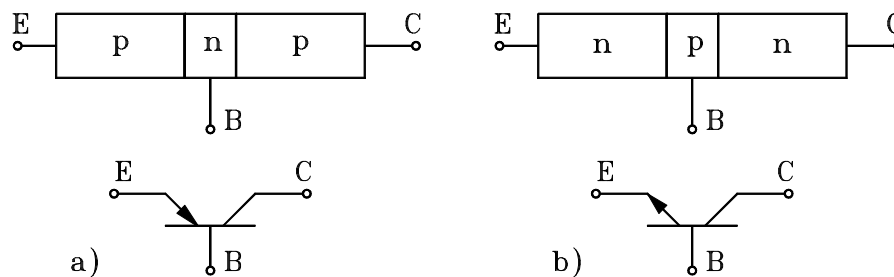


Definicija i tehnološka izvedba bipolarnog tranzistora

Naziv tranzistor nastao je kao složenica od dvije engleske riječi: **transfer resistor** što u prijevodu znači preneti otpor. U nazivu bipolarni tranzistor sadržana je osnovna značajka ovog elektroničkog elementa, njegovo aktivno djelovanje (prijenos otpora) koje se temelji na sudjelovanju obaju tipova nosilaca naboja (bipolarnih nosilaca tj. elektrona i šupljina). Bipolarni spojni tranzistor (skraćenica BJT od *engl. bipolar junction transistor*) može se u načelu shvatiti kao ustrojstvo dvaju pn spojeva, tj. kao poluvodička cjelina pnp ili npn tipa u kojoj se središnji sloj naziva baza (oznaka B), a druga dva sloja su emiter (oznaka E) i kolektor (oznaka C), slika 4.1.1.

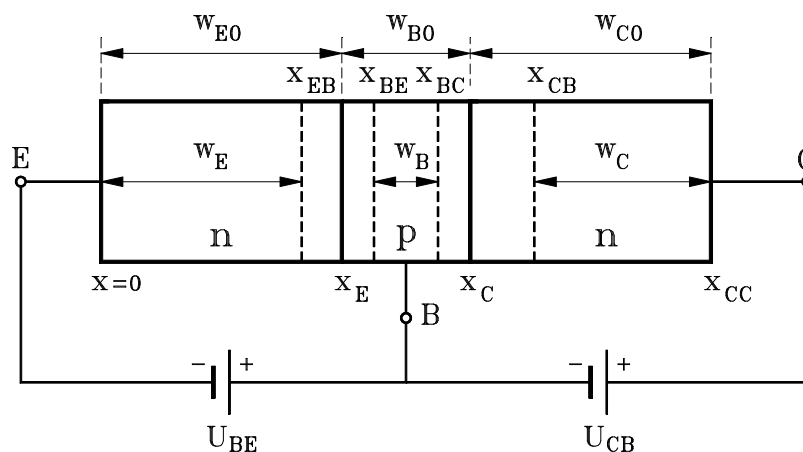


Slika 4.1.1: Ustrojstvo i simbol za bipolarni spojni tranzistor:

a) pnp tip, b) npn tip.

S obzirom na tri priključka (emiter, baza i kolektor) postoji mogućnost i više načina polarizacije odnosno rada tranzistora. Ako tranzistor radi kao pojačalo tada je spoj emiter-baza propusno polariziran, a spoj kolektor-baza nepropusno. Pri tome se promjenom napona na propusno polariziranom pn spoju, odnosno promjenom struje kroz taj spoj, mijenja i struja kroz nepropusno polarizirani pn spoj. Ta pojava nazvana tranzistorski efekt ili bipolarno međudjelovanje dvaju pn spojeva preko zajedničkog uskog područja baze temelji se na mehanizmu utiskivanja (injekcije) manjinskih nosilaca iz emitera, prijenosa (tranzita) tih nosilaca kroz bazu i sakupljanja (kolekcije) na kolektoru.

U uvjetima normalne polarizacije (spoj emiter-baza je propusno, a spoj kolektor-baza nepropusno polariziran), visina potencijalne barijere je umanjena na emitterskom spojištu upravo za potencijalnu energiju određenu naponom propusne polarizacije $q \cdot U_{BE}$, a na kolektorskom spojištu je uvećana za $q \cdot U_{CB}$, slika 4.1.2. b).



Slika 4.1.3: Definicija područja emitera, baze i kolektora

normalno polariziranog npn tranzistora.

Za tranzistorski efekt je nužan uvjet uske baze, tj. treba biti: $\frac{W_{B0}}{L_{nB}} \ll 1$.

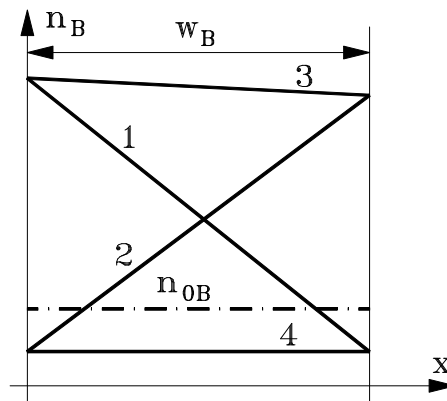
Ako tranzistor radi kao pojačalo tada je spoj emiter-baza propusno polariziran, a spoj kolektor-baza nepropusno. Pri tome se promjenom napona na propusno polariziranom pn spoju, odnosno promjenom struje kroz taj spoj, mijenja i struja kroz nepropusno polarizirani pn spoj. Ta pojava nazvana tranzistorski efekt ili bipolarno međudjelovanje dvaju pn spojeva preko zajedničkog uskog područja baze temelji se na mehanizmu utiskivanja (injekcije) manjinskih nosilaca iz emitera, prijenosa (tranzita) tih nosilaca kroz bazu i sakupljanja (kolekcije) na kolektoru.

