

3. Електроника

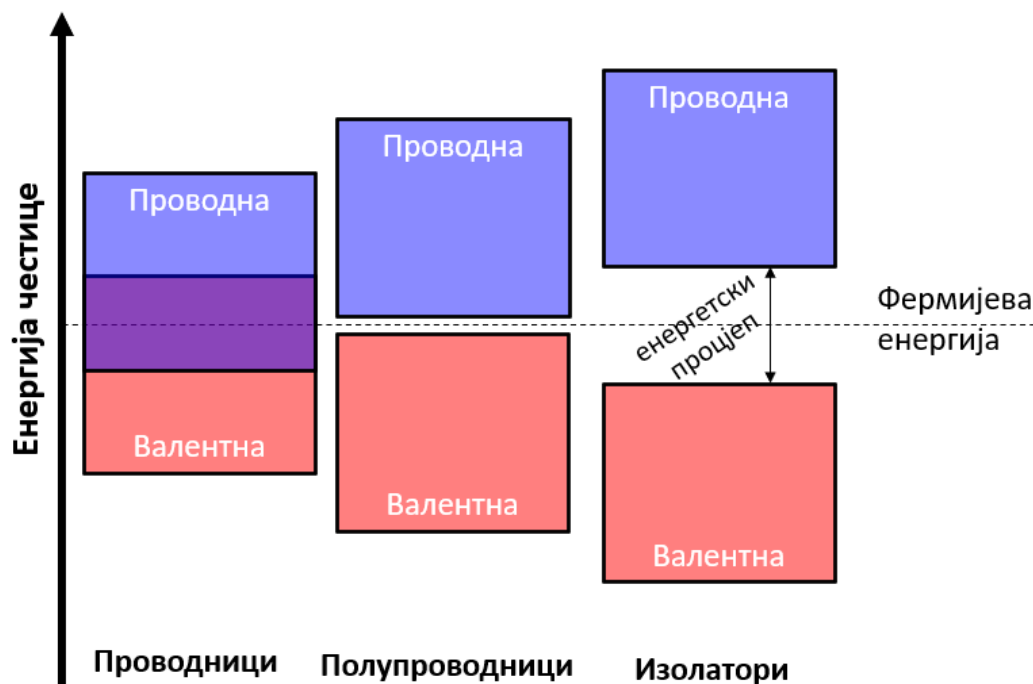
3.1. Чисти полупроводник

Као што је и раније помињано, наелектрисане честице атома су електрони (-) и протони (+). Електрони се налазе у омотачу а протони су у језгру атома и не могу га напустити.

Електрони у омотачу револвирају око језгра атома, али нису сви једнаки. Наиме електрони су организовани у енергетске нивое према томе колику енергију посједују. Електрони са већом енергијом су на вишим енергетским нивоима и удаљенији су од језгра. Обрнуто важи за атоме са мањом енергијом.

Највиши ниво се назива **валентни ниво**. Електрони овог нивоа учествују у стварању ковалентне везе између атома, чиме настају молекули. Електрони овог нивоа ако добију довољно енергије, могу прећи у **проводни енергетски ниво** и тиме постати **слободна наелектрисања**. Слободна наелектрисања су наелектрисања која чине електричну струју.

Различити атоми имају различито распоређене енергетске нивое, а тиме и различито распоређене валентне и проводне нивое.



Слика 14 Валентни и проводни нивои код проводника, полупроводника и изолатора.

Слика 14 приказује проводне и валентне нивое код проводника, полупроводника и изолатора. На слици је означена Фермијева енергија, која показује колику енергију честица треба да има да би напустила атом. Као што се на слици види, код проводника проводни и валентни нивои се преклапају, што омогућава великом броју валентних електрона проводника да напусте атоме и постану слободни. Ово је разлог зашто проводници имају велики број слободних електрона.

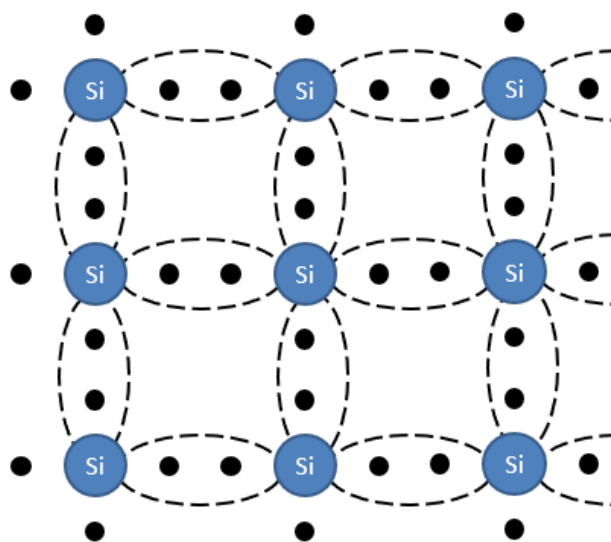
Код изолатора проводни и валентни нивои се не преклапају, већ штавише су веома удаљени. Разлика у енергији између врха валентне зоне и дна проводне зоне се назива **енергетским процјепом**. Енергетски процјеп показује колику енергију треба дати електрону да би имао шансу да пређе из валентне у проводну зону. Овај процјеп не постоји код проводника а велики је код изолатора. Због овога, потребно је веома јако електрично поље (или висока температура) да би се исцупали електрони из валентне области изолатора.

Код полупроводника проводна и валентна зона су раздвојене на 0K, али већ на собној температури ће се помало преклапати. Ово значи да је енергетски процјеп веома мали (0K) или непостојећи (собна температура), тако да значајан број електрона добијају довољно енергије да прескоче у проводну зону. Наравно ово није ни близу томе колико се ове области преклапају код проводника и стога је број слободних електрона увјек много мањи него код проводника и тиме је отпорност већа.

СТРУКТУРА ПОЛУПРОВОДНИКА

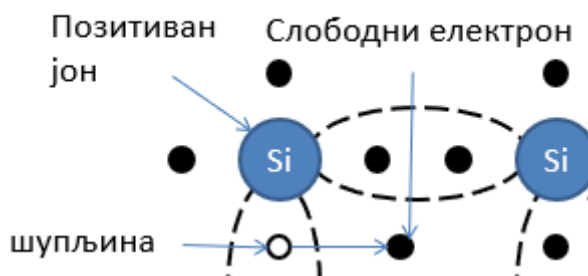
Полупроводник који најчешће користимо у електроници је силицијум (Si).

Атоми силицијума имају 4 валентна електрона. Силицијум би жељео да има 8 валентних електрона како би попунио валентни ниво. Стога са своја 4 сусједа ствара 4 ковалентне везе што му омогућава да подјели своје електроне са другима и од њих добије њихове електроне. На овај начин силицијум добија 4 електрона која му треба и твори кристалну решетку, што чини силицијум чврстим.



Слика 15 Атоми силицијума, њихови валентни електрони и ковалентне везе између њих

Слика 15 ово графички прикатује. Тачке представљају валентне електроне док испрекидане линије обиљежавају ковалентне везе. Предмет сваке ковалентне везе је дијељење два електрона.



Слика 16 Настанак шупљине

Када један од валентних електрона силицијума добије довољно енергије он постаје слободан електрон и напушта атом. Атом кога је напустио електрон, сада има један електрон мање од броја протона и постаје позитиван јон. Настанком тог једног слободног електрона такође настаје празно мјесто у валентном нивоу атома. Ову празнину називамо **шупљина**. Атом би веома волио да попуни шупљину неким електроном. Пошто су атоми са шупљинама позитивни, шупљину можемо донекле сматрати позитивним наелектрисањем.

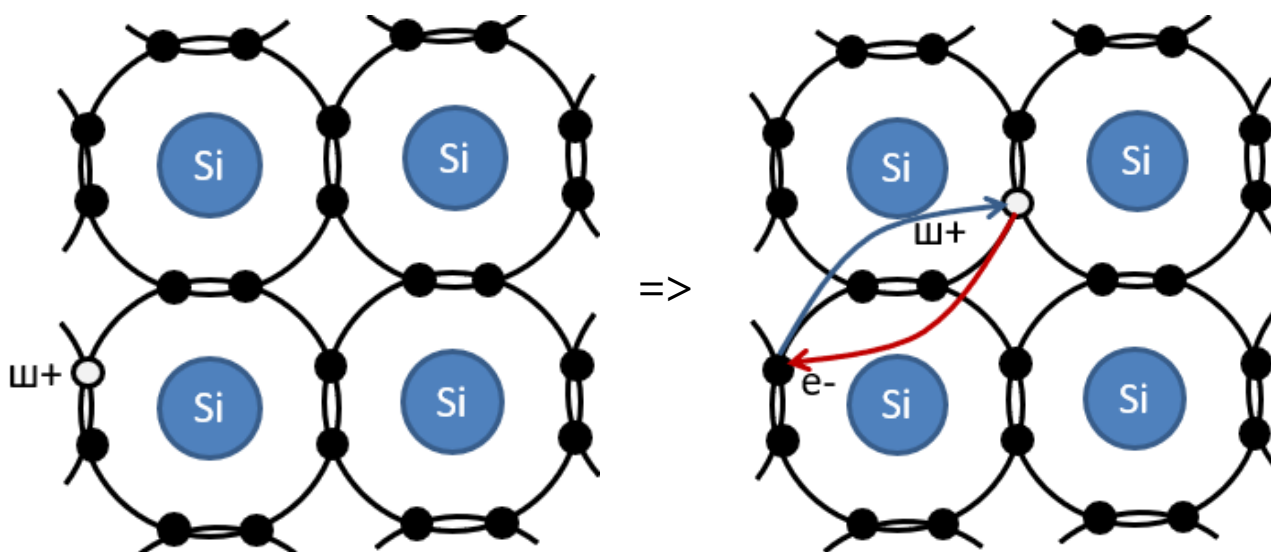
Слободни електрони могу да изгубе енергију и буду приморани да се придруже неком атому и попуне његову шупљину. Овај процес се зове **рекомбинација** и доводи до тога да се један електрон шупљина пар поништи. Након рекомбинације имаћемо један мање електрон и једну мање шупљину.

