

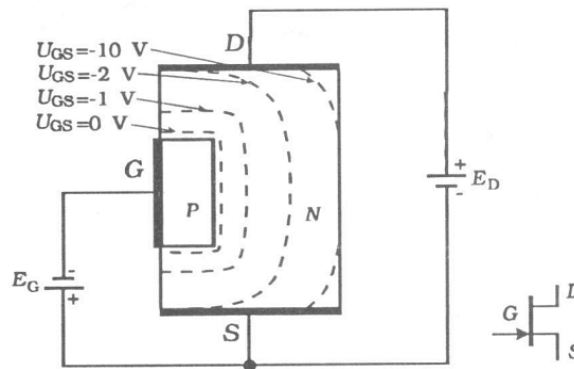
4. TRANZISTORI SA EFEKTOM POLJA

4.1. Spojni tranzistori sa efektom polja (FET)

Kod tranzistora sa efektom polja proticanje struje se kontroliše pomoću električnog polja koje stvara priključeni napon na upravljačkoj elektrodi. Originalni naziv za ovu vrstu tranzistora na engleskom jeziku je *Field Effect Transistor*, koji se često piše skraćeno FET.

Presek FET-a prikazan je na slici 4.1. Ima provodni kanal N-tipa na kojeg su priključene dve elektrode, koje se nazivaju sorsa i drejn. Ima kontrolnu oblast P-tipa, koja je direktno spojena sa kanalom N-tipa, pa odatle potiče naziv spojni, na nju je priključena elektroda koja se zove gejta.

Između drejna i sorsa priključen je napon E_D , a između sorsa i gejta napon E_G .

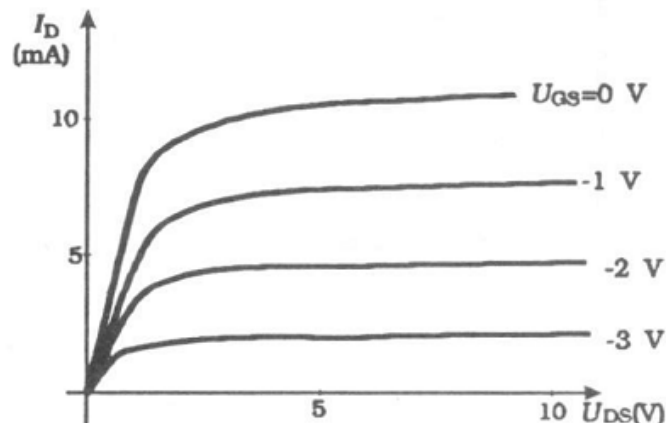


Slika 4.1. Struktura FET-a i simbol

Ukoliko je napon E_G jednak nuli nema polja kroz kanal. Kanal je širok i FET se ponaša kao mala otpornost, može doći do proticanja veće struje. Sa porastom napona E_G , u negativnom smeru, polje se širi i potiskuje elektrone kroz kanal feta, usled čega dolazi do sužavanja kanala i povećanja otpornosti odnosno smanjenja struje. Pri dovoljno velikom naponu na gejtju fet prestaje da provodi.

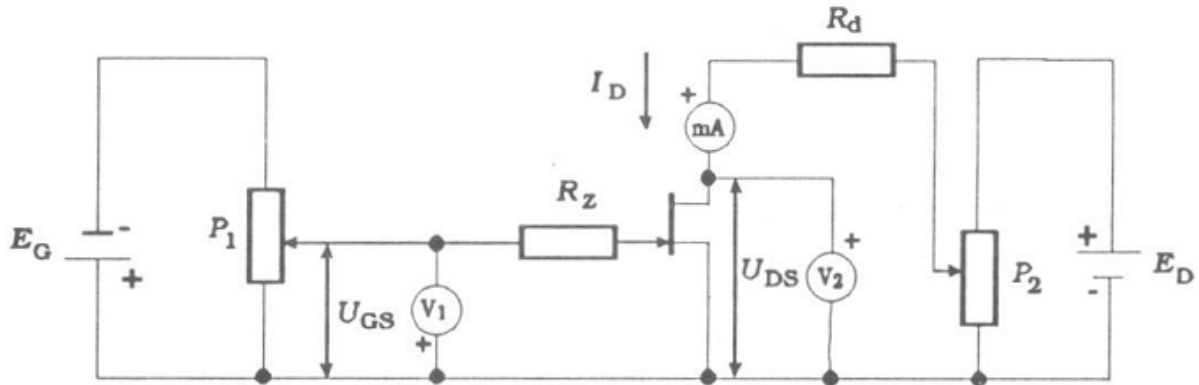
Kod povećanja napona U_{DS} , pri konstantnom naponu U_{GS} , dolazi do porasta struje kroz kanal. Pri malim naponima struja naglo raste, dok sa daljim povećanjem napona U_{DS} struja sporije raste. Ovo se dešava zbog toga što se formira polje oko P-oblasti unutar kanala koje se širi i sužava kanal a samim tim povećava otpornost kanala.

Na slici 4.2. date su familije izlaznih karakteristika FET-a za različite vrednosti napona U_{GS} .



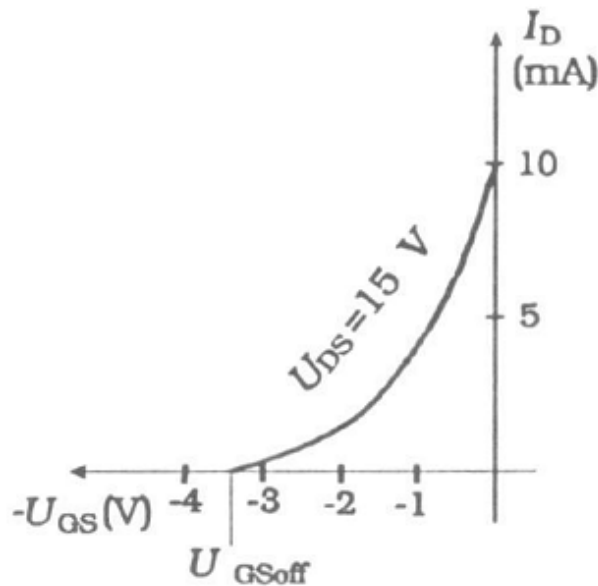
Slika 4.2. Familija izlaznih karakteristika FET-a

Snimanje karakteristike FET-a mogu da se obave pomoću kola sa slike 4.3. Izvor E_G daje napon koji je negativan u odnosu na masu. Vrednost negativnog napona U_{GS} se podešava potenciometrom P_1 . Otpornik R_Z služi za zaštitu od pogrešnog uključanja. Napon U_{DS} se podešava potenciometrom P_2 . Otpornik R_D služi za zaštitu izlaznog kola od pogrešnog uključanja.



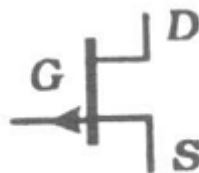
Slika 4.3. Kolo za snimanje karakteristika FET-a

Kod FET-a postoji i prenosna karakteristika, gde je napon između gejta i sorsa ulazna promenljiva a zavisno promenljiva je struja drena kroz kanal. Jedna prenosna karakteristika data je na slici 4.4.



Slika 4.4. Prenosna karakteristika FET-a

Pored opisanog N-kanalnog FET-a postoji takođe P-kanalni, kod kojeg je kanal od poluprovodnika P-tipa a gejtt od N-tipa. Svi naponi i struje imaju smer suprotan smeru N-kanalnog feta. Ređe se proizvode od N-kanalnog. Njegov simbol je prikazan an slici 4.5.