Područja rada biloparnog tranzistora

Ovisno o polaritetu napona priključenog između emitera i baze, te kolektora i baze, u načelu se razlikuju tri područja rada tranzistora:

1. normalno aktivno područje (spoj emiter-baza je propusno, a spoj kolektor-baza nepropusno polariziran),
2. područje zasićenja (spoj emiter-baza i spoj kolektor-baza su propusno polarizirani),
3. zaporno područje (spoj emiter-baza i spoj kolektor-baza su nepropusno polarizirani).

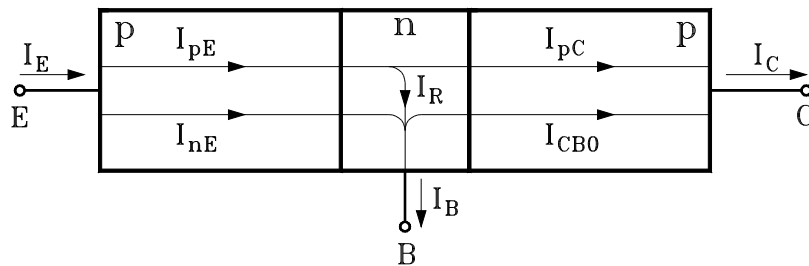
Uz navedena tri područja teorijski se razmatra i četvrto područje koji je obrnuto (inveržno) u odnosu prema normalnom aktivnom području (spoj emiter-baza je nepropusno, a spoj kolektor-baza propusno polariziran).



Slika 4.12.1: Područja rada npn tranzistora:
"1" - normalno aktivno, "2" - inveržno aktivno,
"3" - zasićenje, "4" - zapiranje.

Struje normalno polariziranog tranzistora

Tranzistor ima tri izvoda (elektrode) stoga tri elektrodne struje: emitera, baze i kolektora, sastavljene od pripadnih šupljinskih i elektronskih sastavnica.



Slika 4.3.1: Struje normalno polariziranog pnp tranzistora.

1. struje šupljina I_{pE} (šupljine utisnute iz emitera u bazu),
2. struje elektrone I_{nE} (elektroni utisnuti iz baze u emiter).

$$I_E = I_{pE} + I_{nE} \quad (4.3.1)$$

Sastavnice struje kolektora I_C su:

1. struje šupljina I_{pC} (struja I_{pE} umanjena za rekombinacijsku struju I_R),
2. reverzne struje zasićenja I_{CB0} (struja manjinskih nosilaca nepropusno polariziranog spoja kolektor-baza).

$$I_C = I_{pC} + I_{CB0} \quad (4.3.2)$$

Struja baze I_B sastoji se od tri sastavnice:

1. struje elektrona I_{nE} (utisnuta struja iz emitera u bazu),
2. rekombinacijske struje I_R , koja je posljedica rekombinacije elektrona u bazi i dijela šupljina iz emitera,

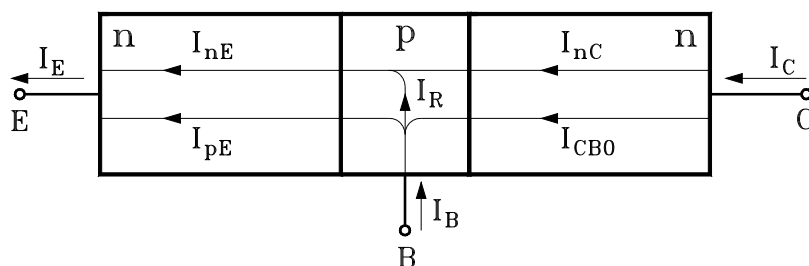
$$I_R = I_{pE} - I_{pC} \quad (4.3.3)$$

3. reverzne struje zasićenja spojišta kolektor-baza I_{CB0} .

$$I_B = I_{nE} + I_R - I_{CB0} \quad (4.3.4)$$

Struja emitera jednaka je zbroju struje kolektora i struje baze:

$$I_E = I_C + I_B$$



Slika 4.3.2: Struje normalno polariziranog npn tranzistora.

Struje normalne polarizacije kod ovog tranzistora su iste kao i kod pnp samo tamo di je index p za pnp, npn je index n i obrnuto.

Osnovni parametri bipolarnog tranzistora

Djelotvornost emitera

Djelotvornost (efikasnost) emitera definirana je omjerom struje većinskih nosilaca, šupljina za pnp, odnosno elektrona za npn tranzistor, i ukupne struje emitera:

$$\gamma = \frac{I_{pE}}{I_{pE} + I_{nE}} = \frac{I_{pE}}{I_E} \quad (\text{za pnp tranzistor}) \quad (4.4.1.1)$$

$$\gamma = \frac{I_{nE}}{I_{nE} + I_{pE}} = \frac{I_{nE}}{I_E} \quad (\text{za npn tranzistor}) \quad (4.4.1.2)$$

S pomoću Einsteinove relacije (2.11.9) i (2.11.10), djelotvornost emitera može se prikazati kao funkcija električne provodnosti emitera i baze:

$$\gamma = \frac{1}{1 + \frac{\sigma_B \cdot W_B}{\sigma_E \cdot L_{nE}}} \quad (4.6.9)$$