Зато што сваки пут када настане један слободни електрон у полупроводницима настаје и једна шупљина, број слободних електрона и шупљина је једнак у чистом силицијуму. Број шупљина и слободних електрона је веома мали због постојања енергетског процјепа или малог преклапања проводне и валентне зоне.

3.2. Кретање наелектрисања у полупроводницима и струја

Да би струја могла да тече кроз неки материјал, треба да постоји одређен број „носилаца наелектрисања“ или слободних наелектрисања. У металима су то најчешће слободни електрони. Слободни електрони постоје и у полупроводницима али као што смо рекли, има их мало.

Насупрот слободним електронима који се могу кретати релативно слободно кроз материјал, али шупљине су дио самих атома. Али свеједно шупљине се могу „привидно“ кретати. Наиме ако електрон неког атома постане слободан (и тиме направи шупљину у оригиналном атому) и онда попуни шупљину неког другог атома (рекомбинација), нама који посматрамо тренутак прије и тренутак послје ће изгледати као да се шупљина премјестила из једног у други атом.



Слика 17 Кретање шупљина (sh^+) из једног атома у други

Због ове привидне могућности да се шупљине крећу, и тога да чине атом позитивним, шупљине се такође сматрају носиоцима наелектрисања и могу да творе струју.

Постоје два разлога због којих може да дође до кретања наелектрисања (шупљина и слободних електрона):

- присуство електричног поља
- под дејством дифузије

Електрично поље погони електроне да се крећу супротно правцу поља, а шупљине се крећу у смјеру поља. Исто је и са правцем струје. Струја је у смјеру кретања шупљина а супротна смјеру кретања електрона.

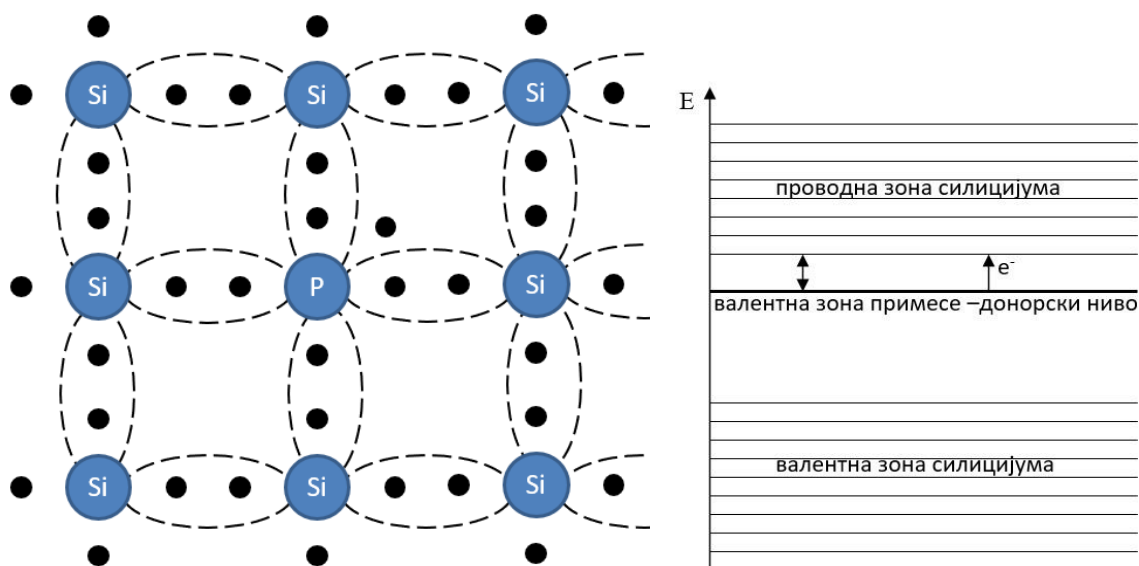
Дифузија се дешава када наелектрисања нису равномјерно распоређена у простору. Дифузија тежи да изједначи концентрацију наелектрисања у цијелом материјалу, тако да ће се наелектрисања кретати из области веће концентрације према областима ниже концентрације. Дифузија није процес који се само дешава у електроници, већ се дешава у многим другим областима. Рецимо ако сипамо сируп у чашу воде, примјетићемо да је на почетку сируп концентрисан на једном мјесту, али онда под дејством дифузије се шири према дјеловима чаше гдје га нема. Исто се дешава са наелектрисањима.

3.3. P и N тип полупроводника

P и N типови полупроводника настају додавањем других елемената (нечистоће или примјесе) у чисти силицијум. Овај процес додавања нечистоћа или примјеса се назива **допирање**. Силицијум се допира или са **петовалентним** елементима (имају пет валентних електрона: **фосфор**, **арсен**, **антимон** итд.) или са **тровалентним** елементима (имају три валентна електрона: **бор**, **галијум** итд.). Иако се примјесе додају у **веома** ниским концентрацијама, 1 атом примјесе на 1.000 до 1.000.000 атома силицијума, овај процес чини силицијум **много** бољим проводником.

N-тип

Да би се добио N-тип силицијума најчешће се додаје фосфор (P) као примјеса.



Слика 18 Структура N-типа силицијума (лијево) и енергетски нивои (десно)

Фосфор је петовалентни елемент и фали му 3 валентна електрона. Он свеједно образује 4 ковалентне везе са сусједна 4 атома силицијума. Због овога пети валентни електрон фосфора постаје сувишан и веома лако постаје слободан електрон. Због лакоће којом донира слободне електроне, петовалентне примјесе се називају **донорима**. Зато што је електрон напустио фосфор, фосфор постаје позитивно наелектрисан јон.

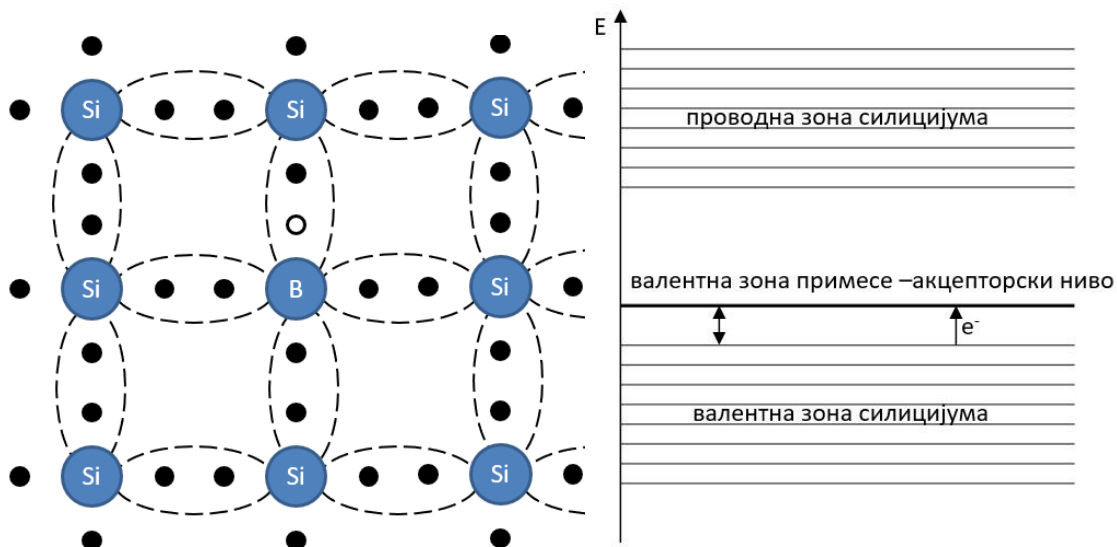
Код фосфора лакоћа донирања је појачана тиме, као што се види на Слика 18, што је валентни ниво значајно ближи проводној зони него валентни ниво силицијума због чега пети електрон фосфора треба дати веома мало енергије да постане слободан. На собној температури се може претпоставити да су сви атоми фосфора отпустили свој пети електрон. Ово је насупрот силицијуму гдје ће само мали број електрона постати слободни.

Код N-типа полупроводника већина носилаца наелектрисања/слободног наелектрисања су слободни електрони који је већином фосфор донирао. Силицијум и даље производи парове слободних електрона и шупљина али је њихов број много мањи од слободних електрона

фосфора. Другим ријечима, за N-тип се каже да код њега су доминантни носиоци наелектрисања електрони, док су шупљине мањински носиоци наелектрисања.

Р-тип

Да би се добио Р-тип силицијума, најшешће се додају атоми бора (В) као примјесе.



Слика 19 Структура Р-типа полупроводника (лијево) и енергетски нивои у истом (десно)

Бор је тровалентни елемент којему чак и након што направи четири ковалентне везе са сусједним атомима силицијумима и даље недостаје један електрон у валентном нивоу. То значи да атом бора долази са „уграђеном“ шупљином. Ова шупљина ће бити веома лако попуњена од стране неког слободног електрона јер је енергетски ниво те шупљине тек изнад валентне зоне силицијума. Због овога атом бора лако **прима** електроне и зато се тровалентне примјесе називају **акцепторима** (енгл. *to accept* – примити). Након што атом бора прими електрон из неког атома силицијума у том атому настаје шупљина и при овом настанку шупљине се не генерише слободан електрон.