Slika 4.5. Simbol P-kanalnog FET-a

4.2. Fetovi sa izolovanim gejtom (MOSFET)

Pored tranzistora sa efektom polja postoje i tranzistori sa efektom polja sa izolovanim gejtom, koje često nazivamo MOSFET. Naziv MOSFET potiče od engleske skraćenice *Metal Oxide Semiconductor*, što znači metal- oksid – poluprovodnik.

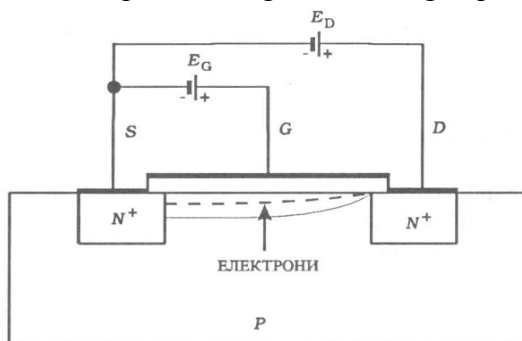
Postoje dve vrste MOSFET-ova: sa indukovanim i ugrađenim kanalom.

MOSFET sa indukovanim kanalom normalno ne sadrži provodni kanal kada je napon na gejtu jednak nuli. Priključivanjem odgovarajućeg napona na gejtu obrazuje se kanal i struja može da teče.

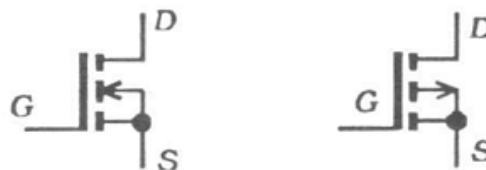
Na slici 4.6. prikazana je unutrašnja struktura MOSFET-a sa indukovanim kanalom N-tipa, sa odgovarajućim naponima napajanja.

Ako je napon E_G jednak nuli elektroni ne mogu da se kreću od sorsa ka drejna jer se između njih nalazi P-oblast.

Ako se napon na getu poviši u pozitivnom smeru, dolazi do formiranja kanala na površini poluprovodnika. Pozitivni potencijal na gejtu privlači elektrone, koji se gomilaju na površini poluprovodnika. Ovaj sloj elektrona omogućava kretanje elektrona od sorsa ka drejnu, tj predstavlja naknadno formirani (indukovani) kanal. Do formiranja kanala ne dolazi odmah, već posle nekog minimalnog napona, kojeg nazivamo prag provođenja.

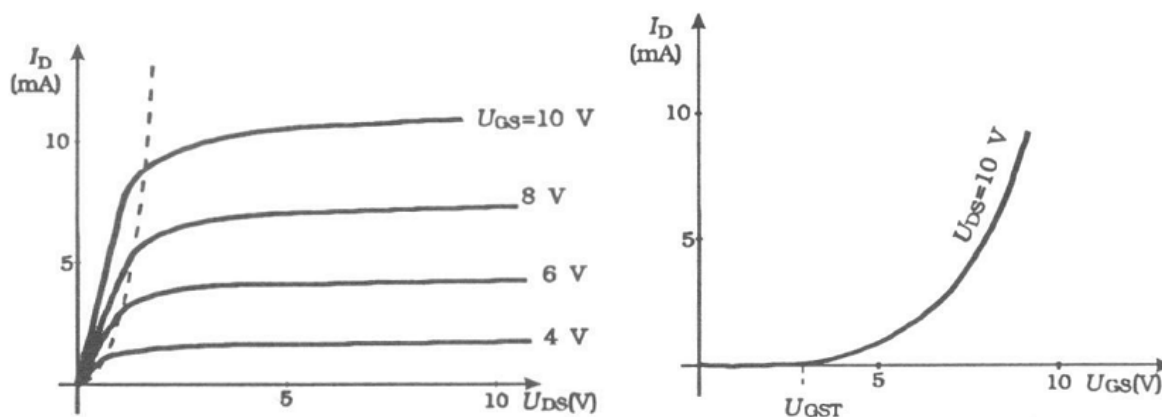


Slika 4.6. Presek MOSFeta N-tipa



Slika 4.7. Simbol MOSFET-a N-tipa levo, P-tipa desno

U utaljenom režimu struja gejta jednaka je nuli $I_G=0$. U skladu sa tim, može se govoriti samo o prenosnoj i izlaznoj karakteristici. Izlazne i prenosne karakteristike MOSFET-a sa indukovanim kanalom N-tipa date su na slici 4.8.

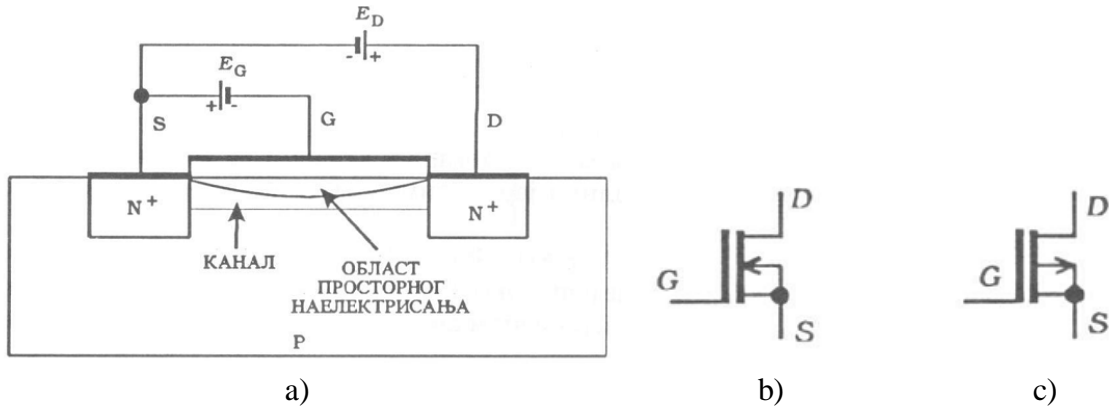


Slika 4.8. Izlazna (levo) i prenosna (desno) karakteristika MOSFET-a sa indukovanim kanalom N-tipa

MOSFET sa ugrađenim kanalom sadrži provodni kanal i kada je napon na gejtju jednak nuli. Napon na gejtju može da se menja i u pozitivnom i negativnom smeru čineći kanal više ili manje provodnim.

