дава инверзниот пробивен напон (U_p) кој не смее да се пречекори.

Тунелскиот или зенеров ефект може да се јави и кај диоди со мала ширина на спојот за попречување и висока концентрација на хемиските примеси. Со зголемување на инверзниот напон на таков спој преку вредноста на инверзниот пробивен напон U_p , електроните под влијание на создаденото поле ги кинат валентните врски, се зголемува бројот на слободните

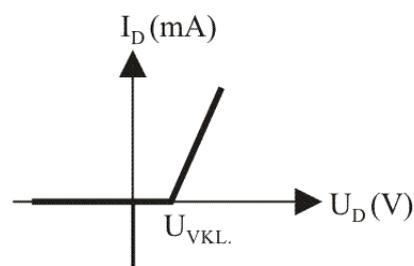
електрони и инверзната струја нагло расте. Се намалува внатрешниот отпор на диодата и тој не дозволува понатамошно зголемување на инверзниот напон. Дојдено е до пробив на спојот, но не и до негово уништување. Инверзниот напон останува константен.

Струјно-напонската карактеристика од слика 1.24 се однесува на физички реална диода.

За анализа на многу електронски кола се користи модел на идеална диода, која во директната насока има отпор нула и претставува совршен спроводник, а во инверзната насока нејзината струја е нула и има бесконечен отпор. Нејзината карактеристика е дадена на **слика 1.27**. Идеалната диода дејствува како затворен прекинувач, кога е директно поларизирана, и како отворен прекинувач, кога е инверзно поларизирана.



Слика 1.27: Карактеристика на идеална диода.



Слика 1.28: Карактеристика на делумно линеарна диода.

Третиот модел што е во употреба е делумно линеарна диода со што се упростуваат пресметките во колата со диоди. Нејзината карактеристика (**слика 1.28**) е составена од две линии: едната започнува некаде во инверзниот дел и завршува во точката на напонот на вклучувањето на диодата ($U_{VKL.}$), а другата продолжува од таа точка во подрачјето на директната поларизација со одреден агол. Со тој агол е одреден отпорот на диодата во директната насока.

РЕЗИМЕ

*Полупроводничката диода е електронски елемент со PN-спој и со два извода: анода и катода.

*Диодата е директно поларизирана, ако анодата е врзана на позитивен, а катодата на негативен потенцијал, или кога анодата е поврзана на повисок потенцијал од катодата.

*Диодата е инверзно поларизирана, ако катодата е поврзана на повисок потенцијал од анодата.

*Состојбата на диодата со директна и со инверзна поларизација е дадена со нејзината статичка карактеристика.

*Пробив на диодата може да настапи од преголема температура на спојот.

*Зенеров ефект настапува при инверзна поларизација при што инверзниот напон останува константен.

*Лавински ефект настапува при пречекорување на дозволениот инверзен пробивен напон.

✓ ПРОВЕРИ ШТО ЗНАЕШ

- Дефинирај го поимот полупроводничка диода?
- Нацртај го симболот на полупроводничката диода и означи го!
- Објасни ја поларизацијата на диодата!
- Дефинирај ја статичката карактеристика на диодата!
- Нацртај ја статичката карактеристика на диодата!
- Кога настапува термички пробив на диодата?
- Каков може да биде електричниот пробив?
- Објасни го поимот идеална диода и нацртај ја нејзината статичка карактеристика!

1.6. Видови и примена на полупроводнички диоди

Денес се среќаваме со повеќе видови диоди, зависно од материјалите од кои се изработени и од нивната намена. Во својот развој, за првите полупроводници е користен германиум како полупроводнички материјал. Но, понатаму силициумот се покажал како подобар во однос на процесот на обработката, како и во однос на температурната стабилност. Силициумот станува прв избор меѓу полупроводниците, а доста се застапени и некои соединенија на галиумот, како што е галиум-арсенид.

Според намената разликуваме: насочувачки, демодулациони, ограничувачки, импулсни, прекинувачки, капацитивни, фотодиоди, LED и други. Според конструкцијата разликуваме два вида, и тоа диоди со точкест спој и диоди со површински спој.

1.6.1. Диоди со точкест спој

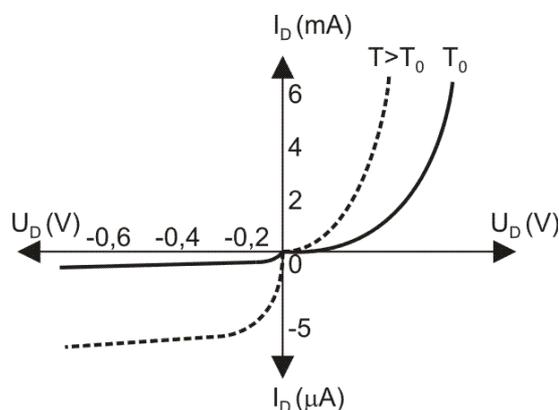
Германиумот, сепак, не е сосема исфрлен. Тој се применува за изработка на диоди со точкест спој. Накратко околу нивната изработка: пречистен германиум се добива со постепено греење, така што при разни температури се одделуваат хемиските нечистотии. Пречистувањето се прави се додека специфичниот отпор на германиумот не достигне

неколку десетици Ω cm. Потоа, додека се уште е во течна состојба, се додаваат примеси на петвалентни елементи (арсен, антимон) во таков сооднос еден атом на примесата да дојде на еден милион до една милијарда атоми на германиум. Со процес на извлекување се добива кристална структура од N-типот. Кристалот потоа се сече на тенки плочки, коишто по уште едно чистење од нечистотиите, нанесени при обработката, се заваруваат на метална подлога. Така подготвен кристал се става во куќиште, се воведува спирално свиткана жица од волфрам, платина или злато, со дебелина околу $6\ \mu\text{m}$ да ја допре кристалната плочка (слика 1.29). Металниот врв се заварува со плочката по електричен пат и диодата се оптоварува со нормална јачина на струјата. Потоа се пропуштаат импулси со 10 пати појака струја од максимално дозволената. На местото на допирот се развива топлина и се формира кратер во плочката. Електроните се извлекуваат од кратерот и така се формира PN-спој.



Слика 1.29: Конструкција на точкеста диода.

Струјно напонската карактеристика на германиум диодата OA90 е дадена на слика 1.30. Треба да се сврти вниманието на редот на големината на струјата: во директната насока таа е дадена во mA, а во инверзната во μA .



Слика 1.30: Струјно напонска карактеристика на германиум диода OA90.

Напонот на директно поларизираната диода е $0,3\text{V}$, што ја прави диодата поефикасна за мали сигнали со помали загуби на моќност, **особено за детекција на амплитудно и фреквенциски модулираните сигнали, или кај логички кола со ниско логичко ниво.** Отпорот на диодата со директна поларизација, при напон од 1V се движи во границите $50 - 200\ \Omega$, а за инверзно поларизирана при напон од -10V изнесува $0,5 - 10\text{M}\Omega$.

Со малата површина на спојот се добива и мал сопствен капацитет, помал од 1pF, што овозможува диодата да се употребува при високи фреквенции со голем степен на корисно дејство. Денес се користат **диоуди со точкест спој особено во радиотехниката за детекторски степени.**

Недостаток на диодата OA90 е зависноста на нејзината карактеристика од температурата и поголема вредност на инверзната струја во однос на диоди од силициум.

1.6.2. Диоди со површински спој

Диодата со површински спој се состои од две кристални плочки, едната од P-тип, а другата од N-тип. Преку метални контакти тие се врзани со надворешни изводи на анода и катода, а спојот е затворен во метално или во пластично куќиште.

1.6.2.1. Насочувачки диоди

Насочувачките диоди се диоди со површински спој, а се користат за добивање еднонасочна струја од извор на наизменичен напон. Овие диоди имаат релативно голема површина на спојот, па низ нив може да течат струи со голема јачина и релативно високи инверзни напони. Нивната примена за високи фреквенции е ограничена со големите сопствени капацитивности.

Како материјал за изработка на насочувачките диоди се користи силициум, германиум и денес многу ретко селен.

За изборот на насочувачка диода битни се следниве параметри кои ги дава производителот:

- најголема дозволена струја во директна насока $I_D \text{max}$;
- максимален дозволен инверзен напон $U_I \text{max}$ (околу 70% од вредноста на пробивниот напон U_P);
- максимална дозволена моќност на дисипација $P_D \text{max}$ (моќност претворена во топлина во внатрешноста на диодата).

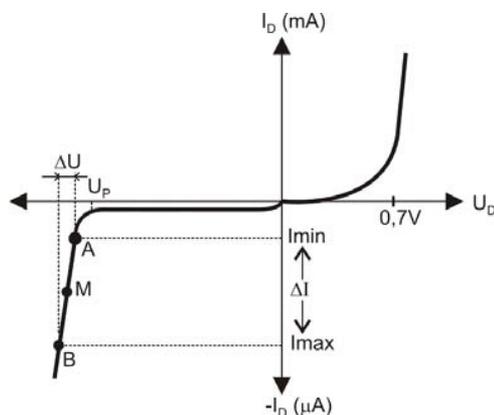
Според моќноста, насочувачките диоди се делат на:

- диоди со мала моќност до 3W;
- диоди со средна моќност до 10W;
- диоди со голема моќност до неколку KW.

1.6.2.2. Зенер диоди

Зенер диода е силициумска диода со површински спој, наменета за стабилизација на еднонасочен напон. За разлика од стандардната насочувачка диода, зенер диодата има зголемен процент на хемиски примеси, како во N-подрачјето така и во P-подрачјето. Со тоа

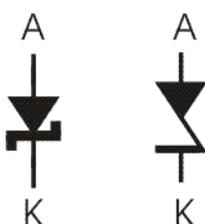
е подобрена нејзината струјно-напонска карактеристика во областа на инверзните напони каде што и е и работното подрачје. Подобрувањето се гледа во зголемена стрмнина на делот на карактеристиката и поостро колено после точката на пробивниот напон. Типичната струјно-напонска карактеристика е дадена на **слика 1.31**.



Слика 1.31: Струјно-напонска карактеристика на зенер диода.

За стабилизација на напон се користи делот меѓу точките A и B, познат како област на зенеров ефект. За голема промена на струјата ΔI се добива релативно мала промена на инверзниот напон ΔU на краевите на диодата, што е карактеристично за уредите коишто вршат стабилизација на напон. Во колото каде што се врши стабилизација, работната точка M на диодата (вредност на напонот што се стабилизира) се поставува на средината меѓу точките A и B.

Електричниот симбол на зенер диодата е даден на **слика 1.32**.



Слика 1.32: Електричен симбол на зенер диода.

Зенер диодите се изработуваат за напони на стабилизација од 3V до 75V, но можни се и напони надвор од овој опсег (до 200V). За напони помали од 3V тешко е да се произведе зенер диода со добри стабилизациони својства. За тие напони се користат сериски врзани силициумски диоди со површински спој, поларизирани во спроводна (директна) насока ($n \times 0,7V$).

Основните параметри за избор на зенер диодата се:

- зенер напонот во опсег 3,3V до 75V;

- толеранција на специфицираниот напон, која може да биде 5% или 10%, но на располагање се и многу попрецизни толеранции како што е 0,05% за посебни цели;
- моќност на диодата, која може да биде $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$, 1, 5, 10 и 50W.

Зенер диодите се употребуваат за изработка на стабилизатори на напон, како извори на референтен напон и во ограничувачите на напон.

1.6.2.3. Импулсни диоди

Карактеристично за логичките операции во дигиталните кола е работа со **импулси** каде што имаме брза промена од логички ниско на логички високо ниво. **Таквата операција треба да ја извршува некој вид прекинувачки елемент**, кој во состојба отворено има бесконечно голем отпор, а во состојба затворено бесконечно мал отпор.

Полупроводничката диода се однесува слично, но целосно не ги исполнува овие барања. Главното ограничување потекнува од тоа што таа не може да обезбеди доволно брз премин од спроводна во неспроводна состојба. Причината лежи во појавата на натрупување на слободните носители на полнежот во слојот за попречување.

Кога диодата е директно поларизирана подолго време, на граничната површина на PN-спојот од диодата, на P-страната доаѓа до натрупување на споредни носители електрони, а на N-страната празнини. Ако спојот се префрли во состојба на инверзна поларизација, распределбата на споредните носители ќе се менува моментално, зашто нивното движење е дифузно и нивната концентрација опаѓа релативно бавно. Спојот останува спроводен за период во кој концентрацијата на споредните носители не се намали на ниво кое го има кога диодата е неполаризирана. Овој период се дефинира како време на растворување на диодата.

Опаѓањето на концентрацијата на споредните носители продолжува и понатаму, се додека инверзната струја на спојот не ја достигне вредноста на заситувањето. Тоа е период на опаѓање на диодната струја. Се ова може да се разбере и како последица на постоење на дифузиониот капацитет на PN-спојот. Вкупното времетраење на преминувањето од директна во инверзно поларизирана состојба изнесува од 2 до 50 ns.

Во импулсните или прекинувачките диоди, наменети за такви операции, се применети технолошки постапки на додавање примеси на злато во силициумската плочка на диодата, со цел да се спречи создавање голема концентрација на споредните носители.

Според времето на исклучување, импулсните диоди се делат на микросекундни ($t_r > 0,1 \mu s$) и наносекундни ($t_r < 0,1 \mu s$).

Импулсните диоди се употребуваат во дигиталните прекинувачки кола за извршување на логички операции со електрични сигнали од импулсен облик.

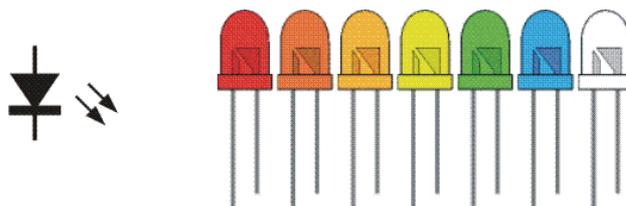
1.6.2.4. LED диода

LED или **светлечка диода** (името доаѓа од кратенката на англискиот израз **Light Emitting Diode** - диода која емитира светлина) претставува извор на светлина. Принципот на работа на LED диодата се базира на својството на електронот да емитира енергија од одредена област на видливиот спектар, кога преминува од повисоко во пониско енергетско ниво. За тоа е потребен надворешен извор за напојување.

Бојата на зрачењето не зависи од јачината на струјата на диодата, туку од видот на полупроводниот материјал од кој е направена.

Секој хемиски елемент има своја емисија на зрачна енергија. Така, на пример, диода направена од комбинација на галиум, арсен и фосфор дава црвена светлина. Со промена на хемиската комбинација на PN-спојот можат да се добијат разни бои од видливиот дел на спектарот, како црвена, зелена, сина, жолта, или инфрацрвена (IR) и ултравиолетова (UV), од невидливиот дел на спектарот. Другите бои можат да се добијат како комбинација на две или повеќе примарни бои (**црвена**, **сина**, **зелена**) на диоди ставени во исто куќиште и користејќи заедничка оптичка леќа.

Електричниот симбол и изглед на LED диода е даден на **слика 1.33**.



Слика 1.33: Електричен симбол и изглед на LED диода.

За нормална работа, LED диодата користи директна поларизација, а напонот на краевите на диодата се движи меѓу 1,6V и 3V, зависно од бојата. Типична работна струја на LED диода со стандардна големина изнесува околу 20mA, а максимален инверзен напон до 5V. Освен стандардните, постојат и високоефикасни LED диоди со работна струја од 2 до 8mA. **LED диодата има поголема брзина на вклучување и исклучување, што овозможува да се користи за пренос на дигитални информации преку фиброоптички влакна со голема брзина (до 10 импулси во секунда).**

Ласерските диоди се тип на светлечки диоди и се користат кај оптичките уреди (ЦД и ДВД читачи/режачи) и кај комуникациите со голем капацитет (оптички влакна и оптичка комуникација).

OLED (кратенка на англискиот израз Organic Light-Emitting Diode) диода претставува светлечка диода направена од органски полупроводник. Нејзиниот емитирачки пласт, подлогата и анодниот и катодниот приклучок се направени од органски молекули кои спроведуваат електрична струја. **OLED диодите се употребуваат во ТВ-екраните,**

компјутерските монитори, мобилните телефони, часовници, во светлечките реклами и информации во информациски апликации и патокази, мобилните телефони, часовници и слично.

Со развојот на нови материјали се зголемува ефикасноста на LED диодите и тие стануваат реален извор на светлина со кој се заменуваат стандардните светилки. Моќноста на диодите со голема ефикасност достигнува вредност до 5W со 18-20 lm/W, што е повеќе од вредноста што ја дава стандардна светилка со вжештена спирала од 60 до 100W.

1.6.2.5. PIN диода

PIN диодите се составени од три полупроводни подрачја. Помеѓу подрачјата од P и N-тип се наоѓа област на чист полупроводник (I). При директна поларизација, спроводливоста на I-подрачјето се менува со јачината на струјата. Отпорноста на I-подрачјето е голема при мали вредности на еднонасочната струја, а мала при големи. Оваа особина на PIN диодата, формирање отпорност која може да се менува со помош на еднонасочна струја, односно напон, овозможува **PIN диодата се употребува како прекинувачки елемент, како модулатор или како променлив отпорник во електрични кола со автоматска регулација на засилувањето.**

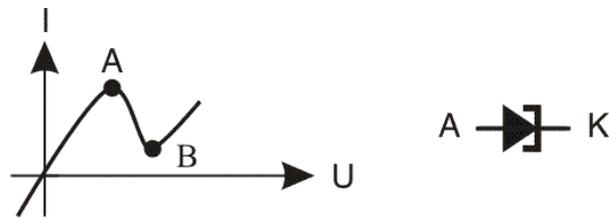
Структурата и електричниот симбол на PIN диодата се дадени на **слика 1.34**.



Слика 1.34: Структура и електричен симбол на PIN диодата.

1.6.2.6. Тунел диода

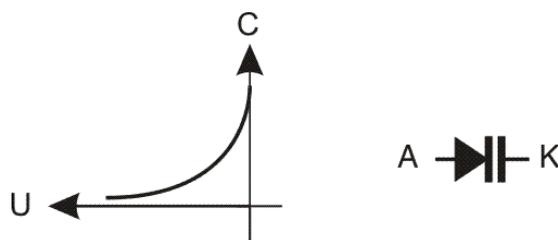
Тунел диодите се изработуваат од германиум со голема концентрација на примеси. Ширината на зоната на попречување во PN-спојот на тунел диодата е обратно пропорционална со концентрацијата на слободните носители, па тунел диодите, поради зголемениот процент на примеси, имаат многу мала ширина на зоната. На **сликата 1.35** се дадени струјно-напонската карактеристика на тунел диодата и нејзиниот електричен симбол. Делот од карактеристиката од точката A до точката B се нарекува “област на негативна спроводливост” бидејќи со зголемување на напонот на краевите на диодата се намалува струјата низ неа. Тунел диодите се употребуваат во прекинувачките и засилувачките кола, а најчесто во осцилаторите. **Тунел диодата е диода со голема брзина и има примена во засилувачите во областа на микробранови.**



Слика 1.35: Ступно-напонската карактеристика и електричен симбол на тунел диодата.

1.6.2.7. Варикап диода

Варикап - капацитивни диоди се полупроводнички диоди чија капацитивност се менува со промена на приклучениот напон на нејзините краеве. Зависноста на капацитивноста од приклучениот напон и електричниот симбол на варикап диодата се дадени на **слика 1.36**.



Слика 1.36: Завсност на капацитивноста од приклучениот напонот и електричен симбол на варикап диодата.

Капацитивните диоди се применуваат во осцилаторните кола во радио и телевизиската техника во областа на високи фреквенции, во колата за автоматско регулирање на фреквенцијата, како променливи кондензатори со електрично управување. Во областа на микробранови се применува посебен вид на варикап диода, т.н. варактор диода, која служи за умножување на фреквенцијата.

1.6.2.8. GUN диода

GUN диода е диода која содржи полупроводник од N-тип. Таа има три подрачја, од кои, две со голема густина на примеси на краевите, и едно со мала густина на примеси кое се наоѓа меѓу нив. **GUN диодата** има негативен отпор и се користи во осцилатори во фреквентниот опсег од 10GHz.

РЕЗИМЕ

*Точкеста диода се изработува од германиум, напонот на директно поларизирана диода е $0,3V$, сопствениот капацитет е помал од $1pF$, се применува во кола за високи фреквенции.

*Насочувачка диода е диода со површински спој, може да издржи струја со голема јачина и релативно висок инверзен напон, се употребува во насочувачки кола и склопови.

*Зенер диода работи во област на пробив со инверзни напони, се користи за стабилизација на напон.

*Импулсната диода има брз премин од неспроводна во спроводна состојба, се користи за импулсни и логички кола.

*Лед или светлечка диода дава светлина под влијание на надворешен извор за напојување, работи со директна поларизација.

✓ **ПРОВЕРИ ШТО ЗНАЕШ**

- Какви видови полупроводнички диоди разликуваме според конструкцијата?
- Објасни ја изработката на диодите со точкест спој?
- Каде наоѓаат примена диодите со точкест спој?
- Каде наоѓаат примена насочувачките диоди?
- Кои ограничувања ги има насочувачката диода?
- Како се делат насочувачките диоди?
- Објасни ги стабилизационото дејство на зенер диодата со помош на статичката карактеристика!
- Нацртај го шематскиот приказ на зенер диодата!
- За кои напони на стабилизација се изработуваат зенер диодите?
- Кои се основните параметри за избор на зенер диодата?
- Каде наоѓаат примена импулсните диоди?
- Нацртај ја шематска ознака на LED, PIN, варикап и тунел диода.
- Каде наоѓаат примена LED, GUN, PIN, OLED, варикап, тунел и ласерските диоди?

ТЕМАТСКО УТВРДУВАЊЕ

I Прашања со заокружување (Заокружи ги точните одговори)



1. Активни компоненти се:

- а) отпорници
- б) диоди
- в) тиристори
- г) кондензатори.

2. Во аналогни кола спаѓаат:

- а) мемории
- б) микропроцесори
- в) осцилатори
- г) засилувачи
- д) филтри.

3. Материјалите со голем број слободни електрони се:

- а) полупроводници
- б) проводници
- в) изолатори.

4. Полупроводник од P-тип се добива со внесување на

- а) тривалентни атоми
- б) четривалентни атоми
- в) петвалентни атоми

во кристалната решетка на германиум или силициум.

5. Кога позитивниот пол на изворот се поврзе со N-подрачјето на PN-спојот, тогаш тој:

- а) е директно поларизиран
- б) не е поларизиран
- в) е инверзно поларизиран.

II Прашања со поврзување

6. Поврзи ги електричните симболи со соодветните диоди:



а)



б)



в)



г)



д)

- 1. Зенер диода _____
- 2. Насочувачка диода _____
- 3. LED диода _____
- 4. Варикап диода _____.

7. Поврзи ја групата материјали со нивната специфична отпорност:

- 1. Полупроводници а) од 10^{-6} до 10^{-5} Ωcm _____
- 2. Изолатори б) од 10^6 до 10^8 Ωcm _____
- 3. Проводници в) од 10^{-3} до 10^7 Ωcm _____.

8. Поврзи го типот на полупроводник со главните носители:

- 1. P-тип а) електрони _____
- 2. N-тип б) празнини _____.

9. Поврзи го дејството на идеалната диода со поларизацијата:

- 1. Затворен прекинувач а) директна поларизација _____
- 2. Отворен прекинувач б) инверзна поларизација _____.

10. Поврзи ја диодата со нејзината примена:

- | | |
|---|----------------------|
| 1. Кола за автоматска регулација на фреквенцијата | а) тунел диода _____ |
| 2. Осцилатори | б) варикап _____ |
| 3. Модулатори | в) зенер диода _____ |
| 4. Стабилизатори на напони | г) PIN диода _____ . |

III Прашања со дополнување

11. При температура на апсолутната нула ($-273^{\circ}\text{C} = 0\text{K}$) полупроводникот се однесува како _____ .

12. Со внесување на петвалентни атоми во кристалната решетка на германиум или силициум се добива полупроводник од _____ тип.

13. Полупроводник од N-тип се добива со внесување на _____ валентни атоми во кристалната решетка на германиум или силициум.

14. Ако се поврзе позитивниот пол на изворот со приклучокот на P-подрачјето од PN-спојот, а негативниот пол на приклучокот на N-подрачјето на PN-спојот, тогаш PN-спојот ќе биде _____ поларизиран .

15. Струјно - напонска карактеристика на диода претставува зависност на _____ на диодата од _____, при одредена константна _____ .

Вежби за активно учење:

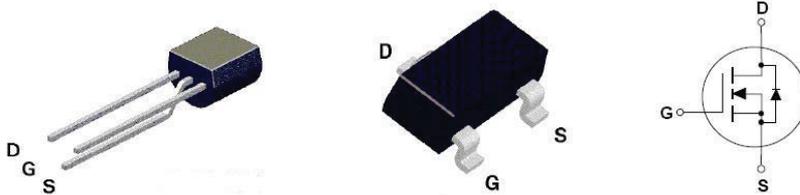


- ❖ Обиди се да откриеш во кои уреди од твоето домаќинство имаат примена диодите.
 - ❖ Истражувај на интернет за видови и поширока примена на диодите од изложената во текстот и врз основа на истражувањето изработи проект.
 - ❖ На часовите по практична настава согледај го насочувачкото дејство на полупроводничката насочувачка диода со помош на осцилоскоп.
 - ❖ Пронајди на интернет фотографии од различни видови диоди, и со помош на професорот пробај да ги препознаеш.
-

2. ТРАНЗИСТОРИ

Со изучување на содржините од оваа тема, ќе стекнеш знаења за транзисторите и ќе можеш:

- да го објаснуваш создавање на транзисторот со помош на PN-споеви;
- да ги разликуваш видовите на транзистори;
- да го сватиш начинот на поларизација кај транзисторите;
- да ја разликуваш поларизацијата и начинот на работа меѓу PNP и NPN-транзистор;
- да ги претставуваш графичките статичките карактеристики на транзисторите;
- да го објаснуваш коефициентот на струјното засилување на транзисторот;
- да го претставуваш транзисторот преку еквивалентно коло со h-параметри;
- да ја познаваш улогата на транзисторот како засилувачки елемент;
- да ја објаснуваш разликата меѓу статичката и динамичката работна права и работна точка;
- да ја познаваш улогата на транзисторот како прекинувачки елемент;
- да ги разликуваш работни режими кај транзисторот кој работи како прекинувачки елемент;
- да го објаснуваш принципот на работа на FET-от;
- да ја познаваш разликата во начинот на работа меѓу биполарен транзистор и FET;
- да ја познаваш практичната примена на разните видови на транзистори.



Полупроводнички елемент со два PN-споја и три електроди претставува транзистор. Називот транзистор е добиен од англиските зборови **TRANS**fer res**ISTOR**, со значење преносна отпорност, или поточно, отпорност со која може да се управува.

Транзисторите можат да се поделат на две основни групи: биполарни транзистори и транзистори со ефект на поле (FET – **F**ield **E**ffect **T**ransistor). Двете групи се со слична конструкција со примена на PN-споеви, но со различен принцип на работа. Кај биполарните транзистори, во вкупната струја која тече низ транзисторот, учествуваат два вида на носители на полнеж – главни и споредни, за разлика од транзисторите со ефект на поле, кај кои струјата е формирана само од еден вид на носители на полнежот. Во анализите на случувањата во внатрешноста на полупроводниците, ќе се користи електронската насока на струјата.

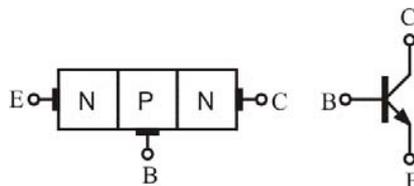
Според режимот на работа, транзисторите од двете групи можат да се поделат на засилувачи и на прекинувачи.

2. Транзистори

Структурата на биполарниот транзистор е составена од две PN-диоды со површински спој, ставени во процесот на производството многу блиску една до друга, така што да го споделат заедничкиот регион. Според тоа, биполарниот транзистор претставува спој од два полупроводника од едниот вид, меѓу кои е вметнат полупроводник од другиот вид. Таков распоред е можен во две варијанти означени со NPN и PNP.

2.1. NPN-транзистор

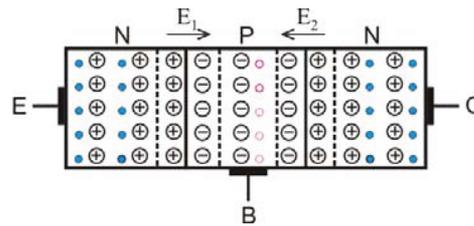
NPN транзисторот е составен од два PN-споја, допрени со P подрачјата. Неговата структура и шематската ознака се дадени на **слика 2.1**.



Слика 2.1: Структура и шематската ознака на NPN-транзистор.

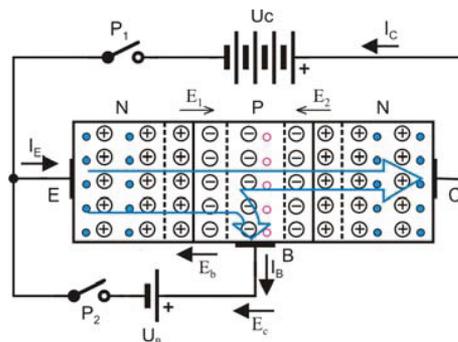
Средното подрачје на транзисторот се вика **база (B)** и во конструкцијата на транзисторот се бара да биде што потенок. Неговата ширина, за некои видови транзистори, може да има вредност околу 50 μm (за споредба, дебелината на спојот изнесува 1 μm). Едниот крај на N подрачјето се вика **емитер (E)** и има основна задача да емитира носители на полнеж - електрони, кои патуваат преку базата (B) и се собираат на спротивниот крај на транзисторот,

наречен **колектор (C)**. Процентот на примесите во N подрачјата е поголем од оној на P подрачјето.



Слика 2.2: Графички приказ на NPN-транзистор.

За подобро разбирање на процесите ќе се послужиме со графички приказ на NPN-транзисторот, даден на **слика 2.2**. Од сликата се гледа дека по завршениот процес на формирање на единствениот кристал, се создаваат две потенцијални бариери и две зони на попречување со внатрешните полиња E_1 и E_2 со спротивни насоки. Едната е на спојот емитер база, кој е наречен емитерски, а другата на спојот меѓу базата и колекторот и тој е наречен колекторски. Начинот на формирањето на бариерите е еднаков на оној што веќе е опишан во поглавјето 1.4 за полупроводниците и за диодите.



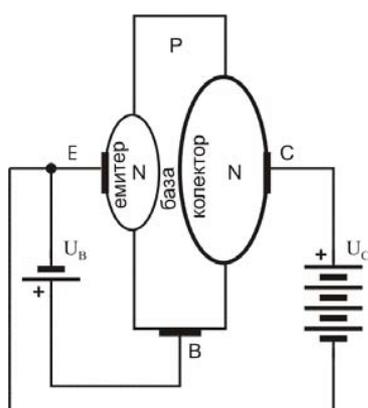
Слика 2.3: Поларизација на NPN-транзистор.

За поларизација на споевите се потребни два еднонасочни извори (**слика 2.3**). Изворот U_B е врзан меѓу базата и емитерот, а изворот U_C меѓу колекторот и емитерот.

Кога прекинувачот P_1 е затворен, а P_2 отворен, изворот U_C формира надворешно поле E_C , ориентирано од колекторот кон емитерот. Неговата насока се совпаѓа со насоката на внатрешното поле E_2 , а неговиот ефект е да го засили дејството на полето E_2 , се проширува зоната на попречување на колекторскиот спој и струјата I_C не може да тече.

Состојбата драстично се менува со затворање на прекинувачот P_2 . Изворот U_B создава надворешно поле E_b меѓу базата и емитерот, насочено од базата кон емитерот. За доволно голема вредност на напонот на изворот, надворешното поле E_b му се спротивставува на внатрешното поле E_1 и го прави емитерскиот спој директно поларизиран. Слободните електрони во голем број преминуваат од регионот на емитерот преку емитерскиот спој и навлегуваат во регионот на базата. Но, бидејќи областа на базата е многу мала и располага

со мал број празнини, можноста за рекомбинација меѓу електроните и празнините е многу мала. Само оние електрони што се рекомбинираат со празнините учествуваат во формирањето на базната струја I_B . Останатиот број електрони не можат да се насочат кон приклучокот на базата, тие по пат на дифузија се преместуваат на границата на зоната на попречување меѓу базата и колекторот. Тука, тие паѓаат под влијание на полето E_C и E_2 , го поминуваат колекторскиот спој и одат во регионот на колекторот. Како резултат, во колото емитер колектор ќе протече струјата I_C . Јачината на таа струја ќе зависи од бројот на слободните електрони кои преминале преку емитерскиот спој, односно од степенот на поларизацијата на емитерскиот спој. Значи, кај NPN-транзистор ќе тече струја меѓу емитер и колектор, само ако тече струја во колото емитер база, а тоа се случува кога колекторот е на повисок потенцијал од потенцијалот на базата кон емитерот ($U_{CE} \geq U_{BE} \geq 0.7V$).