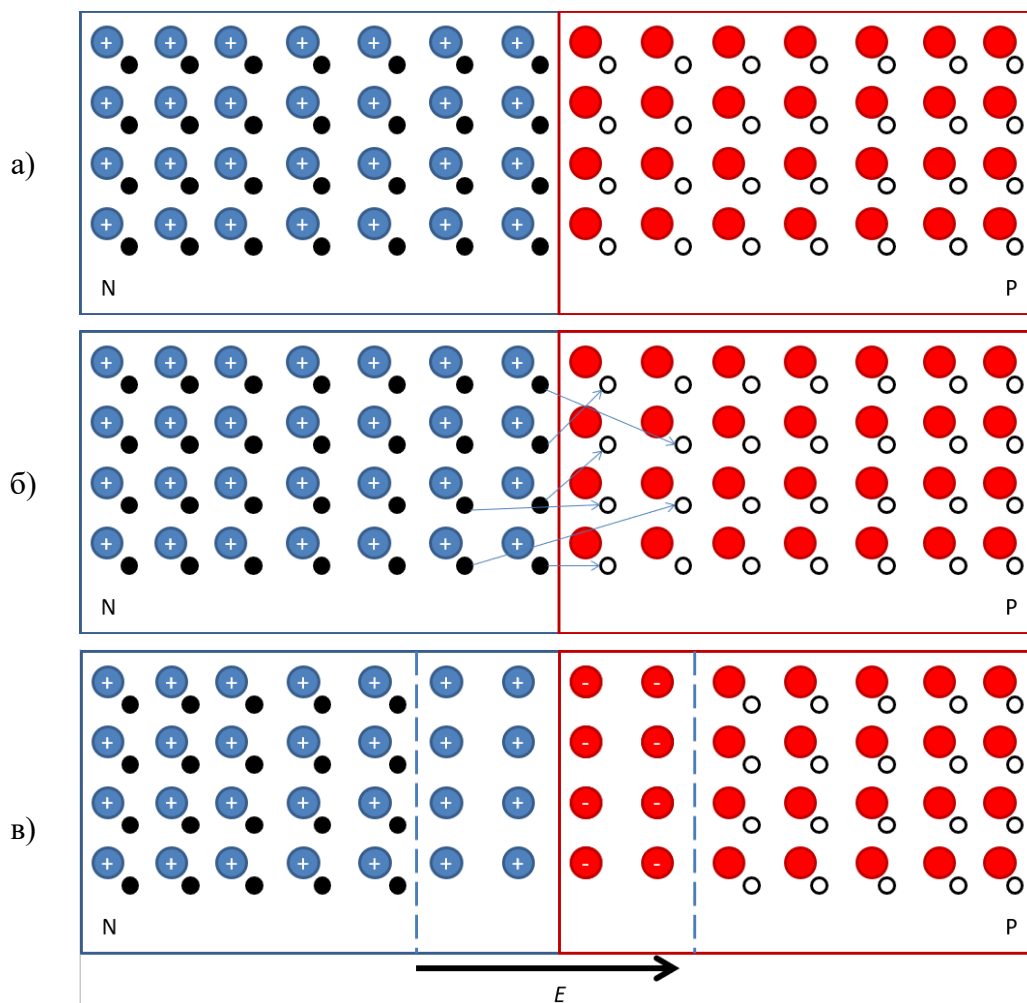
Из свих ових горњих разлога, у полупроводницима Р-типа доминантна наелектрисања су шупљине а слободних електрона има веома мало. Иако има мало слободних електрона, шупљине се могу кретати и од њих се може направити електрична струја те је полупроводник Р-типа, попут полупроводника N-типа) много проводнији од чистог полупроводника.

3.4. PN спој

Ако спојимо два комада силицијума, један Р а други N типа, добићемо ситуацију приказану на Слика 20-а. У N типу су доминатно слободни електрони а шупљине су ријетке. Атоми које су ти слободни електрони напустили су позитивни. У Р-типу постоји велики број шупљина и занемарљив број слободних електрона.

Слика 20-б Пошто је концентрација слободних електрона у N типу већа него у Р типу под дејством **дифузије** електрони почињу да прелазе из N-типа у Р-тип и тамо се **рокомбинују** са локалним шупљинама (већином атоми бора) чиме настају атоми са једним електроном вишка, тј. негативни јони.

На N страни PN споја сада има мање слободних електрона те она постаје позитивно наелектрисана док Р страна постаје негативно наелектрисана због негативних јона. Ово наелектрисање проузрокује настанак унутрашњег електричног поља преко самог PN споја са правцем од N према Р типу. Ово поље успорава електроне који желе да пређу из N у Р тип и како наелектрисање услед јона расте, са њиме расте и јачина поља и све мање и мање електрона може да пређе из N у Р тип. У неком тренутку ово електрично поље постаје толико јако да је јаче од силе дифузије и у потпуности спрјечава даљи прелазак електрона из N у Р тип.



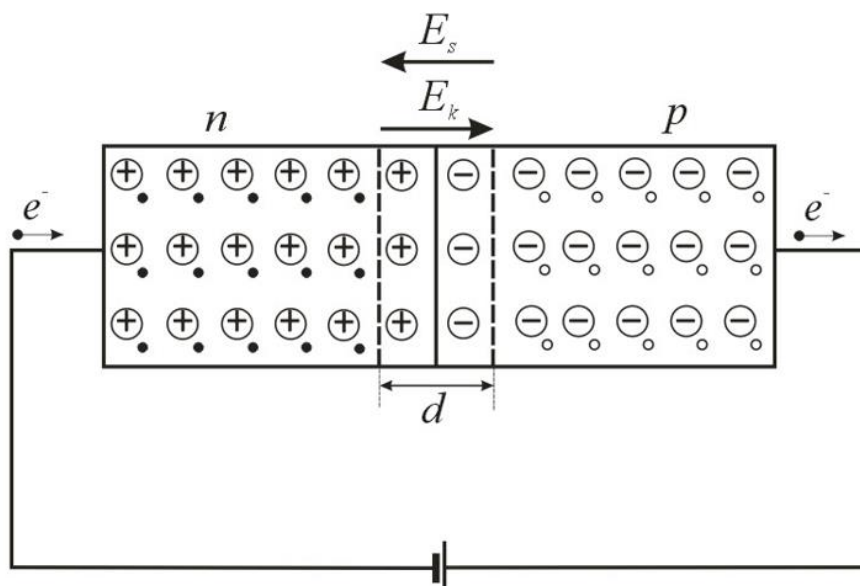
Слика 20 PN спој без присуства спољњег поља и формирање области просторног товара . Црне тачке су слободни електрони, бјели кружићи су шупљине.

Крајњи резултат је приказан на Слика 20-в, која показује да је због унутрашњег електричног поља престало даље кретање електрона из N у Р тип и између N и П типа сада се налази област **просторног товара**. Област у којој нема слободних наелектрисања и која представља

барјеру за кретање наелектрисања због њеног поља. Очигледно је да би било потребно неко спољње поље јаче од унутрашњег и супротног смјера да поново покрене прелазак преко PN споја.

ДИРЕКТНА ПОЛАРИЗАЦИЈА PN СПОЈА

PN спој је директно поларисан када је PN спој прикачен на извор напона и тако да је P страна на већем потенцијалу (+ страна батерије) а N страна на нижем потенцијалу (- страна батерије).



Слика 21 Директно поларисан PN спој

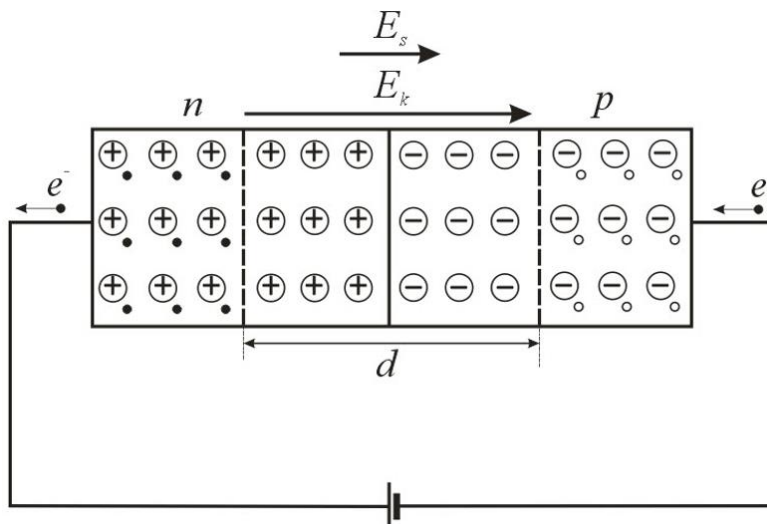
На овај начин у PN спој доводимо спољње поље E_s супротног смјера у односу на унутрашње поље E_k . Због овога се укупно поље преко PN споја смањује, и штавише ако је спољње поље јаче од унутрашњег, сада електрично поље помаже слободним електронима да пређу из N у P тип. Такође, зато што је PN спој сада прикачен на извор напона, N спој добија константно нове електроне из – стране батерије, а електрони који су попуњавали шупљине у P-типу бивају одвучени према + страни батерије. Под дејством овога, област просторног товара се смањује а са њоме се смањује и унутрашње поље.

Стога се може рећи да ако се PN спој поларише директно са довољно великим напонам, струја може несметано да тече кроз PN спој.

ИНВЕРЗНА ПОЛАРИЗАЦИЈА PN СПОЈА

Код инверзне поларизације, + страна (виши потенцијал) напона се доводи на N-тип а – страна (нижи потенцијал) на P тип. Ово је обрнута поларизација у односу на директну поларизацију.