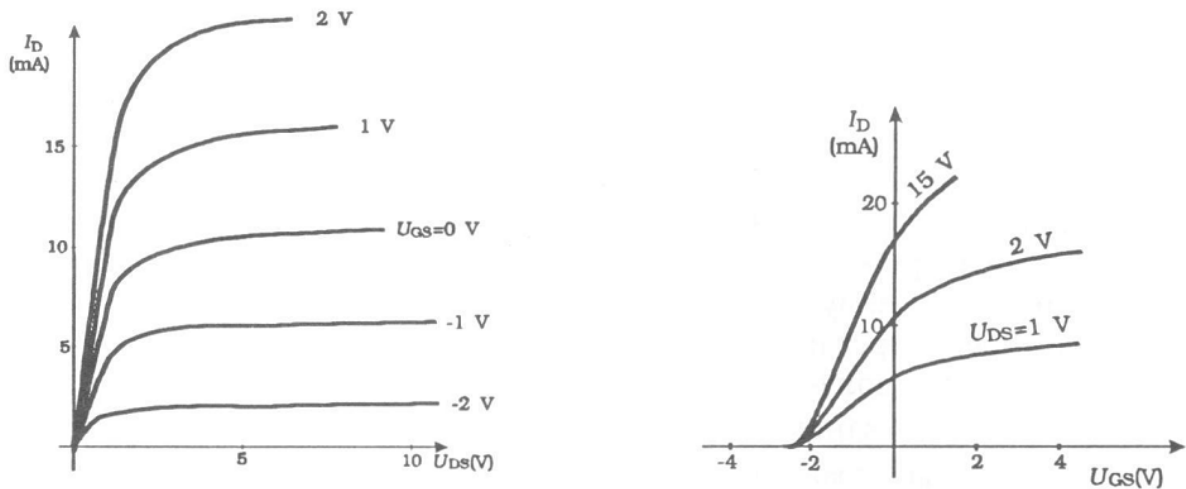
Princip rada ovog MOSfeta se zasniva na kombinaciji FET-a i MOSfeta sa indukovanim kanalom.

Struktura i simbol MOSFET-a sa ugrađenim kanalom dati su na slici 4.9.



Slika 4.9. MOSFET sa ugrađenim kanalom a) struktura, b) simbol N-tipa, c) simbol P-tipa

Izlazne i prenosna karakteristika MOSFET-a sa ugrađenim kanalom N-tipa date su na slici 4.10. Kao što se vidi sa slike 4.10. MOSFET sa ugrađenim kanalom radi i pri pozitivnom i negativnom naponu U_{GS} .



Slika 4.10. Izlazna (levo) i prenosna (desno) karakteristika MOSFET-a sa ugrađenim kanalom N-tipa

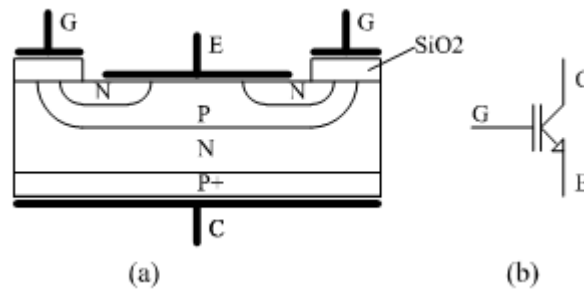
Osnovni tehnički podaci u vezi mosfetova su granice oblasti sigurnog rada (BV_{GS} , BV_{DS} , I_{Dmax} , P_{Dmax}) i parametri modela (V_P odnosno V_T , I_{DSS} odnosno K , a za male signale g_m). Kod većine diskretnih mosfet-ova prag otvaranja (V_T) je standardizovan, spada u opseg od 2V do 4V, a kod jedne manje grupe (takozvani logic level tipovi) je između 1V i 2V.

Mosfet-ovi se prave za razne snage. Za manje snage ($P_{Dmax} \leq 1W$) koristi se kućište TO-92 ili neka od kućišta za površinsku montažu. Za veće snage karakteristično je plastično kućište TO-220 i TO-247, metalno kućište TO-3 i razni moduli. Veliki broj mosfet-ova se koristi u integrisanoj tehnici za neka analogna kola ali su mnogobrojne digitalne primene.

4.3. IGBT

IGBT-i su elementi energetske elektronike koji čine prelaz između bipolarnih tranzistora i mosfetova. Sam naziv IGBT (**I**nulated **G**ate **B**ipolar **T**ransistor – bipolarni tranzistor sa izolovanim gejtom) upućuje na srodstvo sa bipolarnim tranzistorom. Značajna je sličnost da glavnu struju čine obe vrste nosilaca (elektroni i šupljine).

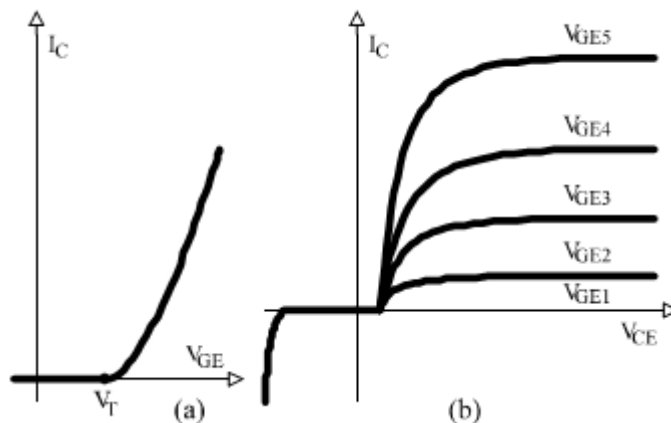
Po strukturi IGBT jako liči na vertikalni mosfet samo je sa strane kolektora (C) dodat jedan jako dopiran P+ sloj (slika 4.11.a). stvarne komponente dobijaju se paralelnim spajanjem velikog broja ovakvih ćelija. Grafički simbol IGBT-a prikazan je na slici 4.11.b.



Slika 4.11. a) struktura i b) grafički simbol IGBT-a

Otvaranje kanala i pokretanje glavne struje je omogućeno pozitivnom polarizacijom gejta (G): u P sloju ispod gejta formira se kanal N tipa. Nakon pokretanja struje elektrona iz emitora (E) preko kanala, iz P+ oblasti krene velika količina šupljina u sredinu N oblasti i smanjuje joj otpornost. Sa jedne strane prisustvo šupljina smanjuje gubitke koje se javljaju u uključenom stanju ali nažalost ujedno usporava i isključenje IGBT-a.

Slično kao i kod mosfeta, i kod IGBT-a je upravljačka elektroda (gejt) izolovana od kanala tako da u ustaljenom režimu važi $I_G=0$. U skladu sa tim, može se govoriti samo o prenosnoj i izlaznoj karakteristici. Tipični diagrami tih karakteristika dati su na slici 4.12.

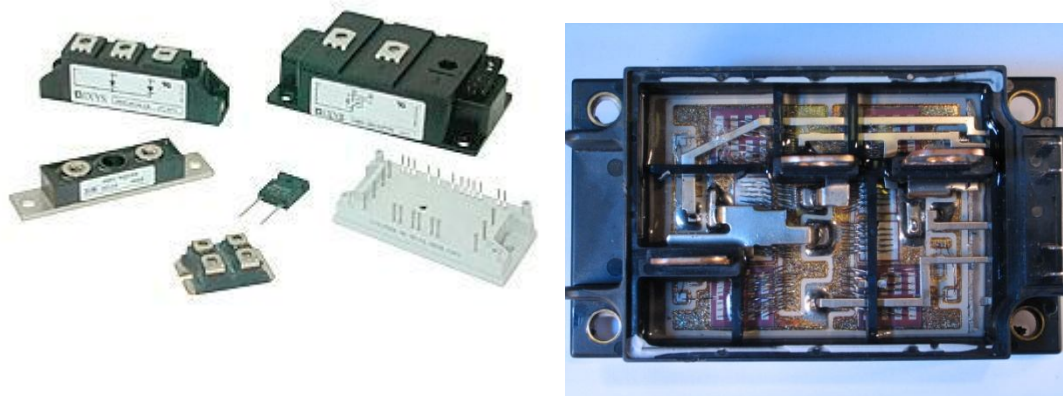


Slika 4.12. a) prenosna i b) izlazna karakteristika IGBT-a

IGBT-e skoro isključivo koristimo u prekidačkom režimu. U uključenom režimu radna tačka se nalazi u blizini ose I_C , pad napona je $V_{CE}=V_{CEsat}=2V...5V$. i isključenom stanju radna tačka je praktično na osi V_{CE} . Ako se dovede $V_{CE}<0$, već kod nekoliko volti dolazi do proboja. Proboj može da se desi i pri pozitivnom naponu V_{CE} ali pri daleko većem naponu.