Слика 2.4: Физички распоред на полупроводните региони на NPN-транзистор.

Од сликата на реалниот физички распоред на полупроводниците на NPN-транзистор (слика 2.4), се добива уште појасна претстава за процесот на формирањето на колекторската струја I_C . Ширината на базата меѓу емитерот и колекторот за некои видови транзистори изнесува до $50 \mu m$, а самиот спој меѓу полупроводниците P и N е околу $1 \mu m$. Површините на споевите база-колектор и база-емитер не се еднакви. Површината на колекторскиот спој е три пати поголема од површината на емитерскиот спој. Ова е потребно за да може колекторот да ги собере сите електрони кои доаѓаат од емитерот.

Поларитетот на изворите U_C и U_B е многу битен за функционирањето на транзисторот. Што ќе се случи ако се промени поларитетот на едниот или на двата извора? Да го промениме поларитетот само на изворот U_C , прекинувачот P_2 да биде отворен, а да го затвориме прекинувачот P_1 (слика 2.3). Како прво, се свртува насоката на полето E_C и таа се совпаѓа со насоката на полето E_1 . Потенцијалната бариера на емитерскиот спој се зголемува, се проширува зоната за попречување и транзисторот станува блокиран.

Ако го затвориме сега и прекинувачот P_2 , емитерскиот спој станува директно поларизиран и протекува струја I_B од емитерот кон базата. Но, во исто време протекува и голема струја од емитерот, преку подрачјето на базата кон колекторот преку колекторскиот спој на кој нема

никаква потенцијална бариера. Бариерата е поништена со дејството на полето E_C и нема никакво дејство кое би го сопрело преминувањето на електроните преку колекторскиот спој, што може да предизвика уништување на транзисторот. Од друга страна, двата извора, во однос на колото база колектор се приклучени во серија и нивниот напон, како збир, го поларизира директно колекторскиот спој, што придонесува за зголемување на струјата.

Ако го свртиме поларитетот и на изворот U_B , двата извора и натаму остануваат врзани во серија меѓу базата и колекторот, но нивните напони се одземаат. Напонот база колектор е: $U_{BC} = U_B - U_C$. Овој напон ќе биде позитивен, односно базата ќе биде на повисок потенцијал од колекторот и спојот ќе биде директно поларизиран само кога е $U_B > U_C$. Во тој случај ќе дојде до оштетување на транзисторот.

Ако го свртиме поларитетот на изворот U_B , полето E_b ќе ја смени насоката и емитерскиот спој ќе биде инверзно поларизиран. Но, ако напонот на изворот U_C е поголем од напонот на изворот U_B , полето E_C ќе го поништи дејството на полето E_b и емитерскиот спој ќе биде директно поларизиран, што предизвикува оштетување на транзисторот. Само ако напонот на изворот U_B е еднаков или поголем од напонот на изворот U_C , транзисторот ќе биде заштитен.

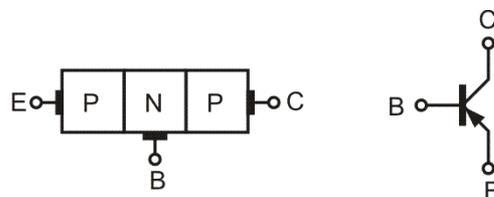
Струјата може да се ограничи и со додавање отпорници во надворешното коло.

✓ ПРОВЕРИ ШТО ЗНАЕШ

- Дефинирај го поимот транзистор.
- Какви видови транзистори постојат?
- Нацртај ја шематската ознака на NPN-транзисторот.
- Колку електроди има транзисторот и како се нарекуваат?
- Како се создава струјата при поларизацијата на NPN транзисторот?

2.2. PNP-транзистор

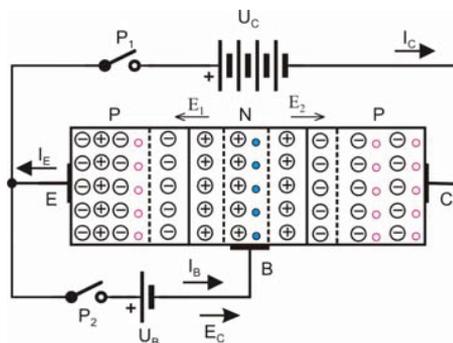
PNP транзисторот е составен од два PN-споја, допрени со N-подрачјата. Неговата структура и шематскиот знак се дадени на **слика 2.5**.



Слика 2.5: Структура и шематска ознака на PNP-транзистор.

Целата негова конструкција е иста со конструкцијата на NPN-транзисторот, со таа разлика што P и N-полупроводниците ги менуваат местата. Овде емитерот и колекторот се од P-тип, а базата е од N-тип. PN-споевите се поставени така што внатрешните полиња E_1 и E_2 сега се насочени едното спротивно од другото и во спротивна насока од онаа кај NPN-транзисторот. Процентот на примесите е поголем во P-подрачјата од оној на N-подрачјето, што значи дека овде главната струја е струја на празнините.

За разјаснување на процесите што се одвиваат во PNP-транзисторот ќе се послужиме со скицата, дадена на **слика 2.6**. Се забележува дека изворите U_C и U_B се поставени спротивно во однос на сличната скица на слика 2.3.



Слика 2.6: Графички приказ на PNP-транзистор.

Со затворање на прекинувачот P_1 , во внатрешноста на транзисторот се формира поле E_C со дејството на изворот U_C . Тоа поле е насочено од емитерот кон колекторот и го помага дејството на полето E_2 , со што се зголемува потенцијалната бариера и се проширува зоната на попречување меѓу базата и колекторот и транзисторот останува блокиран.

Со затворање на прекинувачот P_2 , емитерскиот спој директно се поларизира. Попречниот слој на емитерскиот спој се стеснува и се поништува, голем број празнини навлегуваат во подрачјето на базата. По пат на дифузија тие се поместуваат кон работ на подрачјето на попречување на колекторскиот спој, каде што паѓаат под влијание на резултантното поле на E_C и E_2 , го поминуваат подрачјето на попречување и се упатуваат кон колекторот и кон неговиот метален приклучок, каде што извлекуваат електрони од изворот U_C преку спроводникот кој е сврзан со колекторот. Оваа експресна анализа потсетува само дека се работи за истиот процес кој веќе е анализиран кај NPN-транзисторот.

Истите опасности од уништување на транзисторот постојат и кај PNP транзисторот ако дојде до свртување на поларитетот на изворите за напојување.

✓ ПРОВЕРИ ШТО ЗНАЕШ

- Нацртај ја шематската ознака на PNP-транзисторот.
- Каква насока имаат внатрешните полиња E_1 и E_2 во PNP транзисторот во однос на NPN-транзисторот?

- Кој спој се нарекува емитерски, а кој колекторски?
- При каква поларизација може да дојде до уништување на транзисторот?

2.3. Инверзна струја

Да се вратиме сега на слика 2.3 и на состојбата кога е затворен само прекинувачот P_1 . Во транзисторот не тече струја, констатација до која е дојдено со следењето на движењето на основните носители – електроните. Ако се земе предвид постоењето и на споредните носители на полнежот, состојбата ќе се промени.

Празнините, споредните носители во подрачјето на колекторот, под влијание на полето K_C се движат кон подрачјето на базата, лесно преминуваат преку колекторскиот спој и навлегуваат во многу тесното подрачје на базата. Со оглед на разликата во ширината на подрачјето на колекторот и на базата, бројот на празнините дојдени во подрачјето на базата е многу поголем од бројот на електроните – споредни носители создадени во подрачјето на базата. Мал дел од празнините се рекомбинира со електроните од базата. Останатиот поголем број празнини, се уште под влијание на полето E_C , преминува и преку емитерскиот спој, совладувајќи ја потенцијалната бариера на спојот и се упатува кон металниот приклучок на емитерот, каде што извлекува електрони од изворот за напојување преку спроводникот со кој е врзан изворот со емитерот. На тој начин се формира инверзната струја која тече од колекторот кон емитерот. Таа струја ќе ја означиме со I_{CE0} како инверзна струја од колекторот кон емитерот со отворено коло на базата. Јачината на оваа струја зависи од бројот на раскинатите валентни врски, што значи од температурата на транзисторот.

Истото се случува и кај PNP-транзисторот, само што струјата I_{CE0} во него потекнува од електроните како споредни носители на полнеж во P-подрачјето на колекторот. Таа има спротивна насока од онаа на NPN-транзисторот и тоа од емитерот кон колекторот.

РЕЗИМЕ

***Биполарен транзистор е струјно управуван електронски елемент со три изводи: колектор, база и емитер, во кој струјата поминува преку два PN – споја.**

***Според распоредот на споевите, транзисторот може да биде од NPN или од PNP-тип.**

***NPN транзистор е составен од два N-полупроводника со вметнат P-полупроводник меѓу нив. Главни носители на електричниот полнеж се електроните.**

***PNP-транзистор е составен од два P-полупроводника со вметнат N-полупроводник меѓу нив. Главни носители на полнежот се празнините.**

***Во колекторското коло на транзисторот тече струја само ако тече и базната струја.**

*Инверзната струја на транзисторот е струја на споредните носители на полнеж, таа тече од колекторот кон емитерот кај NPN и од емитерот кон колекторот за PNP-транзисторот, при отворено коло на базата.

* При поларизација на NPN-транзисторот, колекторот е на повисок потенцијал од базата а базата од емитерот.

* При поларизација на PNP-транзисторот, емитерот е на повисок потенцијал од базата а базата од колекторот.

✓ ПРОВЕРИ ШТО ЗНАЕШ

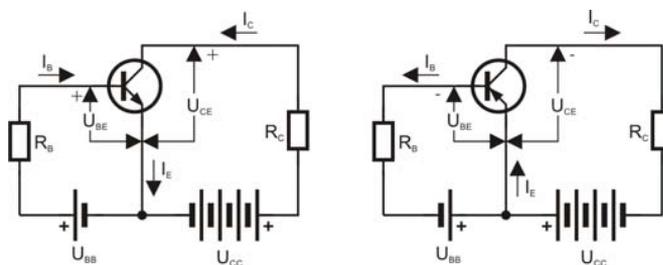
- Кои носители ја создаваат струјата во NPN-транзисторот?
- Кои носители ја создаваат струјата во PNP-транзисторот?
- Како се создава струјата I_{CE0} во транзисторот?
- Од што зависи јачината на струјата I_{CE0} ?

2.4. Карактеристики на транзисторот

Кај транзисторот постојат два режима на работа: статички и динамички. Статички режим на работа имаме кога во колото на транзисторот постојат само еднонасочни напони и струи со кои се поларизира транзисторот. Транзисторот се поларизира така што емитерскиот спој ќе биде директно поларизиран, а колекторскиот инверзно. Во динамичкиот режим на работа, покрај еднонасочните напони и струи, имаме напон и струја на наизменичен сигнал, кој треба да се засилува.

2.4.1. Статички режим на работа

Колото на транзисторот во статички режим на работа е прикажано на **слика 2.7**. За анализа го користиме колото со NPN-транзисторот, која важи и за колото со PNP-транзистор, само со спротивни насоки на струите и напоните. Во колото на колекторот и на базата се ставени отпорникот R_B , со кој се одредува базната струја и отпорникот R_C , со кој се одредува колекторската струја.



Слика 2.7: Колото на транзисторот во статички режим на работа.

Во анализата ќе ги користиме следниве ознаки:

U_{CE} – напон колектор–емитер

U_{BE} – напон база–емитер

U_{CC} - напон на изворот за напојување на колекторот

U_{BB} - напон на изворот за напојување на базата

I_C - колекторска струја

I_B - базна струја

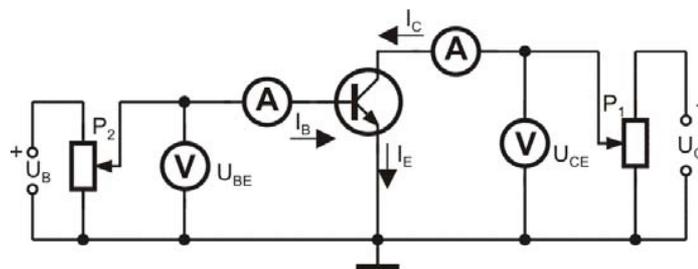
I_E - емитерска струја

Во анализата на принципите на работа на транзисторите е користен метод на електронската насока на струите. Во пресметките, пак, вообичаено е да се користи метод на техничката насока, при што се работи само за промена на знаците на струите во однос на оние од електронската насока.

2.4.2. Статички карактеристики

Од горе наведените, четири големини се со јасно изразена меѓусебна зависност. Тоа се: базната струја I_B и напонот база - емитер U_{BE} , како влезни, и колекторската струја I_C и напонот колектор - емитер U_{CE} , како излезни големини. Нивните зависимости можат да се претстават графички преку статичките карактеристики на транзисторот. Бројот на овие карактеристики е доста голем, но нема потреба од сите за пресметка на транзисторско коло со графичка метода.

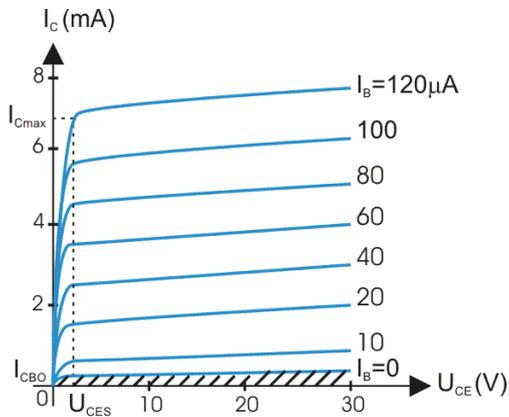
Комплетните карактеристики ги дава производителот на транзисторот, или се добиваат со едноставно коло за мерење. Такво коло е прикажано на **слика 2.8**.



Слика 2.8: Коло за мерење на статичките карактеристики на NPN-транзистор во спој со заеднички емитер.

На **слика 2.9** се прикажани карактеристиките на промената на колекторската струја I_C во зависност од промената на напонот U_{CE} за различни вредности на базната струја I_B , според функцијата:

$$I_C = f(U_{CE}) \text{ за } I_B = \text{const.} \dots\dots\dots(2.1)$$



Слика 2.9: Излезна карактеристика.

Оваа карактеристика се вика излезна и може да се снима со колото од слика 2.8. Напонот U_{CE} се мери со волтметар, врзан меѓу колекторот и емитерот, а колекторската струја I_C со милиамперметар, врзан во серија во колекторското коло. Потребно е уште да се мери и базната струја I_B со микроамперметар, врзан во серија во колото на базата.

Првата од карактеристиките се мери така што со потенциометарот P2 се регулира струјата I_B да биде 0, а со P1 се менува напонот U_{CE} во чекори од по 1V, почнувајќи од нула па до 10V и за секој чекор се забележува вредноста на струјата I_C , при што се води сметка струјата I_B да не се промени. Добиените резултати се внесуваат во координатниот систем $I_C - U_{CE}$ и со поврзување на точките се добива кривата $I_C = f(U_{CE})$ за $I_B = 0$.

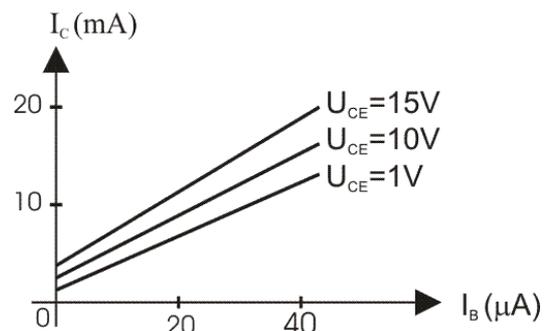
Потоа следува снимање на следната крива, така што со P2 се регулира да се добие струја I_B од $10\mu A$, а целата постапка се повторува како и претходно. Со натамошна промена на струјата I_B на вредностите 20, 40, 60, 80, 100, $120\mu A$ се добиваат сите останати криви на дијаграмот.

Карактеристиката:

$$I_C = f(I_B) \text{ за } U_{CE} = \text{const.} \quad (2.2)$$

ги дава промените на колекторската струја I_C во зависност од промените на базната струја I_B за разни вредности на напонот U_{CE} . Таа е дадена на **слика 2.10** и е наречена преносна карактеристика. Оваа карактеристика одредува како се менува излезната струја со промена на влезната струја, а тоа значи какво е влијанието на влезот врз излезот.

Мерењето и на овие карактеристики може да се прави со истото мерно коло од слика 2.8. Напонот U_{CE} се нагодува со потенциометарот P1 на една вредност, на пример, 1V, потоа со P2 се менува базната струја во чекори од по $20\mu A$ и на милиамперметарот се отчитуваат вредностите на колекторската струја. При тоа, се води сметка вредноста на напонот U_{CE} да не се промени.



Слика 2.10: Преносна карактеристика.

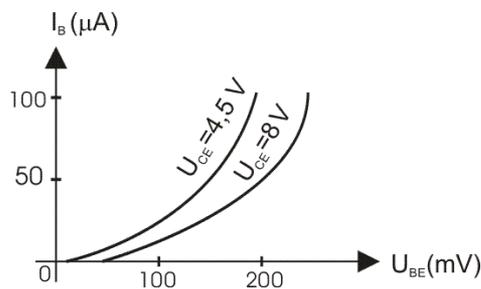
Ако се промени, се прави прво корекција на тој напон со P1, па потоа се прави читањето на вредноста на струјата I_C . Следното мерење е со поголема вредност на U_{CE} , како, на пример, 10V, следното на 15V итн. Со внесувањето на резултатите, се добиваат карактеристиките како на слика 2.10.

Карактеристиката:

$$I_B = f(U_{BE}) \text{ за } U_{CE} = \text{const.} \dots\dots\dots(2.3)$$

ја претставува промената на базната струја I_B во зависност од промените на напонот база - емитер U_{BE} за разни вредности на напонот колектор - емитер U_{CE} и позната е како влезна карактеристика.

Мерењето се прави со колото на слика 2.8, во коешто напонот база - емитер се регулира со потенциометарот R_2 , а напонот U_{CE} со потенциометарот P_1 . Со промена на напонот U_{BE} се менува струјата, при што се води сметка напонот U_{CE} да има постојано иста вредност. Следното мерење се прави со повисока константна вредност на U_{CE} итн. Ако се внесат измерените резултати во координатниот систем на оските $I_B - U_{BE}$, се добива резултат како на **слика 2.11**.

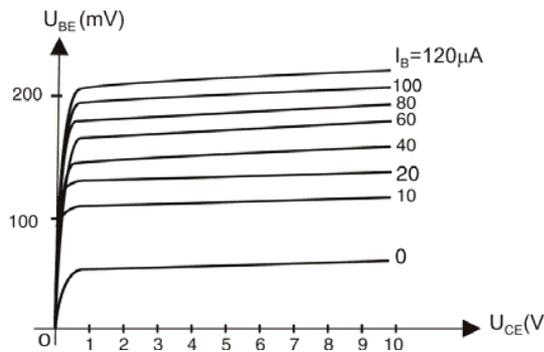


Слика 2.11: Влезна карактеристика.

Последната од карактеристиките од интерес е карактеристиката:

$$U_{BE} = f(U_{CE}) \text{ за } I_B = \text{const.} \dots\dots\dots(2.4)$$

Таа ја претставува промената на напонот база – емитер U_{BE} во зависност од промената на напонот колектор – емитер U_{CE} за разни вредности на базната струја I_B . Со неа се одредува реакцијата на излезното врз влезното коло на транзисторот. Мерењето се прави со истото мерно коло како и досега. Резултатите на мерењето ја даваат **слика 2.12**.



Слика 2.12: Зависноста на напонот U_{BE} од напонот U_{CE} .

2.4.3 Параметри на транзисторот

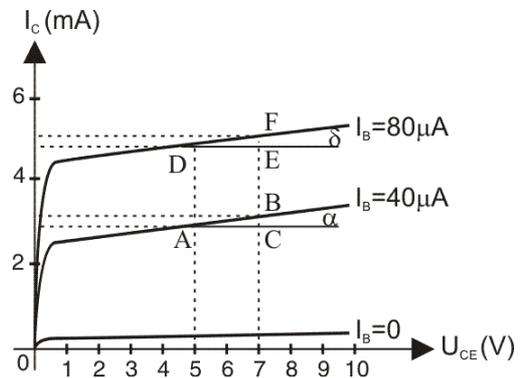
Статичките карактеристики на транзисторот даваат можност за дефинирање и за проучување на статичките параметри на транзисторот. Тие се нарекуваат статички, затоа што се дефинираат во услови на постоење само на еднонасочните напони и струи во колото на транзисторот.

Излезната карактеристика $I_C = f(U_{CE})$ за $I_B = \text{const.}$, дава можност за проучување на три важни параметри на транзисторот:

- излезниот отпор,
- струјното засилување,
- работната права.

2.4.3.1 Излезен отпор на транзисторот

Статичката работна точка на транзисторот е дефинирана со три големини: напонот U_{CE} , струјата I_{CE} и струјата I_B и таа лежи на една од карактеристиките. Излезната карактеристика на транзисторот дава можност да се одреди излезниот отпор R_{iz} во работната точка, како што е прикажано на **слика 2.13**.



Слика 2.13: Одредување на излезниот отпор на транзисторот.

На пример, за напонот $U_{CE} = 5V$ и за базната струја $I_B = 40\mu A$ се добива работна точка A, така што од точката 5V на апсцисната оска се крева вертикала до пресекот со карактеристиката за базна струја од $40\mu A$. На таа точка и одговара колекторска струја од 4,5mA.

Ако од точката A повлечеме хоризонтална линија, таа со карактеристиката ќе зафаќа агол α . Овој агол е дефиниран со неговиот тангенс како:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{CB}{CA} = \frac{\Delta I_C}{\Delta U_C} = \frac{1}{R_{iz}} \quad \text{(во точката A)} \dots \dots \dots (2.5)$$

Тангенсот на аголот α го одредува излезниот отпор R_{iz} на транзисторот во точката A. Промена на колекторскиот напон од 2V ќе даде промена на колекторската струја од 0,2mA, што е одредено со карактеристиката. Излезниот отпор во тој пример ќе биде:

$$R_{iz}(A) = \frac{\Delta U_{CE}}{\Delta I_C} = \frac{2}{2 \cdot 10^{-4}} = 10000 \Omega.$$

Ако се зголеми вредноста на базната струја на $80\mu\text{A}$, при еднаков напон U_{CE} од 5V , се добива точката D. Аголот на карактеристиката со хоризонталата го одредува излезниот отпор на транзисторот во точката D:

$$\text{tg}\delta = \frac{EF}{DE} = \frac{\Delta I_C}{\Delta U_C} = \frac{1}{R_{iz}} \quad (\text{во точката D}) \dots \dots \dots (2.6)$$

Сега промената на колекторската струја ΔI_C изнесува $0,3\text{mA}$, а излезниот отпор ќе биде:

$$R_{iz}(D) = \frac{\Delta U_{\text{CE}}}{\Delta I_C} = \frac{2}{0,3 \cdot 10^{-3}} = 6666\Omega.$$

Точната дефиниција е дека реципрочната вредност на тангенсот на аголот на тангентата за одредена точка го претставува излезниот отпор на транзисторот во таа точка, но поради линеарниот дел на карактеристиката, тој се совпаѓа со аголот на самата карактеристика. Овој отпор опаѓа со растење на колекторската струја.

2.4.3.2. Коефициент на струјно засилување на транзисторот

Струјното засилување се дефинира како однос на промената на колекторската струја ΔI_C , предизвикана од промена на базната струја ΔI_B , се означува со β или h_{FE} и претставува неименуван број:

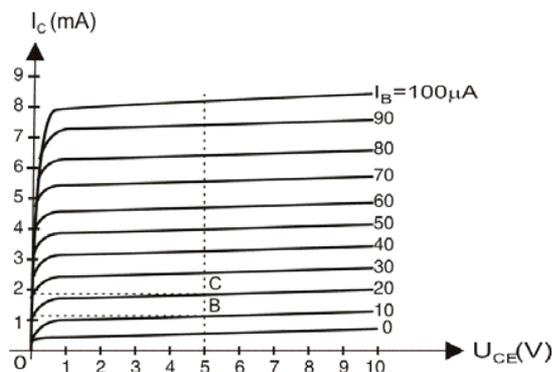
$$\beta = h_{\text{FE}} = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} \dots \dots \dots (2.7)$$

Кога промените на базната и колекторската струја се еднакви, односно кога е карактеристиката линеарна, изразот за струјното засилување може да се напише како:

$$\beta = h_{\text{FE}} = \frac{I_C}{I_B} \dots \dots \dots (2.8)$$

Ако одбереме една вредност на напонот U_{CE} на апсцисната оска на излезната карактеристика (на пример, 5V) и повлечеме вертикална линија, таа линија ќе има повеќе пресечни точки со карактеристиките за разни вредности на базната струја (слика 2.14).

Со пренесување на тие точки по хоризонтала на ординатната оска ќе добиеме промени на колекторската струја, предизвикани од промените на базната струја.



Слика 2.14: Одредување на струјното засилување.

Ако се помести статичката работна точка од точката В, во која има базна струја од 10mA, во точката С со базна струја од 20mA, колекторската струја ќе се зголеми од 1200mA на 1800mA, па за струјното засилување добиваме:

$$\beta = h_{FE} = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} = \frac{(1800 - 1200)}{20 - 10} = \frac{600}{10} = 60.$$

Промената на струјното засилување зависи од видот на транзисторите. За транзистори со мала моќност, растојанието меѓу карактеристиките, за иста промена на базната струја е константно, што значи дека нивното струјно засилување не зависи од јачината на колекторската струја. Струјното засилување кај транзисторите со поголема моќност има помала вредност и опаѓа со зголемувањето на колекторската струја.

2.4.3.3. Работна права

Во практиката, колекторот на транзисторот многу ретко директно се врзува на изворот за напојување. Меѓу колекторот и изворот најчесто се вградува отпорник R_C (како на слика 2.7), со кој се нагудува вредноста на напонот U_{CE} и служи како оптоварување на колекторското коло. Овој отпорник може да се претстави со права во излезните карактеристики на транзисторот. Положбата на правата зависи од вредноста на напонот на изворот и од вредноста на отпорот на оптоварувањето, а може да се одреди по математички пат.

За математичкото одредување се користи равенката на работната права, добиена со примена на II Кирхофов закон за излезното коло на транзисторот:

$$U_{CC} - R_C I_C - U_{CE} = 0. \dots\dots\dots(2.9)$$

или во друга форма како:

$$U_{CE} = U_{CC} - R_C I_C. \dots\dots\dots(2.10)$$

Сега треба да одредиме две точки и тоа: за $I_C = 0$, $U_{CE} = U_{CC}$ и за $U_{CE} = 0$, $I_C = \frac{U_{CC}}{R_C}$, да ги

внесеме во системот на излезните карактеристики $I_C - U_{CE}$ и да ги поврземе.

Така, на пример, ако се дадени вредностите за $U_{CC} = 10V$ и $R_C = 1K\Omega$, координатите на точките ќе бидат:

$I_C = 0$, $U_{CE} = 10V$, за точката А,

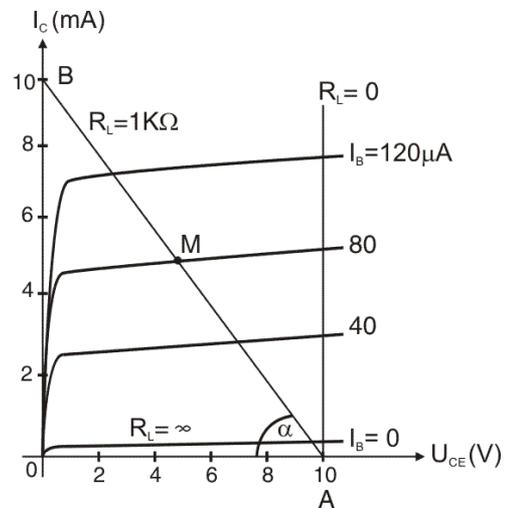
$U_{CE} = 0$, $I_C = \frac{10}{1000} = 10mA$, за точката В.

Добиената состојба се гледа на **слика 2.15**. Работната права зафаќа агол α со апсцисната оска, при што е:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{U_C}{R_C} = \frac{1}{R_C}. \dots\dots\dots(2.11)$$

Статичката работна точка М на транзисторот може да се најде само на работната права. Со намалување на отпорот, аголот се зголемува и се добива максимална вредност од 90° , кога е отпорот на оптоварувањето 0. Како се зголемува отпорот, така се намалува и аголот и тој се поклопува со апсцисната оска кога отпорот е бесконечно голем, односно кога колекторското коло е отворено и не тече колекторска струја.

Слика 2.15: Положба на работната права.



Побудна права

Но, да се вратиме за момент на слика 2.7 и да го анализираме колото на базата. Според II Кирхофов закон можеме да ја напишеме равенката на тоа коло како:

$$U_{BB} - R_B I_B - U_{BE} = 0 \dots\dots\dots (2.12)$$

или:

$$U_{BE} = U_{BB} - R_B I_B \dots\dots\dots (2.13)$$

од каде е:

$$I_B = \frac{(U_{BB} - U_{BE})}{R_B} \dots\dots\dots (2.14)$$

што претставува равенка на побудната права. Според оваа равенка може да се нацрта побудната права во влезните статички карактеристики на транзисторот. Се одредуваат двете точки:

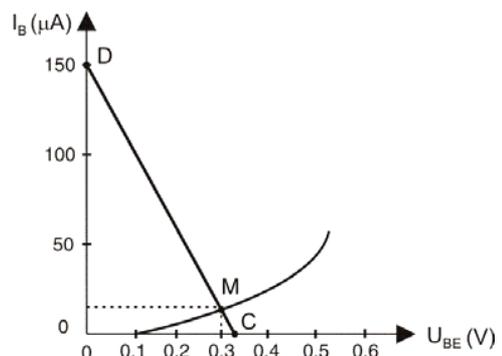
С за $I_B = 0$, $U_{BE} = U_{BB}$ и

Д за $U_{BE} = 0$, $I_B = \frac{U_{BB}}{R_B}$

и со нивното поврзување се добива побудната права (слика 2.16).

За германиумските транзистори, напонот U_{BE} не може да ја премине вредноста од 0,34 и тој може да се занемари во однос на вредноста на напонот U_{BB} . Според тоа, приближната вредност на еднонасочната струја на базата I_B ќе биде:

$$I_B \approx \frac{U_{BB}}{R_B} \dots\dots\dots (2.15)$$



Слика 2.16: Положба на побудната линија.

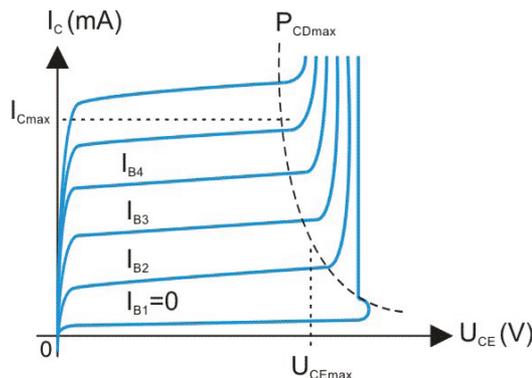
2.4.4 Ограничувања при работа на транзисторот

За правилна и сигурна работа на електронските кола со транзистори треба да се води сметка за максималните дозволени вредности на напонот, струјата и моќноста на транзисторот.

Колекторскиот спој во нормален начин на работа е инверзно поларизиран. При поголема вредност на инверзниот напон се случува Зенеров ефект, а потоа и лавински ефект, при што доаѓа до топлински пробив и оштетување на транзисторот. На **слика 2.17** се дадени излезните карактеристики на транзистор во спој со заеднички емитер, продолжени до областа на пробивот на колекторскиот спој. На дијаграмот е прикажано како се одредува максималниот дозволен напон меѓу колекторот и емитерот U_{CEmax} . Тој треба да биде понизок од пробивниот напон и секогаш е одреден од страна на производителот на транзисторот.

Во нормален режим на работа, во транзисторот при одреден напон U_{CE} тече и одредена колекторска струја I_C , што значи дека во внатрешноста на транзисторот се троши моќност:

$$P_{CD} = U_{CE} I_C \dots\dots\dots(2.16)$$



Слика 2.17: Ограничување на работното подрачје на транзисторот.