У овом случају све се дешава обрнуто него код директне поларизације. спољње електрично поље извора напона сада помаже унутрашњем пољу у спрјечавању проласка наелектрисања. Слободни електрони из N-типа сада



Слика 22 Инверзно поларисан PN спој

иду према + страни извора напона да би се тамо поништили. Електрони са – стране извора долазе у Р тип и тамо се рекомбинују за шупљинама. Ово проузрокује смањење шупљина и електрона у Р и N типу и значајно повећање области просторног товара.

При оваквој поларизацији нема преласка електрона из N у Р тип те можемо рећи да струја готово да не може да тече кроз PN спој.

Веома мали број слободних електрона из Р типа и даље могу да пређу у N тип и тамо се рекомбинују са веома малим бројем шупљина тамо, али ова струја је тако мала да је готово занемарљива. Ову веома малу струју називамо струјом цурења.

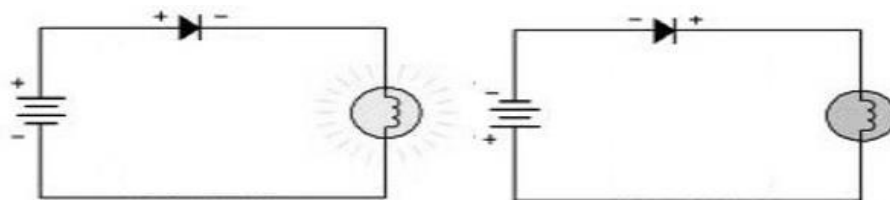
3.5. Диода

Диода је једна од најједноставнијих електронских компонената, и представља један PN спој. Пошто је у питању PN спој, диода има два конектора. Р страна се зове анодом а N страна је катода.



Слика 23 Симбол диоде

Слика 23 приказује симбол који се користи за диоде у електричним колима. Узимајући у обзир све што смо до сада казали, очигледно је да струја кроз диоду само може проћи у смјеру троугла симбола, од аноде ка катоди.

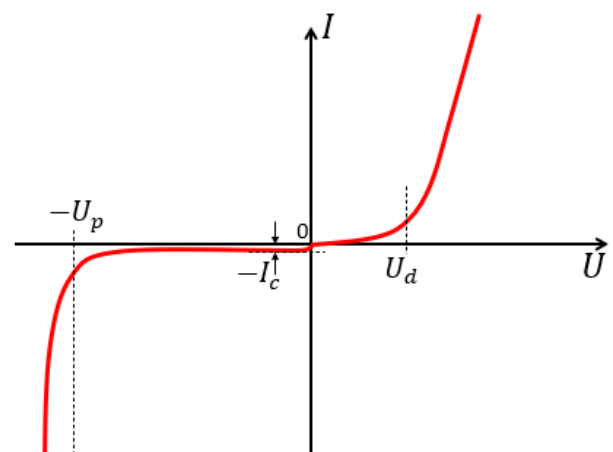


Слика 24 Диода у колу. Директна (лијево) и инверзна (десно) поларизација.

За диоду се може рећи да је једносмјерни вентил, јер пушта струју само у једном правцу. Због овога струја се назива **усмјерачком** компонентом. Ово се види на Слика 24, гдје на лијевој слици струја може да тече од аноде ка катоди, док на десном случају струја не може да тече од катоде ка аноди.

СТРУЈНО-НАПОНСКА КАРАКТЕРИСТИКА ДИОДЕ

струјно напонска карактеристика диоде показује везу између напона на диоди и струје која пролази кроз њу. Слика 25 приказује ту карактеристику. На карактеристици позитиван напон означава директну поларизацију а негативан инверзну. Са карактеристике се види да је потребан неки директни напон да би диода почела да проводи. Овај минимални напон потребан да диода проведе (U_d) назива се **праг провођења**. Код силицијумских диода $U_d \approx 0,6V$. Након што је праг достигнут струја више не зависи од напона на диоди.



Слика 25 Струјно-напонска карактеристика диоде

Ако је диода инверзно поларисана, постоји веома мала струја цурења I_c која тече од катоде према аноди. Као што смо раније рекли ово је струја мањинских носилаца наелектрисања. Ако инверзни напон а тиме и поље постане довољно јако, оно почиње та чупа електроне из атома, ти електрони под дејством огромног поља се крећу веома брзо и сударају се са другим

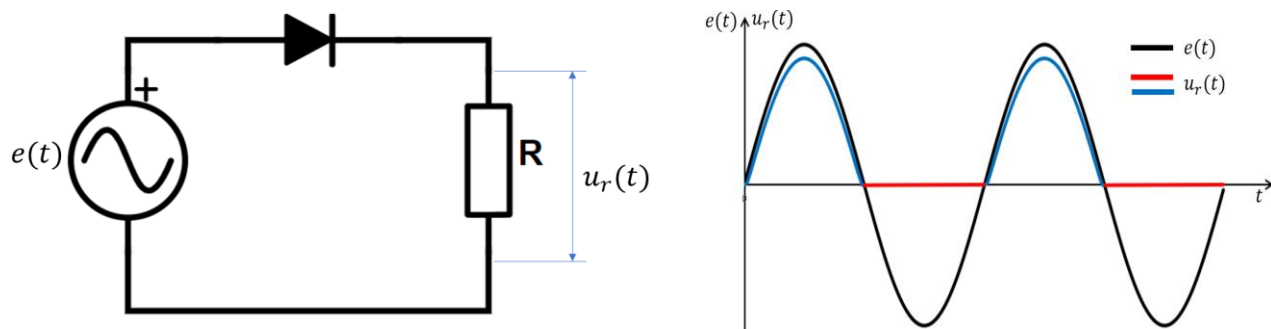
атомима и из њих избијају још више електрона. Ово се назива пробојем диоде и узрокује појаву великих инверзних струја кроз диоду.

Инверзни напон изнад којег долази до пробоја назива се пробојним напонем (U_p). Пробој диоде је нежељено својство диоде и приликом дизајнирања кола треба одабрати модел диоде чији пробојни напон ће бити довољно велики да издржи максималне могуће инверзне напоне којима диода може бити изложена.

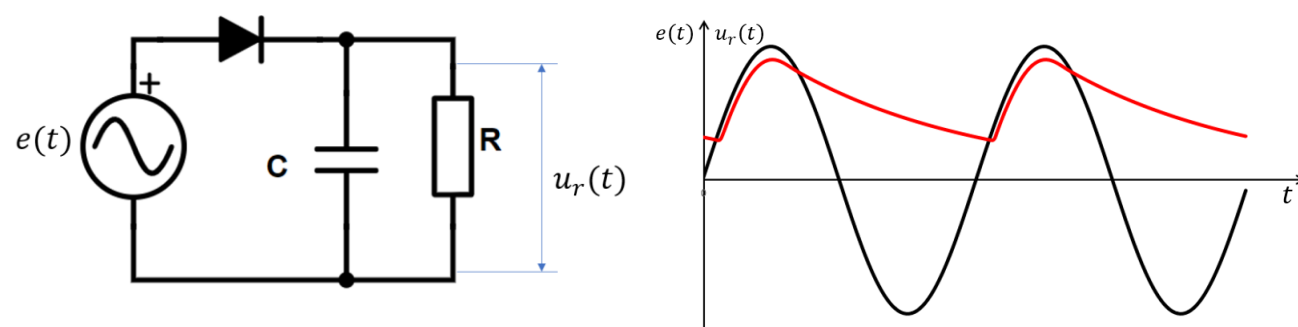
Постоје различите врсте пробоја. Најчешћи је лавински пробој који сам већ укратко описао. Друга врста пробоја је Зенеров пробој. Ако се диода специфично дизајнира да садржи веома допиран полупроводник и има веома малу зону просторног товара, до пробоја може доћи на мањем инверзном напону што значи да би струје биле мање кроз диоду. Ово је Зенеров пробој, и овај пробој се дешава у специјалим Зенеровим диодама. Ове диоде се користе у енергетским системима гдје су високи инверзни напони чести.

3.6. Исправљачи

Исправљачи су уређаји који имају за циљ да претворе наизмјенични напон у једносмјерни напон. Диоде се најважнији дјелови исправљача због своје могућности да пропуштају струју само у једном правцу.



Слика 26 Исправљач са једном диодом (лијево) и временски дијаграм улаза и излаза (десно)

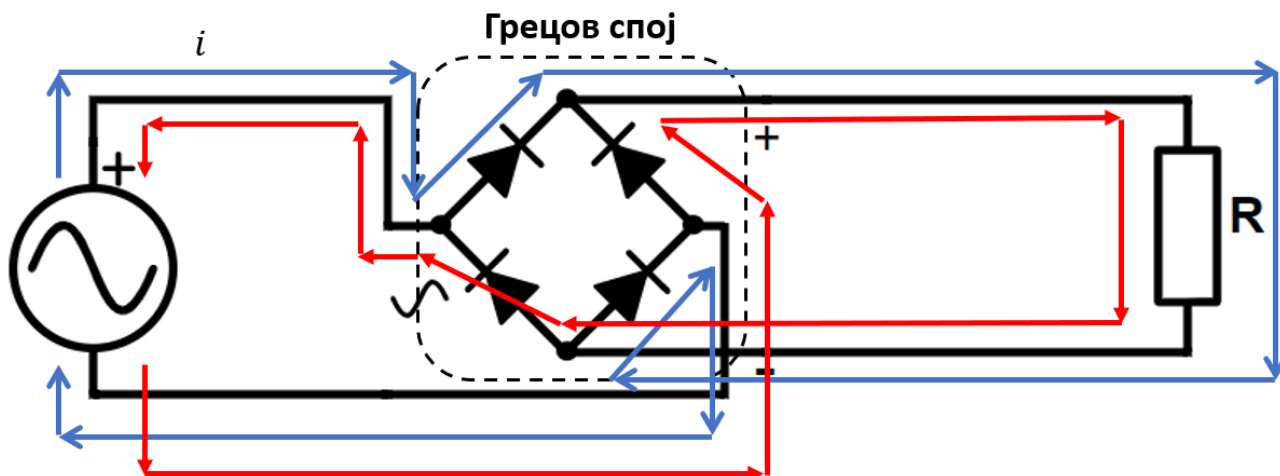


Слика 27 Исправљач са диодом и кондензатором (лијево) и временски дијаграм улаза и излаза (десно). Црвена линија на дијаграму је излазни напон.