Prenosna karakteristika je slična prenosnoj karakteristici mosfeta sa indukovanim kanalom, smo što je prag V_T veći između 4V i 8V.

Oblast sigurnog rada kod IGBT-a je ograničen probojnim naponom (BV_{GE} , BV_{CE}), maksimalnom strujom (I_{Cmax}) i maksimalnom snagom gubitaka (P_{Dmax}). Najvažniji parametri modela su napon zasićenja V_{CEsat} i prag provođenja V_T .



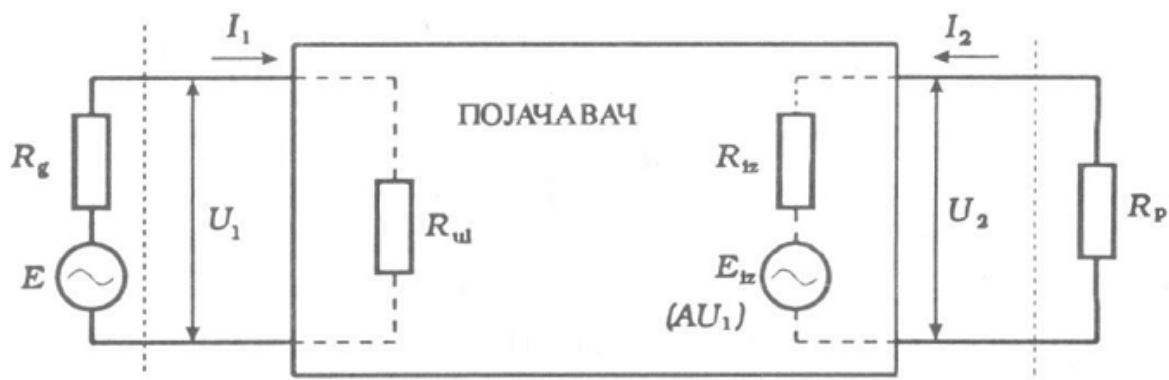
Slika 4.13. IGBT

5. POJAČAVAČI

5.1. Opšte osobine pojačavača

Pojačavač je elektronsko kolo na čijem ulazu se dovodi neki signal i na njegovom izlazu se dobija signal istog oblika, ali veće vrednosti. Na primer, na ulaz pojačavača se dovodi naizmeničan napon 1 mV, a na njegovom izlazu se dobija takođe naizmeničan napon istog oblika od 100 mV.

U elektrotehnici se često neko kolo posmatra kao četvoropol. Četvoropol je kolo koje ima četiri kraja: dva ulazna i dva izlazna kao na slici 5.1.



Slika 5.1. Tranzistor kao linearan četvoropol

Pojačavač služi za pojačanje napona, struje ili snage. U izrazima za pojačanje postoje veličine U_1 , U_2 , I_1 , I_2 , P_1 , itd. Sve ove veličine su naizmenične i treba ih posmatrati kao male promene jednosmernih veličina.

Pojačanje napona A_u definiše se kao količnik izlaznog i ulaznog napona:

$$A_u = \frac{U_2}{U_1} \quad [5.1]$$

Pojačanje struje A_i se definiše na sličan način:

$$A_i = \frac{I_2}{I_1} \quad [5.2]$$

Ulazna otpornost je R_{ul} je otpornost između ulaznih krajeva. Definiše se kao količnik ulaznog napona i struje:

$$R_{ul} = \frac{U_1}{I_1} \quad [5.3]$$

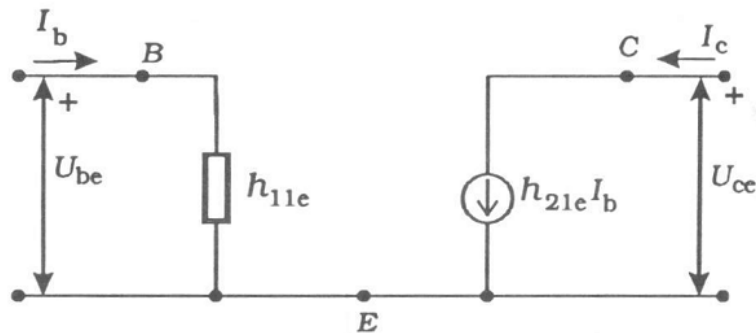
Izlazna otpornost R_{iz} se definiše kao količnik izlaznog napona praznog hoda U_0 (kad potrošač nije priključen) i izlazne struje kratkog spoja I_{KS} (kada se izlazni krajevi kratko spoje):

$$R_{iz} = \frac{U_0}{I_{KS}} \quad [5.4]$$

5.2. Pojačavači sa bipolarnim tranzistorom

Bipolarni tranzistor, osim u prekidačkom režimu, se najčešće koristi u kolima za pojačavanje napona, struje ili snage. Postoje mnogobrojna kola sa bipolarnim tranzistorima koja služe kao pojačavači, mi ćemo obraditi samo neka od njih. U okviru ovog poglavlja daćemo osnovne parametre pojačavača.

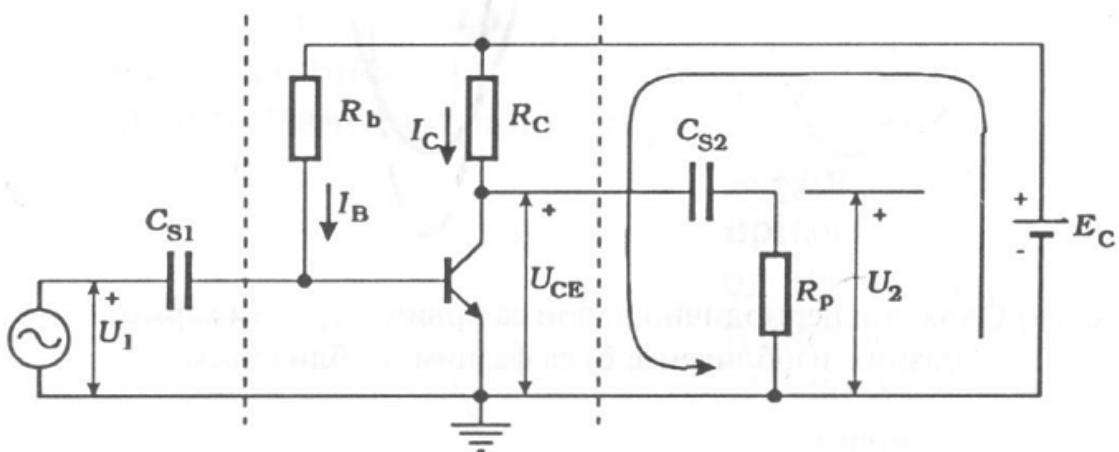
Tranzistori, kao i drugi poluprovodnički elementi, su nelinearne komponente. Međutim kod pojačanja malih naizmeničnih signala, ove elemente, možemo predstaviti linearnim četvoropolom. Ekvivalentna šema tranzistora za male signale data je na slici 5.2.