Тоа е моќност од која нема никаква корист, туку таа се претвора во топлина од која транзисторот треба да се ослободи. Оваа топлина се создава на колекторот и се вика моќност на дисипација. Максималната дозволена моќност на дисипација P_{CDmax} има константна вредност и во полето на излезните карактеристики е претставена како хипербола. Работната линија и работната точка на транзисторот мора да се постават во областа под кривата на P_{CDmax} , во која сите точки одговараат на моќност помала од максималната моќност на дисипацијата. На дијаграмот на излезните карактеристики се означени границите на работниот режим на транзисторот со максималната дозволена колекторска струја I_{Cmax} , максималниот дозволен колекторски напон U_{CEmax} и максималната дозволена дисипација P_{CDmax} .

За транзистори со помала моќност, одведувањето на топлината се прави по пат на зрачење во околината. Транзисторите со средна и голема моќност имаат вградени метални плочки на колекторот, со што се зголемува зрачењето на топлината. Во практичното изведување на

транзисторските степени со поголема моќност, одведувањето на топлината се подобрува со монтажа на транзисторот на метален радијатор со поголема површина.

РЕЗИМЕ

*Во статичкиот режим на работа, во колото на транзисторот се присутни само еднонасочните вредности на напоните и струите.

*Со поларизацијата на транзисторот, емитерскиот спој е директно, а колекторскиот е инверзно поларизиран.

*Положбата на работната точка се одредува со напонот U_{CE} и со струите I_C и I_B , така што да се најде на работната линија.

*Факторот на струјното засилување β или h_{FE} покажува колку пати колекторската струја е поголема од базната струја.

*Дисипација е моќност која се претвора во топлина во транзисторот. За заштита од прекумерно греење, на транзисторот се вградуваат ладилни тела.

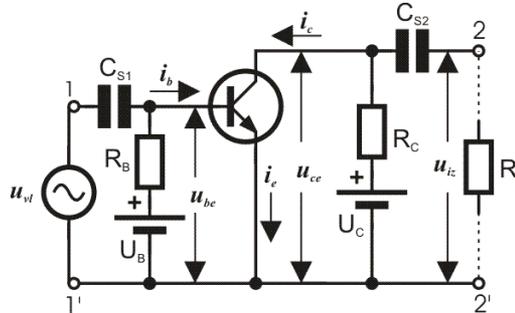
✓ ПРОВЕРИ ШТО ЗНАЕШ

- Дефинирај статички режим на работа на транзисторот.
- Кои големини се влезни, а кои излезни кај транзисторот во спој со заеднички емитер?
- Како се дефинира излезна, влезна преносна и директно преносна карактеристика?
- Кои се најважните параметри на транзисторот?
- Што претставува β ?
- Од што зависи положбата на работната правата на транзисторот и како се одредува?
- Зошто треба да се води сметка за максималните дозволени вредности на напонот, струјата и моќноста на транзисторот?

2.5 Динамички режим на работа

Сите напори што ги правиме, за да го ставиме транзисторот во статички режим на работа се само припрема за тој да може да ја извршува функцијата на засилувач. Со донесување наизменичен напон и струја на сигналот на влезот на транзисторот, неговата работна точка веќе не мирува, туку се поместува долж работната линија во ритамот на сигналот и транзисторот преминува во динамички режим на работа.

Динамичкиот режим на работа подразбира функционирање на транзисторот како засилувач. Во динамичкиот режим, освен еднонасочните напони и струи, со кои се поларизира транзисторот и му се одредува статичката работна точка, постои и наизменичен напон и струја на сигналот, кој треба да биде засилен.

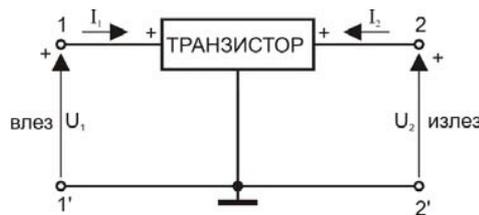


Слика 2.18: Транзистор во динамички режим.

Тој сигнал се носи на влезот на транзисторскиот засилувачки степен (слика 2.18) и се добива засилен на излезот од тој степен за натамошна обработка (натамошно засилување или за активирање на одреден уред).

2.5.1. Еквивалентна шема на транзистор со h-параметри

Транзисторот е нелинеарен елемент, но може да се направи негов модел како линеарен елемент, како специјален случај на општа линеарна мрежа со две порти. Портата се дефинира како два приклучока за влезот и два приклучока за излезот (слика 2.19).



Слика 2.19: Транзистор како активен четворопол.

Математичката анализа на таква мрежа се изведува со z-параметри (импеданси), со u-параметри (адмитанси) или со h-параметри (хибридни). Со овие параметри се формираат по две равенки со кои се одредува односот меѓу влезниот напон и влезната струја кон излезниот напон и излезната струја.

Односите меѓу напоните и струите на влезот и на излезот се дефинираат со три системи на равенки:

$$\begin{cases} u_1 = z_{11}i_1 + z_{12}i_2 \\ u_2 = z_{21}i_1 + z_{22}i_2 \end{cases}$$

$$\begin{cases} i_1 = y_{11}u_1 + y_{12}u_2 \\ i_2 = y_{21}u_1 + y_{22}u_2 \end{cases}$$

$$\begin{cases} u_1 = h_{11}i_1 + h_{12}u_2 \\ i_2 = h_{21}i_1 + h_{22}u_2 \end{cases} \dots\dots\dots(2.17)$$

Во првиот систем фигурираат z – параметрите, тие се однесуваат како импеданси на следниов начин: z_{11} – влезна импеданса, z_{22} – излезна импеданса, z_{12} и z_{21} – преносни импеданси, при што членовите $z_{12}i_2$ и $z_{21}i_1$ претставуваат внатрешни зависни напонски извори.

Во вториот систем фигурираат y – параметрите, кои претставуваат адмитанси на следниов начин: y_{11} – влезна адмитанса, y_{22} – излезна адмитанса, y_{12} и y_{21} преносни адмитанси, при што членовите $y_{12}u_2$ и $y_{21}u_1$ претставуваат внатрешни зависни струјни извори.

Во третиот систем се h – параметрите, кои имаат различна природа. Третиот систем на равенки се вика систем на равенки со хибридни или **h – параметри**.

Параметрите од едниот систем можат да се пресметаат, со малку алгебарски манипулации, од вредностите на параметрите од другите два система.

За анализа на транзисторот кога работи со нискофреквенциски сигнали со мали амплитуди најповолни се h – параметрите. Наизменичните напони и струи, во тој случај, можат да се претстават како мали промени на еднонасочните вредности и системот на равенките со h – параметрите може да се напише како:

$$\begin{cases} \Delta U_1 = h_{11}\Delta I_1 + h_{12}\Delta U_2 \\ \Delta I_2 = h_{21}\Delta I_1 + h_{22}\Delta U_2 \end{cases} \dots\dots\dots(2.18)$$

Со кратко спојување на излезното коло на транзисторот во однос на наизменичната струја, промената на излезниот напон ΔU_2 станува нула. Од првата равенка на системот се добива:

$$h_{11} = h_i = \frac{\Delta U_1}{\Delta I_1} \text{ за } \Delta U_2 = 0 \dots\dots\dots(2.19)$$

Овој параметар претставува влезен отпор на транзисторот при краткоспоен излез.

Кога влезното коло е отворено, не тече влезната струја, па имаме $\Delta I_1 = 0$, а од првата равенка се добива:

$$h_{12} = h_r = \frac{\Delta U_1}{\Delta U_2}; \text{ за } \Delta I_1 = 0 \dots\dots\dots(2.20)$$

Овој параметар претставува коефициент на напонска повратна спрега при отворено влезно коло и тој е неименуван број.

За краткоспоено излезно коло, од втората равенка добиваме:

$$h_{21} = h_f = \frac{\Delta I_2}{\Delta I_1}; \text{ за } \Delta U_2 = 0. \dots\dots\dots(2.21)$$

Овој параметар го претставува коефициентот на струјното засилување на транзисторот при краткоспоено излезно коло.

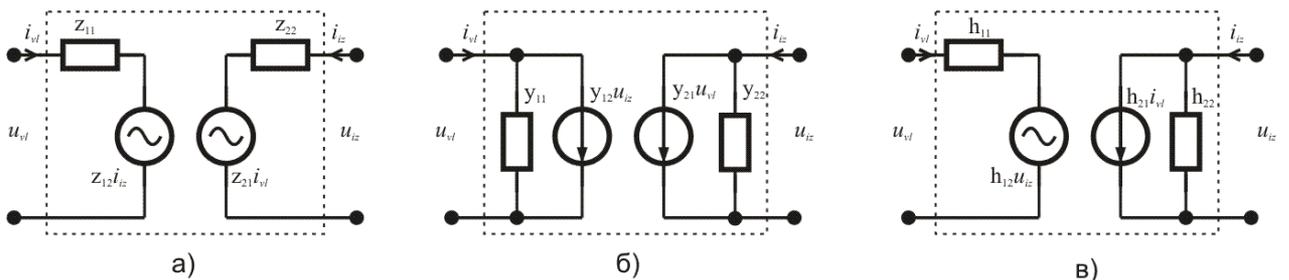
За отворено влезно коло, од втората равенка се добива:

$$h_{22} = h_o = \frac{\Delta I_2}{\Delta U_2}; \text{ за } \Delta I_1 = 0. \dots\dots\dots(2.22)$$

Овој параметар има димензија на спроводливост и претставува излезна спроводливост на транзистор со отворено излезно коло.

Вредностите на хибридниите параметри можат лесно да се измерат со мерење на напоните и струите на изводите на транзисторот, под услови наведени во нивните дефиниции. Во практиката, тие се мерат директно со компјутерски управувани инструменти.

Со помош на овие равенки се формираат соодветните еквивалентни кола на транзисторот со z-параметри, y-параметри и h-параметри, како што е прикажано на **слика 2.20**.

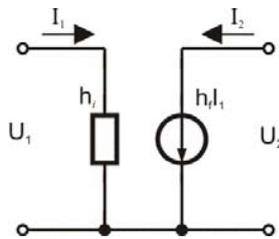


Слика 2.20: Еквивалентни кола на транзисторот.

Во општ случај, сите параметри, дадени во равенките, се комплексни вредности со реален и имагинарен дел. Ако се ограничи режимот на работа на транзисторот на сигнали со ниски фреквенции, имагинарните делови можат да се запостават и да останат само реалните делови на вредностите на параметрите. Во таквата состојба импедансите стануваат отпорности, а адмитансите инверзни вредности на отпорностите, односно спроводности.

Од друга страна, за режим на работа со мали сигнали нема потреба да се користат сите четири параметри за да се добие прифатливо добар модел на транзисторот. Се покажува дека параметрите $h_{12} = h_r$ и $h_{22} = h_o$ имаат толку мали вредности да можат да се

елиминираат. Еквивалентната шема на транзисторот со h -параметрите сега добива изглед како на **слика 2.21**.



Слика 2.21: Еквивалентна шема на транзистор со h -параметри.

РЕЗИМЕ

*Во динамичкиот режим на работа, присутни се и наизменичните компоненти на напонот и струјата на сигналот.

*Транзисторот е нелинеарен елемент, но за еквивалентните шеми се прави негов модел во линеарна форма со h – параметрите.

* h – параметрите се користат за анализа на колото на транзисторот за мали сигнали со ниски фреквенции.

*Со h – параметрите се претставени влезниот и излезниот отпор, повратната реакција од излезот кон влезот и струјното засилување.

✓ ПРОВЕРИ ШТО ЗНАЕШ

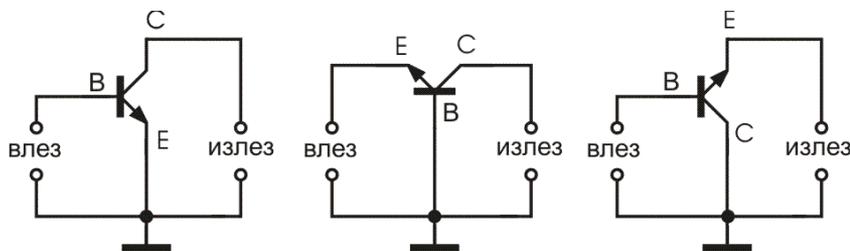
- При кој режим на работа транзисторот функционира како засилувач?
- Напиши го системот со h -параметри на транзисторот и дефинирај го секој параметар поодделно.
- Нацртај еквивалентна шема на транзистор со h -параметри.

2.6. Транзистор како засилувачки елемент

Транзисторот е активен електронски елемент со влез и излез. Во електрично коло тој се однесува како четворопол. Но, бидејќи тој има само три изводи, едниот од нив ќе биде

заеднички за влезот и за излезот. Зависно од тоа кој извод е заеднички за влезот и за излезот, разликуваме три вида на транзисторски споеви (слика 2.22):

- транзистор во спој со заеднички емитер, во кој влезот е меѓу базата и емитерот, а излезот меѓу колекторот и емитерот;
- транзистор во спој со заедничка база, во кој влезот е меѓу емитерот и базата, а излезот меѓу колекторот и базата;
- транзистор во спој со заеднички колектор, во кој влезот е меѓу базата и колекторот, а излезот меѓу емитерот и колекторот.

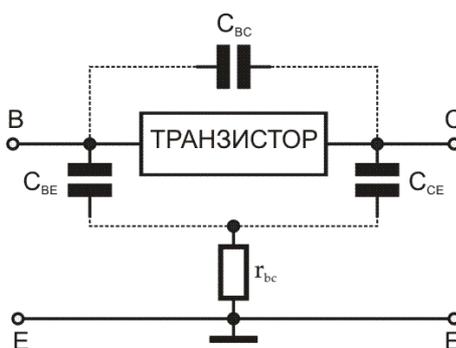


Слика 2.22: Видови споеви на транзисторот.

Спојот со заеднички емитер е најмногу употребуван спој. Заедничкиот извод обично се врзува со заземјена маса, па се употребува и изразот: спој со заземјен емитер, заземјена база или заземјен колектор.

2.6.1. Особини на транзисторот при високи фреквенции

Параметрите на транзисторот, кои при ниски фреквенции (до 1kHz) се дадени како реални броеви, при високи фреквенции добиваат комплексен карактер. Колото на транзисторот како четворопол при високи фреквенции е дадено на слика 2.23.



Слика 2.23: Коло на транзистор при високи фреквенции.

Дополнителни елементи во однос на колото на слика 2.19 се капацитивностите меѓу базата и емитерот C_{BE} и меѓу колекторот и базата C_{BC} . Капацитивноста меѓу колекторот и емитерот е мала и обично не се зема во предвид (се занемарува).

На високи фреквенции опаѓа вредноста на засилувањето на струјата, напонот и на моќноста. Причината за тоа се капацитивностите што се создаваат на базниот и на колекторскиот спој. За секој тип транзистори се дава гранична фреквенција до која може да се користи транзисторот.

Коефициентот на струјното засилување на транзисторот, исто така, опаѓа во областа на високите фреквенции. Паѓањето на вредноста на струјното засилување е поголемо за спој со заеднички емитер во однос на спој со заедничка база.

РЕЗИМЕ

***Транзистор како засилувачки елемент може да работи во спој со заеднички емитер, заедничка база и заеднички колектор.**

***Најмногу употребуван е спојот со заеднички емитер.**

***При високи фреквенции, параметрите на транзисторот стануваат комплексни големини.**

✓ ПРОВЕРИ ШТО ЗНАЕШ

- Нацртај ги трите вида транзисторски споеви.
- Што се случува со засилувањето на транзисторот при високи фреквенции?
- Која е разликата во параметрите при ниски и при високи фреквенции?

2.7. Транзистор како прекинувачки елемент

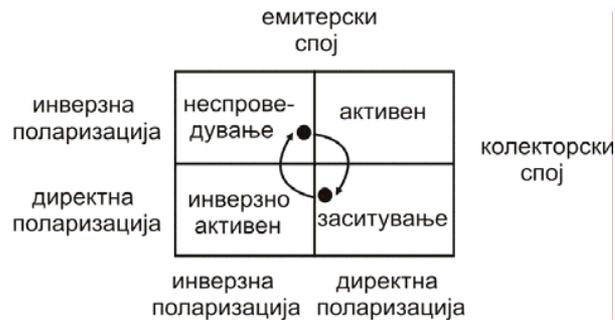
Следејќи го принципот на работа на диодата, може да се смета дека таа функционира и како прекинувач, отворен кога диодата е инверзно поларизирана, а затворен кога е директно поларизирана. Тоа се должи на карактеристиката на PN- спојот. Сепак, таа не може да изврши една од неопходните функции во дигиталната логика, а тоа е инверзија на сигналот, односно промена од 0 на 1 или од 1 на 0.

Транзисторот, кој во својата конструкција содржи два PN-споја, исто така, може, да се донесе во услови на работа како прекинувач со можност за инвертирање на сигналот. Транзисторот како прекинувач наоѓа широка примена во изработката на интегрирани дигитални кола, разни уреди за автоматика и во колата на импулсната техника.

Транзисторот како прекинувач може да се најде во три режими на работа: режим на неспроведување, заситување и преоден режим.

Биполарниот транзистор има два PN-споја: емитерски и колекторски спој. Секој од нив може да се поларизира директно или инверзно. Според тоа, постојат четири можни услови на

поларизација со кои транзисторот може да се донесе во режим на заситување, во активен режим или во режим на неспроведување.



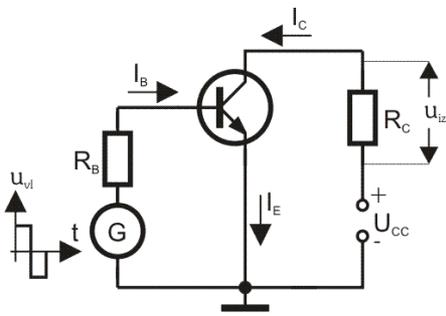
Слика 2.24: Шематски приказ на режимите на работа.

На **слика 2.24** шематски е прикажано дефинирањето на режимите на работа. Подрачјето на неспроведување се дефинира со инверзна поларизација на емитерскиот и на колекторскиот спој. Во овие услови транзисторот се однесува како отворен прекинувач. Активното подрачје се дефинира со директно поларизиран емитерски и инверзно поларизиран колекторски спој, што е во согласност со дефиницијата дадена за транзистор како засилувач. Подрачјето на заситување е одредено со директна поларизација на двата споја, а транзисторот се однесува како затворен прекинувач. Последното подрачје е спротивно на активното подрачје и се дефинира со инверзно поларизиран емитерски и директно поларизиран колекторски спој. Подрачјата на прекин и на заситување се од примарна важност за транзистор како прекинувач. Кога е во состојба на прекин, излезната струја има многу мала јачина, а отпорноста меѓу излезните краеве има голема вредност. Во состојба на заситување, излезната струја има голема јачина, а излезната отпорност мала вредност. За да прејде од состојба на неспроведување во состојба на заситување, транзисторот поминува преку активното подрачје. Во тој период транзисторот се наоѓа во преоден режим во кој неговите параметри ги менуваат своите вредности.

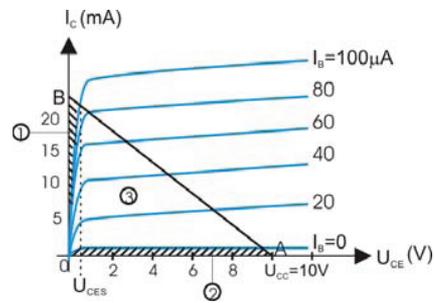
2.7.1 Прекинувачко коло со транзистор во спој со заеднички емитер

Во прекинувачките кола обично се користи транзистор во спој со **заеднички емитер** (**слика 2.25**).

Во колото на базата е ставен генератор на правоаголен импулс G , со кој се менува поларизацијата на базата и режимот на работа на транзисторот.



Слика 2.25: Транзистор како прекинувач.

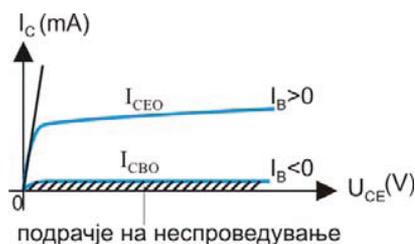


Слика 2.26: Дијаграм на работни области.

Дијаграмот на излезните карактеристики со внесена работна линија е даден на **слика 2.26**. На дијаграмот се маркирани делови на работната линија, кои припаѓаат на три подрачја: 1 – подрачје на заситување, 2 – подрачје на неспроведување (блокирање) и 3 – подрачје на активен режим.

2.7.1.1. Режим на неспроведување

Рамниот дел на влезниот импулс со негативна вредност на напонот ја прави базата негативна во однос на емитерот, со што инверзно го поларизира емитерскиот спој. Во колото на базата ќе тече инверзна струја, која ќе ја донесе работната точка под карактеристиката $I_B = 0$ (**слика 2.27**).



Слика 2.27: Подрачје на неспроведување.

Знаеме дека кога колото на базата е отворено ($I_B = 0$) во колекторското коло тече струјата I_{CE0} . Транзисторот ќе биде во режим на неспроведување кога инверзната струја на базата ќе стане помала од струјата I_{CE0} .

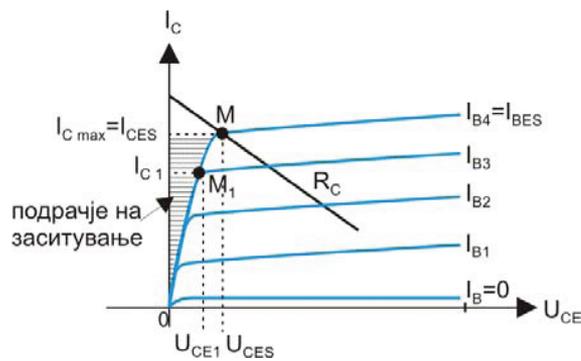
Во исто време, колекторскиот спој е инверзно поларизиран, колекторот е на повисок потенцијал од базата и во колото колектор база ќе тече инверзната струја I_{CB0} , која има многу мала јачина (за германиумски транзистор е од редот на неколку μA , а за силициумски неколку nA).

Во практиката, за премин во режимот на неспроведување, за силициумски транзистори за кои се смета дека струјата I_{CE0} е приближно еднаква на I_{CB0} , доволно е

побудниот импулс да падне на нула, додека за германиумските транзистори (за NPN-тип) мора да премине во негативно подрачје за најмалку 0,1V.

2.7.1.2. Режим на заситување

Условите за воспоставување на режимот на заситување се нешто посложени и бараат двата споја на транзисторот да бидат директно поларизирани. Транзисторот се донесува во состојба на затворен прекинувач, односно во состојба на заситување со рамниот дел на побудниот импулс со позитивна вредност на напонот. Базата станува попозитивна од емитерот и емитерскиот спој е директно поларизиран. Во колото база емитер протекува струја I_{BES} , а во колото колектор емитер протекува струја I_{CES} . Работната точка се поместува во подрачјето на заситувањето (слика 2.28).



Слика 2.28: Подрачје на заситување.

Состојбата на заситувањето се карактеризира со мали напони U_{CES} на колекторот, при што сите излезни карактеристики се слеваат во една крива линија, наречена линија на напонско заситување. Напонот меѓу колекторот и емитерот, кој одговара на максималната дозволена вредност на колекторската струја I_{CES} , е означен како U_{CES} . Неговата вредност за силициумски транзистори изнесува околу 0,6V, а за германиумски 0,25V.

Колекторската струја се пресметува според:

$$I_{CES} = \frac{(U_{CC} - U_{CES})}{R_C} \dots\dots\dots(2.23)$$

а струјата на базата треба да го задоволи условот:

$$I_{BES} = \frac{I_{CES}}{h_{FE}} \dots\dots\dots(2.24)$$

Излезната отпорност на транзисторот во режим на заситување се пресметува според:

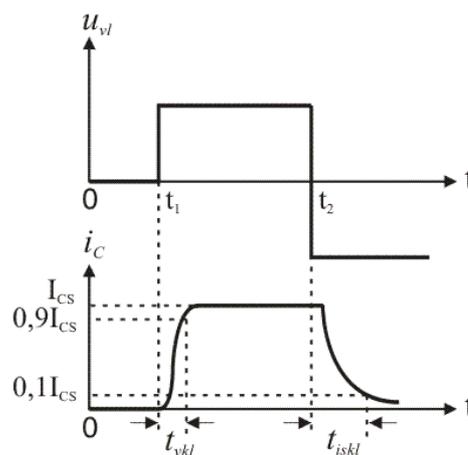
$$R_{iz} = \frac{U_{CES}}{I_{CES}} \dots\dots\dots(2.25)$$

и има мала вредност (неколку десетини ома). Со тоа се задоволени барањата на затворен прекинувач: да пропушта доволно голема струја за активирање на надворешно коло, да има

мал пад на напон и мал отпор на краевите на прекинувачот, за загубите на прекинувачот да бидат мали.

2.7.1.3 Преоден режим

Транзисторот се доведува во спроводна состојба со предниот, растечки раб на влезниот импулс. Однесувањето на колекторската струја за оваа состојба е прикажано на **слика 2.29**. Како што се гледа од сликата, колекторската струја ја достигнува максималната вредност I_{CES} , со задоцнување t_{vkl} . Ова задоцнување се должи на време потребно за смалување на ширината на слоевите за попречување со дифузното движење на носителите на полнежите. Нешто помало влијание имаат и сопствените капацитивности на споевите на транзисторот.



Слика 2.29: Однос помеѓу побудниот импулс и колекторската струја.

Ова време се дефинира како време на вклучување и треба да е што пократко. Тоа се постигнува со избор на транзистор со повисока гранична фреквенција и со помали сопствени капацитивности.

Додека е транзисторот во состојба на заситување, во близината на емитерскиот и на колекторскиот спој се натрупуваат носителите на полнежот. Со промената на поларизацијата на споевите не доаѓа до моментална промена на состојбата на споевите. По завршувањето на процесот на растоварување на базата од натрупаните носители на полнежот, доаѓа до паѓање на колекторската струја на минимална вредност. Времето на опаѓањето на колекторската струја t_{iskl} се вика време на исклучување. Овие времиња имаат влијание врз брзината на прекинувачкото дејство на транзисторот. Времето на формирање на излезниот импулс не може да биде помало од збирот на времето на вклучување и времето на исклучување на прекинувачкиот транзистор.

РЕЗИМЕ
*Транзисторот како прекинувач, може да се најде во режим на неспроведување – отворен прекинувач, во режим на заситување – затворен прекинувач и во преоден режим.
*Како прекинувач транзисторот се користи во спој со заеднички емитер.
*Со поларизацијата на емитерскиот и на колекторскиот спој, транзисторот може да се донесе во режим на заситување, или во режим на активна работа.
*Режим на прекин настапува кога емитерот е на повисок потенцијал од базата.
*Режим на заситување настапува кога двата споја се директно поларизирани.

✓ ПРОВЕРИ ШТО ЗНАЕШ

- Во кои режими на работа може да се најде транзисторот како прекинувач?
- Каква е поларизацијата на емитерскиот и колекторскиот спој на транзисторот кога е во заситување?
- Колкава е излезната струја кога транзисторот е неспроводен?
- Означи ја областа на неспроведување во излезната карактеристика на транзисторот.
- Во кој режим на работа транзисторот се однесува како затворен прекинувач?

2.8. Униполарни транзистори - транзистори со ефект на поле

Теоријата на **транзисторите со ефект на поле** или **FET (Field Effect Transistor)** е разработена меѓу 1920 год. и 1930 год., што е далеку пред откривањето на биполарните транзистори. Првобитниот модел на FET имал алуминиумска плоча на која биле поставени две полупроводнички плочки. На другата страна од плочките се ставени метални контакти. Меѓу алуминиумската плоча и металните контакти се доведува напон кој формира електрично поле на површината на полупроводникот. Со овој напон се овозможува управување со течењето на струјата меѓу металните контакти. Недоволно развиената технологија на пречистување на полупроводничките материјали не овозможила идејата да се реализира до крај.

Дури во 1952 год., американскиот физичар Вилием Шокли (William Shockley) воведува споен **FET** (**JFET** - **J**unction **F**ield **E**ffect), во кој алуминиумската плоча е заменета со PN-спој. Основна карактеристика на овој транзистор е струјата, која е формирана само од еден вид носители на полнеж. Поради тоа, а за разлика од биполарните транзистори, тие се наречени и **униполарни**. Уште една разлика во однос на биполарните транзистори е во начинот на управувањето со струјата. Излезната струја на биполарниот транзистор се контролира со влезната струја, а на униполарниот со електрично поле, создадено со влезниот напон. При тоа, влезната струја има многу мала јачина. Влезниот отпор на униполарниот транзистор е многу голем, што значи дека тој бара многу мала моќност од претходниот степен.

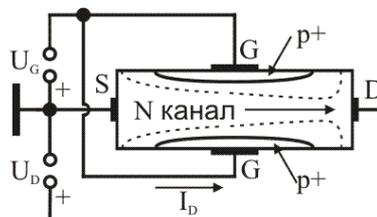
Постојат два вида униполарни транзистори: **спојни FET** и **MOSFET** (**M**etal – **O**xide – **S**emiconductor **FET**).

Транзисторите со ефект на поле имаат неколку особини што ги прават посупериорни над биполарните транзистори. Тоа се: поголемата влезна отпорност, помали сопствени шумови, помали димензии и едноставна постапка на производството. Биполарните транзистори имаат предност во брзината, како прекинувачки кола, и поголемо напонско засилување, како излезни степени.

Транзисторите со ефект на поле се применуваат во прекинувачките кола кога не се бараат специјално големи брзини, потоа во колата со високи фреквенции и во сложени дигитални кола со голем број компоненти.

2.8.1. Структура и принцип на работа на FET

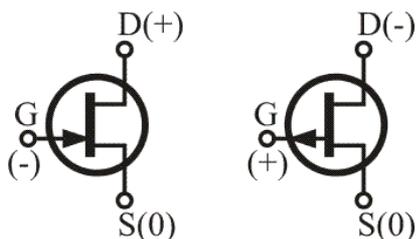
Структурата на FET е прикажана шематски на **слика 2.30**. Тој е составен од тенка плочка - основа со правоаголен пресек од силициумски полупроводник од N или од P-тип. На двете спротивни површини (на сликата спротивни по вертикала) на основата е нанесен полупроводник, спротивен од оној од кој е направена основата и се формирани два PN-споја. Тие две подрачја меѓусебно се сврзани преку металните приклучоци и претставуваат влезна електрода, наречена **гејт** (G).



Слика 2.30: Структура на FET.

На спротивните краеве на основата се поставени метални приклучоци за изводите **дрејн** (D) и **сорс** (S). Стеснетиот дел на плочката меѓу сорсот и дрејнот се вика **канал**.

Во зависност од видот на полупроводникот на основата, разликуваме FET од N-тип, со N-полупроводник на основата и FET од P-тип со P-тип, полупроводник на плочката. Графичките симболи на двата вида FET се дадени на **слика 2.31**.



Слика 2.31: Шематски симбол на FET од N-тип и P-тип.

Ако се прави паралела со биполарниот транзистор, гејт електродата одговара на базата, сорсот на емитерот, а дрејнот на колекторот. Изворот на еднонасочен напон U_G , врзан меѓу гејтот и сорсот, инверзно ги поларизира двата PN споја на гејтот и на каналот. Изворот U_D го поларизира дрејнот на тој начин да има спротивен знак од гејтот во однос на сорсот. Сорсот најчесто се наоѓа на потенцијал 0. Транзисторите со ефект на поле можат да работат во спој со заеднички сорс, во спој со заеднички гејт и во спој со заеднички дрејн. Сепак, најмногу се користи спојот со заеднички сорс.

Принципот на работа на N – FET и на P – FET е ист, само што напоните на електродите се со спротивни поларитети, а струите со спротивни насоки. Во натамошната анализа ќе се ограничимо само на N – FET.

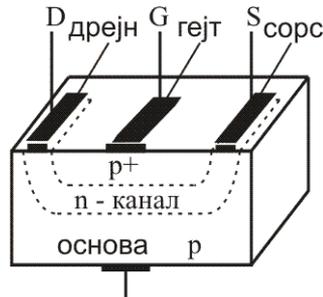
Кога нема напон меѓу гејтот и сорсот, или кога гејтот кратко е споен со сорсот, каналот е широко отворена патека за електроните да течат од сорсот кон дрејнот под влијание на изворот U_D . Јачината на струјата на дрејнот I_D тогаш зависи само од напонот на изворот U_D и отпорноста на полупроводникот на каналот.