Слика 26 приказује исправљач код кога диода искључује све негативне полупериоде. Напон на излазу је увјек истог смјера или нула. Проблем код овог исправљача је што на излазу користимо само пола читаве периоде напона на улазу, и излазни напон није константан.

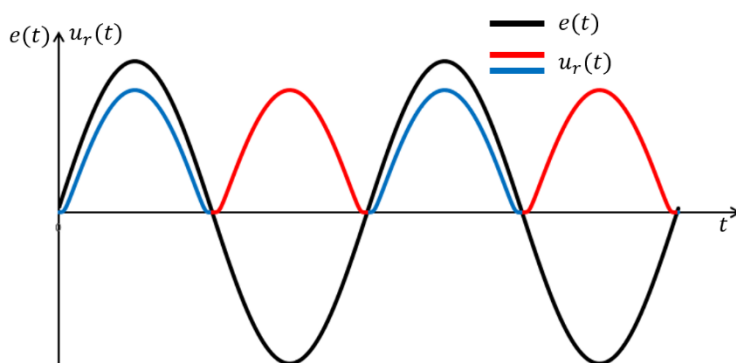
Слика 27 приказује шта се дешава ако у претходни случај додамо један кондензатор паралелно везан са излазом/потрошачем. Током позитивне полупериоде диода је отворена и струја кроз њу тече према отпорнику/потрошачу и према кондензатору што га пуни. Чим напон на улазу умањен за напон на диоди падне испод напона на кондензатору диода се гаси и од тог тренутка кондензатор се празни преко потрошача. Ако је кондензатор довољно јак,

он може да издржи током читаве негативне полупериоде. Када напон на улазу поново пређе преко напона на кондензатору диода се отвара и поново пушта струју преко потрошача и за пуњење кондензатора. Код овог дизајна и даље не користимо напон негативне полупериоде, али нам кондензатор омогућава да „оспегламо“ донекле напон.



Слика 28 Исправљач са Грецовим спојем. Стрелице означавају пут струје током позитивне (плаво) и негативне (црвено) полупериоде

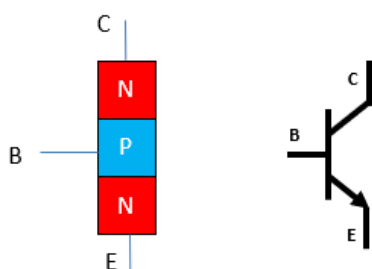
На Слика 28 је исправљач са грецовим спојем. Грецов спој се састоји од четири диоде у таквој конфигурацији тако да без обзира која страна улаза је на већем потенцијалу, на излазу је увјек једносмјеран напон. Грецов спој у основи инвертује негативне полупериоде. Излаз са Грецовог споја је на Слика 29. Грецов спој омогућава коришћење и позитивне и негативне полупериоде али не даје и даље константан напон. Додавање кондензатора на излазу овај напон се да испеглати.



Слика 29 Излаз са Грецовог споја

3.7. Биполарни транзистори

Биполарни транзистори се састоје од 3 наизмјенична слоја N и P типа полупроводника. Због овога постоје двије врсте биполарних транзистора: NPN и PNP транзистори.



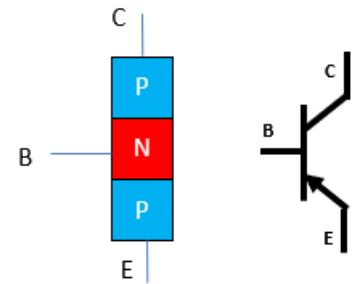
Слика 30 Структура (лијево) и симбол (десно) NPN транзистора

На Слика 30 приказана је основна структура NPN транзистора. Пошто биполарни транзистори имају 3 слоја полупроводника, имају такође и 3 конектора. Средњи слој/конектор је база (B) а остала два конектора/слоја су колектор (C) и емитор (E).

Дијаграм на слици је упроштена слика NPN транзистора јер у стварности постоје велике разлике између величине и допираности базе, колектора и емитора. База представља много тањи слој од колектора и емитора, док је емитор много више допиран од базе док је колектор мање допиран.

Што се тиче симбола (десно), емитор је увјек обиљежен стрелицом по чему се разликује од колектора. Смјер стрелице индицира да ли је у питању NPN или PNP транзистор.

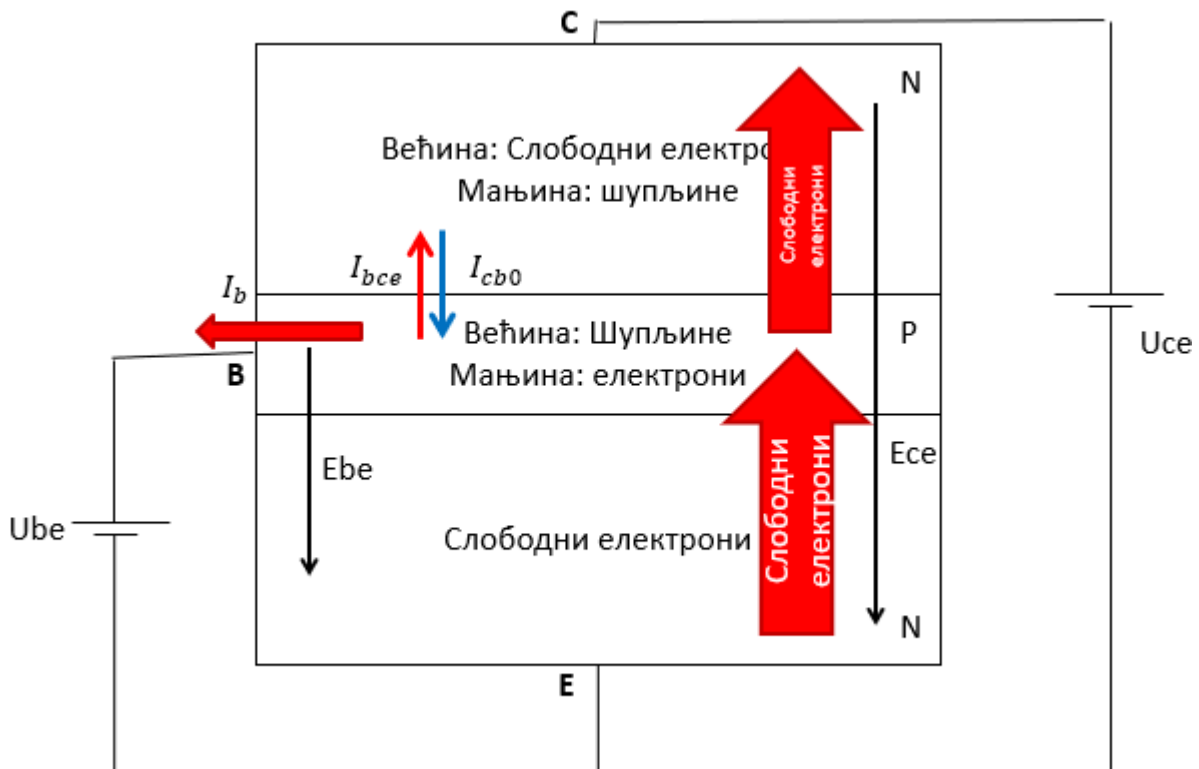
Слика 31 приказује упришћену шему PNP транзистора и његов симбол. У односу на NPN само су обрнути типови полупроводника. База је и даље у средини, а емитор је више допиран крај транзистора док је колектор мање допиран. На симболу стрелица је сада окренута према бази што индицира да је у питању PNP транзистор.



Слика 31 Структура (лијево) и симбол (десно) PNP транзистора

Прије него што се почнемо бавити објашњавањем како биполарни транзистор функционише, ваља примјетити да се биполарни транзистор састоји од два PN споја (али и НЕ од двије диоде): база-емитор (BE) и колектор-база (CB).

Слика 32 приказује много реалистичнији приказ NPN транзистора као и принцип његовог функционисања. Да би транзистор функционисао у активном режиму (постоје и други режими али их овдје нећемо помињати), тј. да би проводио, на његове конекторе (B, E и C) морају се довести напони одређене јачине и поларизације. На BE мора се довести директно поларишући напон довољне јачине да отвори BE PN спој било да је у питању PNP или NPN



Слика 32 Структура и принцип функционисања NPN биполарног транзистора

транзистор. Ако је у питању NPN транзистор, код њега база мора бити на већем потенцијалу од емитора, а колектор мора бити на још већем потенцијалу. Због овога код NPN транзистора важи да је $U_{CE} > U_{BE}$. Ситуација је обрнута код PNP транзистора.

Под дејством директног напона на BE, овај PN спој бива отворен и огроман број слободних електрона емитора почиње да прелази у базу. У бази, због њене мале величине и ниже допираности и тиме ниже концентрације шупљине, само мали број слободних електрона се могу рекомбиновати са шупљинама базе. Овај мали број електрона полако истичу преко B конектора према извору U_{BE} и творе струју базе.