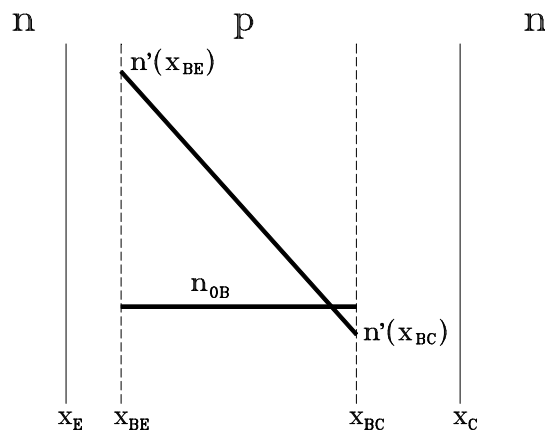
Djelotvornost emitera je veća što je veća njegova električna provodnost σ_E , stoga je gustoća dodanih primjesa u emiteru uvijek veća od gustoće primjesa u bazi.

Prijenosni (transportni) faktor

Mjera kvalitete prijenosa definirana je omjerom struje većinskih nosilaca kolektora i struje većinskih nosilaca emitera:

$$\beta^* = \frac{I_{pC}}{I_{pE}} = 1 - \frac{I_R}{I_{pE}} \quad (\text{za pnp tranzistor}) \quad (4.4.2.1)$$

$$\beta^* = \frac{I_{nC}}{I_{nE}} = 1 - \frac{I_R}{I_{nE}} \quad (\text{za npn tranzistor}) \quad (4.4.2.2)$$



Slika 4.7.1: Raspodjela elektrona u bazi normalno polariziranog npn tranzistora.

Što je baza uža u odnosu prema difuzijskoj dužini manjinskih nosilaca, to je prijenos nosilaca iz emitera kroz bazu do kolektora djelotvorniji, pa se može kazati da je kvaliteta prijenosa nosilaca, uz utiskivanje iz emitera i sakupljanje na kolektoru, bitna značajka tranzistora.

Strujno pojačanje

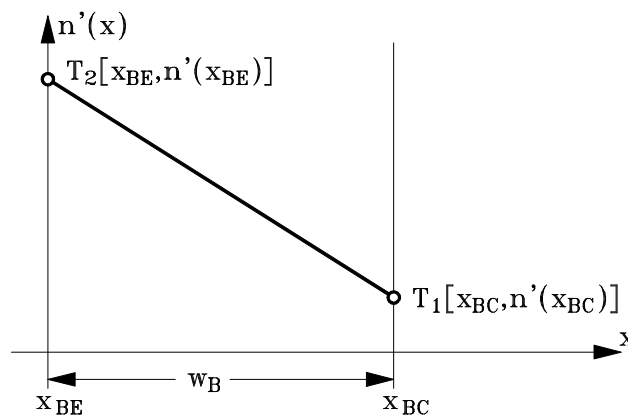
Omjer struje većinskih nosilaca kolektora i ukupne struje emitera jednak je umnošku djelotvornosti i faktora prijenosa, a definira se kao strujno pojačanje tranzistora u spoju zajedničke baze:

$$\frac{I_{pC}}{I_E} = \frac{I_{pC}}{I_{pE}} \cdot \frac{I_{pE}}{I_E} = \beta^* \cdot \gamma = \alpha \quad (\text{za pnp tranzistor}) \quad (4.4.3.1)$$

$$\frac{I_{nC}}{I_E} = \frac{I_{nC}}{I_{nE}} \cdot \frac{I_{nE}}{I_E} = \beta^* \cdot \gamma = \alpha \quad (\text{za npn tranzistor})$$

Vrijeme proleta nosilaca kroz bazu

Raspodjela gustoća manjinskih nosilaca u bazi tranzistora može se zbog uskog područja baze približno prikazati pravcem, slika 4.9.1.



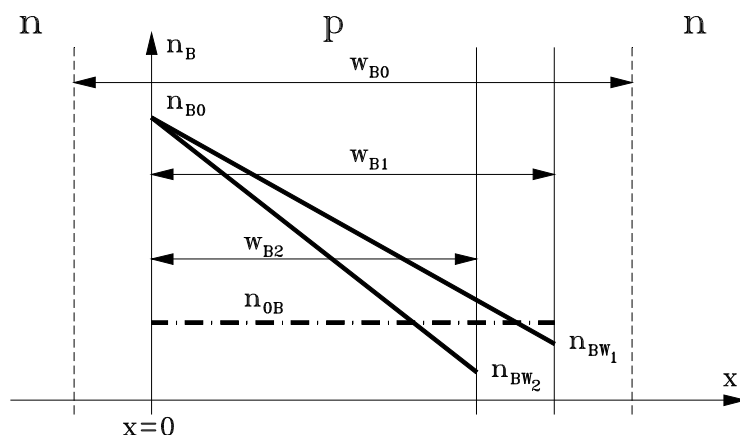
Slika 4.9.1: Raspodjela manjinskih nosilaca u bazi npn tranzistora.

$$t_{pr} = \frac{w_B^2}{2 \cdot D_{nB}}$$

Dobiveni izraz za vrijeme proleta nosilaca kroz bazu identičan je izrazu izvedenom za usku n stranu pn spoja.