Со приклучување на изворот U_G , како на слика 2.30, двата PN-споја инверзно се поларизираат и по должината на споевите се создава зона на попречување. Полупроводникот на каналот е формиран со мал процент на донори, а областа на гејтот е со поголем процент на акцептори, зоната на попречување повеќе се шири во областа на каналот отколку во гејтот. Електроните во каналот се оддалечуваат од границата на зоната на попречување кон средината на каналот. Каналот станува стеснет со проширувањето на зоната на попречување, а како последица се намалува неговата спроводност и јачината на струјата на дрејнот. Со промена на напонот меѓу гејтот и сорсот U_{GS} се менува и јачината на струјата на дрејнот, односно излезната струја на транзисторот.

Ширината на каналот не е еднаква по целата должина на плочката. Каналот е најширок во близината на сорсот, а најтесен во околината на дрејнот. Причината лежи во фактот дека напонот меѓу гејтот и дрејнот има најголема вредност и изнесува $U_D + U_G$, а одејќи кон

сорсот опаѓа до вредноста U_G . Во каналот постои надолжно растење на напонот или градиент на напонот.

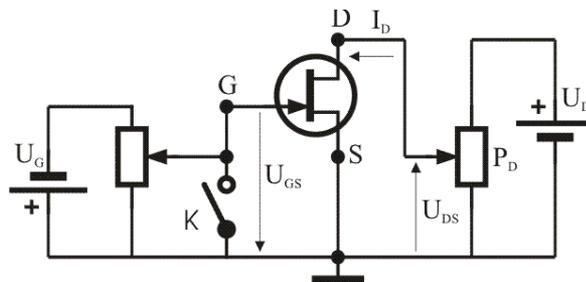
Вистинската структура на N-FET е дадена на **слика 2.32**. На основата или супстратот се додава примеса со која се создава n-регионот на каналот со мала дебелина (околу 1 микрон), потоа со следното додавање на акцепторски примеси се формира P-регионот на гејтот. На површината се ставаат метални контакти за изводите на гејтот, сорсот и дрејнот.



Слика 2.32: Структура на N-FET.

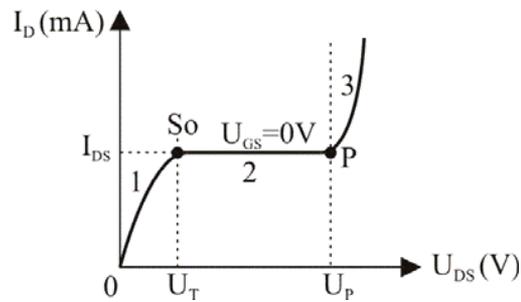
2.8.2. Статички карактеристики на FET

Од статичките карактеристики на FET, битни се карактеристиките $I_D - U_{DS}$ и $I_D - U_{GS}$, при што со I_D е означена излезната или струјата на дрејн, со U_{DS} напонот меѓу дрејн и сорс и со U_{GS} напонот меѓу гејт и сорс. Тие можат да се снимаат со колото дадено на **слика 2.33**.



Слика 2.33: Електрично коло за снимање на статичките карактеристики на FET.

На веќе познат начин можат да се снимаат излезните карактеристики $I_D = f(U_{DS})$ за $U_{GS} = \text{const}$. Со затворање на прекинувачот K во колото на гејтот, гејтот ќе биде заземјен, напонот U_{GS} ќе биде 0, а излезната карактеристика $I_D = f(U_{DS})$ за $U_{GS} = 0$ ќе има изглед како на **слика 2.34**.



Слика 2.34: Статичка карактеристика на FET.

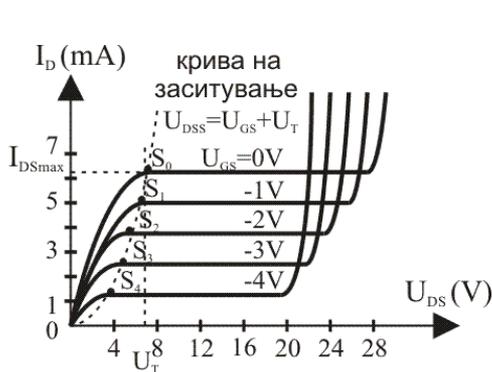
За мали напони U_{DS} , каналот се однесува како отпорност, што придонесува карактеристиката да има линеарен тек.

Тој дел од карактеристиката ја дефинира областа на активна отпорност (означена со 1 на сликата). Со натамошно зголемување на напонот U_{DS} се зголемува инверзната поларизација на PN- спојот гејт – дрејн и се проширува зоната на попречување. За вредноста U_T на напонот U_{DS} каналот е максимално стеснет, а неговиот отпор е максимален.

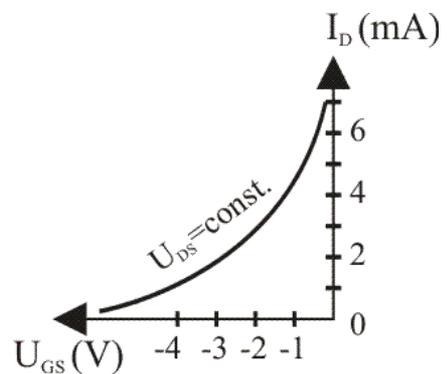
На карактеристиката тоа е точката S_0 и таа го дефинира напонот при кој двете зони на попречување речиси се допираат. Струјата I_D во каналот има вредност I_{DS} и не се менува со натамошното зголемување на напонот U_{DS} . На карактеристиката тоа е делот означен со 2 и е наречен област на заситување.

Третиот дел од карактеристиката, означен со 3, е област на пробив и започнува од точката P . Во оваа точка напонот U_{DS} ја надминува вредноста на пробивниот напон на PN – спојот и струјата на дрејнот нагло се зголемува. Пробивот е од областа на зенеров ефект, што значи реверзибилен и може да се врати во претходната состојба, ако се ограничи струјата со отпорност во надворешното коло на дрејнот.

На **слика 2.35** се дадени комплетните карактеристики $I_D = f(U_{DS})$ за $U_{GS} = \text{const}$. Активната област на карактеристиките е одделена од областа на заситување со кривата на заситување, нацртана со испрекината линија.



Слика 2.35: Фамилија струјно-напонски карактеристики.



Слика 2.36: Преносна карактеристика на FET.

Преносната карактеристика $I_D = f(U_{GS})$ за $U_{DS} = \text{const.}$ е дадена на **слика 2.36**. Во поголемиот дел на карактеристиките од слика 2.37, струјата I_D малку зависи од напонот U_{DS} . Поради тоа, сите преносни карактеристики се на мало растојание и обично се претставуваат само со една крива.

Меѓу најважните статички карактеристики на FET спаѓаат излезниот отпор:

$$R_{iz} = \frac{U_{DS}}{I_D}, \dots\dots\dots(2.26)$$

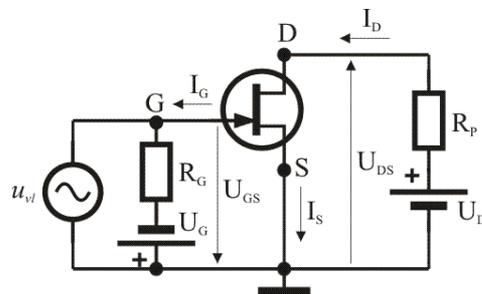
кој има вредност од 100Ω до $100K\Omega$, и влезниот отпор:

$$R_{vl} = \frac{U_{GS}}{I_G}, \dots\dots\dots(2.27)$$

кој е многу голем и достигнува вредност до $10^9\Omega$.

2.8.3. FET во динамички режим на работа

Електричната шема на **слика 2.37** го претставува колото на FET во динамички режим на работа. Транзисторот е во спој со заеднички сорс. Изворот на сигналот е ставен во колото на гејтот, а во излезното коло е ставено отпорно оптоварување R_p . Наизменичните напони и струи на сигналот и овде се третираат како мали промени на еднонасочните вредности.



Слика 2.37: Електричната шема на колото на FET во динамички режим на работа.

Динамичката влезна отпорност на FET се дефинира како:

$$r_{vl} = \frac{\Delta U_{GS}}{\Delta I_G} \quad \text{за} \quad \Delta U_{DS} = 0. \dots\dots\dots(2.28)$$

Таа е со многу голема вредност, од редот на неколку мегаоми, поради инверзно поларизираној спој гејт – сорс.

Преносната спроводливост или кондуктанса е:

$$g_m = \frac{\Delta I_D}{\Delta U_{GS}} \quad \text{за} \quad \Delta U_{DS} = 0. \dots\dots\dots(2.29)$$

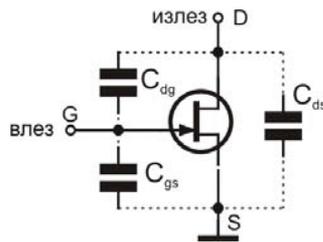
Таа се дефинира со стрмнината на преносната карактеристика и нејзините вредности се движат меѓу 0,1 и 10mA/V.

Динамичката излезна отпорност се дефинира за областа на заситување со:

$$r_{iz} = \frac{\Delta U_{DS}}{\Delta I_D} \quad \text{за } \Delta U_{GS} = 0. \quad (2.30)$$

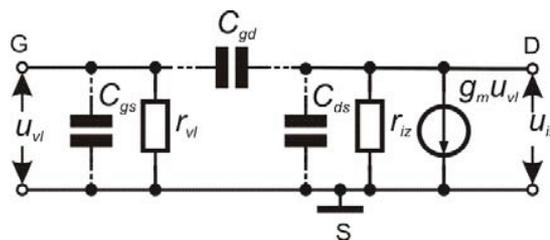
и има вредност од неколку десетини до неколку стотини килооми.

Меѓуелектродните капацитивности имаат значително влијание врз карактеристиките на FET при високи фреквенции. Тие се прикажани на **слика 2.38**. Капацитивноста меѓу гејтот и сорсот C_{gs} паралелно е врзана на влезот и ја намалува импедансата на FET на високи фреквенции. Нејзината вредност е околу 1pF. Паралелно со оптоварувањето на излезот дејствува капацитивноста C_{ds} и го намалува засилувањето при високите фреквенции. Нејзината капацитивност е многу мала и често не се зема предвид. Капацитивноста C_{dg} меѓу дрејнот и гејтот учествува во враќањето на дел од сигналот од излезот на влезот. Тоа може да предизвика нестабилна работа и самоосцилирање на засилувачот. И нејзината вредност е мала, околу 0,1pF.



Слика 2.38: Распоред на меѓуелектродните капацитивности на FET.

2.8.3.1 Еквивалентна шема на FET

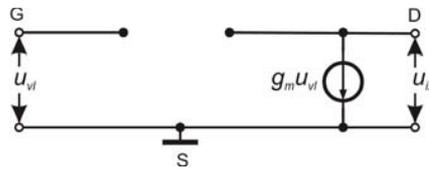


Слика 2.39: Целосна еквивалентна шема на FET.

Целосната еквивалентна шема на FET е дадена на **слика 2.39**. Во колото се внесени сите претходно дефинирани параметри. На излезот е прикажан еквивалентен струен генератор кој на излезот дава струја пропорционална на преносната спроводност и напонот на влезниот сигнал:

$$i = g_m u_{vl}.$$

Кога засилувачот работи на ниски фреквенции, неговото еквивалентно коло се упростува со исфрлање на сите кондензатори што ги претставуваат меѓуелектродните капацитивности, како и големите паралелни отпорности r_{vl} и r_{iz} . Така, добиената шема е прикажана на **слика 2.40**.



Слика 2.40: Еквивалентна шема на FET за ниски фреквенции.

ЗАПАМЕТИ !!!

- * Биполарните транзистори се струјно, а униполарните се напонски регулирани елементи.
- * FET е напонски управуван, униполарен електронски елемент со три изводи: дрејн, гејт и сорс, во кој тече струја преку канал од само еден вид полупроводник.
- * Според видот на полупроводникот на каналот разликуваме N- FET и P – FET.
- * Кога нема напон на гејтот, или кога е гејтот кратко споен со сорсот, низ FET-от не тече струја на дрејнот.
- * При поларизација на N-FET транзисторот, сорсот е на повисок потенцијал од гејтот а дрејнот од сорсот.
- * При поларизација на P-FET транзисторот, гејтот е на повисок потенцијал од сорсот а сорсот од дрејнот.

✓ ПРОВЕРИ ШТО ЗНАЕШ

- Која е разликата помеѓу биполарните и униполарните транзистори?
- Кои видови униполарни транзистори постојат?
- Нацртај ги симболите на n-канален и p-канален FET и означи ги изводите.
- Објасни што се случува со каналот при поларизација на FET.
- Нацртај ја статичката излезна карактеристика на FET и објасни ги нејзините области.
- Дефинирај преносна спроводливост на FET.
- Нацртај еквивалентна шема на FET при ниски фреквенции.

2.9. Примена на транзисторите

Транзисторите се применуваат во сите гранки на електрониката и електротехниката – при изработка на **засилувачи, осцилатори, предавателни уреди и склопови за регулација**. Освен во електрониката и електротехниката, транзисторите денес се користат речиси во сите гранки на индустријата. Големiot успех и брзиот развој се последица на малите димензии, едноставното и масовно производство и многу малата потрошувачка на енергија.

Биполарните транзистори се струјно управувани засилувачи, а **униполарните** се напонски управувани засилувачи. Од времето кога се пронајдени па до сега, тие се усовршувани и приспособувани за општа употреба или за специјални функции.

Како засилувачи тие се изработуваат за засилување при ниски фреквенции до 1MHz, при средни фреквенции до 100MHz и при високи фреквенции преку 100MHz. Според моќноста, можат да бидат за мали моќности до 0,2W, за средни моќности до 1W и за големи моќности преку 1W.

Како прекинувачки елементи, освен за стандардните прекинувачки функции, транзисторите се применуваат во дигиталната технологија за изработка на логички порти како сос-тавни делови на комплексни дигитални системи. Така, на пример, еден полупроводнички чип може да содржи и по неколку милиони транзисторски прекинувачки елементи.

Транзисторот како елемент се употребува речиси во сите електронски уреди. Исклучок се единствено VF и NF-филтрите, кои претежно се состојат од кондензатори и калеми и од некој отпорник.

Иако во денешните уреди се повеќе се употребуваат интегрирани кола, поради бројните предности: мали димензии, поедноставно вградување и сервисирање, транзисторите не се исфрлени од употреба. Не се видливи како самостојни елементи, тие се интегрирани со други елементи и градат интегрирани кола. Транзисторите се комбинираат со отпорници, кондензатори, диоди, калеми и со други транзистори. За тоа дека можат многу добро да се интегрираат, доказ се денешните компјутерски процесори.

ТЕМАТСКО УТВРДУВАЊЕ



I Прашања со заокружување (Заокружи ги точните одговори)

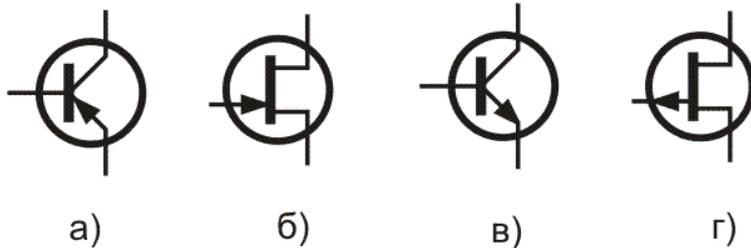
1. Главни носители на електричниот полнеж во PNP-транзисторот се:
 - а) електроните
 - б) празнините
 - в) донорите
 - г) акцепторите.
 2. Мерната единица на h_{fe} параметарот е:
 - а) неименуван број
 - б) А
 - в) V.
 3. Споредни носители на електричниот полнеж во PNP-транзисторот се:
 - а) електроните
 - б) празнините
 - в) донорите
 - г) акцепторите.
 4. Зависноста на струјата I_C напонот U_{ce} при константна струја I_B кај транзистор во спој со заеднички емитер е претставена со:
 - а) преносната карактеристика
 - б) влезната карактеристика
 - в) излезната карактеристика.
 5. Кај транзисторот во спој со заедничка база влезна струја е:
 - а) I_C
 - б) I_B
 - в) I_E .
-

6. Излезната карактеристика на транзистор во спој со заеднички емитер е претставена со:

- а) $I_C = f(U_{CE})$ за $I_B = \text{const.}$
 б) $I_B = f(U_{BE})$ за $U_{CE} = \text{const.}$
 в) $U_{BE} = f(U_{CE})$ за $I_B = \text{const.}$

II Прашања со поврзување

7. Поврзи ги електричните симболи со видовите транзистори:



1. NPN – транзистор _____
 2. PNP – транзистор _____
 3. FET од N – тип _____
 4. FET од P – тип _____

8. Поврзи го параметарот со релацијата:

1. Излезна спроводливост а) $h_{11} = h_i = \frac{\Delta U_1}{\Delta I_1}$ за $\Delta U_2 = 0$.
 2. Коэффициент на напонска повратна спрега. б) $h_{12} = h_r = \frac{\Delta U_1}{\Delta U_2}$; за $\Delta I_1 = 0$.
 3. Коэффициент на струјно засилување. в) $h_{21} = h_f = \frac{\Delta I_2}{\Delta I_1}$; за $\Delta U_2 = 0$.
 4. Влезна отпорност. г) $h_{21} = h_f = \frac{\Delta I_2}{\Delta I_1}$; за $\Delta U_2 = 0$.

III Прашања со дополнување

10. Со односот на промената на колекторската струја ΔI_c , и промената на базната струја ΔI_b се дефинира _____.

11. Кога транзисторот е во состојба на заситување, излезната струја има _____ јачина, а излезната отпорност _____ вредност.

12. Кога емитерскиот и колекторскиот спој се инверзно поларизирани, транзисторот е во режим на _____.

13. Транзисторот се поларизира така што емитерскиот спој ќе биде _____ поларизиран, а колекторскиот _____ поларизиран.

Вежби за активно учење:

- ❖ Состави табела во која ќе ги внесеш карактеристиките на видовите транзистори и анализирај ја.
 - ❖ Истражувај на интернет за транзистори - шеми за практична реализација.
 - ❖ Изработи проект за видови на транзисторите.
 - ❖ Изработи проект за примена на транзисторите.
-

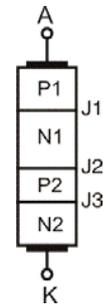
3. ТИРИСТОРИ

Основни познавања за тиристорите ќе стекнеш со изучување на содржините од оваа тема од електрониката и ќе можеш:

- да го објаснуваш начинот на работа на тиристорите;
 - да ги познаваш основните карактеристики на тиристорите;
 - да ги познаваш прекинувачките способности на тиристорите;
 - да ги сфаќаш условите за вклучување и исклучување на тиристорите;
 - да го познаваш начинот на побудување на тиристорот;
 - да ја опишуваш улогата на тиристорот како прекинувач и регулатор на електричната моќност;
 - да ја познаваш разликата меѓу дијак и тријак;
 - да даваш примери на практична примена на дијакот и тријакот.
-

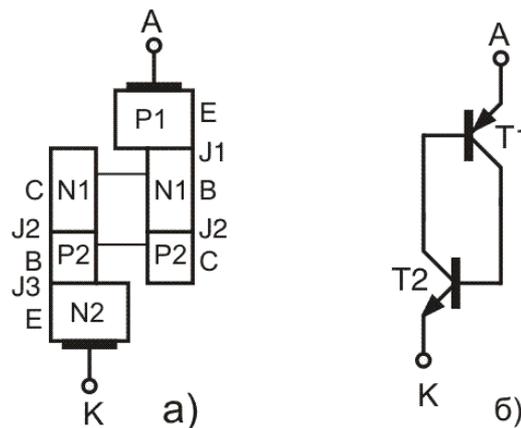
Тиристорите се група елементи со конфигурација од четири или повеќе полупроводни материјали, наредени такашто да прават најмалку три PN-споеви и имаат најмалку два извода (слика 3.1). Меѓусебно, тиристорите се разликуваат според бројот на изводите, насоката на спроведувањето и формата на статичките карактеристики.

Слика 3.1: Основна конфигурација на тиристорот.



3.1. Динистор

Елементот со структура како на слика 3.1 е наречен динистор или Шоклиева диода. Неговите изводи се означени со A – анода и K- катода.



Слика 3.2: Еквивалентна шема на динисторот.

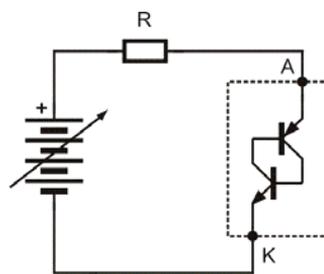
Оваа структура може да се претстави и на друг начин, разделена на две структури PNP и NPN, како на **слика 3.2**. Полупроводничките слоеви не се со иста ширина и концентрација на примесите. Најголема ширина има слојот N1, а најголема концентрација на примеси имаат крајните слоеви P1 и N2.

3.1.1. Принцип на работа на динисторот

За подобро објаснување на принципот на работа, ќе се послужи́ме со шематскиот приказ на динисторот со два транзистора, едниот PNP а другиот NPN, меѓусебно споени како на слика 3.26.

Ако се приклучи позитивен крај на изворот за напојување на анодата, а негативен на катодата, PN-споевите J1 и J3 ќе бидат директно поларизирани, а спојот J2 инверзно. Оваа состојба е еднаква на состојбата на активниот режим на работа на двата транзистора.

Со приклучување еднонасочен напон, како на **слика 3.3**, ни еден транзистор нема да спроведува зашто кај ни еден од транзисторите нема струја база емитер. Со базната струја на долниот транзистор управува горниот транзистор, а базната струја на горниот транзистор ја управува долниот транзистор. Двата транзистора се држат меѓусебно во исклучена, неспроводлива состојба, без оглед колку го зголемуваме напонот на изворот за напојување.



Слика 3.3: Поларизација на динисторот.

Такво толкување важи за идеални транзистори, тие никогаш нема да спроведат ако нема базна струја. Наспроти нив, реалните транзистори имаат некоја гранична вредност на напонот меѓу колектор и емитер, која можат да ја издржат без да пробијат и да почнат да спроведуваат. Ако пробие долниот транзистор, тој ќе овозможи да протече базната струја на горниот транзистор. Горниот транзистор станува спроводен и овозможува течење на базна струја на долниот транзистор. Краен резултат е спроведување на двата транзистора. Тоа е начинот на кој се изведува позитивна повратна спрега меѓу транзисторите. Пробивањето на транзисторите во оваа ситуација не значи и нивно оштетување, што се случува кај стандардните транзистори.

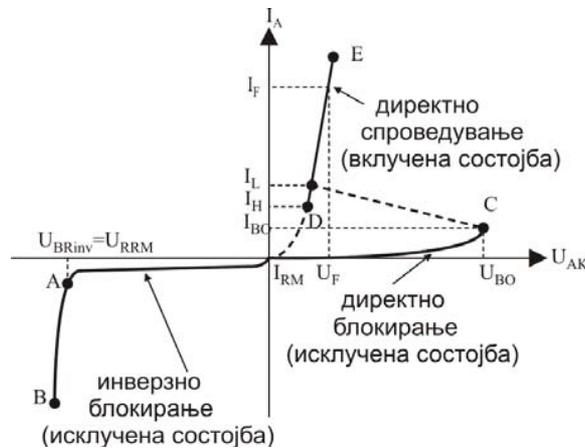
За мали вредности на напонот, струјата низ динисторот е мала, така што може да се каже дека динисторот е неспроводен. Кога напонот на краевите на динисторот ќе ја надмине вредноста на напонот на пробив на спојот J2, U_{BO} , струјата на спојот расте и поради присуството на позитивна повратна спрега меѓу транзисторите, за кратко време тие влегуваат во заситување и динисторот ќе се најде во состојба на директно спроведување. Во состојбата на спроведување, тече голема струја и имаме мал пад на напон на динисторот. Струјата на динисторот може да се ограничи само со приклучување на надворешна отпорност на оптоварување. Во оваа состојба динисторот може да остане се додека струјата не падне под минималната вредност, одредена со струјата на држење I_H . Како заклучок, директно поларизираниот динистор може да се најде во една од двете состојби: состојба на директна неспроведливост и состојба на спроведување. Нема работен режим меѓу вклучена и исклучена

чена состојба, што значи дека не може да се користи како засилувачки елемент, тој е или вклучен или исклучен.

Состојба на инверзна поларизација имаме кога анодата е на негативен, а катодата на позитивен потенцијал. Споевите J1 и J3 се инверзно поларизирани, а J2 директно, што значи дека транзисторите се во режим на неспроведување и низ динисторот тече само инверзната струја. Но, кога инверзниот напон ќе стане поголем од U_{BRinv} , а тоа е напонот на пробив во инверзната насока, доаѓа до пробив на еден од споевите, а со тоа и на динисторот и тој се уништува.

3.1.2. Струјно-напонска карактеристика

Струјно-напонската карактеристика (слика 3.4) придонесува за појасна слика на се што досега е кажано за динисторот, како и за одредување на неговите параметри.



Слика 3.4: Струјно-напонска карактеристика на динисторот.

Делот на карактеристиката од 0 до точката C го покажува однесувањето на динисторот при мали напони на директна поларизација. Отпорот на динисторот е многу голем, од редот на стотици $M\Omega$, а струјата многу мала, од редот неколку nA и тој се наоѓа во состојба на директна неспроводливост. Оваа состојба трае се додека напонот на динисторот не ја достигне вредноста U_{BO} , а тоа е напонот на пробивање, односно на неговото вклучување.

Делот DE на карактеристиката ја покажува состојбата на директно спроведување на динисторот. Овде динисторот има многу мала отпорност и голема струја, а напонот на неговите краеве паѓа до вредности $0,5 - 2V$. Од состојба на спроведување, динисторот може да излезе ако неговата струја падне под вредноста I_H , наречена струја на држење.

Областа на инверзната поларизација на динисторот е дефинирана со делот на карактеристиката од 0 до точката A, во кој отпорноста му е многу голема (неколку стотици $M\Omega$), а струјата многу мала (неколку nA). Ако се зголеми инверзниот напон на поларизацијата до

вредноста U_{BRinv} , која се вика инверзен пробивен напон, инверзната струја нагло се зголемува и доаѓа до пробив, односно до уништување на динисторот. Тоа е делот АВ на карактеристиката.

РЕЗИМЕ

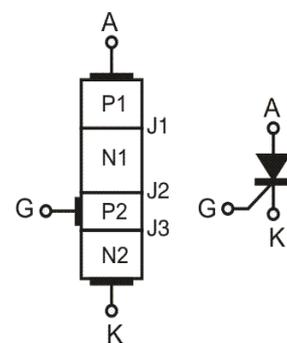
- * Тиристорите се група елементи со конфигурација од четири или повеќе полупроводни слоеви.
- * Динистор е четирислоен тиристорски елемент со три PN споеви и со два изводи (анода и катода).
- * Директно поларизируваниот динистор има состојба на неспроведување при мали напони анода – катода.
- * За напони поголеми од напонот на вклучувањето, динисторот е во состојба на спроведување.
- * Инверзно поларизируваниот динистор се однесува како обична диода.

✓ ПРОВЕРИ ШТО ЗНАЕШ

- Објасни ја конфигурацијата на тиристорите.
- Објасни го принципот на работа на динисторот преку шематската конфигурација.
- Што се случува во состојбата на инверзна поларизација на динисторот?
- Дефинирај ги состојбите на директно блокирање, директно спроведување и инверзно блокирање на динисторот.

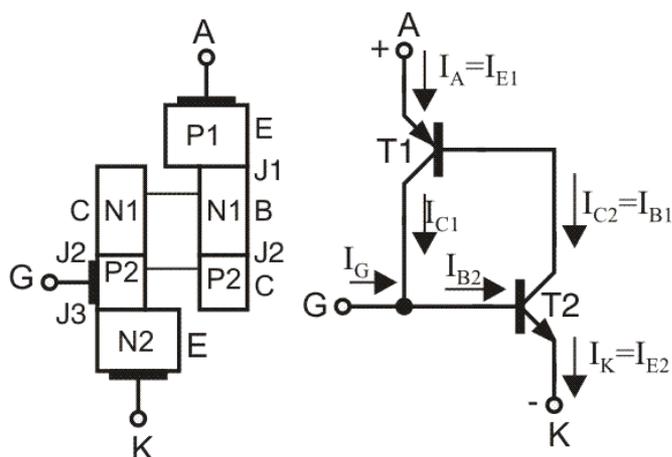
3.2. Тиристор

Со додавање на уште еден извод, приклучен на средниот P слој на структурата од слика 7.1, се добива тиристорски елемент со три изводи, познат како SCR (Silicon Controlled Rectifier) – контролиран силициумски насочувач или едноставно тиристор, како што најчесто се среќава во практиката. Неговите приклучоци се означени како А - анода, К - катода и G - гејт или порта (слика 3.5). Анодата и катодата имаат иста улога како и кај динисторот, а гејтот има улога на управувачка електрода за вклучување на тиристорот.



Слика 3.5: Структура и електричен симбол на тиристорот.

За анализа на работата на тиристорот ќе се послужиме, како и кај динисторот, со еквивалентна шема со два транзистора (слика 3.6).



Слика 3.6: Еквивалентна шема на тиристорот.

Кога колото на гејтот е отворено, тиристорот се однесува исто како и динисторот и се што е кажано за динисторот важи и за тиристорот.

3.2.1. Режим на вклучување и исклучување на тиристорот

Да видиме какво е влијанието на гејтот кога тиристорот е во состојба на директна неспроводливост. Ако се овозможи течење на струјата на гејтот, таа струја ќе ја зголеми и базната струја на вториот транзистор I_{B2} и преку патеката на позитивната спрега: зголемена I_{B2} дава зголемена I_{B1} , таа дава зголемена I_{C1} итн., се зголемува и анодната струја I_A и падот на напонот на тиристорот U_{AK} , се до моментот кога тој напон не ја достигне вредноста на напонот на вклучување U_{B0} , а тиристорот преоѓа во состојба на директно спроведување. Во таа состојба, на тиристорот има мал пад на напон (околу 1V) и низ тиристорот тече голема струја, одредена со напонот на тиристорот U_{AK} и отпорот на оптоварувањето приклучен во анодното коло.

Од овој момент, колото на гејтот нема повеќе никакво влијание врз струјата на тиристорот. Струјата на гејтот може да се прекине, а струјата низ тиристорот продолжува да тече. Тоа значи дека струјата на гејтот има улога само да го поттикне процесот на позитивната реакција и спроведувањето на тиристорот и таа може да има импулсен карактер. Тиристорот може да се вклучува со краток позитивен напонски импулс.

Струјата на гејтот треба да има одредена вредност и траење за да може да го вклучи тиристорот при одреден напон U_{AK} . Со зголемувањето на струјата на гејтот се намалува напонот

на вклучувањето на тиристорот U_{B0} , а тоа значи дека тиристорот ќе се вклучи и при помал напон U_{AK} .

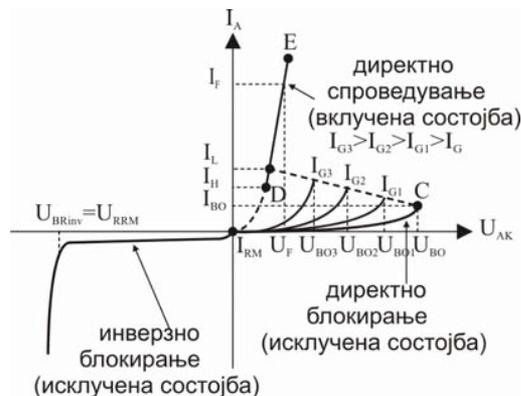
Исклучувањето на тиристорот, исто како и кај динисторот, се случува само кога струјата на тиристорот ќе се намали под вредноста на струјата на држење I_H . Тоа значи дека треба да се прекине колото на анодната струја, или да се намали напонот U_{AK} толку за струјата да падне под вредноста I_H .

3.2.3. Статички карактеристики

Тиристорите имаат две струјни кола: влезно (управувачко) и излезно (главно) струјно коло, па според тоа и две струјно-напонски карактеристики.

а) Излезни статички карактеристики

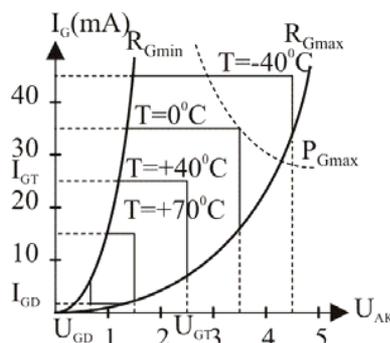
Овие карактеристики ја покажуваат зависноста на анодната струја I_A од напонот меѓу анодата и катодата U_{AK} за различни вредности на струјата на гејтот I_G (слика 3.7). Се забележува дека карактеристиката за $I_G = 0$ ја има истата форма како и карактеристиката на динисторот, што произлегува од истиот принцип на работа на двата елемента. При директна поларизација и тиристорот има две стабилни состојби: состојба на директно спроведување (исклучена состојба) и состојба на директно спроведување (вклучена состојба).