PN spoj CB је инверзно поларисан јер је колектор (N страна) на већем потенцијалу од базе (P страна) и спрјечава да већински носиоци наелектрисања колектора (електрони) прелазе у базу или да шупљине базе прелазе у колектор. Али напон U_{CE} не да не смета електронима емитора који су у бази да пређу у колектор, који има мању концентрацију електрона, већ им помаже тиме што ствара поље E_{CE} које вуче електроне емитора према колектору.

Несметаном преласку у колектор из базе слободних електрона емитора који се нису рекомбиновали у бази се придружује веома мали број слободних електрона базе. Ова наелектрисања излазе из C конектора и творе струју колектора.

Као што се може видјети струја је већином сачињена од наелектрисања која су дошла из емитора, тј. наелектрисања која су прешла BE spoj и нису се рекомбиновали у бази. Ово значи да струја колектора се може повећати и смањити отварањем и затварањем BE spoja преко U_{BE} .

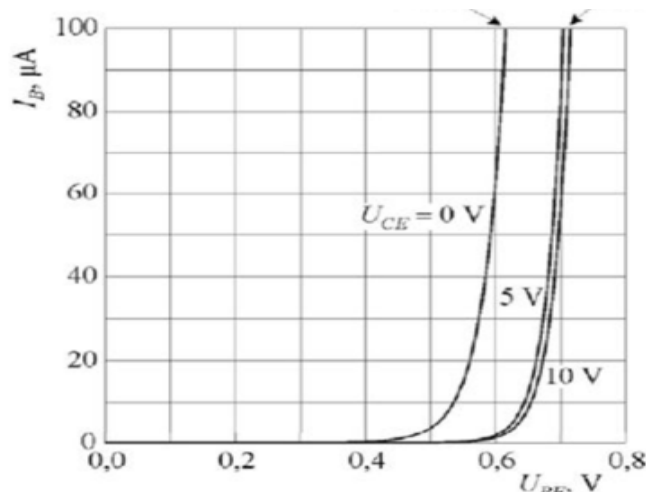
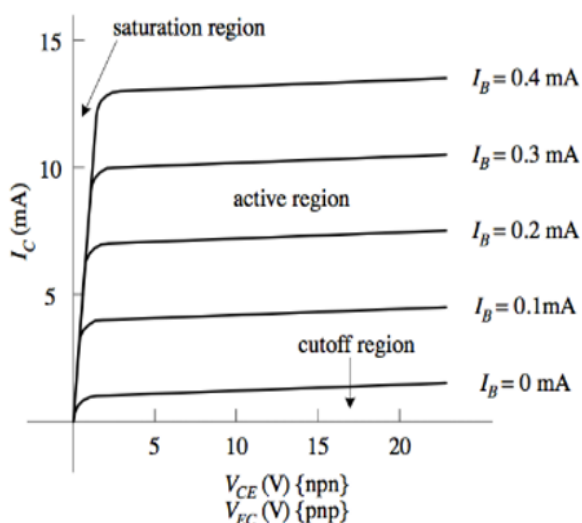
У случају PNP транзистора сличне ствари се дешавају. Само тада велики број шупљина емитора прелази из њега у базу и из базе у колектор. Такође напони на бази, колектору у емитору су другачији. Тада емитор треба да је на највећем потенцијалу, база на мало нижем а колектор на најнижем јер шупљине иду од већег потенцијала ка мањем.

КАРАКТЕРИСТИКЕ БИПОЛАРНИХ ТРАНЗИСТОРА

Карактеристике које ће мо овдје посматрати су мали дио свих могућих карактеристика транзистора. Такође само ће се посматрати везивање транзистора са заједничким емитором када је BE улаз а CE излаз.

Улазна струјно-напонска карактеристика биполарних транзистора

Показује зависност струје базе I_B од напона U_{BE} . Ово је више мање карактеристика диоде у директном режиму рада. Показује да нам је потребан одређен напон U_{BE} да би се јавила струја базе и транзистор имао шансу да ради.



Излазна струјно-напонска карактеристика биполарних транзистора

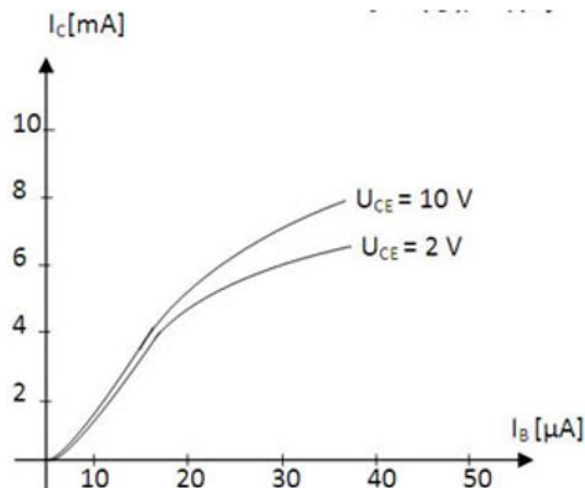
Ова карактеристика показује зависност струје колектора I_C од напона U_{CE} (на слици V_{CE}^1). Као што се са графика види, док је потребно одређено U_{CE} како би транзистор функционисао, само I_C већином зависи од I_B и тиме од U_{BE} . Ово значи да веома малим U_{BE} и I_B (I_B је обично 100-300 пута мање од I_C) контролишемо много веће I_C . Другим ријечима, струја I_C је струја I_B појачана 100-300 пута од стране

¹ Американци веома ријетко напоне означавају са U. Штавише када причају о разлици потенцијала они то називају *voltage* (волтажа) и такође је обиљежавају са V. Амерички начин гледања кола претпостави да је једна тачка на 0V (уземљење) и онда сваки напон гледа у односу на ту тачку. У овом случају тачка на 0V потенцијалу би био емитор.

транзистора.

Преносна карактеристика биполарних транзистора

Ова карактеристика дефинитивно показује директну повезаност улазне струје базе и излазне струје колектора. Треба примјетити да зависност I_C од I_B је линеарна само у једном дијелу графика. Овај линеарни дио је веома важан за једну од примјена биполарних транзистора.



ПРИМЈЕНА БИПОЛАРНИХ ТРАНЗИСТОРА

Биполарни транзистори се највише користе за двије сврхе:

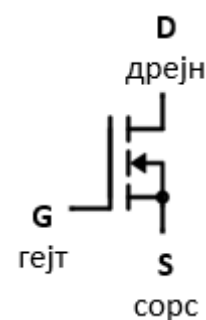
- **прекидачка:** Користи се чињеница да преко напона U_{BE} може упалити или угасити струја I_C . Према томе U_{BE} је прекидач за струју I_C којим се може веома малим напонам палити и гасити већа струја.
- **појачивачка:** Користи се чињеница да постоји област у којој је I_C линеарно зависно од I_B за појачавање промјенљиве струје на I_B . Најједноставнија врста појачала се може направити са једним транзистором користећи овај ефекат.

3.8. MOSFET транзистори

MOSFET транзистори су подскуп FET транзистора и најчешће коришћена врста FET транзистора. FET транзистори раде на принципу коришћења ефекта електричног поља како би уклонили или направили проводни канал кроз транзистор.

MOSFET транзистори се дијеле на два начина. По томе када је настао канал на: MOSFET транзисторе са уграђеним каналом и MOSFET транзисторе са индукованим каналом. Према томе какве је врсте канал на: P каналне и N каналне.

Без обзира на тип, сви FET транзистори имају три прикључка: сорс (S), дрејн (D) и гејт (G). Напоном на гејту се контролише струја између дрејна и сорса. За разлику од биполарних транзистора веома често нема превелике разлике између дрејн и сорс прикључака. Слика 33 приказује један од симбола за MOSFET транзисторе и распоред прикључака.



Слика 33 Симбол N каналног MOSFET транзистора са индукованим каналом.

MOSFET транзистори се најчешће користе у интегрисаним колима.

	Са уграђеним каналом	Са индукованим каналом
N-канални		
P-канални		

MOSFET са ИНДУКОВАНИМ КАНАЛОМ

Слика 35-а приказује структуру MOSFET канала са индукованим каналом N типа прије него што је MOSFET прикључен у коло.

Ова врста MOSFET транзистора се прави тако што се у полупроводник P типа (*substrate*) допирају двије области јако допираног N типа. Висока допираност је обиљежена са +. На површини ових области се направе контакти за сорс (S) и дрејн (D).

На површини блока полупроводника између контаката S и D оксидизује се силицијум и направи се слој силицијум оксида (SiO_2) и на њему се направи контакт за гејт. SiO_2 је изолатор за разлику од чистог силицијума и тиме је гејт изолован од остатка транзистора.

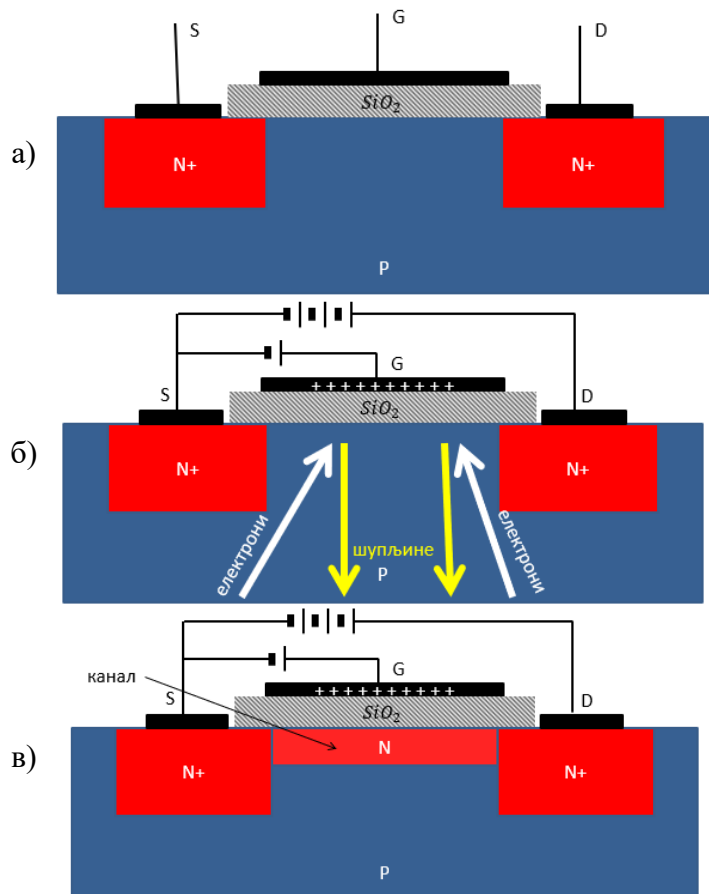
Примјетити да ако вежемо батерију између S и D струја неће моћи да протече јер нису сви PN спојеви на путу директно поларисани. Стога треба формирати канал између дрејна и сорса како би кроз њега текла струја.