Earlyjev efekt

Porastom napona nepropusne polarizacije na pn spoju povećava se širina područja barijere koja se u pravilu širi na slabije onečišćenu stranu. Isti efekt nastaje u bipolarnom tranzistoru na nepropusno polariziranom spoju kolektor-baza. Ako je spoj emiter-baza propusno polariziran naponom stalne vrijednosti, povećanjem napona nepropusne polarizacije na spoju kolektor-baza, područje barijere na kolektorskom spojištu se povećava, tj smanjuje se efektivna širina baze. Ta promjena efektivne širine ili modulacija baze naziva se Earlyjev efekt. Primjer za npn tranzistor prikazan je na slici 4.10.1.



Prikaz Earlyjevog efekta za npn tranzistor

Pri većim iznosima napona nepropusne polarizacije kolektor-baza U_{CB} , efektivna širina baze može poprimiti iznos nula pri čemu nastaje naponski proboj tranzistora (engl. *punch-through*).

Posljedica Earlyjevog efekta očituje se u promjeni gustoće i nagibu raspodjele gustoće manjinskih nosilaca naboja u bazi. Smanjenjem efektivne širine baze umanjuje se i vjerojatnost poništavanja manjinskih nosilaca u bazi pa prema tome i rekombinacijska sastavnica struje baze, što izravno utječe na povećanje faktora strujnog pojačanja. Nadalje povećava se nagib (gradijent) raspodjele gustoće manjinskih nosilaca u bazi (elektrona, ako se radi o npn tranzistoru), te se povećava elektronska sastavnica struje emitera koja je proporcionalna nagibu raspodjele gustoće. Navedene se pojave mogu iskazati jednačbama:

$$I_R = I_{nE} - I_{nC}$$

$$I_R = I_{nE} \cdot (1 - \beta^*) = I_{nE} \cdot \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{w_B}{L_{nB}} \right)^2$$

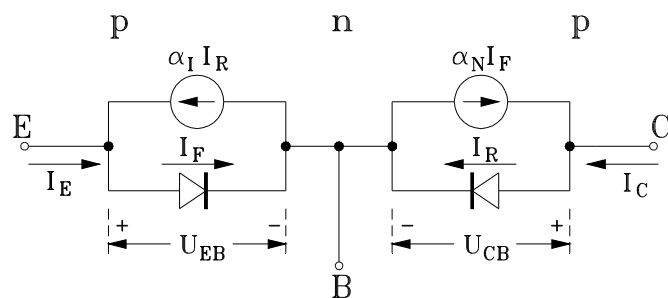
$$I_{nE} = \frac{S \cdot q \cdot n_{B0} \cdot D_{nB}}{w_B}$$

Uvrštavanjem jednačbi, izraz za rekombinacijsku sastavnicu struje baze poprima oblik:

$$I_R = \frac{S \cdot q \cdot n_{B0} \cdot D_{nB}}{w_B} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{w_B^2}{L_{nB}} = \frac{S \cdot q \cdot n_{B0} \cdot w_B}{2 \cdot \tau_{nB}} = \frac{Q_{nB}}{\tau_{nB}}$$

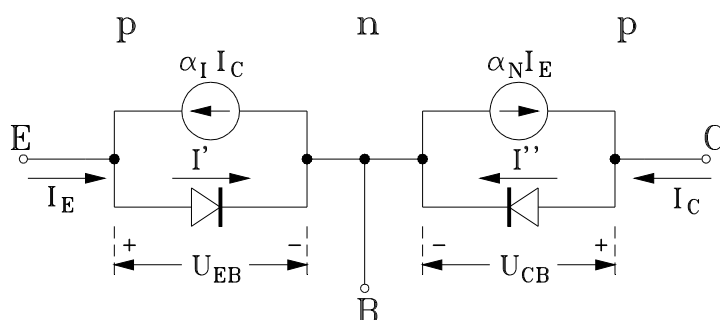
Ebers-Mollov model tranzistora

Ebers-Mollov nadomjesni sklop tranzistora sastoji se od dvije diode i dva zavisna strujna izvora. Na slici 4.11.2. prikazan je tzv. injekcijski Ebers-Mollov model u kojemu su struje strujnih izvora proporcionalne strujama kroz diode.



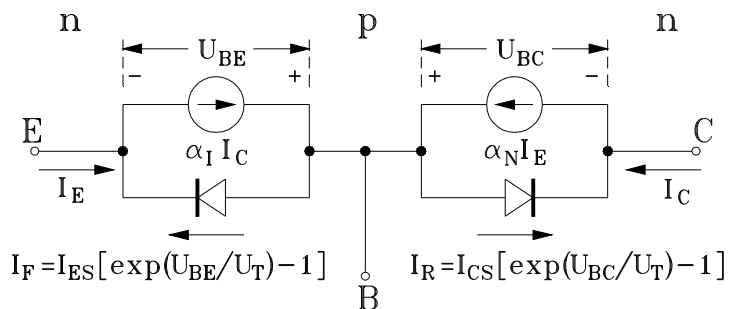
Slika 4.11.2: Injekcijski Ebers-Mollov model za pnp tranzistor.

Ebers-Mollov model u kojemu su struje strujnih izvora proporcionalne vanjskim (elektrodnim) strujama tranzistora prikazan je na slici 4.11.3.



Slika 4.11.3: Ebers-Mollov model pnp tranzistora.