Slika 5.2. Uprošćena šema tranzistora sa h parametrima za male signale

5.2.1. Pojačavač sa zajedničkim emitorom – radna tačka

Da bi tranzistor mogao da radi kao pojačavač neophodno je da mu PN spojevi budu pravilno polarisani. PN spoj baza – emitor treba da bude propusno polarisan, a spoj između baze i kolektora inverzno. Na slici 5.3. prikazan je pojačavač sa zajedničkim emitorom kod kog je polarizacija oba PN spoja izvedena primenom jednog izvora koji obeležavamo sa E_C .



Slika 5.3 pojačavač sa zajedničkim emitetom

Otpornik R_b služi da se pomoću njega odredi jednosmerna struja baze I_B . Struja baze teče od pozitivnog kraja izvora E_C kroz otpornik R_b i spoja baza-emitor tranzistora na masu. Jednosmerna struja baze data je jednačinom:

$$I_B = \frac{E_C - U_{BE}}{R_b} \approx \frac{E_C}{R_b}$$

[5.5]

napon U_{BE} je 0,7V i možemo ga zanemariti u odnosu na napon izvora E_C .

Preko otpornika R_C na kolektor se dovodi pozitivan napon iz izvora E_C . Inače otpornik R_C služi za dobijanje izlaznog naizmeničnog napona U_2 .

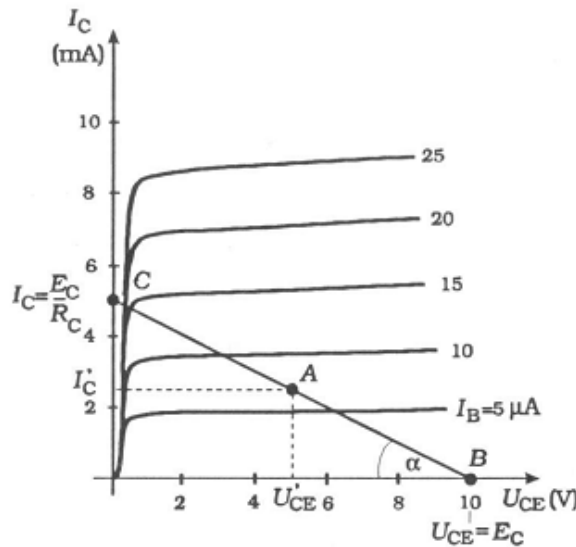
Za označenu konturu na slici 5.3. se može napisati drugim Kirhofov zakon:

$$E_C - I_C R_C - U_{CE} = 0$$

[5.6]

Jednačina 5.6. predstavlja jednačinu prave, koja se može nacrtati uz pomoć dve tačke. Prva tačka je kada je struja I_C jednaka nuli i nalazi se na horizontalnoj osi. U ovom slučaju na osnovu jednačine 5.6 dobijamo da je $U_{CE} = E_C$. (slika 5.4.).

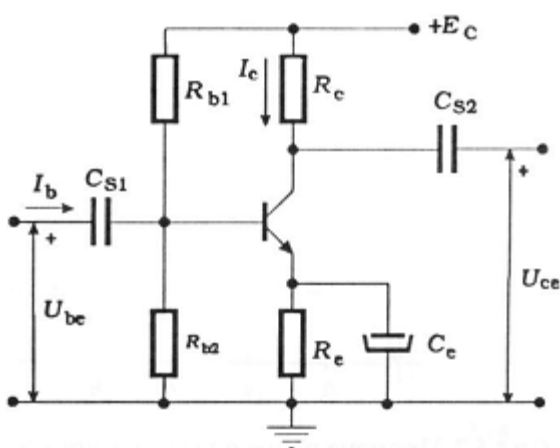
Druga tačka se dobija ako u jednačinu 5.6. uvstimo za $U_{CE} = 0$, i nalazi se na vertikalnoj osi. Sada je $I_C = \frac{E_C}{R_C}$



Slika 5.4. Radna prava i radna tačka

Radna tačka, u većini slučajeva, se postavlja na sredinu radne prave. U ovom delu tranzistor ima linearnu karakteristiku. Izuzetak ovome je kada se tranzistor koristi kao prekidač, što je već obrađeno u poglavlju 3.8.

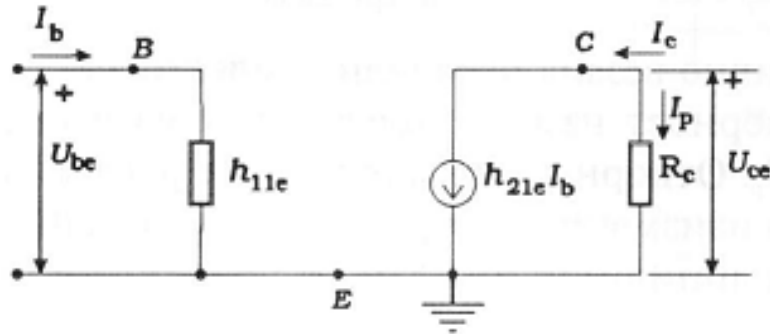
5.2.2. Pojačavač sa zajedničkim emitorom – izrazi za pojačanje



Slika 5.5. Pojačavač sa zajedničkim emitorom

Na slici 5.5. prikazan je tranzistorski pojačavač sa stabilizacijom radne tačke. Elementi ovog pojačavača, koji služe za stabilizaciju radne tačke, ne utiču na rad tranzistorskog pojačavača kod pojačanja naizmeničnog napona. Otpornosti R_{b1} i R_{b2} su znatno veće od ulazne otpornosti tranzistora, pošto su vezane paralelno možemo ih zanemariti. Naizmenična struja kroz otpornik R_e je jednaka nuli jer je paralelno sa otpornikom vezan kondenzator C_e (koji se ponaša kao kratak spoj za naizmeničnu struju)

Ako se ekvivalentnoj šemi tranzistora sa h parametrima doda otpornik R_c , elementi R_{b1} , R_{b2} , R_e , C_e i izvor E_C se izostavljaju jer ne utiču na naizmenični signal, dobija se ekvivalentna šema pojačavača sa zajedničkim emitorom kao na slici 5.6.



Slika 5.6. Ekvivalentna šema pojačavača sa zajedničkim emitorom

Na osnovu ekvivalentne šeme moguće je odrediti sve parametre pojačavača, naponsko pojačanje, strujno pojačanje, ulazu i izlaznu otpornost.

Naponsko pojačanje na osnovu jednačine 5.1 je jednako:

$$A_u = \frac{U_2}{U_1} = \frac{-h_{21e} I_b R_c}{h_{11e} I_b} = -\frac{h_{21e} R_c}{h_{11e}} \quad [5.7]$$