Ради формирања канала на гејт код N каналног MOSFET са индукованим каналом се доводи позитиван потенцијал као што је приказано на Слика 35-б. Због позитивног потенцијала на гејсту се гомилају позитивна наелектрисања која не могу прећи у транзистор због оксида силицијума. Ова позитивна наелектрисања привлаче електроне (-) и одбијају шупљине. Област одмах испод силицијум оксида почиње да има слободне електроне као већинске носиоце наелектрисања а шупљине постају у мањини. На тај начин конвертујемо P-тип испод оксида у N-тип полупроводника.

Слика 35-в приказује MOSFET након формирања ове нове области N-типа, која представља својеврсни **канал** између дрејна и сорса. Струја сада може да тече између сорса и дрејна кроз овај канал и зависи од његове ширине што зависи од тога колики је напон на гејту. Што је U_{GS} позитивније, то се привлачи више слободних електрона и канал постаје шири. Ако нема напона на гејту или је негативан, канал ће нестати и струја више неће моћи да тече.

Код P каналних MOSFET са индукованим каналом ситуација је слична као код N каналних само су поларизације обрнуте. Код њих су D и S направљени од P+ типа који је направљен у substrate N типа. Пошто треба формирати канал P типа на гејт се доводи негативан напон и наелектрисања која привлаче шупљине и одбијају слободне електроне.

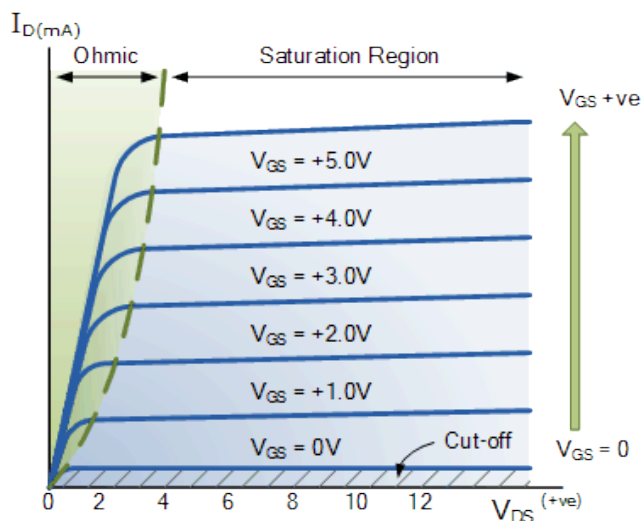
Треба примјетити да пошто струја не тече кроз гејт, струја која уђе у дрејн изаћи ће из сорса. Такође присјетимо се симбола за MOSFET транзисторе са индукованим каналом на Слика 34, они имају три цртице тако да D и S нису спојени. Ово је за разлику од MOSFET са уграђеним



Слика 35 MOSFET N-канални транзистор са индукованим каналом. а) структура б) настанак канала в) канал након индуковања

каналом гдје су ове цртице спојене у линију. На овај начин симбол говори да транзистори са индукованим каналом немају канал који везује D и S, док код уграђених тај канал постоји од почетка.

Излазна карактеристика MOSFET транзистора са индукованим каналом



Слика 36 Излазна карактеристика N каналног MOSFET са индукованим каналом

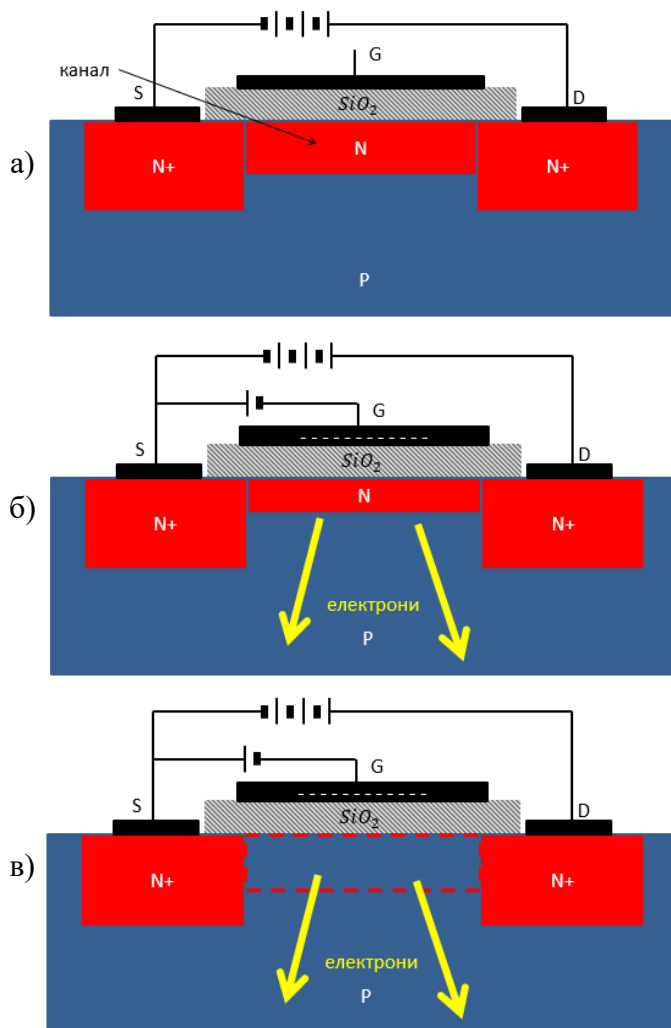
Структура је готово идентична случају када имамо MOSFET са индукованим каналом само што сада транзистор долази из фабрике са већ уграђеним каналом између D и S. Стога ако доведемо напон на D и S као на Слика 37-а, и не доведемо напон на гејт, струја ће протећи кроз транзистор због постојања канала.

Слика 37-б приказује шта се дешава код N каналног ако доведемо негативан потенцијал на гејт. Негативна наелектрисања на гејту одбијају слободне електроне из канала и привлаче шупљине. Због овога канал се сужава и тиме се смањује струја која тече кроз транзистор. Ако напон на гејту постане довољно велики (у негативну страну у случају N канала) канал може бити у потпуности угашен као на Слика 37-в. Без канала струја не може да тече између дрејна и сорса.

Уколико би код N каналног довели позитиван напон на гејт, ово би привукло слободне електроне и тиме би се канал и струја која кроз њега тече повећали.

Излазна карактеристика као код биполарних транзистора показује зависност од излазне струје I_D од напона U_{DS}^2 . На графику се јасно види да струја I_D не зависи од U_{DS} (осим што је потребан минималан напон да струја почне да тече већ зависи од напона на гејту U_{GS} . Види се да је у питању N канални транзистор јер струја расте што је више позитиван гејт. Карактеристика P каналног транзистора би била иста N каналној само би U_{GS} било негативно.

MOSFET СА УГРАЂЕНИМ КАНАЛОМ



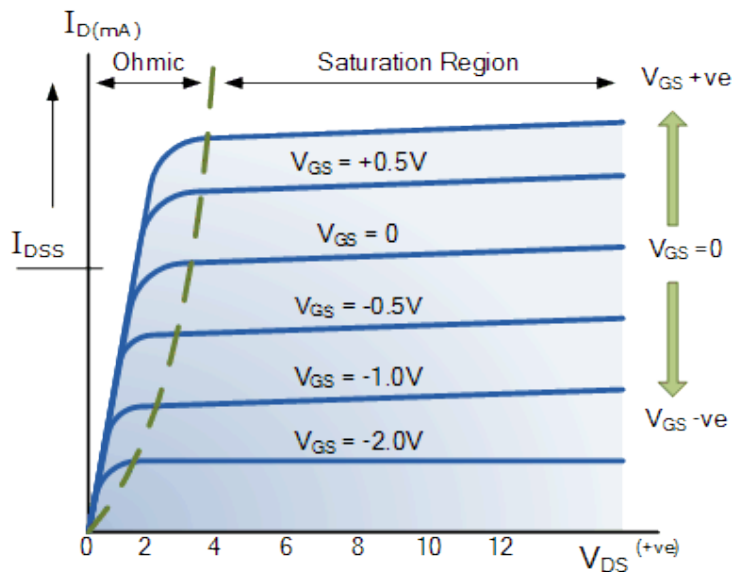
Слика 37 MOSFET N-канални транзистор са уграђеним каналом. а) структура б) смањење канала в) нестанак канала

² Опет Американци обиљежавају напон са V уместо U.

Код Р каналног је готово све исто само су типови полупроводника и поларитети напона обратни. Р канални MOSFET са уграђеним каналом се гаси довољно високим позитивним напонам који одбија позитивне шупљине из Р канала. Струја кроз канал се повећава довођењем негативног напона на гејт.