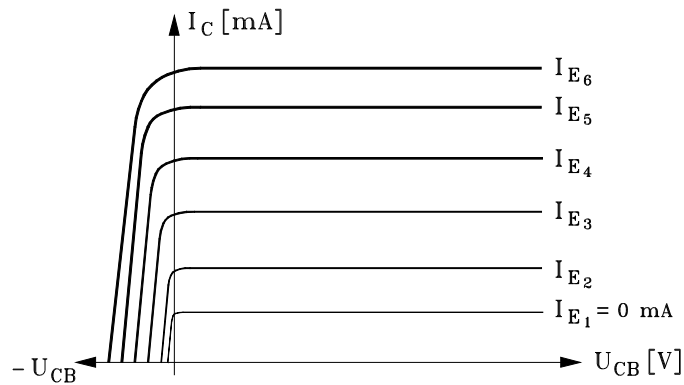
U Ebers-Mollovom modelu npn tranzistora strujni izvori i struje dioda imaju suprotan predznak u odnosu prema strujama pnp tranzistora, a zbog npn ustrojstva promjenjeni su i polariteti napona na spoju emiter-baza i kolektor-baza, slika 4.11.4.



Slika 4.11.4: Ebers-Mollov model npn tranzistora.

Izlazne karakteristike u spoju zajedničke baze i zajedničkog emitera

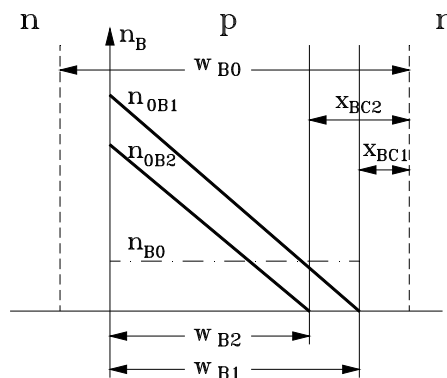
Izlazne su karakteristike dane kao funkcija $I_C = f(U_{CB})$ pri stalnoj vrijednosti struje I_E za pojedinu karakteristiku, slika 4.13.1.2.



Slika 4.13.1.2: Izlazne karakteristike npn tranzistora u spoju zajedničke baze.

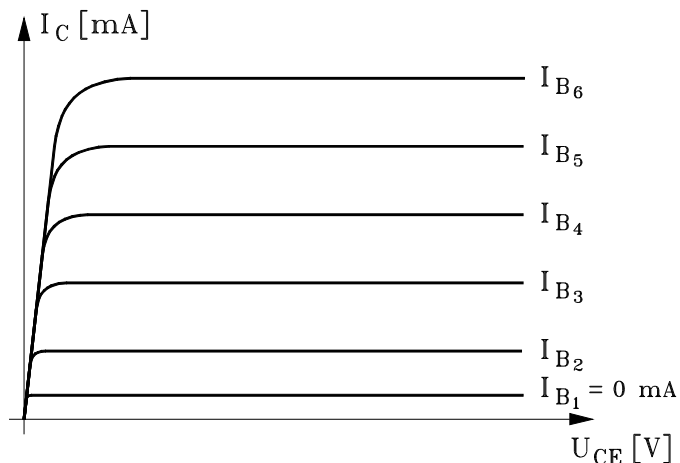
U normalnom aktivnom području rada tranzistora u spoju zajedničke baze karakteristike su približno vodoravni pravci, a mali porast struje I_C koji nastaje s povećanjem napona U_{CB} tumači se kao posljedica Earlyjevog efekta. Pri propusnom polaritetu napona kolektor-baza, ($-U_{CB}$), tranzistor radi u području zasićenja koje je karakterizirano naglim padom struje kolektora što se tumači smanjenjem gradijenta gustoće elektrona u bazi.

Stalna vrijednost struje emitera I_E pri promjeni (povećanju apsolutne vrijednosti) napona U_{CB} može se održati promjenom (smanjenjem) napona U_{BE} tako da je gradijent gustoće elektrona u bazi tranzistora stalan, slika 4.13.1.3.



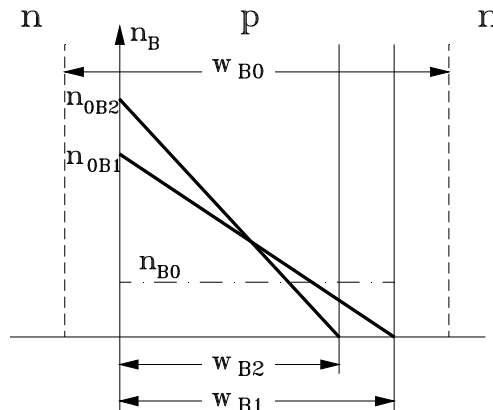
Slika 4.13.1.3: Definicija stalnog gradijenta gustoće nosilaca (elektrona) u bazi npn tranzistora pri promjeni napona U_{CB} .

Izlazne karakteristike tranzistora u spoju zajedničkog emitera dane su kao funkcija $I_C = f(U_{CE})$ pri stalnoj vrijednosti struje baze za pojedinu karakteristiku (slika 4.13.2.2.).



Slika 4.13.2.2: Izlazne karakteristike npn tranzistora u spoju zajedničkog emitera.

U skladu s jednadžbom $U_{CE} = U_{BE} - U_{BC}$ za aktivno područje nužno treba biti ispunjen uvjet $U_{CE} > U_{BE}$ da bi spoj kolektor-baza bio nepropusno polariziran naponom U_{CB} . Povećanjem napona U_{CE} povećava se i apsolutni iznos napona U_{CB} , a smanjuje se efektivna širina baze. Da bi pritom struja baze zadržala stalnu vrijednost potrebno je povećati gustoću manjinskih nosilaca (elektrona) n_{0B} na rubu barijere emitorskog spojišta, odnosno povećati napon propusne polarizacije U_{BE} spoja emiter-baza, slika 4.13.2.3.