Strujno pojačanje po definiciji jednačine 5.2. je jednako:

$$A_i = \frac{I_2}{I_1} = \frac{-h_{21e} I_b}{I_b} = -h_{21e} \quad [5.8]$$

Ulazna otpornost je jednaka:

$$R_{ul} = \frac{U_1}{I_1} = \frac{h_{11e} I_b}{I_b} = h_{11e} \quad [5.9]$$

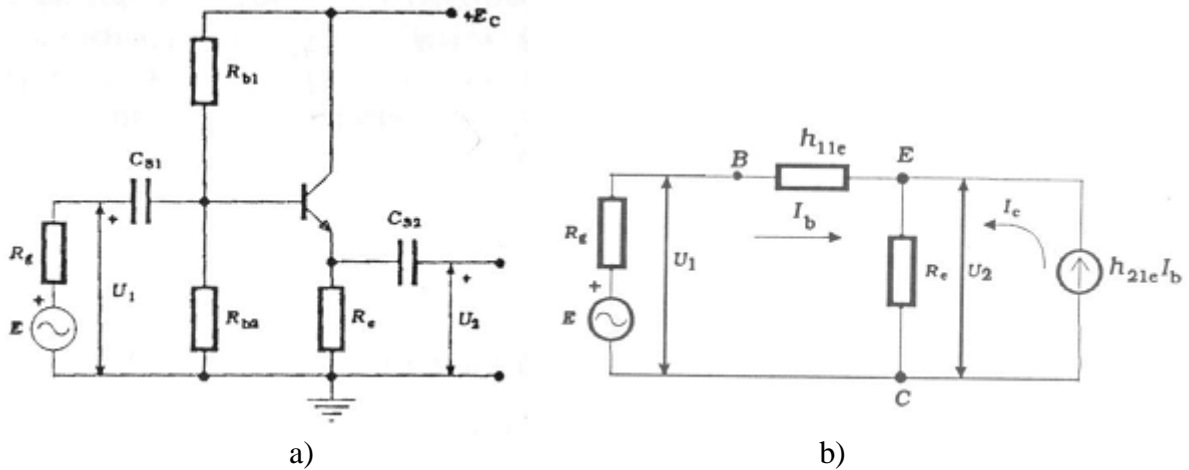
I izlazna otpornost je jednaka:

$$R_{iz} = \frac{U_2}{I_2} = \frac{-h_{21e} I_b R_c}{-h_{21e} I_b} = R_c \quad [5.10]$$

5.2.3. Pojačavač sa zajedničkim kolektorom

Na slici 5.7.a prikazan je pojačavač sa zajedničkim kolektorom. Izlazni napon U_2 se nalazi na otporniku R_e , a na njega može da se priključi potrošač. Slično kao i kod pojačavača sa zajedničkim emitorom otpornike R_{b1} i R_{b2} možemo zanemariti.

Ekvivalentna šema pojačavača sa zajedničkim kolektorom za male signale dat je na slici 5.7.b.



Slika 5.7. Pojačavač sa zajedničkim kolektorom

Naponsko pojačanje ovog pojačavača je jednako:

$$A_u = \frac{U_2}{U_1} = \frac{(h_{21e} + 1)I_b R_e}{h_{11e}I_b + (h_{21e} + 1)I_b R_e} \approx 1 \quad [5.11]$$

pošto je ulazna otpornost tranzistora mala kažemo da je naponsko pojačanje približno jednako jedinici.

Strujno pojačanje je jednako:

$$A_i = \frac{I_2}{I_1} = \frac{h_{21e}I_b}{I_b} = h_{21e} \quad [5.12]$$

Ulazna otpornost je jednaka:

$$R_{ul} = \frac{U_1}{I_1} = \frac{(h_{11e} + h_{21e}R_e)I_b}{I_b} = h_{11e} + h_{21e}R_e \approx h_{21e}R_e \quad [5.13]$$

Izlazna otpornost je jednaka:

$$R_{iz} = \frac{U_o}{I_{cKS}} = \frac{R_g + h_{11e}}{h_{21e}} \quad [5.14]$$

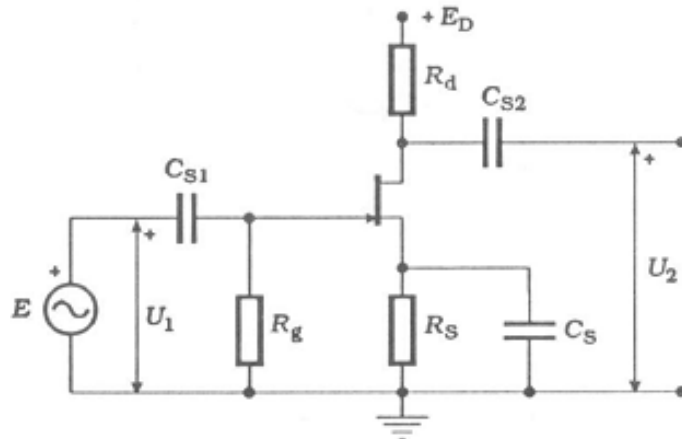
Uopšteno, pojačavač sa zajedničkim kolektorom ima naponsko pojačanje približno jednako jedinici, veliku ulaznu i malu izlaznu otpornost. Često se upotrebljava za prilagođavanje impedanse između dva pojačavačka stepena.

Ovaj pojačavač ima veliko strujno pojačanje pa se koristi i kao pojačavač struje u pojačavačima snage.

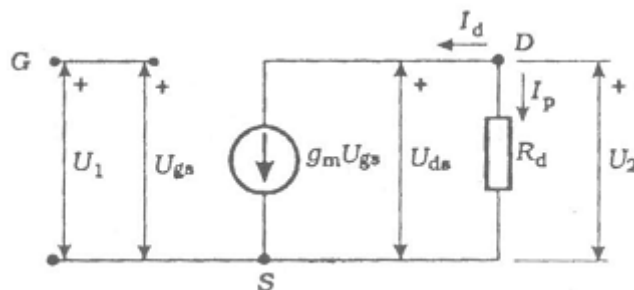
5.3. Pojačavači sa FET-ovima

Pojačavači sa fetom treba da imaju izvore napajanja i definisane jednosmerne veličine koje određuju radnu tačku. Njen položaj je znatno teže definisati i stabilizovati nego kod bipolarnih tranzistora. (u ovom poglavlju neće se obrađivati ta tematika).

Na slici 5.8. prikazan je pojačavač sa zajedničkim sorsom. U ovom kolu otpornik R_s služi za dovijanje automatskog prednapona, koji nam služi za pravilnu polarizaciju feta. Otpornik R_g služi za spajanje gejta sa masom i obično ima veliku otpornost (između $100\text{k}\Omega$ i $10\text{M}\Omega$); njegova otpornost je istovremeno i ulazna otpornost ovog tipa pojačavača, jer je ulazna otpornost praktično beskonačno velika.



Slika 5.8. Pojačavač sa zajedničkim sorsom



Slika 5.9. ekvivalentna šema pojačavača sa zajedničkim sorsom

Naponsko pojačanje pojačavača sa zajedničkim sorsom je jednako:

$$A_u = \frac{U_2}{U_1} = \frac{-g_m U_{gs} R_d}{U_{gs}} = -g_m R_d \quad [5.15]$$

O strujnom pojačanju je besmisleno govoriti jer je ulazna struja feta jednaka nuli ($I_g=0$). Ulazna otpornost ovog pojačavača je određena otpornošću otpornika R_g .