Излазна карактеристика MOSFET транзистора са уграђеним каналом

График на Слика 38 пореди исте ствари као и график на Слика 36. Са графика се очигледно види да и у овом случају струја дрејна зависи највише од напона на гејту. Такође се јасно види да струја није нула ако је напон на гејту нула, за разлику од MOSFET са индукованим каналом. Пошто је у питању карактеристика N каналног MOSFETA, струја расте што је напон на гејту позитивнији и опада са негативним напонам.



Слика 38 Излазна карактеристика N каналног MOSFET са уграђеном каналом

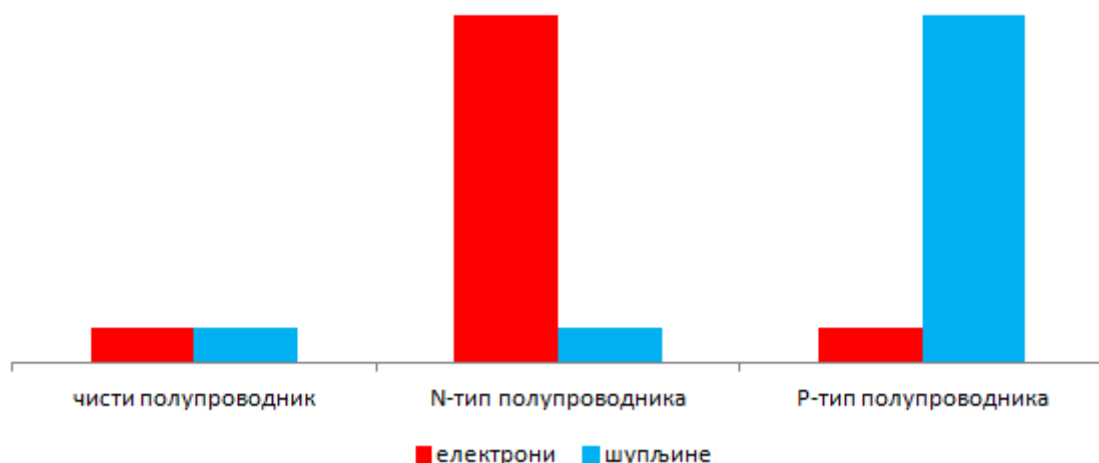
Карактеристика Р каналног MOSFET са уграђеним каналом би била готово идентична, само би знакови напона на гејту били обрнути јер код њега струја расте са што негативнијим напонам и гаси се довољно великим позитивним напонам.

3.9. Питања за прелазну оцјену

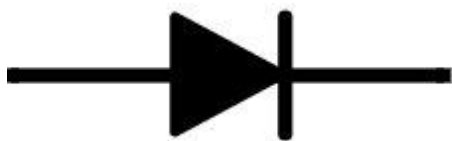
По чему и како се разликују Р и N типови полупроводника једни од других и од чистог полупроводника.

Р и N типови посједују знатно већи број носилаца наелектрисања (шупљина и електрона) од чистог полупроводника и стога имају значајно мањи отпор. Р и N типови се разликују по томе којих носилаца наелектрисања има највише у њима. Код N типа много више има слободних електрона (електрони су негативни => N) док код Р типа је обротно и доминантне су шупљине (шупљине настају отпуштањем електрона => атом постаје позитиван јон => позитиван => P).

Концентрација слободних наелектрисања



Шта је диода? Који јој је симбол у колу?



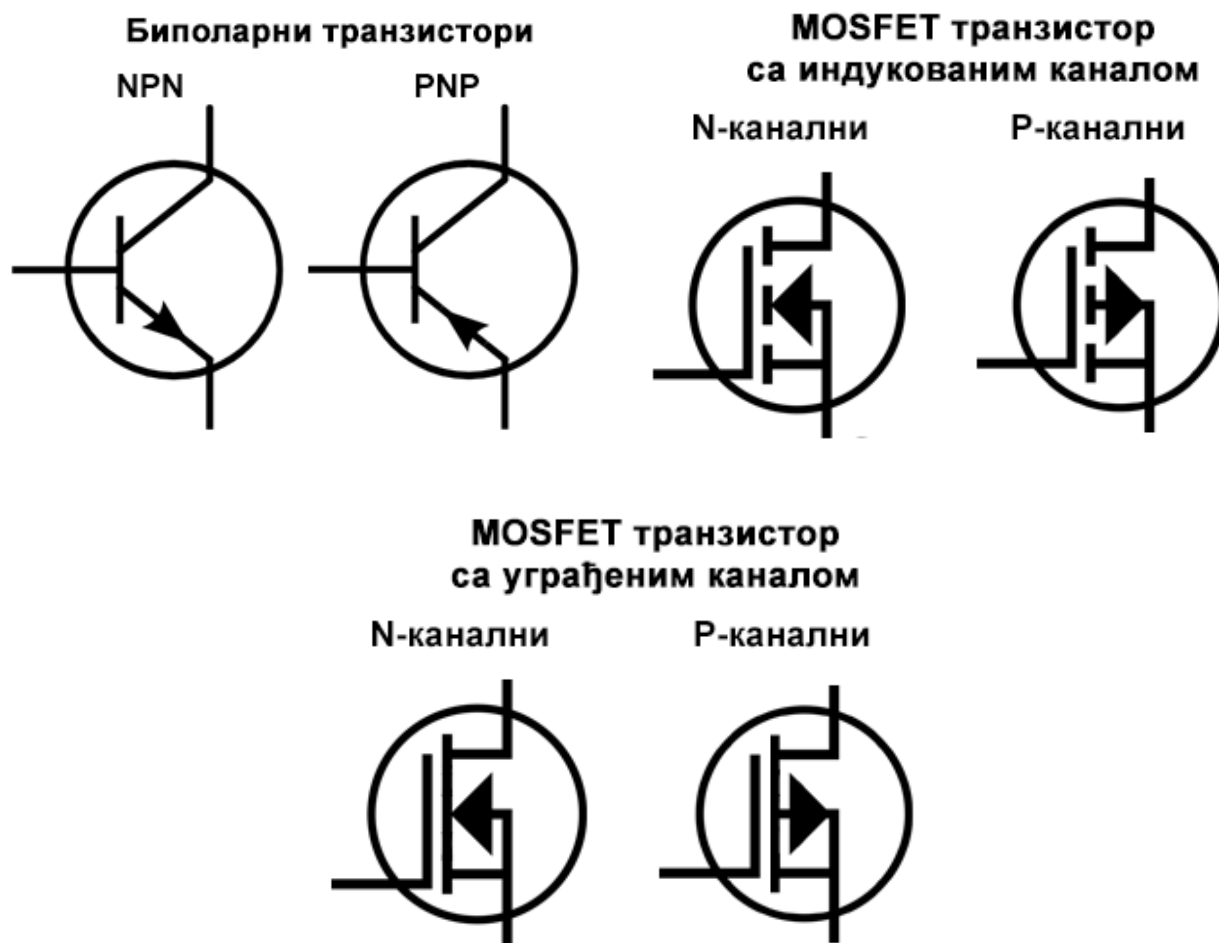
Диода је полупроводничка компонента састављена од једног PN споја. Симбол у колу је на слици. Анода је P страна диоде док је катода N страна.

Када диода проводи а када не?

Диода може провести струју само ако је P страна (+) на већем потенцијалу од N стране (-). Ово називамо директном поларизацијом. То јесте ако је анода на већем потенцијалу од катоде. Уколико нема напона или је потенцијал обрatan (+ на N а – на P) кроз диоду струја не може проћи. Ово је инверзна поларизација. Стога струја само може да тече у правцу стријелице у симболу диоде.

Симболи транзистора:

(круг око транзистора није обавезан и само означава да је транзистор самосталан у својој кутији)



Конектори транзистора:

Код биполарних транзистора три излаза транзистора називамо (и означавамо): база (B), колектор (C) и емитор (E). База је средњи конектор, док се емитор обиљечава стријелицом.

Код FET транзистора улази се називају (и означавају са) гејт (G), дрејн (D) и сорс (S). Гејт је средњи конектор, слично бази код биполарних транзистора. Дрејн и сорс су функционално готово идентични. Код MOSFET-а сорс има на себи стријелицу.

Од чега зависи струја колектора?

Струја колектора скоро у потпуности зависи од струје базе или напона база-емитор. Потребан је напон колектор-емитор одређене поларизације али након што се то стекне, да ли тече струја колектора зависи само од напона база-емитор. Ако је база-емитор спој директно поларисан (код NPN транзистора база (P) мора бити на већем потенцијалу док код PNP база (N) треба бити на мањем потенцијалу) струја колектора тече. Ако је база-емитор инверзно поларисан струја колектора не тече. Сам интензитет струје колектора зависи од струје базе.

Каква је струја гејта код MOSFET транзистора?

Струја базе код њих је нула јер је гејт физички изолован од остатка транзистора. Тако да рад транзистора зависи само од напона.

Како се понашају MOSFET транзистори када је напон на гејту 0?

Код MOSFET транзистора са индукованим каналом без напона на гејту нема канала те они не проводе. Канал се индукује довођењем напона правилног знака на гејт.

Код MOSFET транзистора са уграђеним каналом, канал је фабрички уграђен у транзистор те он проводи и без напона на гејту. Довођењем напона правилне поларизације на гејт канал се може угасити и транзистор ће престати да проводи.

Које су најчешће сврхе употребе транзистора?

Транзистори (биполарни и FET) се најчешће користе као:

- Прекидачи јер струјом базе или напоном гејта можемо прекинути или отворити ток струје од колектора до емитора или дрејна ка сорсу.
- Појачивачи јер струја колектора или дрејна директно сразмјерна малој струји базе или малим напоном гејта.