Слика 3.7: Излезна статичка карактеристика на тиристорот.

Преминот од исклучена во вклучена состојба е во моментот кога напонот меѓу анодата и катодата ќе го надмине напонот на пробивање U_{B0} . Овој напон се менува во зависност од струјата на геј

Влезната карактеристика има иста форма како карактеристиката на обична диода. Но, сите тиристиори од ист тип немаат иста влезна карактеристика, постои голема разлика во карактеристиките на влезните кола и поради тоа тие се прикажуваат како на **слика 3.8**. Граничните криви одговараат на примероци со минимална и максимална отпорност на гејтот за дадениот тип на тиристор.



Слика 3.8: Влезна статичка карактеристика на тиристорот.

3.2.3. Побудување на тиристорот

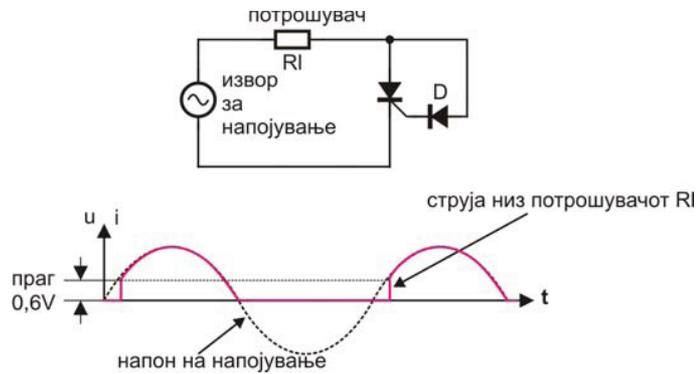
Од претходно изложениот принцип на работа на тиристорот следува дека побудувањето на тиристорот (или чкрапнување) може да се направи на два начина: со зголемување на напонот меѓу анодата и катодата над вредноста на напонот на вклучувањето U_{B0} , или со приклучување позитивен напон на гејтот. Во практиката секогаш се применува вториот начин.

Побудниот напон може да биде: еднонасочен, наизменичен или импулсен. Од овие три начини, најчесто се применува побудување со позитивни струјни импулси.

3.2.4. Тиристор како регулатор на електрична моќност

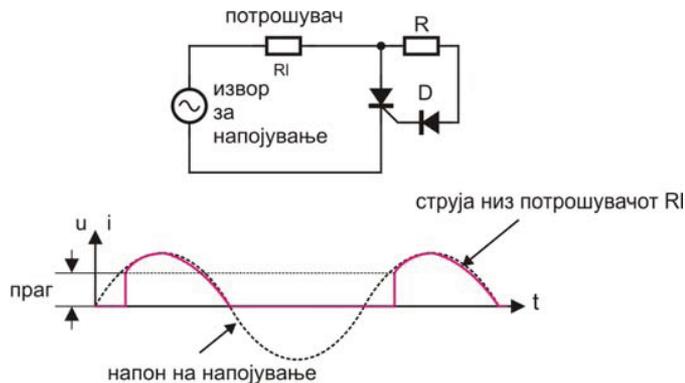
Наспроти фактот дека тиристорот е еднонасочен елемент, тој наоѓа најголема примена во управувањето со напојувањето со наизменичен напон. Ставен во коло за напојување на некое оптоварување со наизменичен напон, тој ќе функционира само за време на позитивната полупериода на напонот. Без окинување на гејтот и при напон којшто е доста под напонот на пробивањето, тиристорот нема да спроводи.

Да видиме што се случува ако се врзе гејтот со анодата на тиристорот преку една стандардна насочувачка диода (**слика 3.9**). Ддиодата е потребна да се сопре течење на инверзна струја преку гејтот кај тиристиори со вграден отпорник гејт – катода.



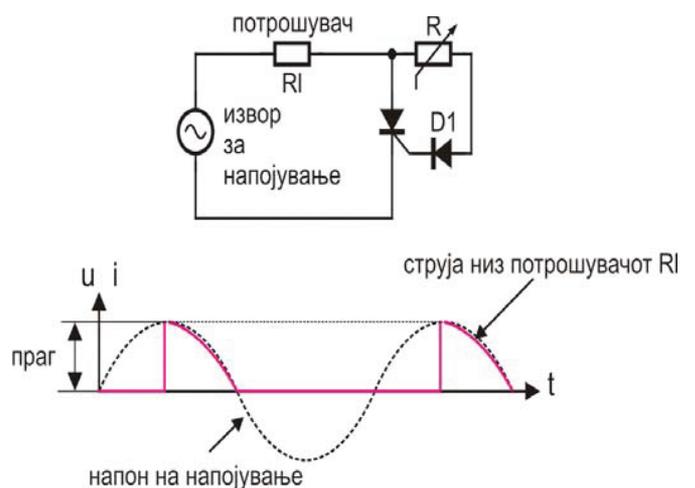
Слика 3.9: Тиристорот во коло на наизменична струја.

Прагот на окинувањето и донесувањето на тиристорот во спроводна состојба се постигнува кратко време по почнувањето на секоја позитивна полупериода. Тоа е времето за кое напонот за напојување ја достигнува онаа вредност при која почнува да тече струјата на гејтот.



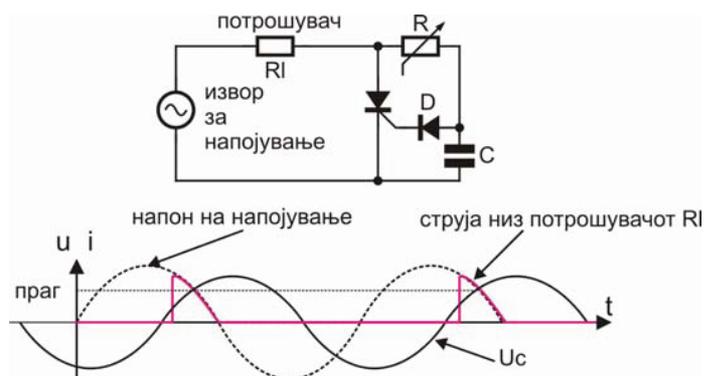
Слика 3.10: Чкрапнување на тиристорот преку отпорник.

Моментот на чкрапнување може да се задоцни со ставање отпорник во колото на гејтот (слика 3.10). Со падот на напонот на тој отпорник се намалува напонот на гејтот и чкрапнувањето на тиристорот се одлага се додека напонот на напојувањето не ја достигне претходната вредност при која настапило чкрапнувањето на тиристорот, зголемена за падот на напонот на отпорникот. Со поголем степен на отсекување на синусниот полубран, добиено со задоцнето чкрапнување на тиристорот, оптоварувањето добива помала средна моќ.



Слика 3.11: Регулација на моќноста на тиристорот.

Ако се направи серискиот отпорник во колото на гејтот да биде променлив (слика 3.11), се регулира испорачаната моќност на оптоварувањето по желба. Со зголемувањето на вредноста на отпорот се подига нивото на прагот на окинувањето и помала моќност се испорачува на оптоварувањето. Спротивното се случува со намалувањето на отпорот. За жал, оваа регулација е ограничена само на првата половина на полупериодата, до нејзиниот максимум. Колку и да го зголемуваме прагот на окинување, регулацијата не може да се пренесе во другата половина на полупериодата.



Слика 3.12: Поместување на фазата на окидниот бран.

Решението се наоѓа во додавање на кондензатор во колото, со кој се поместува фазата на окидниот бран (слика 3.12). Напонот на кондензаторот, како што се гледа и од дијаграмот, фазно е поместен за 90° во однос на напонот на напојувањето. Тоа важи за отпорно оптоварување, а за друг вид оптоварување, индуктивно или комбинирано, фазата се поместува каде и да е меѓу 0 и 90° . Со фазното поместување, кретењето на полупериодата на струјата се постигнува подоцна од максималниот напон на изворот за напојување.

Во пракса, формата на напонот на кондензаторот е покомплексна од овде прикажаната, синусоидата е поизобличена секогаш кога тиристорот спроведува. Овој начин на окинување на тиристорот задоволува за едноставни примени како што е регулација на светлина.

РЕЗИМЕ

* Тиристорот или контролиран силициумски насочувач е елемент со три изводи: анода, катода и гејт.

* Тиристорот се побудува со позитивен напон на гејтот.

* Со струјата на гејтот, тиристорот преоѓа во состојба на директно спроведување.

* По влегувањето на тиристорот во состојба на директно спроведување, струјата на гејтот повеќе нема никакво влијание.

* Тиристорот може да се исклучи ако се прекине анодното коло, или ако се намали напонот анода – катода под вредноста на напонот на вклучувањето на тиристорот.

* За побудување на тиристорот се користат позитивни струјни импулси.

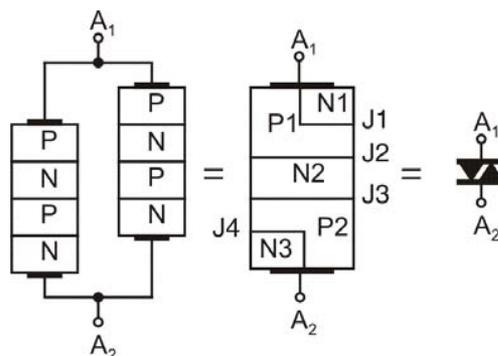
* Тиристорот во колото на наизменична струја ја регулира пренесената моќност од мрежата кон потрошувачот.

✓ ПРОВЕРИ ШТО ЗНАЕШ

- Како се добива структурата на тиристорот?
- Каква е улогата на гејтот кај тиристорот?
- Како се исклучува тиристорот?
- Дефинирај ги состојбите на директно блокирање, директно спроведување и инверзно блокирање на тиристорот.
- Како се побудува тиристорот?
- Зошто се става диода во колото на гејтот?
- Како се задоцнува окинувањето на тиристорот?
- Што се добива со регулација на задоцнувањето на окинувањето?

3.3. Дијак

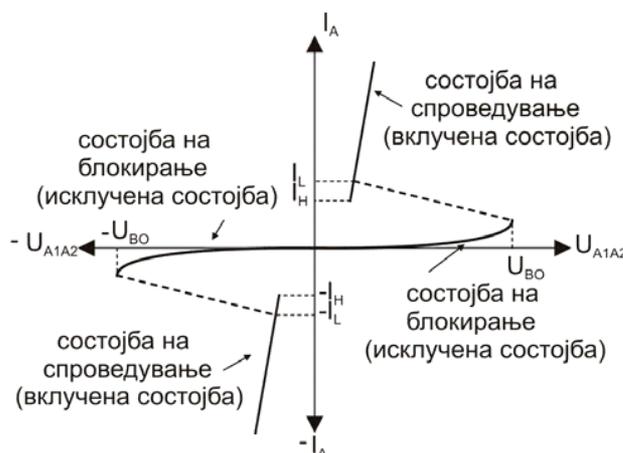
Со паралелно врзување на два динистора, поставени во спротивни насоки, се добива еден од елементите на групацијата тиристори, наречен дијак. Еквивалентното коло и електричниот симбол на дијакот се дадени на **слика 3.13**. Направен на една силициумска плочка, дијакот претставува елемент со петослојна NPNP-структура.



Слика 3.13: Структура и електричен симбол на дијакот.

Кога е приклучен на еднонасочен напон, дијакот се однесува како стандарден динистор, тој ќе спроведува во една насока од позитивниот кон негативниот крај на напонот на изворот. Ако ги свртиме краевите на дијакот, тој пак ќе спроведува, што значи дека неговите краеве

не се однесуваат како анода и катода. Бидејќи дијакот спроведува во двете насоки, неговите краеве се обележуваат со A1 и A2 или со MT1 и MT2.



Слика 3.14: Струјно-напонска карактеристика на дијакот.

Како и сите други тиристоры, дијакот ќе почне да спроведува откако напонот на неговите краеве ја достигне вредноста на пробивниот напон. По тоа тој се разликува од стандардните диоди, кои стануваат спроводни при вредности на напонот од околу 0,6 V, за дијакот тој изнесува околу 30 - 35 V. Струјно-напонската карактеристика на дијакот е дадена на **слика 3.14**.

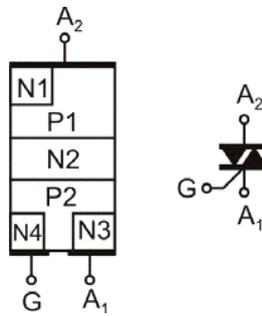
Дијакот ретко се користи самостојно, најчесто е во придружба на друг тиристорски елемент.

✓ ПРОВЕРИ ШТО ЗНАЕШ

- Што претставува дијак?
- Во што се разликува дијакот од стандардните диоди?
- Како изгледа струјно-напонската карактеристика на дијакот?

3.4. Тријак

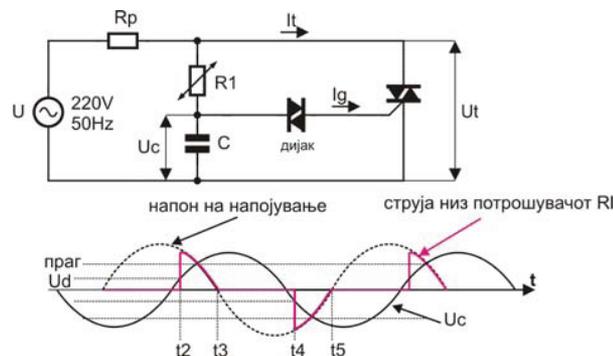
Со врзување два тиристора во паралела, слично на врзување на два динистора, се добива нов тиристорски елемент, познат како тријак. Тријакот може да се дефинира како двонасочен тиристор кој спроведува во двете насоки. Неговото еквивалентно коло и електричниот симбол се дадени на **слика 3.15**. Тријакот спроведува во двете насоки и изводите на тријакот се означуваат како анода 1, анода 2 и гејт. Управувачкиот сигнал на гејтот може да биде и позитивен и негативен во однос на A1. Исто така, и напонот меѓу A1 и A2 може да биде позитивен и негативен.



Слика 3.15: Структура и електричен симбол на тријакот.

И тријакот се носи во спроводлива состојба ако се овозможи течење на струјата на гејтот. Струјата на гејтот може да има иста или спротивна насока со главната струја. Главната струја се смета за позитивна ако тече од анодата 2 кон анодата 1, а негативна ако тече од анодата 1 кон анодата 2.

Основен принцип на окинување на тријакот е со фазно поместување, слично како и кај тиристорот. Едно такво коло е прикажано на **слика 3.16**, тоа е истото коло од слика 3.12, во кое наместо тиристор стои тријак и наместо диода стои дијак. Напонот на кондензаторот U_c во почетокот расте се до вредноста U_d , до моментот t_2 кога дијакот станува спроводен. Од моментот t_2 до t_3 низ тријакот и потрошувачот тече струја I_t која што престанува да тече во моментот t_3 , кога наизменичниот напон на изворот за напојување станува нула.

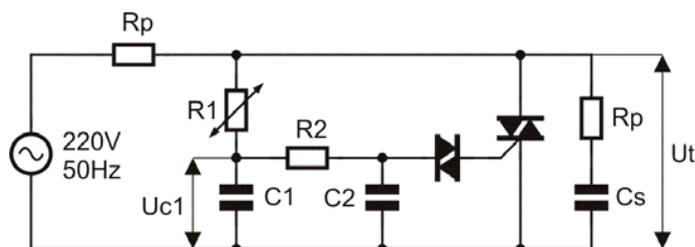


Слика 3.16: Принципно коло на работа на тријакот.

За време на негативната полупериода, во моментот t_4 , пак доаѓа до пробивање на дијакот, но сега во спротивната насока, се побудува тријакот и протекува струја низ тријакот и потрошувачот од моментот t_4 до t_5 .

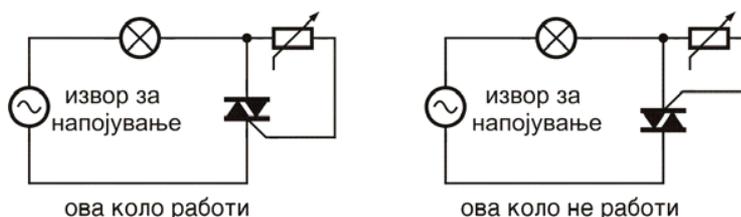
Тријакот не се побудува симетрично за двете полупериоди на напонот на изворот, не се окинува точно на истото напонско ниво. Како последица се јавува голем број на хармонични фреквенции. Состојбата нешто ја подобрува присуството на дијакот. Подобрување се добива и со дополнително фазно поместување на напонот U_{c1} со R_2 и C_2 како што е направено во колото, дадено на **слика 3.17**. За потрошувачи со индуктивен карактер се ставаат елементите R_p и C_s за да не дојде до губење на контролата. Со нив се филтрираат многу

брзи непожелни напонски скокови коишто можат да го окинат тријакот надвор од секаква контрола.



Слика 3.17: Дополнително фазно поместување на напонот за окинување.

Изводите анода 1 и анода 2 меѓусебно не се заменливи, што се гледа од две едноставни конструкции на **слика 3.18**, од кои едната работи а другата не. Поради поедноставување се изоставени дијакот и кондензаторот.



Слика 3.18: Приклучување на анодите на тријакот.

✓ ПРОВЕРИ ШТО ЗНАЕШ

- Како може да се дефинира тријакот?
- Која е разликата помеѓу тријакот и тиристорот?
- Зошто во колото на гејтот се употребува дијак?
- Зошто не можат изводите анода 1 и анода 2 меѓусебно да се заменат?

3.5. Примена на тиристорите

Основната функција на тиристорите е да управуваат со струја на излезот со голема јачина со помош на мала струја во побудното коло.

Малата отпорност и пад на напон, а со тоа и мали загуби на моќност во спроводна состојба и многу големата отпорност и издржливост на големи напони во неспроводна состојба, ги прават тиристорите погодни за употреба како бесконтактни прекинувачи во кола за регулација на струјата и моќноста, особено за големи потрошувачи.

Освен за прекинувачи, овие компоненти се користат и за континуирана регулација на електричната моќност, најчесто како насочувачи, инвертори (за претворање на еднонасочната во наизменична струја) или фреквенциски претворувачи за континуирана регулација на брзината на електромоторите.

Само за споредба, одредени типови транзистори можат да работат со моќности над 500W, со струја поголема од 50A и напон поголем од 500V. За разлика од нив, тиристорите можат да работат со моќност поголема од 250KW, со струја над 1000A и со напон над 2500V. Карактеристично е што побудната моќност за активирање на транзистор е поголема од онаа што е потребна за тиристор со иста излезна моќност. Неповолноста на тиристорите е помалата брзина на прекинување и поради тоа тие не можат да се користат за прекинување и регулација на сигнали со високи фреквенции.

Тиристорите имаат голема примена во индустриската електроника и автоматика за контрола на моќноста на големи потрошувачи, како што се електромотори, грејачи, електрични рефлектори, а во секојдневниот живот за регулација на јачината на светлото на електричните светилки, за регулација на брзината на електричните мотори во разни апарати во домаќинствата, за регулација и автоматика на полнење на акумулаторски станици и многу други примени.

Тријакот се користи за поедноставни примени со мала моќност, најмногу во апарати за домаќинство, разни електрични алати за регулација на брзината, додека тиристорите наоѓаат примена најмногу за регулација на моќни еднонасочни мотори во индустријата.

РЕЗИМЕ
* Дијакот е елемент со петослојна структура и спроведува во двете насоки.
* Дијакот се користи најчесто во придружба на друг тиристорски елемент.
* Тријак е двонасочен тиристор кој спроведува во двете насоки и се користи во кола со наизменичен напон.
* Тријакот се доведува во спроводна состојба со струјата на гејтот.
* Со регулација на фазата на струјата на гејтот се регулира предадената моќност на потрошувачот.
* Тиристорите се користат за управување на струја со голема јачина со помош на мала струја на гејтот.
* Тиристорите имаат најголема примена за контрола на моќноста на електромотори, грејачи и електрични рефлектори, а тријаките во апарати за домаќинства.

ТЕМАТСКО УТВРДУВАЊЕ

I Прашања со заокружување

(Заокружи ги точните одговори)



- Тиристорот е во исклучена состојба кога се наоѓа во:
 - Директно спроведување
 - Директно блокирање
 - Инверзно блокирање.
- За регулација на моќни еднонасочни мотори во индустријата се користи:
 - Тиристор
 - Дијак
 - Тријак.

II Прашања со поврзување

3. Поврзи ги електричните симболи со елементите:



а)



б)



в)

- Тиристор _____
- Дијак _____
- Тријак _____.

III Прашања со дополнување

4. Електронските елементи со конфигурација од четири или повеќе полупроводни материјали, наредени така што да прават најмалку три PN-споеви и имаат најмалку два извода се нарекуваат _____ .

5. Карактеристиките кои ја покажуваат зависноста на струјата на гејтот од напонот меѓу гејтот и катодата $U_{ГК}$ се _____ карактеристики.

6. Двонасочен тиристор кој спроведува во двете насоки се нарекува _____ .

Вежби за активно учење:

- ❖ Истражувај на интернет за видови тиристори.
- ❖ Изработи проект на тема тиристори.
- ❖ Изработи проект за практичната примена на тиристорите.



4. ТЕРМИСТОРИ И ФОТОЕЛЕКТРИЧНИ ЕЛЕМЕНТИ

Со изучување на содржините од оваа тема ќе стекнеш основни знаења за градбата, карактеристиките и примената на различни видови специфични електронски елементи и ќе можеш:

- да го објаснуваш начинот на работа на термисторите;
 - да го објаснуваш температурниот коефициент на термисторот;
 - да ја познаваш примената на термисторите;
 - да го објаснуваш начинот на работа на фотоелектричните елементи;
 - да ги идентификуваш фотоелектрични елементи;
 - да ги објаснуваш основните карактеристики на фотоелектричните елементи;
 - да ја познаваш практичната примена на фотоелектричните елементи.
-

4.1. Термистори

Термисторите претставуваат група температурно осетливи отпорни елементи, од каде што и потекнува нивниот назив, составен од кратенки на зборовите "термички (thermal)" и "отпорни (resistor)". Постојат два вида термистори: **NTC** и **PTC**. **NTC (Negative Temperature Coefficient)** се термистори со негативен температурен коефициент, што значи дека нивниот отпор се намалува со зголемувањето на температурата. Поради тоа, тие се користат како температурни сензори. **PTC (Positive Temperature Coefficient)** се термистори со позитивен температурен коефициент, при што нивниот отпор се зголемува со зголемувањето на температурата. Оваа карактеристика овозможува нивна примена во кола за регулација на електричната струја.

Зависноста меѓу отпорноста на термисторот и температурата има линеарен карактер и може да се изрази како:

$$\Delta R = k\Delta T; \dots\dots\dots(4.1)$$

каде што:

ΔR - промена на отпорноста

ΔT - промена на температурата

k - температурен коефициент на отпорот.



Слика 4.1: Електричен симбол на термисторот.

Електричниот симбол на термисторот е даден на **слика 4.1**.

Температурниот коефициент k на термисторот претставува релативна промена на отпорот при промена на температурата за 1К(келвин). Овој коефициент е во зависност од линеарниот температурен коефициент α . Отпорот на термисторот се дефинира со:

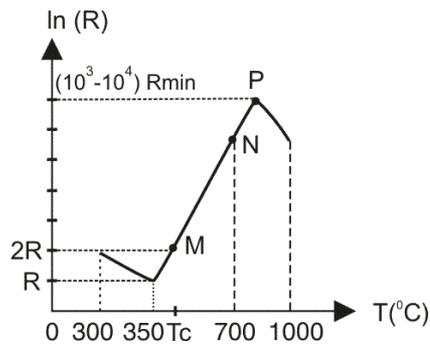
$$R(T) = R(T_0)(1 + \alpha\Delta T). \dots\dots\dots(4.2)$$

Во оваа формула со R е претставена отпорноста на термисторот при мерената температура T , T_0 е референтна температура, а ΔT е разликата меѓу температурите T и T_0 . Со α е претставен линеарниот температурен коефициент.

4.1.1. NTC-термистори

Термисторите со негативен температурен коефициент достигнуваат најголем развој и примена во средината на минатиот век. Како претворувачи на температурата во електрична

информација, се карактеризираат со голема осетливост. Најголема примена наоѓаат во електричните мерења на температурата, во медицината, биологијата, геологијата и др. Карактеристиката на зависност на отпорот од температурата е прикажана на **слика 4.2**.



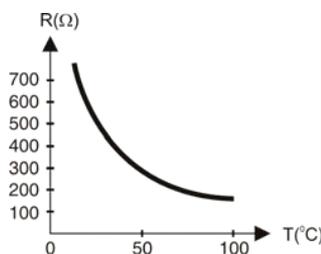
Слика 4.2: Карактеристиката на зависност на отпорот од температурата на NTC-термистор.

Со зголемување на температурата до вредноста означена на графикот со T_c , отпорноста се намалува во незначителна мера. Во областа од точката M до точката N, отпорноста расте по експоненцијален закон, а над точката N забавува и достигнува максимум и повторно опаѓа. NTC-термисторите се произведуваат од оксиди на железо, хром, манган, кобалт, никел, бакар и др. Со комбинирање на неколку видови оксиди се прави смеса од која со процес на синтерување на температура над 1000°C се формираат отпорници со форма на топка, диск или цилиндар. Максималната работна температура изнесува од 300°C до 350°C , а во поново време се изработуваат термистори и за температура од 700°C до 1000°C . Во областа на ниски температури, термисторите се применуваат до неколку десетици Келвинови степени.

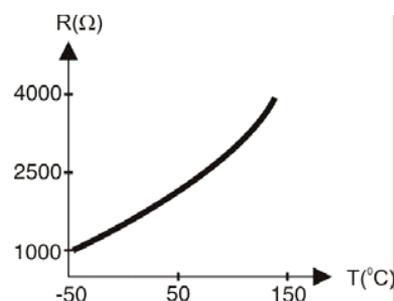
4.1.2. PTC-термистори

Термисторите со позитивен температурен коефициент не се користат за мерење на температурата. Сензори со PTC-термистор за одредена температура даваат дискретни сигнали. Опсегот на мерењето на PTC-термисторот е тесен, а осетливоста е десет пати поголема во однос на NTC-термисторот. Материјал за производство на PTC-термистори е бариум-титанат, кој спаѓа во материјали со феромагнетни својства. Бариум-титанат претставува изолатор, а неговата отпорност се намалува со внесување на донорски примеси.

Карактеристиката на зависност на отпорот од температурата, до 100°C е дадена на **слика 4.3**.



Слика 4.3: Карактеристиката на зависност на отпорот од температурата на NTC-термистор.



Слика 4.4: Карактеристиката на зависност на отпорот од температурата на силициумските отпорни PTC-сензори.

Силициумските отпорни PTC-сензори имаат релативно тесен опсег на мерење (од $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $150\text{ }^{\circ}\text{C}$). Во овој опсег работат голем број уреди од прехранбена индустрија, климатизација, метеорологија, домашни уреди, автомобили и др. Нивната карактеристика е дадена на **слика 4.4**. Термисторите се изработуваат од ситни делови на специјални керамички материјали (разни метални оксиди), а во поново време за нивното производство се користат и силициум и германиум. Промената на електричниот отпор на термисторот може да биде предизвикана од промената на температурата на околината или поради течење на струја во самиот термистор. Термисторите како температурни сензори се користат како електроди осетливи на топлината на околината во која се наоѓаат. Тие ја мерат температурата на околината преку електрични импулси. Исто така, тие учествуваат во контролирањето на топлината, така што прават уредите на кои се приклучени да се грее побавно. Термисторските сензори обично се составени од повеќе пластови од полупроводнички материјали поврзани со телото на термисторот. Овие материјали претставуваат отпор во колото во кое е приклучен термисторот и така ја регистрираат топлината создадена со струјата. Термисторите имаат голем отпор за мали температурни промени и најголем број од нив се направени од оксиди на манган, кобалт, никел и бакар. Освен со овие материјали, за производство на термисторите се користи и силициумот и германиумот. Термисторите се користат за заштита на електронските кола од преоптоварување до кое доаѓа кога "ладен" уред се вклучува за да се постигне постепено затоплување.

Како температурни сензори, тие работат со голема прецизност во релативно мал температурен опсег, во споредба со другите температурни сензори. Термисторските сензори се среќаваат во дигитални термометри, телефони, автомобили, стерео и ТВ уреди. Нивните мали димензии овозможуваат нивна примена во многу други уреди за автоматска контрола и управување во науката и индустријата.

РЕЗИМЕ

- * Термисторите претставуваат температурно осетливи отпорни елементи.
- * Кај NTC (Negative Temperature Coeficient) термисторите отпорот се намалува со зголемување на температурата.
- * Кај термисторите со позитивен температурен коефициент отпорот се зголемува со зголемување на температурата.
- * Температурниот коефициент k на термисторот претставува релативна промена на отпорот при промена на температурата за 1К.

✓ **ПРОВЕРИ ШТО ЗНАЕШ**

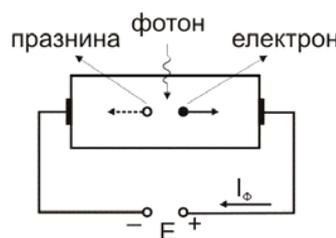
- Дефинирај го поимот термистор.
- Какви видови термистори постојат?
- Како се дефинира температурниот коефициент на термисторот?
- Каде имаат најголема примена NTC-термисторите?
- Каде се применуваат PTC-термисторите?

4.2. Фотоелектрични елементи

Фотоелектрични елементи се елементи чии електрични својства зависат од промената на енергијата на светлосното зрачење.

4.2.1. Фотоотпорници

Фотоотпорниците се електронски елементи изработени од полупроводнички материјали. Основната карактеристика на фотоотпорниците е промена на нивната електрична отпорност при промена на светлосниот флукс кој паѓа на нивната површина.

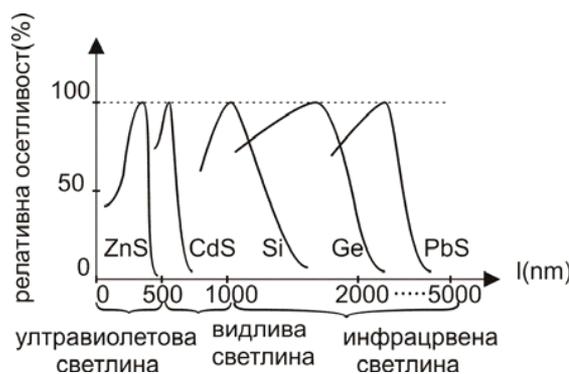


Слика 4.5: Фотоотпорник во во електрично коло со извор за напојување.

Кога е ставен во електрично коло со извор за напојување, фотоотпорникот пропушта струја I_{Φ} пропорционална на вредноста на неговиот отпор (слика 4.5). Ако фотоотпорникот не е осветлен, во колото во кое се наоѓа тече струја $I_{\Phi 0}$ која се нарекува "струја на темно". Кога на површината на фотоотпорникот паѓа светлина, светлосните кванти – фотони ја предаваат својата енергија на атомите на полупроводниот материјал од кој е направен отпорникот и предизвикуваат раскинување на валентните врски, создавајќи еднаков број на слободни електрони и празнини. Слободните електрони и празнините паѓаат под влијание на електричното поле на изворот за напојување, создадено во отпорникот. Слободните електрони се насочуваат кон позитивниот, а празнините кон негативниот крај на напонот на отпорникот, со што се создава струја пропорционална на промената на светлосниот флуks. Оваа струја се додава на "струјата на темно" и се добива вкупната струја на фотоотпорникот. Тоа значи дека промената на светлосниот флуks предизвикала промена на отпорноста на фотоотпорникот и на тој начин е претворена во електричен сигнал.

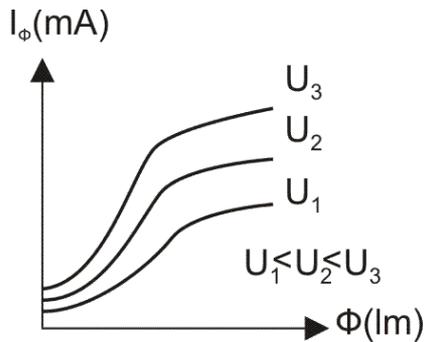
Процедурата на производство на фотоотпорникот се состои во нанесување фотоосетлив полупроводнички материјал на подлога од керамичка плочка. Нанесувањето се прави со таложеење на испарлив материјал или со синтерување на полупроводнички прав на висока температура. На краевите на плочката се ставаат метални контакти и на нив се прицврстуваат изводи со кои отпорникот се поврзува во електричното коло. Така добиената плочка се става во пластично или во метално куќиште со вграден просирен дел од стакло или пластика кој ја пропушта светлината да паѓа на фотоосетливата површина.