Slika 4.13.2.3: Prikaz utjecaja promjene efektivne širine baze na izlazne karakteristike npn tranzistora u spoju zajedničkog emitera.

Definicija i vrste unipolarnih tranzistora

U vođenju struje kod unipolarnih tranzistora sudjeluju većinski nosioci naboja (elektroni ili šupljine), a jakost te struje može se mijenjati vanjskim naponom. Zbog toga što se promjena vodljivosti poluvodiča, a time i jakosti struje, postiže djelovanjem poprečnoga (transverznog) električnog polja koje je posljedica upravo priključenog vanjskog napona na poluvodič, uz naziv unipolarni tranzistor obično se upotrebljava skraćeni naziv tranzistor s efektom polja.

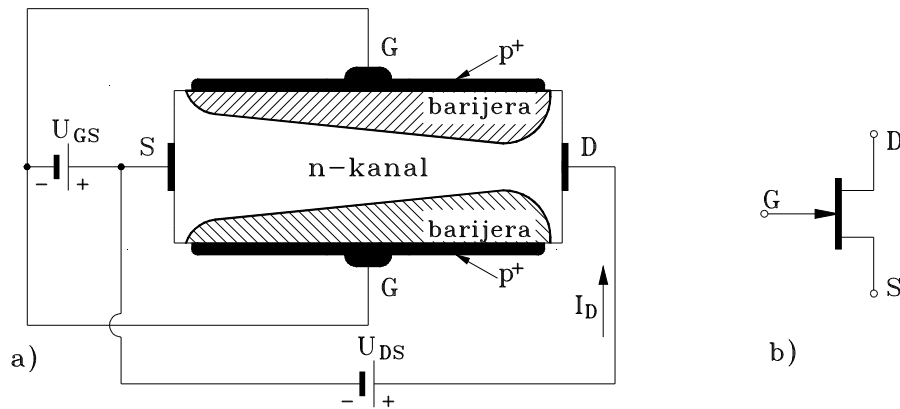
Vrste unipolarnih tranzistora:

- JFET (engl. *junction field effect transistor*) - spojni tranzistori s efektom polja
 - n-kanalni JFET
 - p-kanalni JFET
- MOSFET (engl. *metal-oxide-semiconductor field effect transistor*) tranzistor s efektom polja s izoliranim vratima

MOSFET tranzistor može biti izveden kao n-kanalni na p-podlozi ili kao p-kanalni na n-podlozi, obogaćenog ili osiromašenog tipa.

Tranzistor s efektom polja (JFET) – vrste i tehnološka izvedba

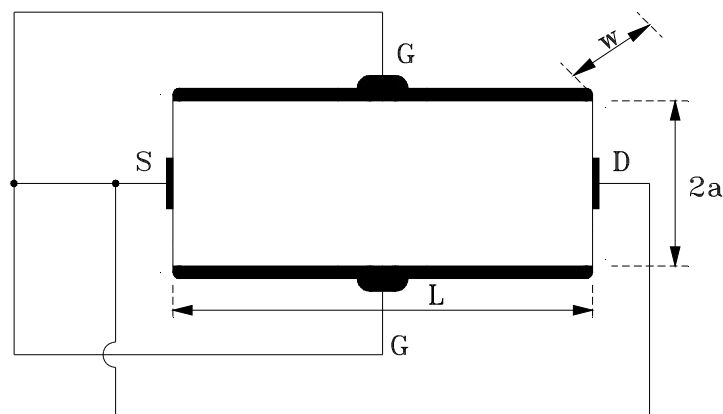
n-kanalni



Slika 5.1.1: a) n-kanalni spojni FET, b) simbol za n-kanalni spojni FET.

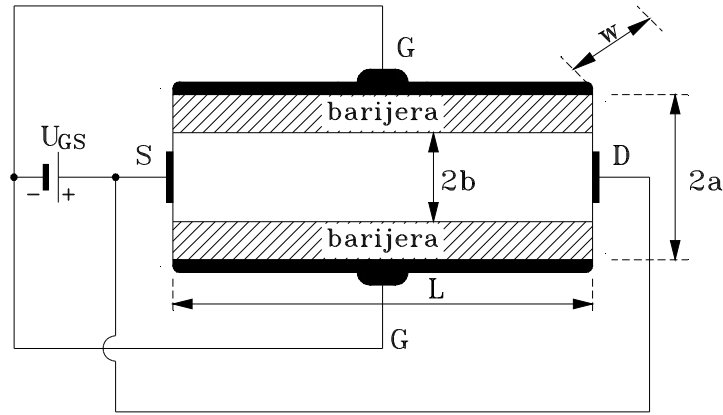
Dio poluvodiča označen kao kanal je vodljivi dio omeđen dvjema simetričnim barijerama uspostavljenima naponom nepropusne polarizacije U_{GS} između p^+ poluvodiča (p-tip poluvodiča s relativno velikom gustoćom akceptorske primjese) i n-tipa poluvodiča s gustoćom donorske primjese manjom u odnosu prema gustoći akceptora u p^+ području, slika 5.1.1.a). Struja teče od uvoda prema odvodu zbog priključenog napona U_{DS} . Sukladno analizi provedenoj za pn spoj, barijera se širi na slabije onečišćenu stranu pn spoja. Stoga će se porastom apsolutne vrijednosti napona U_{GS} širina kanala smanjivati, a time i njegova vodljivost.