Izlazna otpornost ovog pojačavačkog stepena je jednaka:

$$R_{iz} = \frac{U_0}{I_{KS}} = \frac{-I_d R_d}{-I_d} = R_d \quad [5.16]$$

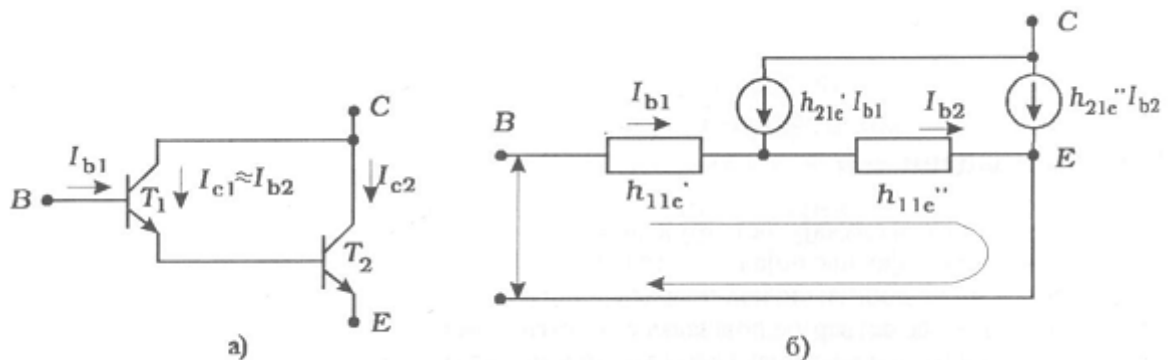
5.4. Složeni pojačavači

U praksi se često dešava da je pojačanje jednog pojačavačkog stepena nedovoljno. Da bi se dobilo veće pojačanje potrebno je upotrebiti više pojačavačkih stepena. Na ulaz prvog pojačavačkog stepena je doveden signal kojeg treba pojačati; na njegov izlaz vezan je ulaz drugog, na izlaz drugog vezan je ulaz trećeg, itd.

Ukupno pojačanje ovog pojačavača dobija se kada se pomnože pojačanja svakog pojačavačkog stepena.

5.4.1. Darlingtonov spoj

Često je potrebno da tranzistor u pojačavaču ima veoma veliki koeficijent strujnog pojačanja h_{21e} (na primer 10.000). Postoji posebna veza dva (ili više) tranzistora koja se ponaša kao tranzistor sa jako velikim koeficijentom strujnog pojačanja h_{21e} ; prikazan je na slici 5.10.a. Ovakva veza tranzistora ima takođe tri kraja ekvivalentni kolektor, bazu i emitor i naziva se darlington spoj. Za primenu ovog kola je važno odrediti njegove ukupne parametre h_{11e} i h_{21e} .



Slika 5.10. Darlington spoj tranzistora koji se ponaša kao NPN tranzistor

Neka je struja baze tranzistora T_1 označena sa I_{b1} . Struja kolektora (I_{c1}) ovog istog tranzistora je za h_{21e} puta veća od njegove struje baze, gde je h_{21e} strujno pojačanje tranzistora T_1 . Ova struja čini struju baze tranzistora T_2 i označena je sa I_{b2} . Kada se ova struja pomnoži sa strujnim pojačanjem h_{21e} drugog tranzistora dobije se kolektorska struja drugog tranzistora I_{c2} i približno iznosi:

$$I_{c2} = h'_{21e} h''_{21e} I_{b1} = h_{21u} I_{b1} \quad [5.17]$$

Odakle vidimo da je ukupno strujno pojačanje darlington spoja jednako:

$$h_{21u} = h'_{21e} h''_{21e} \quad [5.18]$$

Ulazna otpornost ovakve veze može se odrediti iz ekvivalentne šeme, koja je data na slici 5.10.b. i jednaka je:

$$R_{ul} = h_{11e} + h''_{11e} h'_{21e} \approx h''_{11e} h'_{21e} \quad [5.18]$$

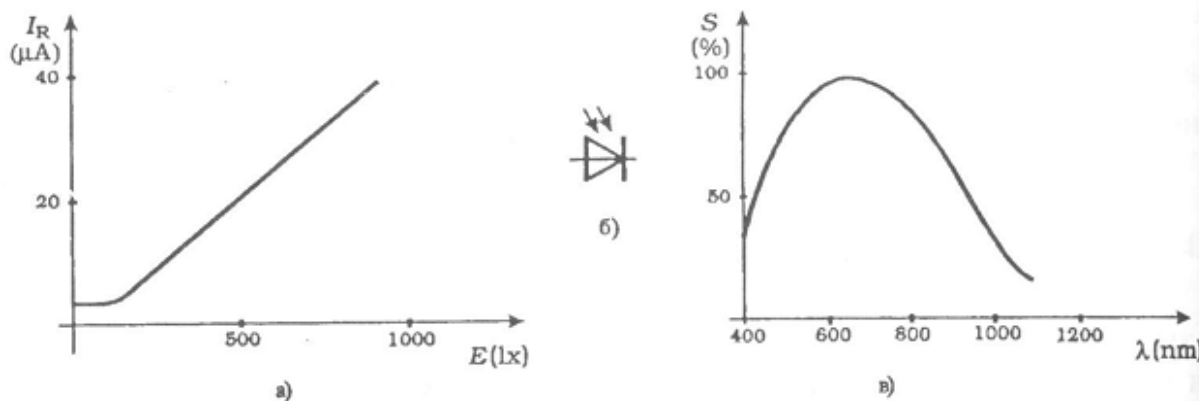
6. OPTOELEKTRONIKA

Osnove fotometrije: Svetlosni zraci se šire od izvora svetlosti. Skup svih svetlosnih zraka koji prolaze kroz neku površinu čine svetlosni fluks Φ kroz tu površinu. Jedinica svetlosnog fluksa je 1 lumen (1 lm). Gustina svetlosnog fluksa se još naziva i osvetljenost, jedinica je 1 luks (1 lx). Osnovna jedinica u fotometriji je jačina svetlosnog izvora I, jedinica joj je 1 kandela (1 cd).

Talasna dužina vidljive svetlosti ide od oko 400 nm (ljubičasta) do oko 700 nm (crvena). Ispod 400 nm su ultraljubičasti, a iznad 700 nm infracrveni zraci.

6.1. Fotodioda

Unutrašnja građa fotodiode je slična građi obične diode. Razlika se sastoji u tome što je kod fotodiode PN – spoj otkriven i na njega mogu da padaju svetlosni zraci. Kada svetlost udari u PN-spoj, stvaraju se parovi elektron-šupljina. Ako se dioda inverzno polariše, tada kroz nju teče povećana inverzna struja. Povećanje inverzne struje I_R kroz diodu je približno srazmerno povećanju osvetljenosti E. Tipično povećanje struje je oko 100 nA/lx. Karakteristika fotodiode je prikazana na slici 6.1.



Slika 6.1. a) karakteristika fotodiode, b) njena oznaka, v) zavisnost osjetljivosti od talasne dužine

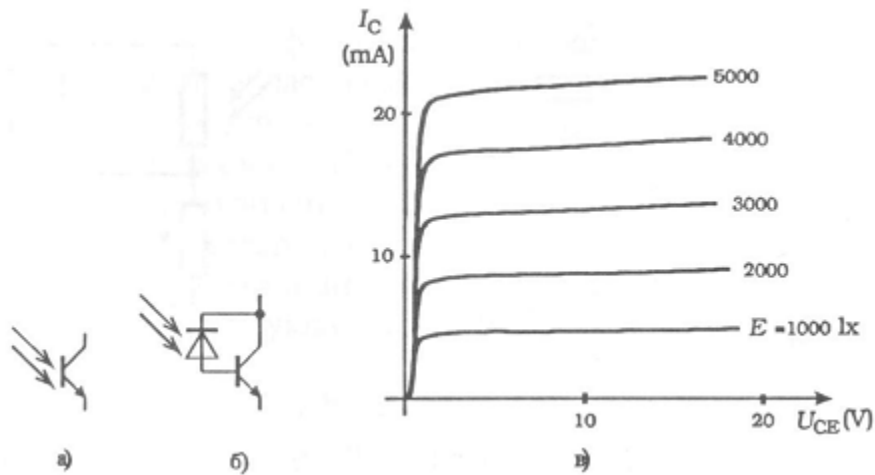
Fotodioda normalno radi u oblasti vidljive svetlosti i u infracrvenoj oblasti. Tipična osjetljivost fotodiode je prikazana na slici 6.1.v. Vidi se da je fotodioda najosjetljivija za talasnu dužinu oko 800 nm.