Фотоотпорниците се прават од неколку вида полупроводнички материјали, секој со сопствена спектрална карактеристика. Фотоотпорници од цинк – сулфид имаат најголема осетливост во областа на ултравиолетовото зрачење, оние од германиум и оловен сулфид во областа на инфрацрвеното зрачење, силициумските за зрачење од околу 1000nm, а кадмиум – сулфидните во областа на видливото зрачење (слика 4.6).

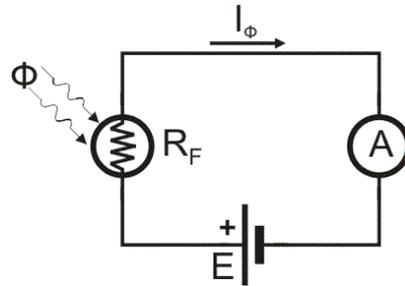


Слика 4.6: Спектрални карактеристики на фотоотпорникот за различни полупроводнички материјали.

Зависноста на струјата I_Φ од светлосниот флуks за разни вредности на напонот на фотоотпорникот е прикажана на **слика 4.7**. Оваа карактеристика не е линеарна, таа покажува струјно заситување за големи вредности на светлосниот флуks.



Слика 4.7: Дијаграм за осетливоста на фотоотпорникот.



Слика 4.8: Електрична шема на светломер.

Фотоотпорниците се применуваат во едноставни инструменти за мерење на осветленоста, таканаречени светломери (**слика 4.8**) и како детектори на светлината во разни алармни и командни уреди.

✓ ПРОВЕРИ ШТО ЗНАЕШ

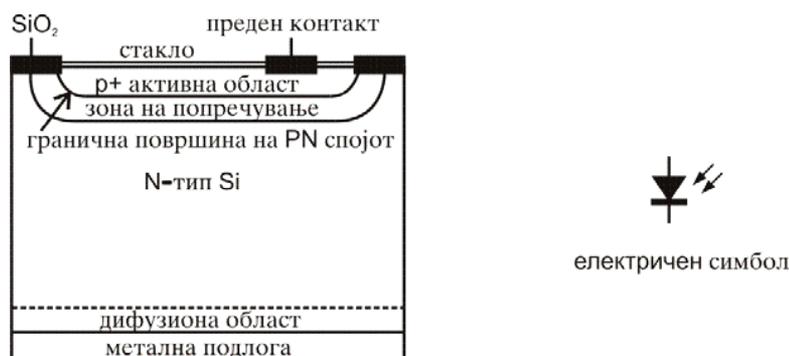
- Што се случува во фотоотпорникот кој е приклучен во електрично коло со извор за напојување, кога на неговата површина ќе падне светлина?
- Кога низ фотоотпорникот тече "струја на темно"?
- Објасни ја постапката на производство на фотоотпорникот.
- Кои фотоотпорници имаат најголема осетливост во областа на видливото зрачење?
- Каде се применуваат фотоотпорниците?

4.2.2. Фотодиоди

Фотодиодата, како и другите фотодетектори, има задача да ја претвори светлосната радијација во електричен сигнал. Во идеален случај, електричниот сигнал треба да биде пропорционален на јачината на светлината која паѓа на диодата. Една од најпознатите примени е соларната ќелија.

Како материјал за изработка на фотодиодите најчесто се користи силициум или галиум арсенид (GaAs), индиумантимонид (InSb), индиумарсенид (InAs), оловен селенид (PbSe) и оловен сулфид (PbS). Овие материјали апсорбираат светлина од одреден опсег на бранови

должини, на пр., од 250nm до 1100nm за силициумот, од 800nm до 2 μ m за галиумарсенид. Модел и електричен симбол на фотодиода се дадени на **слика 4.9**.



Слика 4.9: Модел и електричен симбол на фотодиода.

Знаеме дека еден фотон на апсорбирана светлина создава еден електрон и една празнина. Ако тие се разделат, пред да имаат можност да се рекомбинираат и да почнат да се движат во спротивни насоки, ќе се добие електрична струја, наречена фотоструја, а на надворешните приклучоци напон, наречен фотонапон.

Фотодиодите најмногу се применуваат во алармни системи.

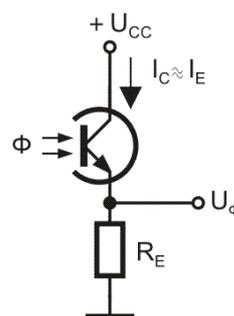
4.2.3. Фототранзистори

Фототранзисторот е биполарен транзистор со колекторска струја пропорционална на светлосниот флуks, кој паѓа на површината на колекторскиот спој. Неговата специфичност е во тоа што на горната страна има светлопропусен (просирен) слој, во кој може да биде вградена и леќа со цел да му се зголеми осетливоста.

Карактеристиката на релативната осетливост на фототранзисторот, дефинирана како однос на фотострујата I_{ϕ} за која и да е бранова должина на светлината наспроти максималната вредност $I_{\phi\max}$ е дадена на **слика 4.11**. Таа покажува како фототранзисторот реагира на светлина со разни бранови должини.



Слика 4.11: Карактеристика на релативна осетливост на фототранзистор.



Слика 4.12: Фототранзистор во електрично коло.

Кој и да е биполарен моќен транзистор со метално куќиште може да се направи да стане фототранзистор, ако му се пресече горниот дел на куќиштето и така отворен се изложува на сончева светлина или на светлина на отворен пламен. Светлината паѓа на колекторскиот PN-спој, којшто е инверзно поларизиран и има најголема ширина.

Начинот на приклучувањето на фототранзисторот во електрично коло е прикажан на **слика 4.12**. КOLEKTOPOT е врзан на позитивниот крај на изворот U_{CC} , емитерот преку отпорникот R_E на негативниот крај, а базата не е вклучена во надворешното коло, таа е слободна. За овој начин на поларизација, зоната на попречување на колекторскиот спој е многу поширока од онаа на емитерскиот спој. Со светлина создадените парови електрони – празнини во зоната на попречување во колекторскиот спој се разделуваат, електроните се упатуваат кон колекторот, а празнините кон емитерот. Нивното движење ја претставува фотострујата, која на отпорникот R_E создава излезен фотонапон. Фотострујата I_ϕ е составена од две компоненти: едната е резултат на светлината што паѓа на фототранзисторот, а другата е инверзната струја I_{CE0} од колекторот кон емитерот. Кога транзисторот не е осветлен, ќе тече само инверзната струја и таа ја претставува струјата на "темно". Нејзини типични вредности се движат околу 10nA и таа се зголемува со зголемувањето на температурата.

Физичкиот приклучок на базата може да се остави отворен, а може да се користи и за поларизација да се добие стабилно ниво на сигналот.

Фототранзисторите најчесто се употребуваат во прекинувачки кола, каде што нивната нелинеарност не создава проблеми.

РЕЗИМЕ

* Фототранзисторот е биполарен транзистор со колекторска струја пропорционална на светлосен флуks.

* Колото на базата на транзисторот е отворено, а фотострујата се создава во зоната на попречување во колекторскиот спој.

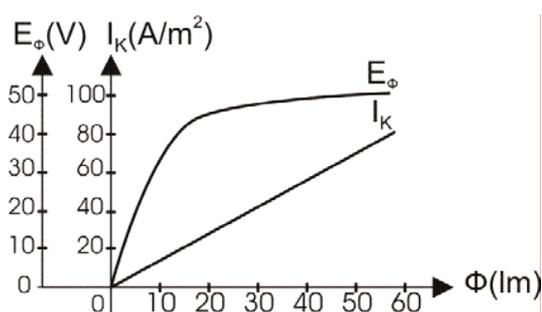
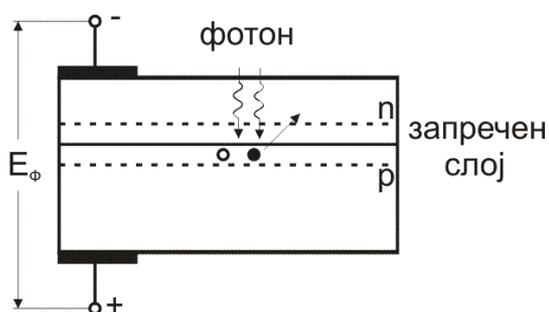
* Во неосветлен фототранзистор тече инверзна струја, наречена "струја на темно".

✓ ПРОВЕРИ ШТО ЗНАЕШ

- Со што е пропорционална колекторската струја на фототранзисторот?
- Дефинирај ја карактеристиката на релативната осетливост на фототранзисторот?
- Од кои компоненти е составена фотострујата?
- Каде се употребуваат фототранзисторите?

4.2.4. Фотогенератори

Полупроводнички елементи со способност да ја претвораат енергијата на светлосното зрачење директно во електрична се нарекуваат фотогенератори. Составени се од еден PN-спој и имаат два извода. Пресек на фотогенераторот е претставен на **слика 4.11**. Запречниот слој има многу мала ширина (околу 20 nm), додека површината на PN-спојот е зголемена, со цел поголема апсорпција на фотони од светлосниот зрак. P и N-областите се со поголема концентрација на слободни носители на електричниот полнеж. Фотогенераторите работат без надворешен извор за напојување. Фотоните од светлинскиот зрак што паѓа на површината на PN-спојот од фотогенераторот, ја предаваат својата енергија на валентните електрони со што се создаваат парови електрон-празнина.



Слика 4.11: Структура на фотогенераторот.

Слика 4.12: Светлосни карактеристики на фотогенераторот.

При тоа се зголемува бројот на споредните носители во запречниот слој од PN-спојот. Контактната потенцијална разлика создава електростатско поле кое им овозможува на споредните носители слободно се движат низ запречниот слој и го напуштаат, додека главните носители остануваат во своите области. При тоа во P и во N областите се создава многу голема концентрација на главните носители, која индуцира електромоторна сила E_{ϕ} на изодите на фотогенераторот.

Оваа електромоторна сила E_{ϕ} се нарекува напон во празен од кога на изводите на фотогенераторот не е приклучен отпорник. Ако се приклучи отпорник, низ него ќе протече електрична струја пропорционална на светлосниот флуks кој паѓа на површината на фотогенераторот.

На **слика 4.12** се дадени светлосните карактеристики на фотогенераторот кои претставуваат зависност на напонот во празен од, E_{ϕ} , и струјата на краток спој, I_{κ} , од светлосниот флуks Φ .

Фотогенераторите се основен извор на електрична енергија во космичките летала. Тие се нарекуваат **соларни келии**, бидејќи енергијата од сончевото зрачење ја претвораат во електрична.

Голема е и примената на соларните келии на земјината површина како алтернативни извори на електрична енергија.

✓ ПРОВЕРИ ШТО ЗНАЕШ

- Кои полупроводнички елементи се нарекуваат фотогенератори?
- Објасни го принципот на работа на фотогенераторот.
- Дефинирај ги светлосните карактеристики на фотогенераторот и нацртај го дијаграмот.
- Каде се применуваат фотогенераторите?
- Нацртај ја шематска ознака на фотодиода!

РЕЗИМЕ

* Фотоотпорниците се фотоелектрични елементи чија електрична отпорност се менува со промена на светлосниот флукс кој паѓа на нивната површина.

* Фотоотпорниците се применуваат во едноставни инструменти за мерење на осветленоста, така наречени светломери и како детектори на светлината во разни алармни и командни уреди.

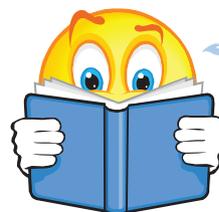
* Фотодиодата ја претвара светлосната радијација во електричен сигнал, пропорционален на јачината на светлината која паѓа на диодата. Таа работи во режим на инверзна поларизација.

* фотогенератори се фотоелектрични елементи со способност енергијата на светлосното зрачење да ја претвараат директно во електрична.

* Фотогенераторите се нарекуваат соларни келии бидејќи енергијата од сончевото зрачење ја претвараат во електрична енергија.

ТЕМАТСКО УТВРДУВАЊЕ

I Прашања со заокружување
(Заокружи ги точните одговори)



1. Елементите кај кои со промена на температурата се менува нивната отпорност се:
- а) фотоотпорници
 - б) фотодиоди
 - в) термистори.

2. Елементи кои се користат како температурни сензори се:

- а) фотогенератори
- б) термистори
- в) фотодиоди.

3. Елементи кои се користат во инструменти за мерење на осветленоста се:

- а) фотодиоди
- б) фотоотпорници
- в) фототранзистори
- г) фотогенератори.

4. Полупроводнички елементи со способност да ја претвораат енергијата на светлосното зрачење директно во електрична се нарекуваат:

- а) фотогенератори
- б) фотоотпорници
- в) фототранзистори
- г) термистори.

5. Како составен дел од инверторите се употребуваат:

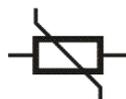
- а) фотодиоди
- б) термистори
- в) фотоотпорници.

II Прашања со поврзување

6. Поврзи ги електричните симболи со елементите:



а)



б)



в)

- 1. Фотодиода _____
- 2. Фототранзистор _____
- 3. Термистор _____.

7. Поврзи ги специфичните електронски елементи со нивната примена како:

- | | |
|-------------------|-------------------------------|
| 1. Термистори | а) Светломери _____ |
| 2. Фотогенератори | б) Температурни сензори _____ |
| 3. Фотоотпорници | в) соларни ќелии _____. |

III Прашања со дополнување

8. Кај NTC-термисторите со зголемување на температурата нивниот отпор се _____ .

9. Специфичните електронски елементи кои се користат во алармните системи се _____ .

11. Електронските елементи чии електрични својства зависат од промената на енергијата на светлосното зрачење се нарекуваат _____ .

Вежби за активно учење:

- ❖ Истражувај на интернет за видови електронски специфични елементи.
- ❖ Изработи проект за примена на фотоелектрични елементи.



5. ИНТЕГРИРАНИ КОЛА

Основни познавања за интегрираните кола ќе добиеш со изучување на содржините од оваа тема од електрониката и ќе можеш:

- да ја истакнеш потребата од развојот на интегрираните кола;
 - да ги објаснуваш карактеристиките на одделните видови интегрирани кола;
 - да ги разликуваш основните постапки при изработка на интегрирани кола;
 - да ги познаваш предностите при масовната употреба на интегрираните кола;
 - да ја познаваш примената на интегрираните кола.
-

Потребата од минијатуризација, намалување на димензиите на електричните кола и елементите и напредокот во областа на микроелектрониката, довеле до појава на интегрираните кола, во кои повеќе електронски елементи, меѓусебно поврзани и сместени во заедничко куќиште, извршуваат одредена функција. Со појавата на интегрираните кола и на плочките со печатени врски, во значителна мерка е изменет начинот на проектирањето и изработката на електронските кола.

Во ова поглавје е направен обид да се разјаснат некои постапки во изработката на интегрираните кола, со цел да се добие општа слика какви интегрирани кола има и што се содржи еден "чип", назив за интегрирано коло, кој се среќава во стручната терминологија.

5.1. Карактеристики на одделни видови интегрирани кола

Интегрираните кола можат да се поделат, според нивните функции, на две големи групи: **аналогни и дигитални**. Според технологијата на применетите активни елементи во колата, имаме интегрирани кола со **биполарни транзистори** и **MOS** интегрирани кола.

Аналогните кола во основа се прават со биполарни транзистори. MOS аналогните кола се со релативно понов датум. Тие овозможуваат интегрирање на аналогните функции заедно со дигиталните кола.

Многу добро познати дигитални интегрирани кола се произведени со биполарни кола пред дваесетина години. Така, на пример, интегрираните кола од серијата 7400 користат биполарни транзистори. Колата со биполарни транзистори имаат поголема потрошувачка од колата со MOS транзистори и не ги задоволуваат барањата на сложените дигитални интегрирани кола. За такви кола, во кои спаѓаат микропроцесорите и големите мемории и кои содржат милиони активни елементи, исклучиво се користи MOS-технологијата. Интегрираните кола се делат на два основни вида: дигитални и линеарни. **Сите интегрирани кола, во кои се содржани дигитални кола, почнувајќи од најпрости логички порти па се до најсложените микропроцесори, се класифицираат во дигитални, а сите останати во линеарни интегрирани кола.**

Пстојат повеќе видови фамилии на логички кола:

- RTL (RESISTOR-TRANSISTOR LOGIC): отпорничко-транзисторска логика;
- DTL (DIODE-TRANSISTOR LOGIC): диодно-транзисторска логика;
- TTL (TRANSISTOR-TRANSISTOR LOGIC): транзисторско-транзисторска логика;
- ECL (EMITTER COUPLED LOGIC): емитерско-спрегната логика;
- IIL (I^2L) (INTEGRATED INJECTION LOGIC): интегрирано-инјекторска логика;
- MOS (METAL-OXIDE-SEMICONDUCTOR LOGIC): логика со MOSFET транзистори;
- CMOS (COMPLEMENTARY METAL-OXIDE-SEMICONDUCTOR LOGIC): логика со комплементарни MOSFET транзистори.

TTL – фамилијата е позната како серија 74, кои претставуваат први две бројки во нивната ознака, по што следуваат две или три бројки. Нејзината основна карактеристика е да работи со напон на напојување од 5V. Првата серија носи ознака 74xx, но таа набргу станува застарена и е заменета со друга TTL – фамилија со додадени две букви LS, па добиваме кола со ознака 74LSxx. Со буквите LS се означуваат малумокни Шоткиевии кола, карактеристични по големата брзина на воспоставување на предниот и задниот раб на импулсите. Така, на пример, оригиналното коло 7432 се наоѓа како 74LS32.

Првата серија **CMOS** кола носи ознака 40xx и таа работи со напон на напојување од 3 до 15V. Од серијата 74 со HC се означуваат CMOS кола со голема брзина и со HCT коло со CMOS кое работи со нормални TTL – нивоа. Серијата 74 CMOS кола има поголема брзина од серијата 40xx, а нивниот излез може да даде струја и до 25mA, што, на пример, е доволно да активира LED. Меѓутоа, колата 74HC можат да работат со напон на напојување само од 2 до 6V. Колата 74HC и 74HCT имаат еднаков распоред на ножички како колата од серијата 74LS.

Една од карактеристиките на CMOS интегрираните кола е можност за нивно оштетување со дејство на статички електрицитет. Кога сме во движење, нашето тело и алиштата постојано се набиваат со статички електрицитет. Јачината на струјата на празнење на тој електрицитет не е толку голема за да предизвика оштетување, но напонот може да достигне и до неколку стотици волти.

Кога ракуваме со обични компоненти, како што се отпорници и биполарни транзистори, мала е можноста со овој напон тие да бидат оштетени. Но, CMOS колата се изградени со фетови за кои знаеме дека се подложни на оштетување со такви напони. Поради тоа, кога се ракува со CMOS колата, претходно мора да се испразни статичкиот електрицитет, така што со раката ќе се допре некој заземјен метален објект.

Кога се работи со скапи интегрирани кола, се препорачува на рацете да се носат ремени за заземјување. Тие имаат голем отпор кој ја ограничува струјата на празнењето и овозможува големите статички напони безбедно да се одведат од телото на заземјувањето.

Голем број интегрирани кола, кои не спаѓаат во овие две серии, како што се микроконтролери, микропроцесори и разни интерфејс кола, се наредени во две или три подкатегории.

Во категоријата **линеарни интегрирани кола** спаѓаат разни аудио, видеокола, радио и комуникациски кола, тајмери, осцилатори и голем број уреди со специјална намена.

5.2. Хибридни интегрирани кола

Постојат два основни вида на интегрирани кола: **хибридни и монолитни**.

Хибридните интегрирани кола се изработуваат со микроелектронски активни и пасивни елементи, прицврстени на заедничка подлога. Врските меѓу елементите се изработуваат во техниката на тенок филм. Тоа е техника на нанесување спроводен

материјал на керамичка подлога, на која е поставена маска со празнини на оние места каде што треба да бидат врските, или пасивните елементи. Спроводниот материјал се наоѓа во состојба на метална пареа и се нанесува на плочката во загреана комора со таложење. Дебелината на наталожениот филм изнесува околу 1 μm .

Активните елементи се изработуваат во дифузиона или епитаксијална планарна техника и се вградуваат на веќе подготвената керамичка плочка. На крајот, сето тоа се затвора во пластично или керамичко куќиште.

Хибридните интегрирани кола имаат подобри карактеристики од соодветните електронски кола со дискретни елементи. Густината на пакувањето на елементите се движи меѓу 30 и 100 елементи по 1cm^2 и најчесто се користат како излезни степени со поголема излезна моќност.

✓ ПРОВЕРИ ШТО ЗНАЕШ

- Како се делат интегрираните кола според нивните функции?
- Какви транзистори се користат за производство на дигитални интегрирани кола?
- Во која техника се изработуваат активните елементи на хибридните кола?
- Објасни ја потребата од развојот на интегрираните кола.
- Објасни ги карактеристиките на аналогните интегрирани кола.

5.3. Монолитни интегрирани кола

Монолитните интегрирани кола се изработуваат на единствен кристален или монолитен материјал, со што е постигната голема густина на пакување на составните делови. Во производството на овие кола се применуваат неколку десетина операции. Повеќето операции се изведуваат автоматски на поголем број интегрирани кола, нивниот број достигнува и до 1000.

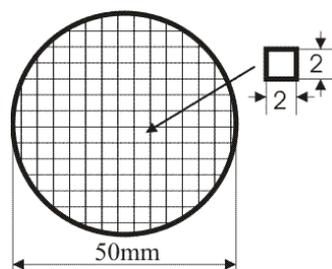
Производството на интегрираните кола мора да се одвива во идеално чист простор, без присуство на честички од прашина, полен или други примеси во воздухот. Обична честичка од прашина, присутна на површината за обработка со димензија помала од 1 μm , изгледа како карпа.

5.3.1. Изработка на основата

Во технологијата на полупроводниците се потребни многу чисти полупроводнички материјали во монокристален облик. Целото парче на полупроводникот мора да потекнува од еден кристал со хомогена кристална структура. Основните суровини за добивање на германиум и силициум се германиум диоксид и силициум диоксид. Тие се пречистуваат до тој степен што на 10^{10} атоми германиум или силициум доаѓа само еден атом на примеса.

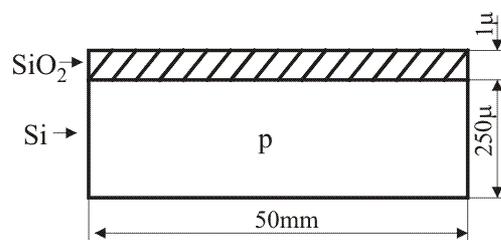
Постапката на пречистувањето се спроведува со растопен полупроводник кој постепено се лади, а нечистотиите се собираат во растопениот дел. На тој начин, во оладениот материјал процентот на примесите станува многу мал. Монокристалите се формираат со постапката на извлекување. Во уредот за извлекување, пречистениот полупроводник повторно се топи во околина исполнета со некој инертен гас, со парче кристал се допира површината на истопената маса и постепено се врти и се извлекува нагоре и така расте монокристалот на полупроводникот со форма на цилиндар.

Во процесот на изработката на интегрираните кола, монокристалните цилиндри се сечат на тенки дискови со пречник од околу 50-70mm и дебелина од 250 до 400 μm . На површината на дискот се формира мрежа од квадратчиња со димензии 2 x 2mm (слика 5.1).



5.1: Диск исечен од монокристал на силициум.

Секое од овие квадратчиња служи како подлога или основа на која се формираат идентични интегрирани кола, бидејќи сите операции се изведуваат истовремено на целиот диск. Потоа се прави оксидација на површината на дискот со што се формира тенок слој на силициум диоксид. Тоа се изведува во комора која се загрева на висока температура од 800 до 1200°C. Силициум диоксидот, кој претставува стакло, има особини на добар електричен изолатор, а служи и како заштитен слој од хемиски влијанија врз дискот. Пресекот на дискот после оксидацијата е прикажан на слика 5.2.



5.2: Пресек на дискот по оксидацијата.

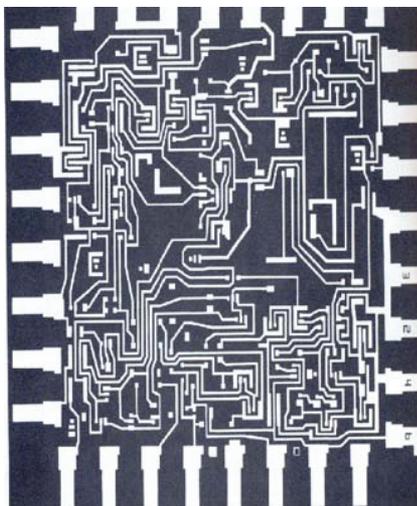
5.3.2. Фотолитографија

Да се сместат милион транзистори на мал простор, меѓусебно да се поврзат во комплексно коло, за да функционираат како мемориски чип или микропроцесор, потребен е специјален процес, наречен фотолитографија.

Структурата на интегрираното коло е составена од повеќе слоеви, секој слој се наноси на одредено место со соодветен чекор во процесот на производството на колото. Распоредот на тие места се одредува со таканаречена маска. Маската е аналогна на фотографски негатив и содржи слика на распоредот на полињата за нанесување на слоевите. Таа најчесто се прави на стаклена плочка, па потоа се намалува на површина од 2 x 2mm и се повторува за да се добие истиот распоред како на слика 4.1.

Фотолитографскиот процес е многу сличен на изработка на црно бели фотографии.

Еден пример на типична маска за формирање на еден слој е прикажан на **слика 5.3**.



5.3: Маска за формирање на еден слој од интегрираното коло.

Фотолитографскиот процес започнува со ставање една капка течен фотоосетлив материјал, наречен фоторезист во средината на дискот. Потоа, дискот се завртува со голема брзина и фотоосетливата емулзија се распространува рамномерно по површината на дискот, при што се добива слој со дебелина околу 700 μm . Овој слој понатаму се суши и се пече пред да биде изложен на светлина.

Маската се става врз дискот, така што полињата на маската и на дискот да се поклопат. Светлина со голема јачина се пропушта преку маската на фотоосетливиот слој на дискот. Со маската се одредува кои делови од дискот ќе бидат осветлени, а кои ќе останат во темно.

Фоторезистот е органски полимер, кој може да биде позитивен или негативен. Со негативниот фоторезист, областите изложени на светлина стануваат полимеризирани и цврсти. По развивањето, овие области остануваат на површината на дискот, а неекспонираните делови

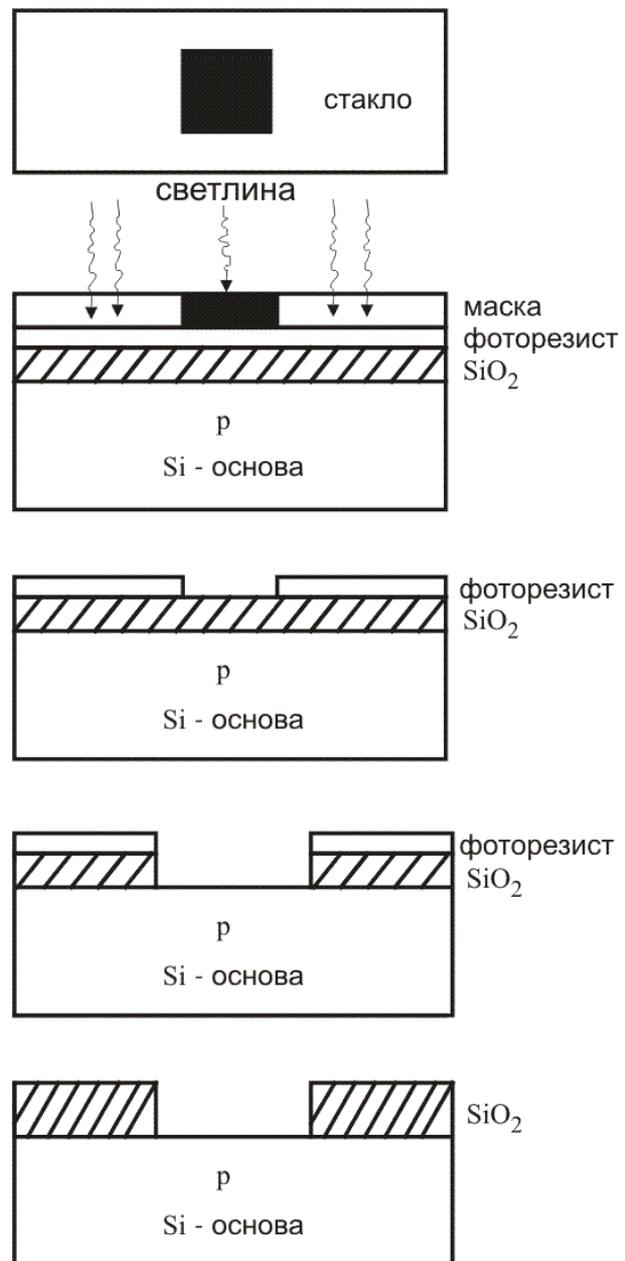
се отстрануваат. Со оваа постапка, на дискот се добива распоред спротивен од оној на маската. Позитивниот фоторезист реагира на спротивен начин.

Изложувањето на фоторезистот на светлина може да се направи преку маска ставена директно во контакт со дискот, или маската да се оддалечи на некое растојание, со што се заштитува од гребене. Во поново време се применува експонирање со проекција, со што сликата од маската се проектира преку прецизни оптички системи на површината на дискот. На овој начин може да се постигне натамошно намалување на димензиите на сликата од маската преку оптиката за проекција.

Во проектирањето на распоредот на елементите на маската се оди на максимално смалување на растојанието меѓу составните делови дури дотаму што димензиите се доближуваат до брановата должина на видливата светлина, што претставува основна пречка. Поради тоа, фотолитографските системи користат ултравиолетова светлина, па дури и X-зрачења кои имаат помали бранови должини.

Развивањето на осветлениот фоторезист преку маската се прави со киселини во неколку наврати. Со првото развивање се отстрануваат деловите од фоторезистот кои не биле осветлени. Потоа дискот се потопува во друга киселина, која не реагира со преостанатиот фоторезист, туку го раствара слојот на силициум диоксид, кој е откриен со претходното развивање. Со третото развивање се отстранува и преостанатиот дел на фоторезистот.

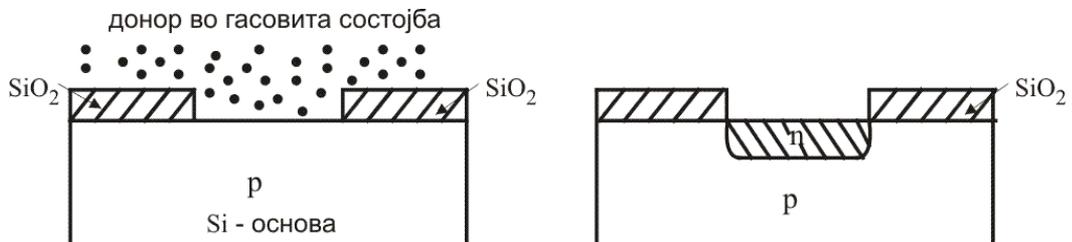
Литографската постапка на формирање на "прозорец", само како илустрација е прикажана на **слика 5.4**.



5.4: Литографска постапка на формирање на "прозорец".

5.3.3. Дифузија

Процесот на дифузија претставува процес на внесување примеси на површината на дискот. Дискот се загрева на висока температура, 800°C за германиумот и 1200°C за силициумот, а примесите во течна состојба или во форма на пареа, се доведуваат на површината на дискот. По пат на дифузија, атомите на примесите продираат во површинскиот слој преку подготвените отвори на дискот и формираат PN-спој. Длабочината на која дифузираат примесите е дефинирана со температурата и времето за кое дискот е оставен во печката за дифузија. Со повторување на процесот повеќе пати се добива повеќеслојна полупроводничка структура. Дифузијата преку оксидниот слој не е можна. Шематскиот приказ на дифузијата е претставен на **слика 5.5**. По завршената дифузија, во основата од p-тип се формира област од n-тип. После оваа прва, следува втора, трета итн. дифузија за добивање сложено интегрирано коло.



5.5: Шематски приказ на дифузија.