Pri naponu $U_{DS} = 0$ i $U_{GS} = 0$, ako se zanemare osiromašena područja koja nastaju zbog djelovanja kontaktnog potencijala, kanal tranzistora ima najveću širinu iznosa $2a$ (širina potpuno otvorenog kanala), slika 5.1.2.



Slika 5.1.2: Širina potpuno otvorenog kanala pri $U_{DS} = 0$ i $U_{GS} = 0$.

Pri nekom naponu U_{GS} i naponu $U_{DS} = 0$ širina kanala se jednako po cijeloj njegovoj dužini smanji na stalnu vrijednost $2b$, slika 5.1.3.



Slika 5.1.3: Širina kanala pri nekom naponu U_{GS} i naponu $U_{DS} = 0$.

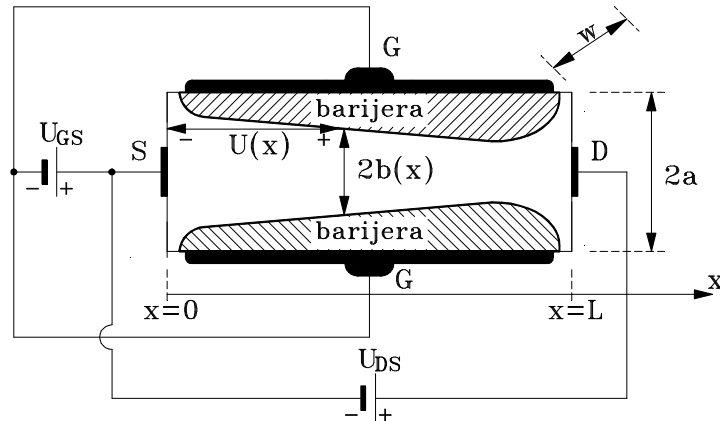
Napon U_{GS} pri kojemu je širina kanala jednaka ničici ($b = 0$), označen je kao napon dodira U_{GS0} (engl. *pinch-off voltage*):

$$a^2 = \frac{2 \cdot \varepsilon \cdot (U_k - U_{GS0})}{q \cdot N_D}, \quad (5.1.3)$$

odnosno

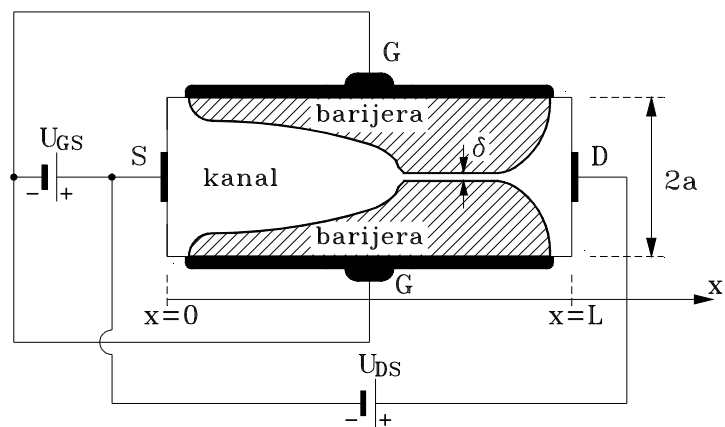
$$U_{GS0} = U_k - \frac{a^2 \cdot q \cdot N_D}{2 \cdot \varepsilon}.$$

Pri naponu $U_{DS} \neq 0$ i $U_{GS} \neq 0$ kroz kanal teče struja odvoda stvarajući pad napona duž kanala. Napon između uvoda i bilo koje točke u kanalu funkcija je koordinate x , $U(x)$, pa je i napon nepropusno polariziranog pn spoja vrata-kanal funkcija koordinate x . Posljedica toga je da širina kanala više nije stalna već se mijenja duž kanala, slika 5.1.4.



Slika 5.1.4: Širina kanala pri naponu $U_{GS} \neq 0$ i $U_{DS} \neq 0$.

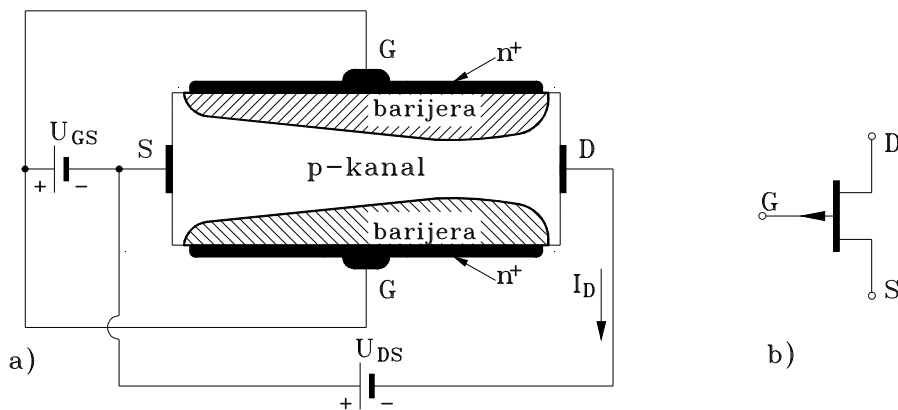
Pri naponu $U_{DS} = U_{GS} - U_{GS0}$, napon odvod-vrata, U_{DG} , jednak je naponu dodira $-U_{GS0}$, a to znači da dodir barijera nastaje na strani odvoda. Smanjivanje širine kanala kao i dodir barijera nastaju zbog pada napona duž kanala. Kako je pad napona posljedica protjecanja struje kroz kanal, pri dodiru barijera prestala bi teći i struja, te bi nestao i uzrok dodira barijera. Stoga je zaključak da širina kanala na mjestu dodira barijera nije jednaka ničici, već ima mali iznos δ koji se pri prekoračenju napona dodira proteže prema uvodu, slika 5.1.5.