Fotodioda se načešće uporebljava kao detektor postojanja ili nepostojanja svetlosti. Primenjuje se kod signalnih uređaja, kod svetlovoda itd.

6.2. Fototranzistor

Fototranzistori su takođe slični običnim tranzistorima, i kod njih je poluprovodnik otkriven pa na njega može da pada svetlost. Fototranzistor može da radi i kao običan tranzistor i obrnuto.

Grafički simbol fototranzistora je prikazan na slici 6.1.a. Spoj baza kolektor ponaša se kao fotodioda, tako da se ekvivalentna šema fototranzistora može prikazati kao na slici 6.2.b. udarom svetlosnih zraka u PN-spoj baza-kolektor, kroz njega protiče povećana inverzna struja. Ova struja se pojačava koeficijentom strujnog pojačanja h_{21e} pa se dobija znatno veća kolektorska struja I_C . Povećanjem osvetljenosti povećava se inverzna kolektorska struja, a takođe i kolektorska struja. Karakteristike fototranzistora prikazane su na slici 6.2.v.



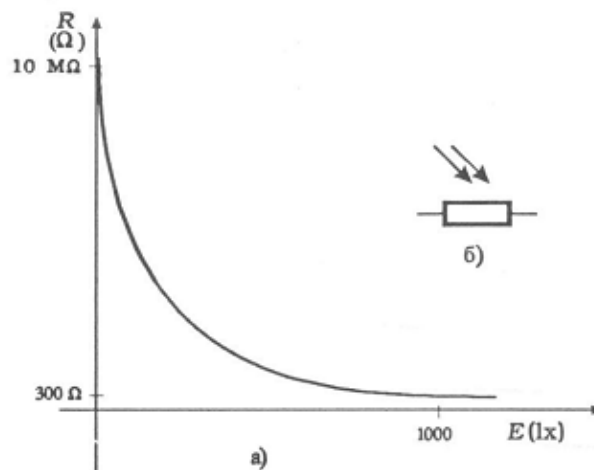
Slika 6.2. a) oznaka fototranzistora, b) njegova ekvivalentna šema, v) karakteristike

Fototranzistor ima znatno veću osetljivost od fotodiode jer se struja dobijena udarom svetlosti pojačava.

Fototranzistori se primenjuju takođe za detektovanje postojanja ili nepostojanja svetlosti. Obični im nije potreban poseban pojačavač.

6.3. Fotootpornik

Fotootpornici se načestće prave od kadijum-sulfida. U njemu normalno ima malo slobodnih nosilaca elektriciteta ukoliko se nalaze u mraku. Ako se osvetli, udar svetlosnih zraka stvara slobodnr nosioce elektriciteta. Što je veća osvetljenost, veći je njihov broj, dok je otpornost manja. Karakteristika fotodiode je prikazana na slici 6.3.a, na kojoj se vidi da njegova otpornost opada sa porastom osvetljenosti po krivi, koj je slična hiperboli. Grafički simbol fotootpornika prikazan je na slici 6.3.b.



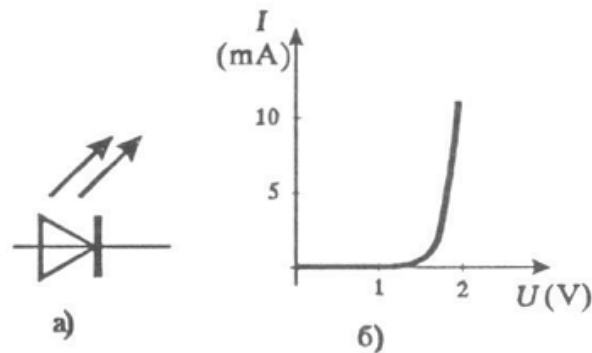
Slika 6.3. a) karakteristika fotootpornika, b) simbol

Otpornost fotootpornika se menja u vrlo širokim granicama pa se često upotrebljava za detekciju nivoa osvetljenosti. Pomoću njih se često prave automati za uključivanje uličnog osvetljenja, svetlećih reklama itd.

6.4. Svetleće poluprovodničke diode

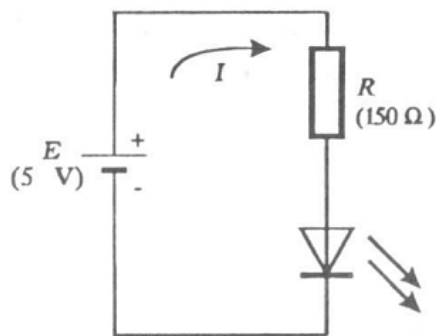
Svetleće poluprovodničke diode (*LED; Light-emiting diode*) polarisane su u propusnom smeru. Prilikom rekombinacija šupljina i elektrona oslobađa se enerđija u vidu svetlosti. Boja svetlosti zavisi od upotrebljenog poluprovodničkog materijala i primesa. Najčešće se kao poluprovodnički material upotrebljavaju galijum, arsenid, galijum arsenid-fosfid itd. Kao primesa najčešće se koriste cink, selen, tejlur itd. Širina oblasti emitovanja je dosta uska (tipično 40 nm) pa je boja dobijene svetlosti veoma čista.

Grafički simbol za svetleću diodu je prikazan na slici 6.4.a, dok je njena karakteristika u propusnom smeru prikazana na slici 6.4.b. posebno je potrebno napomenuti da je dozvoljeni inverzni napon ovih diode veoma nizak (tipično 3 V).

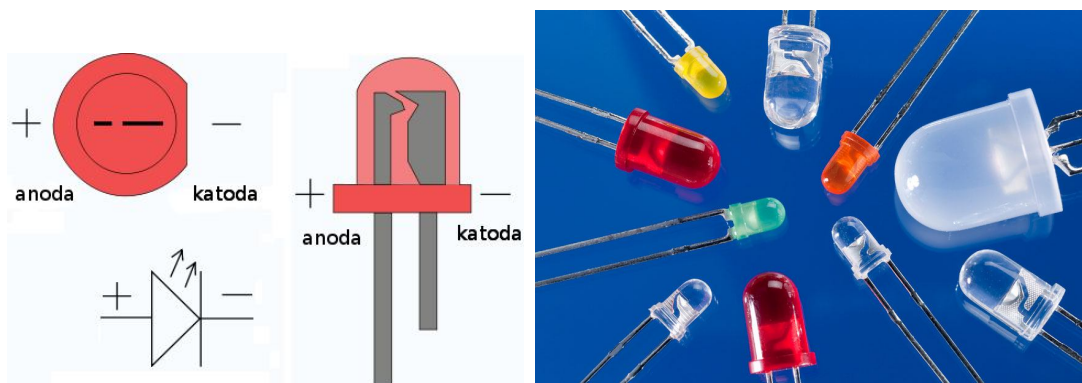


Slika 6.4. Svetleća poluprovodnička diode LED a) grafički symbol, b) karakteristika

Tipični radni napon svetleće diode je od 1,5V do 2,5V, a struja 10mA. Dioda se ne uključuje direktno na napon napajanja nego se sa njom na red stavlja otpornik za ograničenje struje kao na slici 6.5.



Slika 6.5. Svetleća diode sa izvorom i otpornikom za ograničenje stuje



Slika 6.6. Svetleć diode LED