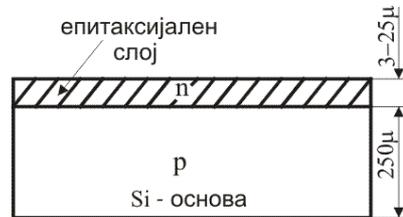
Со процесот на дифузија, најголемата концентрација на примесите е секогаш на површината на дискот. Подлабоко контролирано продирање на атомите на примесите во силициумскиот диск се постигнува со јонска имплантација. Тоа е процес на формирање млаз од забрзани јони на примеса и негово насочување кон површината на дискот. Забрзаните јони удираат во површината како куршуми и го збогатуваат основниот слој со потребната количина на примеси. На овој начин се контролира количината и продирањето на примесите со поголема прецизност.

5.3.4 Епитаксијален раст

Операција на додавање на силициумската основа на дискот на дополнителен слој полупроводник од спротивен тип се вика епитаксијален раст. Тоа се прави во специјална епитаксијална печка во која се загрева дискот и се пушта гас кој содржи две или повеќе соединенија на силициум со примесите. Тие се разложуваат, а силициум со примеси од p или од n-тип се таложи на површината на дискот. Наталожениот слој од силициум има иста кристална структура како основата и со неа претставува единствен монокристал. Со

оваа постапка може точно да се контролира дебелината и составот на епитаксијалниот слој (слика 5.6).

Врските меѓу елементите на интегрираното коло се прават со нанесување тенок пласт – филм од спроводен материјал. Постапката на нанесување се вика таложење и се изведува во комора со висок вакуум.



5.6: Пресек на силициумски диск по завршена постапка на епитаксијален раст.

Во комората се воведува алуминиум, загреан до испарување, заедно со инертен гас и со струењето на гасот алуминиумот се распространува преку дискот и се таложи на подготвени отвори на површината на дискот, создавајќи спроводни врски меѓу елементите.

На сличен начин се прават тенкослојни отпорници со големи вредности на отпорноста. Наместо алуминиум, како материјал за нанесување се користи никел-хром, хром-силициум или молибден-силициум.

По завршувањето на процесот на формирање на интегрираното коло, следуваат завршните операции во кои спаѓаат: контрола, раздвојување и ставање во куќиште.

Во текот на еден технолошки циклус на еден диск се произведуваат до 150, па и повеќе идентични монолитни интегрирани кола. После завршената обработка на дискот, се прави испитување на секое поединечно интегрирано коло, а неисправните кола се обележуваат. Со дијамантска пила се засекуваат линиите на разделувањето на поединечните кола и тие можат да се разделат со кршење, слично на сечење на стакло. Интегрираното коло се става на подлога, метализираните контакти се поврзуваат со соодветните изводи со тенки спроводници и сето тоа се затвора во метално, керамичко или пластично куќиште. Куќиштата можат да бидат со разни форми и со различен број на изводи.

5.4. Примена на интегрираните кола

Интегрираното коло претставува мал електронски уред, направен од полупроводнички материјал. Првото интегрирано коло се појавува во 1950 година. Со интегрираните кола се отвора нова ера во светот на електрониката. **Интегрираното коло се јавува под назив: микроколо, микрочип, силициумски чип или само чип.**

Интеграцијата на голем број ситни транзистори во еден мал чип претставува голем напредок во однос на рачната изработка на електронски кола со електронски дискретни кола.

Предностите на интегрираните кола во однос на колата со дискретни елементи се нивната цена и карактеристиките. Чиповите со сите компоненти се печатат на една подлога, со што компонентите се на поблиско растојание, имаат пократко време за промена на режимот на спроведување и имаат помала потрошувачка на енергија. Површината на чипот се движи од неколку десетини до 350 mm^2 , со густина од 10^6 транзистори на mm^2 .

Според бројот на интегрираните транзистори и други електронски компоненти, интегрираните кола можат да се поделат на следниве групи:

- **кола со низок степен на интеграција (SSI)**, во ова група спаѓаат кола до 100 компоненти по чип, што обезбедува, на пример, неколку логички порти;
- **кола со среден степен на интеграција (MSI)** од 100 до 3000 компоненти, со кои се обезбедува градба на покомплексни системи за нешто малку повисока цена, како на пример RAM мемории од 1Kb, чипови за електронски калкулатори и првите микропроцесори со помалку од 4000 компоненти;
- **кола со висок степен на интеграција (LSI)** од 3000 до 100 000 компоненти каде што спаѓаат основните мемории на компјутерите со околу 10 000 транзистори и следната генерација микропроцесори;
- **кола со многу висок степен на интеграција (VLSI)** за чипови со 1 Mbit RAM мемории со повеќе од 1 милион транзистори.

Освен овие групи, се јавуваат и нови, како што е “сè на еден чип” на кој се наоѓаат сите компоненти потребни за еден компјутер, или микроконтролери, како и “тридимензионални интегрирани кола” со два или поголем број пластови на електронски компоненти, интегрирани вертикално и хоризонтално во едно коло.

Интегрираните кола се изработуваат за стандардни примени по стандардни спецификации или за специфични намени, како што е, на пример, мобилен телефон. Колата по одредени стандарди се применуваат во областа на компјутерите, комуникациите, производствените процеси, транспортни системи, интернетот и други.

Чиповите на интегрираните кола се пакуваат во керамички или во пластични куќишта. Изводите можат да бидат наредени во еден ред на едната страна на куќиштето, во две редици на две спротивни страни или како решетка околу сите страни на куќиштето. Решеткаста форма на изводите имаат колата од групацијата VLSI.

Меѓу попознатите интегрирани кола можат да се наведат:

NE 555, тајмер и мултивибратор, UA741 операциски засилувач, TTL логичката серија 7400, CMOS серијата 4000 (тука спаѓа и серијата 74HC00), првиот микропроцесор INTEL 4004, претходник на 8080CPU и други, микропроцесор во MOS технологија 6502 и 380, микропроцесори Моторола 6800 серија, претходници на 68000 и 88000. За значењето на интегрираните кола може да послужи информацијата дека првиот дигитален компјутер направен со 18000 вакумски електронски цевки, познат под називот ENIAC, имал тежина од преку 30 t и потрошувачка од 200KW.

✓ ПРОВЕРИ ШТО ЗНАЕШ

- Која е основната особина на монолитните интегрирани кола?
- Која постапка се користи за формирање на монокристалите?
- Како се прави оксидација на површината на дискот?
- Каква е постапката на фотолитографијата?
- Што претставува процесот на дифузијата?
- Што е епитаксијален раст?
- Кои се основните постапки при изработка на интегрирани кола?
- Каде се применуваат интегрираните кола?
- Како се делат интегрираните кола според нивните функции?

РЕЗИМЕ

* Интегрираните кола содржат голем број електронски елементи кои меѓусебно се поврзани и сместени во заедничко куќиште и извршуваат одредена функција.

* Интегрираните кола, според нивните функции, можат да се поделат на: аналогни и дигитални.

* Интегрираните кола, според составот, можат да се поделат на: хибридни и монолитни.

* Хибридните интегрирани кола се изработуваат со микроелектронски активни и пасивни елементи.

* Основните операции при изработка на монолитните интегрирани кола се: подготовка и оксидација на основата, фотолитографија, дифузија, епитаксијален раст и завршни операции.

ТЕМАТСКО УТВРДУВАЊЕ**I Прашања со заокружување**

(Заокружи ги точните одговори)



1. Интегрирани кола осетливи на статички електрицитет се:

- а) CMOS колата
- б) TTL колата
- в) RTL колата.

II Прашања со поврзување

2. Поврзи ги ознаките со видовите фамилии на логички кола:

- | | |
|---------|---|
| 1. RTL | а) Логика со MOSFET транзистори _____ |
| 2. DTL | б) Емитерско-спрегната логика _____ |
| 3. TTL | в) Транзисторско-транзисторска логика _____ |
| 4. ECL | г) Диодно-транзисторска логика _____ |
| 5. IIL | д) Интегрирано-инјекторска логика _____ |
| 6. MOS | ѓ) Отпорничко-транзисторска логика _____ |
| 7. CMOS | е) Логика со комплементарни MOSFET транзистори _____. |

3. Поврзи го степенот на интеграција на интегрирани кола со бројот на интегрираните транзистори:

- | | |
|--|-----------------------------|
| 1. Кола со низок степен на интеграција | а) од 100 до 3000 _____ |
| 2. Кола со среден степен на интеграција | б) повеќе од 10^6 _____ |
| 3. Кола со многу висок степен на интеграција | в) од 3000 до 100000 _____. |
| 4. Кола со висок степен на интеграција | г) до 100 _____. |

III Прашања со дополнување

4. Првата серија на TTL-фамилијата има ознака _____.

5. Првата серија на CMOS-фамилијата има ознака _____.

6. Процесот на внесување примеси на површината на дискот се нарекува _____.

7. Операција на додавање на силициумската основа на дискот на дополнителен слој полупроводник од спротивен тип се нарекува _____.

Вежби за активно учење:

- ❖ Истражувај на интернет за видови и карактеристики на интегрирани кола и врз основа на истражувањето изработи проект.
- ❖ Во каталог за интегрирани кола пронајди ја фамилијата на логичк интегрирани TTL кола и анализирај ги нивните ознаки.
- ❖ Во каталог за интегрирани кола пронајди ја фамилијата на логички интегрирани CMOS кола и анализирај ги нивните ознаки.



П Р И Л О Г

ЗАДАЧИ

СО РЕШЕНИ ПРИМЕРИ

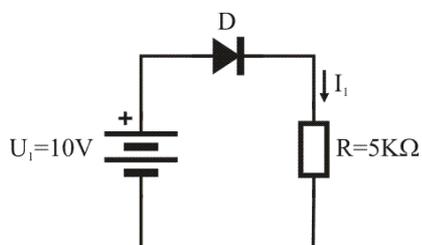
СОДРЖИНА

Задачи и решени примери од полупроводнички диоди.....	125-135 стр.
Задачи и решени примери од транзистори.....	136-141 стр.

Задачи и решени примери од полупроводнички диоди

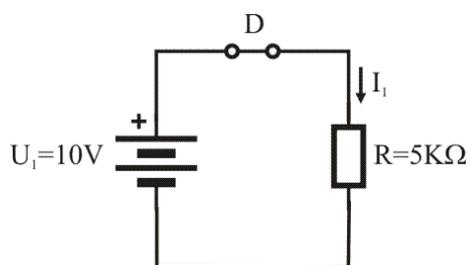
(Во задачите се употребува техничка насока на струјата)

1. Пресметај ја струјата во колото со отпорник и идеална диода, дадено на сликата .



Решение:

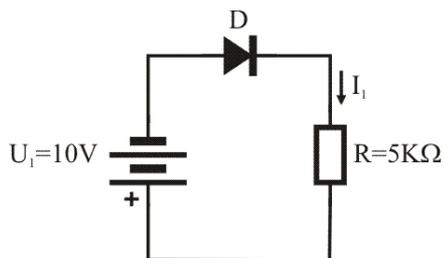
Прво се дефинира поларизацијата на диодата. Анодата на диодата е приклучена на позитивниот пол на изворот, диодата е директно поларизирана. Земајќи предвид дека диодата е идеална, во колото ќе ја замениме со затворен прекинувач. Сега колото го има следниот изглед:



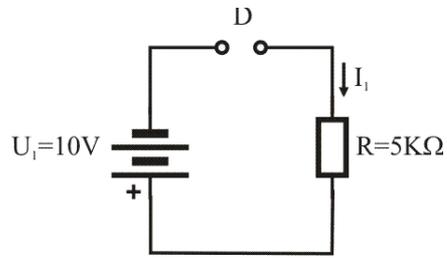
Струјата низ отпорникот може да се пресмета според:

$$I_1 = \frac{U_1}{R} = \frac{10V}{5K\Omega} = 2mA.$$

2. Пресметај ја струјата низ диодата на даденото коло, земајќи ја диодата како идеална.



Решение: Диодата е инверзно поларизирана, таа се заменува со отворен прекинувач.

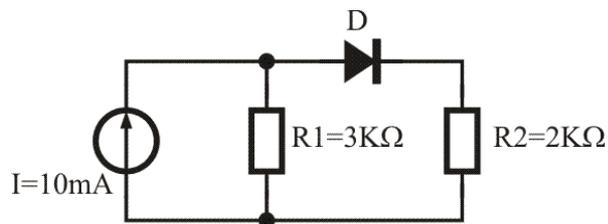


Струјата во колото е $I_1=0$.

3. Во колото со струен генератор $I = 10\text{mA}$ и идеална диода D да се пресмета:

- напонот на отпорникот R_1 ;
- струјата на диодата D .

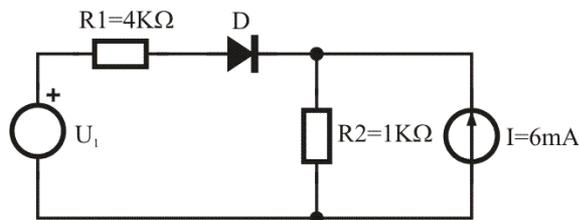
(Решение: $U_{R_1}=12\text{V}$, $I_{D_1}= 6\text{mA}$)



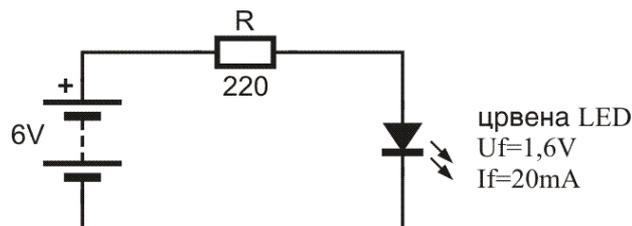
4. При $U_1 = 10\text{V}$ пресметај:

- струја на идеалната диода D ;
- напон на R_2 .

(Решение: $I_D = 0,8\text{mA}$, $U_{R_2}=8\text{V}$)



5. Да се приклучи црвена LED која има пад на напон од $1,6\text{V}$ и струја од 20mA , на еднонасочен извор од 6V .



Решение:

Падот на напонот на отпорникот треба да биде:

$$U_R = 6\text{V} - 1,6\text{V} = 4,4\text{V},$$

вредноста на неговиот отпор е:

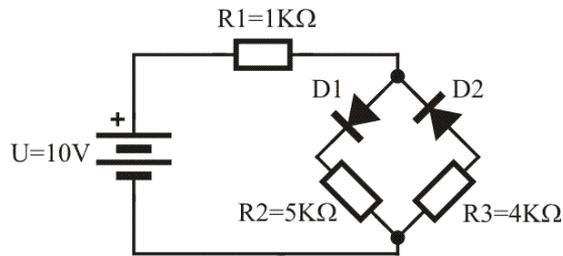
$$R = \frac{4,4V}{20mA} = 0,220K\Omega = 220\Omega .$$

Моќноста на отпорникот е:

$$P_R = U \cdot I = 4,4V \cdot 20 \cdot 10^{-3} A = 0,88W .$$

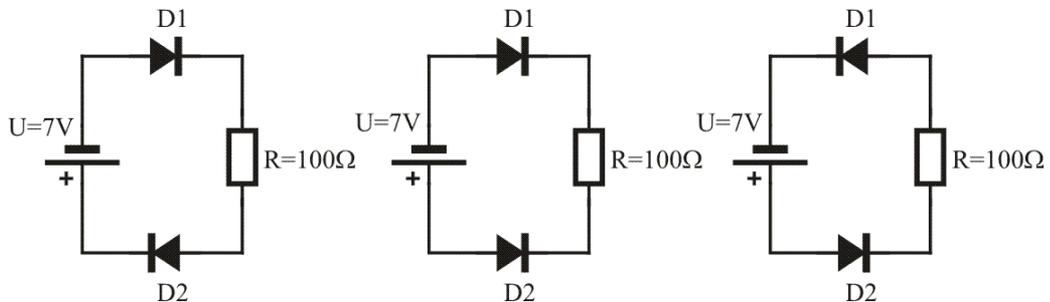
6. За колото од сликата да се пресметаат струите низ идеалните диоди D1 и D2.

(Решение: $I_{D1} = 1,7mA$, $I_{D2} = 0$)



7. Да се пресмета струјата која тече во отпорникот R за секое од овие три кола, при што треба да се претпостави дека диодите D1 и D2 се идеални диоди.

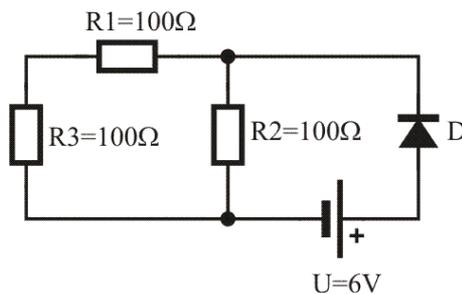
(Решение: $I_1 = 0$, $I_2 = 0$, $I_3 = 10mA$)



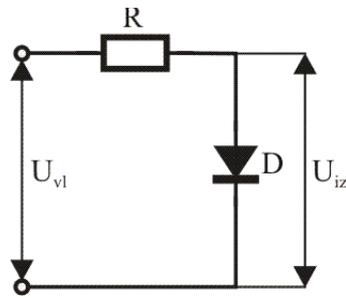
8. За колото од сликата со идеална диода:

- а) да се пресмета напонот на R2;
- б) да се одреди колкава е струјата на диодата.

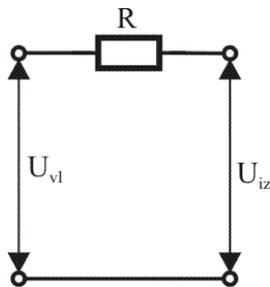
(Решение: $6V$, $90mA$)



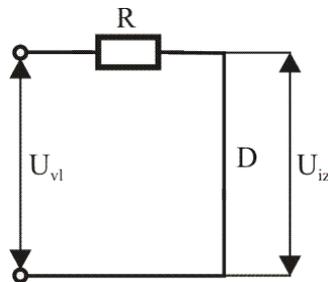
9. За колото од сликата да се нацрта преносната карактеристика.

**Решение:**

Прво се анализира колото кога на неговиот влез ќе се доведат негативни напони ($U_{vl} < 0$). Во тој случај диодата е инверзно поларизирана, се еквивалентира со отворен прекинувач, при што колото ќе го добие следниот изглед:

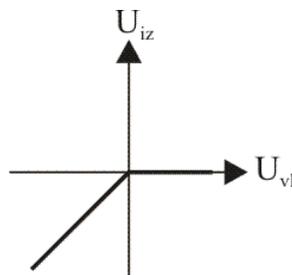


Излезниот напон ќе го следи влезниот напон $U_{iz} = U_{vl}$.



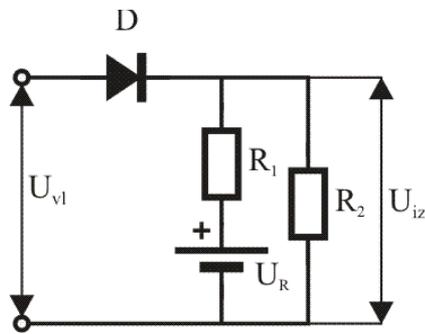
Краевите на диодата се краткоспоени, па напонот на нејзините краеве е $0V$ ($U_{iz} = 0V$).

Преносната карактеристика на колото ќе го има следниот облик:



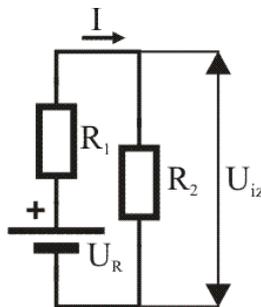
10. За колото од сликата да се нацрта преносната карактеристика.

$$R_1 = R_2 = 6K\Omega, \quad U_R = 15V$$



Решение:

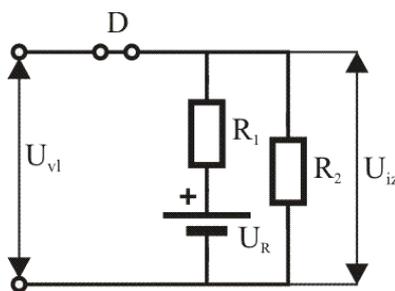
Да претпоставиме дека диодата е исклучена (инверзно поларизирана). Во тој случај колото ќе го има следниот изглед:



Струјата во колото може да се изрази како: $I = \frac{U_R}{R_1 + R_2}$ а излезниот напон:

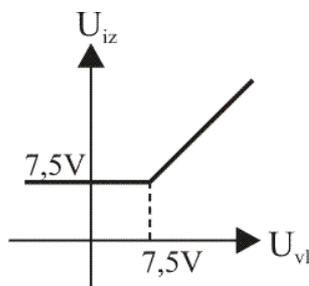
$$U_o = R_2 \cdot I = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot U_R = \frac{6K}{6K + 6K} \cdot 15 = \frac{1}{2} \cdot 15 = 7,5V$$

Овој потенцијал се наоѓа на катодата на диодата. Промена на поларизација ќе има кога влезниот напон ќе биде поголем од 7,5V (кога потенцијалот на анодата ќе биде повисок од потенцијалот на катодата). Во тој момент диодата ќе се вклучи, односно ќе биде директно поларизирана. Колото ќе го има следниот изглед:



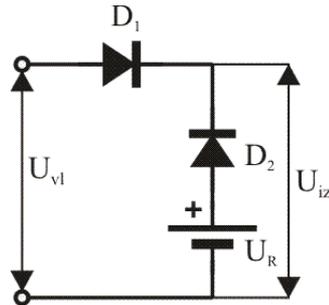
Во овој случај излезниот напон ќе го следи влезниот напон $U_{iz}=U_{vl}$.

Преносната карактеристика ќе го има следниот облик:



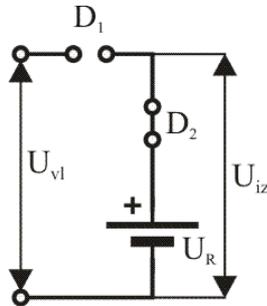
11. За колото од сликата да се нацрта преносната карактеристика.

$$U_R = 10V$$

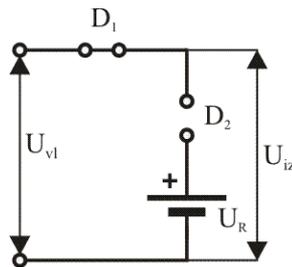


Решение:

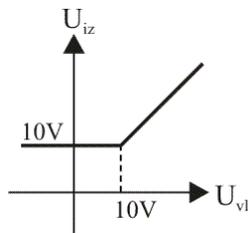
За $U_{vl} < 0$, диодата D_2 е вклучена, бидејќи на нејзината анода има потенцијал од $10V$. Во тој момент катодата на диодата D_1 ќе се наоѓа на истиот потенцијал, со што D_1 ќе биде исклучена. Излезниот напон ќе биде $U_{iz} = 10V$.



Диодата D_1 ќе се вклучи кога $U_{vl} > 10V$, при што диодата D_2 ќе се исклучи. Во тој случај $U_{iz} = U_{vl}$.

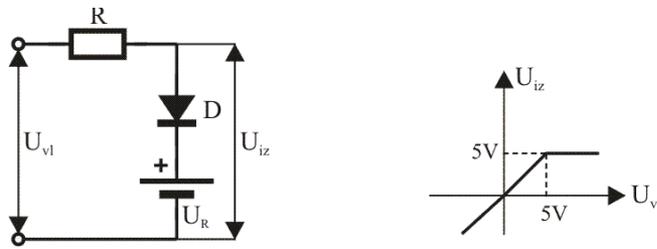


Преносната карактеристика ќе го има следниот облик:



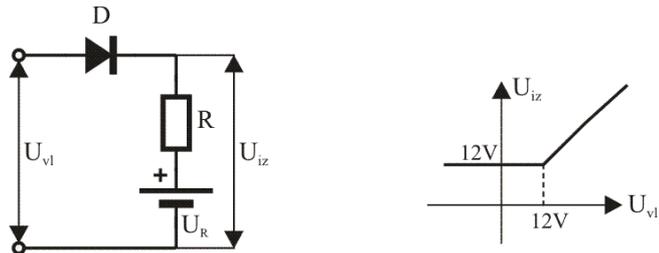
12. За колото на сликата да се нацрта преносната карактеристика. ($U_R = 5V$)

(Решение)



13. За колото на сликата да се нацрта преносната карактеристика. ($U_R=12V$)

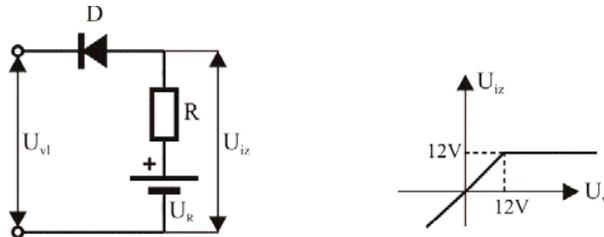
(Решение)



14. За колото на сликата да се нацрта преносната карактеристика.

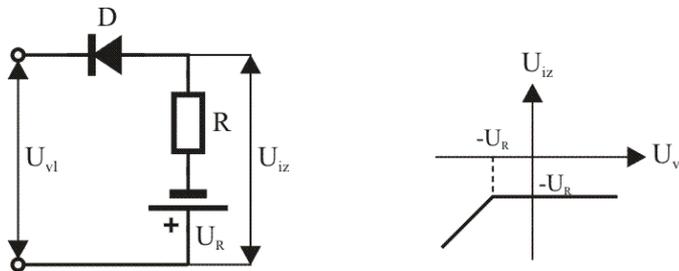
($U_R=12V$)

(Решение)



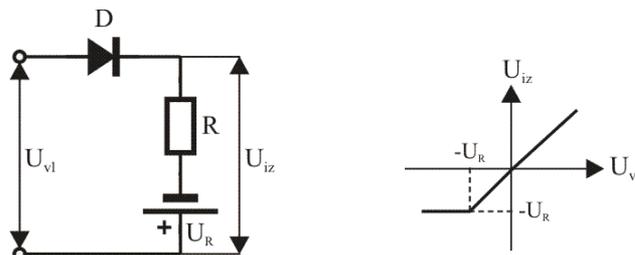
15. За колото на сликата да се нацрта преносната карактеристика.

(Решение)



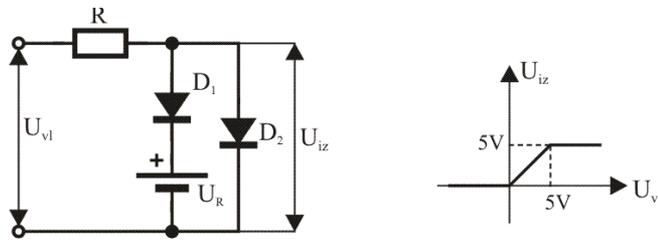
16. За колото на сликата да се нацрта преносната карактеристика.

(Решение)

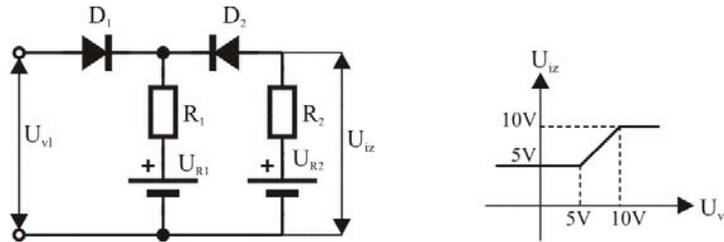


17*). За колото на сликата да се нацрта преносната карактеристика каде што $U_R=5V$.

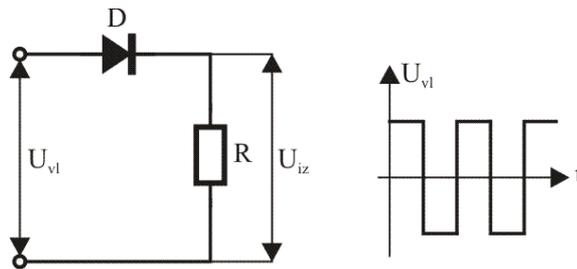
(Решение)



18*). За колото на сликата се дадени $R_1=10K\Omega$, $R_2=20K\Omega$, $U_{R1}=2,5V$, $U_{R2}=10V$. Да се нацрта преносната карактеристика на колото. (Решение)

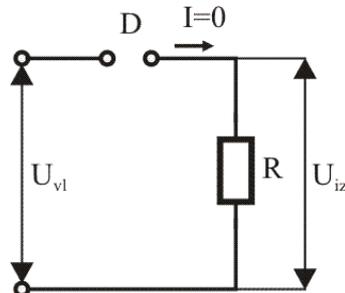


19. За колото од сликата да се нацрта зависноста на излезниот од влезниот напон (преносна карактеристика) и обликот на излезниот напон U_{iz} за даден влезен напон U_{vl} .



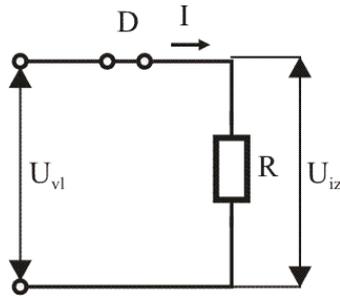
Решение:

Прво се анализира колото кога на неговиот влез ќе се доведе негативниот дел од влезниот напон ($U_{vl}<0$). Во тој случај диодата е инверзно поларизирана, се еквивалентира со отворен прекинувач, при што колото го добива следниот изглед:



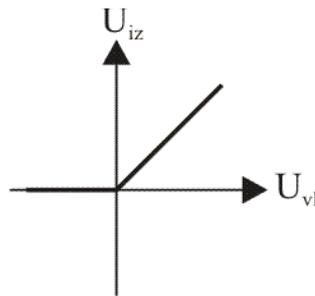
Бидејќи во колото не тече струја, нема да има пад на напон на краевите на отпорникот и излезниот напон е еднаков на 0 ($U_{iz}=0$).

До промена во колото ќе дојде кога влезниот напон ќе стане позитивен. Во тој случај анодата на диодата ќе биде на повисок потенцијал од потенцијалот на катодата кој изнесувал 0V. Сега диодата е директно поларизирана и колото ќе го има следниот изглед:

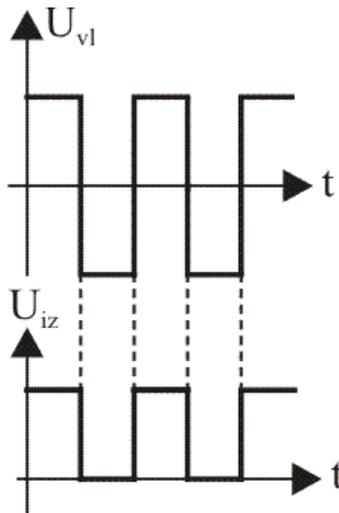


Излезниот напон ќе го следи влезниот напон $U_{iz}=U_{vl}$.

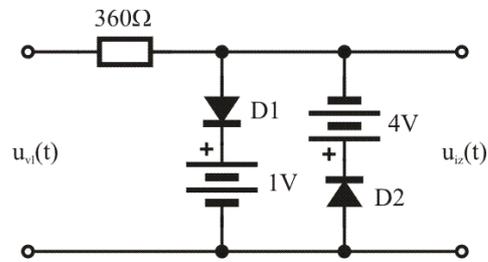
Преносната карактеристика ќе го има следниот облик:



Излезниот напон ќе го има следниот облик:



20*. Ако влезниот напон е $u_{vl} = 5\sin\omega t$ (V), донесен на влезот на колото со идеални диоди од сликата, да се нацрта графикот на излезниот напон $u_{iz}(t)$.

**Решение:**

Во услов на спроведување:

од $U_{D1} + 1V - u_{v1} = 0$ се добива границата на спроведување: $U_{D1} = u_{v1} - 1V$

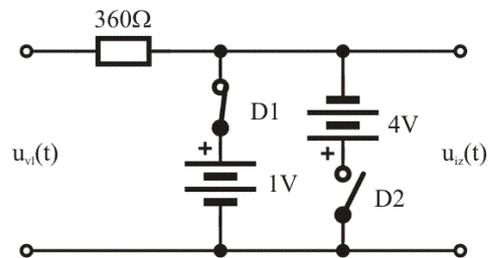
од $U_{D2} + 4V + u_{v1} = 0$ се добива границата на спроведување: $U_{D2} = -u_{v1} - 4V$.

Прво ќе го разгледаме случајот кога D1 е директно поларизирана, а D2-инверзно;

$U_{D1} > 0$, $u_{v1} > 1V$,

$U_{D2} < 0$, $-u_{v1} - 4V < 0$, $u_{v1} > -4V$,

од каде што се добива за $u_{v1} > 1V$ дека $u_{iz} = 1V$.

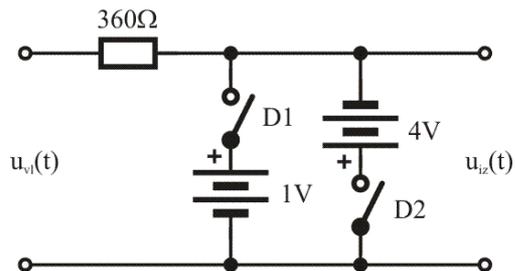


Потоа ќе го разгледаме случајот кога D1 и D2 се инверзно поларизирани;

$U_{D1} < 0$, $u_{v1} < 1V$,

$U_{D2} < 0$, $-u_{v1} - 4V < 0$, $u_{v1} > -4V$,

од каде што се добива за $-4 < u_{v1} < 1V$ дека $u_{iz} = u_{v1}$.

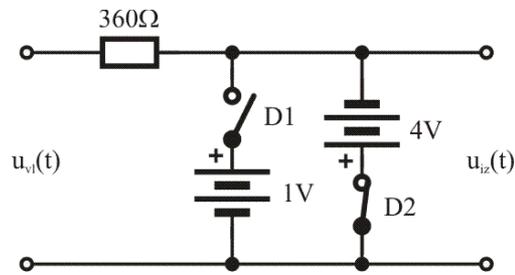


Потоа ќе го разгледаме случајот кога D1 е инверзно поларизирана а D2 директно;

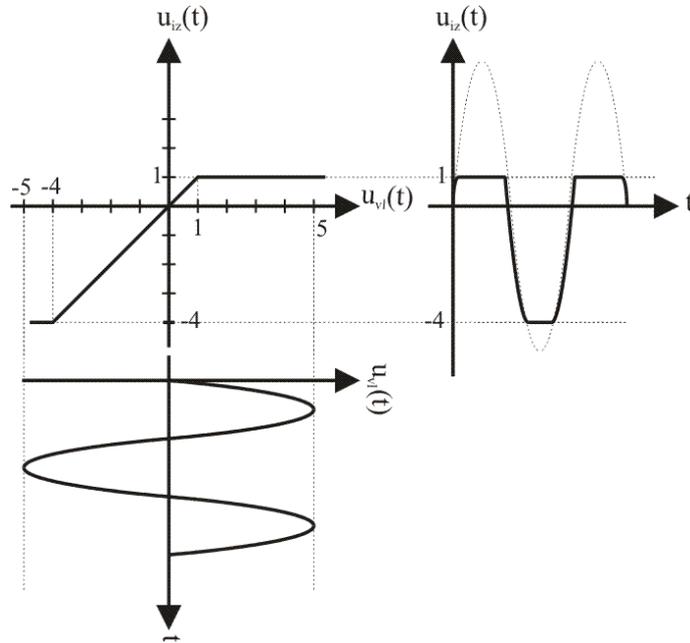
$U_{D1} < 0$, $u_{v1} < 1V$,

$U_{D2} > 0$, $-u_{v1} - 4V > 0$, $u_{v1} < -4V$,

од каде што се добива за $u_{v1} < -4V$ дека $u_{iz} = -4V$.



Обикот на излезниот напон, како и преносната карактеристика се дадени на следната слика:



Можеме да заклучиме дека ваквото коло врши ограничување на напонот и од 'горе' и од 'долу'. Ограничувањето од горе е на вредност од 1V а од долу на -4V.

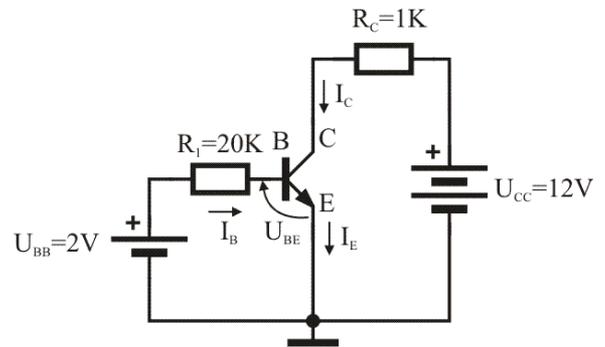
*) Потешки задачи

Задачи и решени примери од транзистори

21. Транзисторот во колото на сликата има $\beta = 100$. Емитерскиот спој е директно поларизиран со изворот $U_{BB} = 2V$ и има напон

$U_{BE} \approx 0,7V$. Да се одреди:

- а) струјата на базата;
- б) колекторската струја;
- в) напонот на колекторот.



Решение:

а) Струјата на базата се одредува од колото база-емитер:

$$U_{BB} - R_1 I_B - U_{BE} = 0$$

Од каде за I_B се добива:

$$I_B = \frac{U_{BB} - U_{BE}}{R_1} = \frac{2 - 0,7}{20 \cdot 10^3} = 65 \mu A.$$

б) Колекторската струја е:

$$I_C = \beta I_B = 100 \cdot 65 \cdot 10^{-6} = 6,5 mA.$$

в) Напонот на колекторот се одредува од колото емитер-колектор:

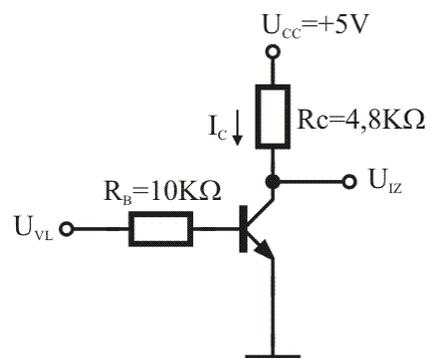
$$U_{CC} - R_c I_C - U_{CE} = 0$$

Од каде за U_{CE} се добива:

$$U_{CE} = U_{CC} - R_c I_C = 12 - 1 \cdot 10^3 \cdot 6,5 \cdot 10^{-3} = 5,5V$$

22. На сликата во колото, во кое транзисторот работи како прекинувач, се дадени следните вредности за транзисторот: $U_{CES} = 0,2V$, $U_{BE} = 0,6V$ и $\beta = 50$.

- а) Одреди ја минималната вредност на влезниот напон со која транзисторот се доведува во заситување;
- б) Одреди ја потребната вредност на влезниот напон со која транзисторот се доведува во режим на неспроведување.



Решение:

а) Колекторската струја на транзисторот кога влегува во заситување изнесува:

$$I_{CS} = \frac{U_{CC} - U_{CES}}{R_c} = \frac{5 - 0,2}{4,8 \cdot 10^3} = 1 mA.$$

Базната струја се пресметува според условот:

$$\beta \cdot I_B = I_{CS} \text{ од каде } I_B = \frac{I_{CS}}{\beta} = \frac{1 \cdot 10^{-3}}{50} = 0,02 \text{mA}.$$

Минималната вредност на U_{VL} ќе ја одредиме преку:

$$U_{VL} = R_B \cdot I_B + U_{BE} = 10 \cdot 10^3 \cdot 0,02 \cdot 10^{-3} + 0,6 = 0,2 + 0,6 = 0,8 \text{V}$$

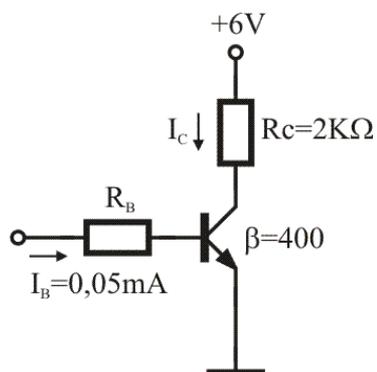
За секоја вредност на влезниот напон и базната струја поголеми од пресметаните, транзисторот ќе биде во длабоко заситување. Со исполнување на овој услов се обезбедува примена на секој транзистор од одбраниот тип со широки толеранции на факторот β . Нивото на излезниот напон од $0,2\text{V}$ се смета за ниско напонско ниво, а транзисторот како затворен прекинувач.

б) Транзисторот ќе биде на граница на неспроведување кога базната струја е нула, напонот база-колектор помал од $0,7\text{V}$. Следи:

влезниот напон е $|U_{VL}| < 0,6\text{V}$, колекторската струја е $I_C \approx 0$, а за напонот на колекторот се добива:

$$U_{CE} = U_{CC} \approx U_{IZ}.$$

23. Пресметај ја струјата низ отпорникот R_C кога транзисторот е во заситување.



Решение:

Познато е дека кај транзистор кој се наоѓа во режим на заситување, напонот U_{CE} изнесува $0,2\text{V}$. Според тоа, од равенката на колекторското коло:

$$U_{CE} = U_{CC} - R_C I_C$$

$$\text{се добива: } I_C = \frac{U_{CC} - U_{CE}}{R_C} = \frac{6 - 0,2}{2 \cdot 10^3} = 2,4 \text{mA}$$

Во колото е дадена вредноста на базната струја I_B па со примена на релацијата меѓу струите:

$$\beta = \frac{I_C}{I_B}, \text{ за } I_C \text{ би се добила вредност:}$$

$$I_C = I_B \cdot \beta = 0,05 \cdot 10^{-3} \cdot 400 = 20 \text{mA}$$

што претставува невозможна состојба во која за напонот U_{CE} би се добила негативна вредност. Тоа ни покажува дека, кога е транзисторот во заситување, колекторската струја не е контролирана од базната струја.

Затоа во подрачје на заситување, колекторската струјата мора да ја пресметаме од колекторското коло.

24. На сликата со транзисторот во колото се вклучува и се исклучува светилка која има отпор на влакното за греење $1\text{K}\Omega$ и е претставена со отпорникот R_L . Транзисторот има $\beta = 50$ и напон $U_{BE} = 0,7\text{V}$. Да се определи режимот на работа на колото за базна струја од $0, 40, 100,$ и $200\mu\text{A}$.

Решение:

Кога е $I_B = 0$,

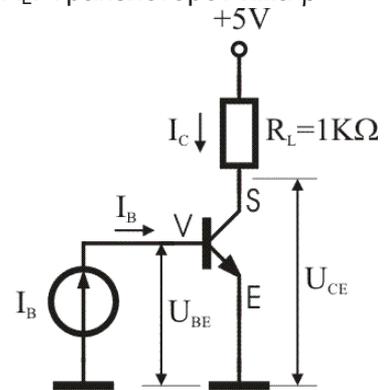
тогаш е и $I_C = 0$, нема струја низ отпорникот R_L , напонот $U_{CE} = 5\text{V}$ и $U_{RL} = 0$, транзисторот не спроведува.

За $I_B = 40\mu\text{A}$,

струјата $I_C = \beta \cdot I_B = 50 \cdot 40 \cdot 10^{-6} = 2\text{mA}$,

$U_{CE} = 5\text{V} - R_L \cdot I_C = 5\text{V} - 2\text{mA} \cdot 1\text{K}\Omega = 5\text{V} - 2\text{V} = 3\text{V}$

Напонот $U_R = 5 - U_{CE} = 5 - 3 = 2\text{V}$.



Колекторскиот спој се уште е инверзно поларизиран:

$U_{CB} = U_{CE} - U_{BE} = 3 - 0,7 = 2,3\text{V}$ и транзисторот е во активниот регион.

За $I_B = 100\mu\text{A}$,

$I_C = \beta \cdot I_B = 50 \cdot 100 \cdot 10^{-6} = 5\text{mA}$,

$U_{CE} = 5\text{V} - R_L \cdot I_C = 5\text{V} - 5\text{mA} \cdot 1\text{K}\Omega = 5\text{V} - 5\text{V} = 0$,

$U_{CB} = U_{CE} - U_{BE} = 0 - 0,7\text{V} = -0,7\text{V}$.

Колекторскиот спој е на границата на директна поларизација, а транзисторот на границата на заситувањето.

На светилката (отпорникот R_L) има напон од 5V .

$$I_C = I_{C_{\max}} = \frac{5\text{V}}{1\text{K}\Omega} = 5\text{mA}$$

$$I_{B(\text{ZAS})} = \frac{I_C}{\beta} = \frac{5 \cdot 10^{-3}}{50} = 100\mu\text{A}.$$

Таа е вредноста на I_B која е потребна да го донесе колото на граница на заситување.

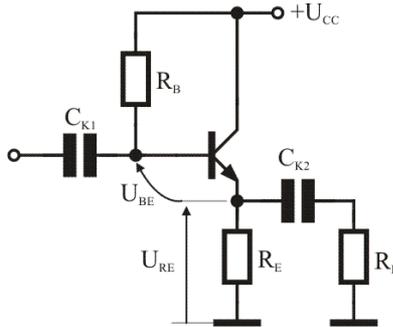
За $I_B = 200\mu\text{A}$,

базната струја го носи транзисторот во длабоко заситување, I_C не може да се зголеми над 5mA , транзисторот работи како затворен прекинувач.

$$I_C = 5\text{mA}, I_B = 200\mu\text{A}, \beta_{\text{sat}} = \frac{I_C}{I_B} = \frac{5 \cdot 10^{-3}}{200 \cdot 10^{-6}} = 25.$$

β_{sat} - форсиран фактор на струјното засилување е секогаш помало од β во нормалното активното подрачје.

25. Да се пресмета вредноста на отпорникот R_E за даденото коло. $U_{CC}=6V$; $U_{RE}=2,4V$; $U_{BE}=0,6V$; $\beta=100$; $R_B=300K\Omega$.



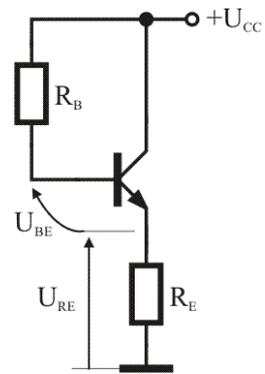
Решение:

$$\beta = \frac{I_C}{I_B}; \text{ од каде што за } I_C \text{ се добива: } I_C = I_B \cdot \beta$$

$$I_B = \frac{U_{CC} - U_{BE} - U_{RE}}{R_B} = \frac{6 - 2,4 - 0,6}{300 \cdot 10^3} = 0,01mA = 10\mu A$$

$$I_C = I_B \cdot \beta = 100 \cdot 10 \cdot 10^{-6} = 1mA$$

$$R_E = \frac{U_{RE}}{I_C + I_B} = \frac{2,4}{1 \cdot 10^{-3} + 0,01 \cdot 10^{-3}} = 2,38K\Omega$$

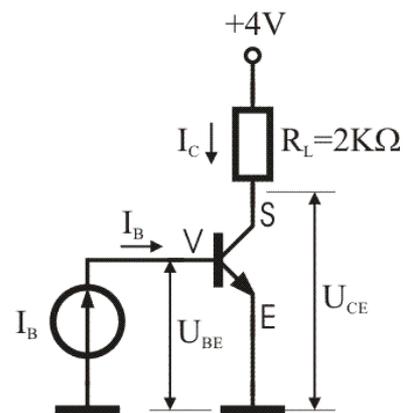


26. Одреди ги U_{CE} и I_C за дадените вредности на I_B и одреди го режимот на работа на транзисторот од колото на сликата.

- a) $I_B = 0$, б) $I_B = 20\mu A$,
- в) $I_B = 60\mu A$, г) $I_B = 100\mu A$

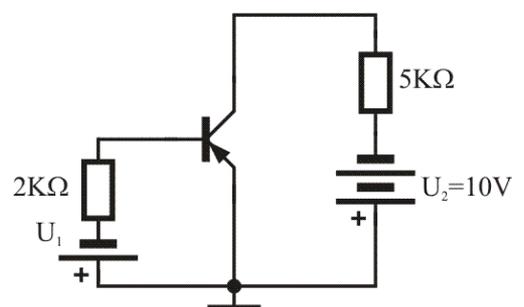
(Решение:

- a) $I_C=0$, $U_{CE}=+4V$ неспроведување,
- б) $I_C=0,8mA$, $U_{CE}=2,4V$ област на неспроведување,
- в) $I_C=2,4mA$, $U_{CE}=0,2V$ на граница на заситување,
- г) $I_C=4mA$, $U_{CE}=0,2V$ во длабоко заситување)



27. PNP транзисторот во колото на сликата ги има следниве карактеристики $\beta = 75$ и да претпоставиме вредност за $U_{CE(ZAS)} = -0,1V$.

- a) Колкава колекторска струја тече кога е транзисторот во заситување?
- б) Ако е $U_{BE} = -0,6V$, колкава вредност е

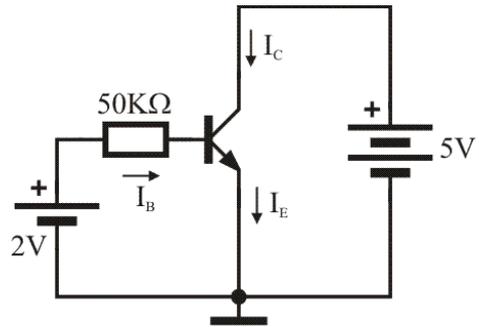


потребна за U_1 за транзисторот да влезе во заситување?

(Решение: а) $I_c=0,45mA$, б) $U_1=0,9V$).

28. NPN транзисторот од сликата има $\beta = 100$, а емитерскиот спој е директно поларизиран при $U_{BE} = 0,6V$.

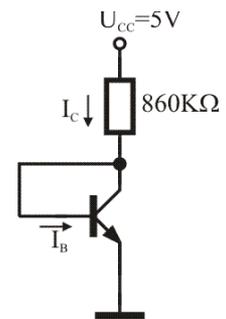
- Во кој режим работи транзисторот?
- Пресметај ја базната, емитерската и колекторската струја.



(Решение: а) $U_{CE} = 2,2V$, режим на спроведување б) $I_B = 28\mu A$, $I_C = 2,8mA$, $I_E = 2,828mA$).

29. Сликата покажува NPN транзистор поврзан така да изгледа како диода. Транзисторот работи во активниот режим. За дадено $U_{BE} = 0,7V$ и $\beta = 49$, пресметај ја базната и колекторската струја.

(Решение: $I_B = 0,1\mu A$, $I_C = 5\mu A$).



30. За колото дадено на сликата, при $\beta = 100$ и $U_{BE} = 0,7V$,

- Најди го U_{IZ} за $U_{VL} = 0,8; 1,5; 2,0$ и $2,5V$.
- За која приближна вредност на U_{VL} колекторската струја ќе биде одредена повеќе со колото за поларизација отколку со релацијата за β ? Кој е тоа режим на работа?
- За $U_{VL} = 2,5V$ да се одреди соодносот меѓу колекторската и базната струја (β_{sat}) и да се спореди со зададената вредност во нормалното активно подрачје.

(Решение: а) за $U_{VL}=0,8V$, $U_{IZ}=0,86V$,

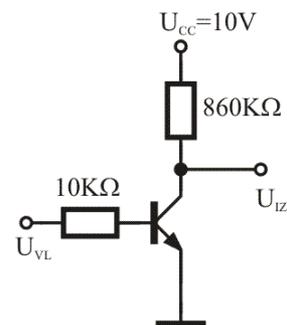
за $U_{VL}=1,5V$, $U_{IZ}=3,12V$,

за $U_{VL}=2V$, $U_{IZ}=0,2V$,

за $U_{VL}=2,5V$, $U_{IZ}=0,2V$,

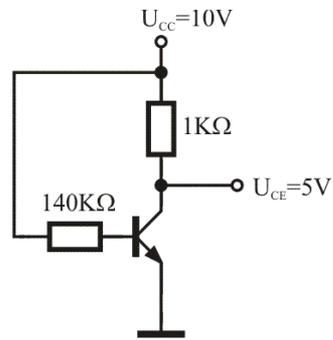
б) $U_{VL} > 0,8V$

в) $\beta_{sat} = 50 < 100$).

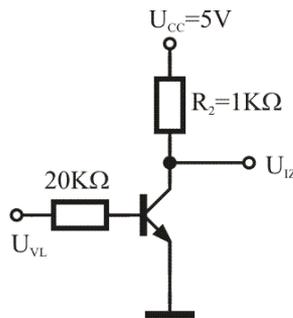


31. Ако е $U_{BE} = 0,7V$, пресметај ја вредноста на β за транзисторот во колото на сликата.

(Решение: $\beta=73$).



32. Во колото, прикажано на сликата, напонот на вклучувањето на спојот база емитер U_{BE} е $0,7V$, U_{CES} е $0,1V$, а β е 200 . Најди ја вредноста на излезниот напон за $U_{VL} = 0,8V$ и $1,0V$ и спореди го односот на промената на излезните напони со односот на промената на влезните напони.



(Решение: за $U_{VL}=0,8V$, $U_{IZ}=4V$, а за $U_{VL}=1V$, $U_{IZ}=3,5V$,

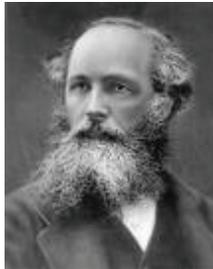
$$\Delta U_{vl} = 0,2V \quad \Delta U_{iz} = -0,5V \quad \frac{\Delta U_{iz}}{\Delta U_{vl}} = -2,5).$$

ИСТОРИЈА НА ЕЛЕКТРОНИКАТА

Како започнува електронската револуција?

Може слободно да се каже дека таа започнува во втората половина на 19. век со идентификацијата на електронот од страна на англискиот физичар **Томсон (Joseph John Thomson)** и со мерењето на неговиот електричен полнеж во **1909 година**, од страна на американскиот физичар **Миликен (Robert Andrews Milikan)**.

Откритието на **Максвел (James Clerk Maxwell)** во **1864** година за постоењето на електромагнетните бранови е основа за развојот на радиокомуникациите.



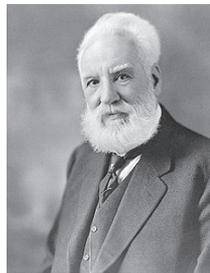
James Clerk Maxwell

1875 година, Томсон емитува први бежични сигнали.



Joseph John Thomson

1876 година, Бел (**Alehander Graham Bell**) конструира прв телефон и го отвора полето на претварање и пренос на звучните во електрични сигнали.



Alehander Graham Bell

1877 година, Едисон (**Thomas Alva Edison**) конструира фонограф, прв уред за запишување и репродукција на звукот.

1883 година, Едисон открива движење на електрони во вакуум од една електрода која се наоѓа на повисок потенцијал кон друга (Едисонов ефект).

1888 година, Херц (Heinrich Herz) експериментално го докажува постоењето на радиобрановите.



Heinrich Herz

1897 година, Браун ја конструира катодната цевка и ја применува во осцилоскоп.

1904 година, Флеминг (John Fleming), применувајќи го Едисоновиот ефект, конструира електронска цевка со два елемента и ја нарекува диода. Електронските цевки стануваат основни уреди за добивање X – зраци, радиосигнали, детектори и предаватели.



диода

Првата демонстрација на бежичните (радио) комуникации ги прави **Никола Тесла во 1894** година.



Никола Тесла

Првата примена на електронските цевки е во радиокомуникациите.

1904 година, уредот за патенти ја менува одлуката, со која на Никола Тесла му е признаен патент за радиокомуникации и на **Маркони (Guglielmo Marconi)** му го признава тој патент. Маркони се смета за прв учесник во развојот на бежичниот телеграф во 1896 и на развојот на радиокомуникациите на големи далечини во 1901 година.



Guglielmo Marconi

1906 година, **Ли Де Форест (Lee De Forest)** открива триода, вакуумска цевка која се користи за разни електронски примени.



Lee De Forest



триода

Првата половина на 20. век претставува ера на користење на вакуумски цевки во електрониката. Нивното користење овозможило развој на радиоуреди, телефонија на голема далечина, телевизија, па и на првите компјутери.

1912 година, **Мајснер** конструира електронски осцилатор.

1918 година, **Армстронг (Edwin Armstrong)** го измислува суперхетеродинскиот приемник. Врз база на тој пронајдок, од 1920 година доаѓа до неверојатен подем во радиоемитирањата.

1920 година, се појавува првата телевизиска слика, но телевизијата не се користи масовно сè до 1947 година. Првите форми на телевизиската слика се добиени со електромеханички средства.

За "татко" на телевизијата сепак се смета **Владимир Зворикин**, кој во **1929 година** измислува електронски цевки за иконоскоп камера, а инженерите на Бел лабораторијата ја промовираат катодната цевка за црно-бел ТВ-приемник.



Владимир Зворикин

1935 година, Армстронг ја воведува фреквенциската модулација, како дополнување на дотогаш користената амплитудна модулација.

Првата и втората светска војна предизвикуваат голем подем во развојот на електрониката во воената индустрија. Голем број разни видови електронски цевки и натаму претставува основен дел на електронските системи на тоа време.

За време на Втората светска војна, **1940 година** е откриен радарот, уред за мерење на далечина и насока на движење врз база на одбивање на радио микробранови.

1946 година е комплетиран најпознатиот компјутер со електронски цевки ENIAC (Electronic Numerical Integrator And Computer).

Ограничувањата и недостатоците на електронските цевки се фактори кои довеле до појава на "полупроводничка револуција" во **1947 година**, со појавата на транзисторите, под водство на научниците **Бердин, Бретеин и Шокли (John Bardeen, Walter Houser Brattain, William B. Shockley)**, но треба да се признае дека електронските цевки не се сосема исфрлени од употреба дури и до денешните денови.



John Bardeen

1948 година, Бретејн и Бердин ја откриле полупроводничката триода - транзистор (**TRANSfer resISTOR**), нов полупроводнички засилувачки елемент со три електроди и два PN-споја.

1950 година, во САД се конструирани ТВ камера и ТВ приемник во боја.



Walter Houser Brattain

1951 година, американскиот физичар **Шокли** ги подобрил особините на транзисторот и го создал транзисторот со површински спој.



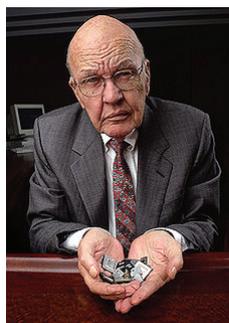
William B. Shockley



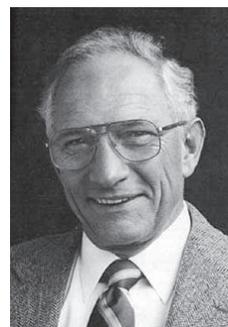
транзистор

1952 година, американскиот физичар **Шокли** дал теоретска основа и идеја за транзистори со ефект на поле кои се произведувале и применувале неколку години подоцна.

Светот станува сведок на најголемото достигнување во историјата на електрониката – појава на полупроводнички електронски елементи, направени од германиум и силициум.



Jack Kilby



Robert Noyce

Мали по димензии, со прецизни карактеристики и со ниски цени на производство, полупроводничките елементи од 1960 година ги потиснуваат електронските цевки во речиси сите електронски уреди. Овој факт, како и потребите за минијатуризација, особено кај ракетните системи, водат кон појавата на интегрираните кола, како резултат на независните истражувања на **Килби (Jack Kilby)** од фирмата Тексас инструментс (Texas

Instruments) во **1958 година**, и на **Херни** и **Нојс (Jean Hoerni, Robert Noyce)** од фирмата Ферчајлд Семикондукторс (Fairchild Semiconductors) во **1959 година**.

Во **1962 година** се појавува првиот електронски ласерски систем.

Од првите интегрирани кола со десетина транзистори, во 1970 година бројот на транзисторите расте и до 1000 во еден чип.

Во **1971 година** произведен е и првиот микропроцесор, како резултат на напорна работа на физичари, електроничари и машински инженери. Овој настан се смета како почеток на компјутеризацијата и производството на дигиталната електроника.

Од **1970 година** па сè до денес, дигиталните интегрирани кола се во постојан развој.

Содржина	стр.
1. ПОЛУСПРОВОДНИЧКИ ДИОДИ	1
1.1. Предмет и поделба на ЕЛЕКТРОНИКАТА.....	3
1.2. Атомска структура на материјата.....	4
1.3. Полупроводни материјали.....	7
1.3.1. Електрични својства на полупроводните материјали.....	8
1.3.2. Полупроводник од N-тип.....	11
1.3.3. Полупроводник од P-тип.....	13
1.4. PN – спој.....	15
1.4.1. Поларизација на PN-споевите.....	16
1.4.2. PN-спој во надворешно електрично поле.....	17
1.5. Полупроводнички диоди.....	20
1.5.1. Статичка карактеристика.....	20
1.5.2. Пробивање на спојот на диодата.....	22
1.6. Видови и примена на полупроводничките диоди.....	24
1.6.1. Диоди со точкаст спој.....	24
1.6.2. Диоди со површински спој.....	26
1.6.2.1. Насочувачки диоди.....	26
1.6.2.2. Зенер диоди.....	26
1.6.2.3. Импулсни диоди.....	28
1.6.2.4. LED диоди.....	29
1.6.2.5. PIN диода.....	30
1.6.2.6. Тунел диода.....	30
1.6.2.7. Варикап диода.....	31
1.6.2.8. GUN диода.....	31
2. ТРАНЗИСТОРИ	39
2.1. NPN-транзистор.....	39
2.2. PNP-транзистор.....	42
2.3. Инверзна струја.....	44
2.4. Карактеристики на транзисторот.....	45
2.4.1. Статички режим на работа.....	45
2.4.2. Статички карактеристики.....	46
2.4.3. Параметри на транзисторот.....	49
2.4.3.1. Излезен отпор на транзисторот.....	49
2.4.3.2. Коефициент на струјно засилување на транзисторот.....	50
2.4.3.3. Работна права.....	51
2.4.4. Ограничувања при работа на транзисторот.....	53
2.5. Динамички режим на работа.....	54

2.5.1. Еквивалентна шема на транзисторот со h -параметри.....	55
2.6. Транзистор како засилувачки елемент.....	58
2.6.1. Особини на транзисторот при високи фреквенции.....	59
2.7. Транзистор како прекинувачки елемент.....	60
2.7.1. Прекинувачко коло со транзистор во спој со заеднички емитер.....	61
2.7.1.1. Режим на прекин.....	62
2.7.1.2. Режим на заситување.....	63
2.7.1.3. Преоден режим.....	64
2.8. Униполарни транзистори - транзистори со ефект на поле.....	65
2.8.1. Структура и принцип на работа на FET.....	66
2.8.2. Статички карактеристики на FET.....	68
2.8.3. FET во динамички режим на работа.....	70
2.8.3.1. Еквивалентна шема на FET.....	71
2.9. Примена на транзисторите.....	72
3. ТИРИСТОРИ.....	77
3.1. Динистор.....	79
3.1.1. Принцип на работа на динисторот.....	79
3.1.2. Струјно – напонска карактеристика.....	81
3.2. Тиристор.....	82
3.2.1. Режим на вклучување и исклучување на тиристорот.....	83
3.2.2. Статички карактеристики.....	84
3.2.3. Побудување на тиристорот.....	85
3.2.4. Тиристор како регулатор на електрична моќност.....	85
3.3. Дијак.....	88
3.4. Тријак.....	89
3.5. Примена на тиристорите.....	91
4.ТЕРМИСТОРИ И ФОТОЕЛЕКТРИЧНИ ЕЛЕМЕНТИ.....	95
4.1. Термистори.....	97
4.1.1. NTC-термистори.....	97
4.1.2. PTC-термистори.....	98
4.2. Фотоелектрични елементи.....	100
4.2.1. Фотоотпорници.....	100
4.2.2. Фотодиоди.....	102
4.2.3. Фототранзистори.....	103
4.2.4. Фотогенератори.....	105
5. ИНТЕГРИРАНИ КОЛА.....	109
5.1. Карактеристики на одделни видови интегрирани кола.....	111
5.2. Хибридни интегрирани кола.....	112

5.3. Монолитни интегрирани кола.....	113
5.3.1. Изработка на основата.....	113
5.3.2. Фотолиитографија.....	115
5.3.3. Дифузија.....	117
5.3.4. Епитаксијална раст.....	117
5.4. Примена на интегрираните кола.....	118
Прилог задачи.....	123
Историја на електрониката.....	143

КОРИСТЕНА ЛИТЕРАТУРА

1. David Irwin David Kerns: Introduction to Electrical Engineering, Prentice Hall International Editions, 1995
2. Методија Камиловски: Електроника за III година ,електротехничка струка,Просветно дело 1995
3. Milman – Halkias: Integrated electronics: analog and digital circuits and systems, 1972
4. Миле Ј. Станковски, Татјана Д. Колемишевска-Гугуловска: Компјутерско водење на процеси, Електротехнички факултет-Скопје, 2006
5. Милутин Петковиќ: Електроника, учебник за III степен на занимањата од електротехничката струка со насока слаба струја и автоматика, Просветно дело 1993
6. Зоран Тасиќ: Електроника I за II клас на електротехничките училишта, Просветно дело 1972
7. Зоран Тасиќ: Електроника II за електротехничките училишта, Просветно дело 1982
8. Др Ратко Опачиќ: Електроника I за II разред средњег образовања, Завод за издавање учебника Нови Сад
9. Интернет прилози и податоци