Slika 5.1.5: Širina kanala uz naponu $U_{DS} > U_{GS} - U_{GS0}$.

p-kanalni

Ustrojstvo p-kanalnog spojnog FETa (kanal je p tipa, a područje vrata n^+ tipa) je takvo da naponi napajanja U_{GS} i U_{DS} , te struja I_D , imaju suprotan predznak od onog za n-kanalni FET, slika 5.1.2.1.



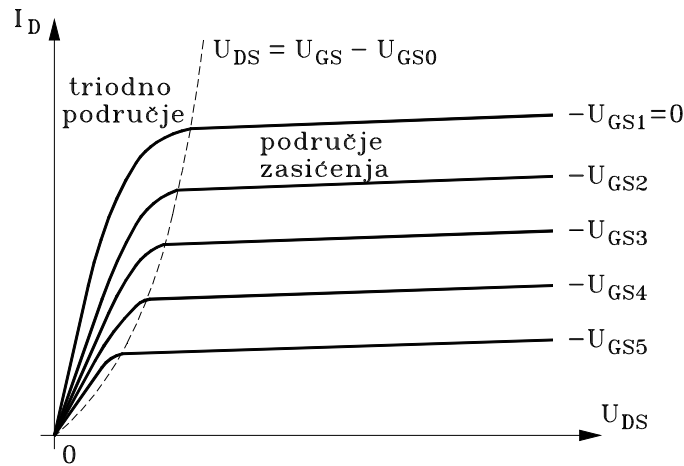
Slika 5.1.2.1: a) p-kanalni spojni FET. b) simbol za p-kanalni spojni FET.

Stoga u svim jednadžbama izvedenim za n-kanalni FET treba promijeniti predznak uz veličine: U_{DS} , U_{GS} , U_{GS0} i I_D :

$$U_{GS0} = \frac{a^2 \cdot q \cdot N_A}{2 \cdot \epsilon} - U_k$$

Izlazne karakteristike i područja rada FET-a

Geometrijsko mjesto točaka određeno uvjetom $U_{DS} = U_{GS} - U_{GS0}$ na izlaznim karakteristikama za pojedini napon U_{GS} , jest granična crta između triodnog područja i područja zasićenja.



Izlazne karakteristike FET-a (definicija triodnog područja i područja zasićenja)

Dinamički parametri FET-a

Derivacija struje I_D po naponu U_{GS} pri nekoj stalnoj vrijednosti napona U_{DS} definira se kao strmina:

$$g_m = \left. \frac{\partial I_D}{\partial U_{GS}} \right|_{U_{DS} = \text{konst.}}$$

Izlazna dinamička vodljivost definirana je derivacijom struje I_D po naponu U_{DS} pri nekoj stalnoj vrijednosti napona U_{GS} . Tako je za triodno područje izveden izraz:

$$g_d = G_0 \cdot \left[1 - \sqrt{\frac{U_k - U_{GS} + U_{DS}}{U_k - U_{GS0}}} \right]$$

Faktor pojačanja definiran je derivacijom napona U_{DS} pri nekoj stalnoj vrijednosti struje I_D :

$$\mu = \frac{\partial U_{DS}}{\partial U_{GS}} = \frac{\partial U_{DS}}{\partial I_D} \cdot \frac{\partial I_D}{\partial U_{GS}} = \frac{g_m}{g_d} = r_d \cdot g_m$$

Statičke karakteristike FET-a

Izlazne karakteristike spojnog FETa dane su za triodno područje jednačbom (5.1.10), a za područje zasićenja jednačbom (5.1.12).

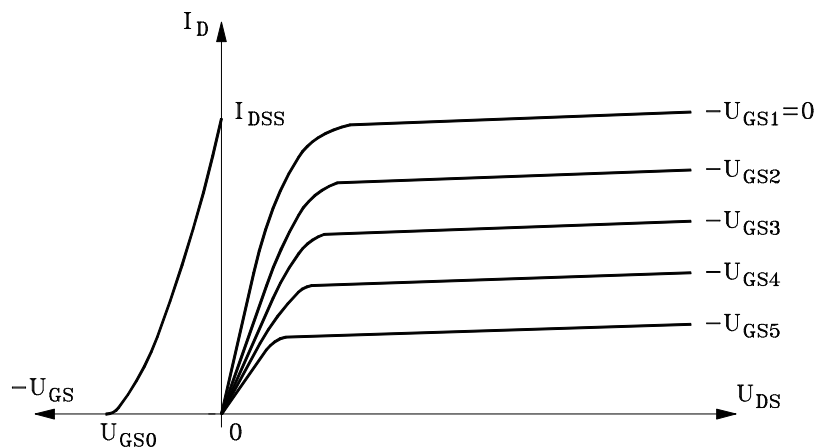
$$I_D = G_0 \cdot \left[U_{DS} - \frac{2}{3} \cdot \frac{(U_k - U_{GS} + U_{DS})^{\frac{3}{2}} - (U_k - U_{GS})^{\frac{3}{2}}}{\sqrt{U_k - U_{GS0}}} \right], \quad (5.1.10)$$

$$I_{Dzas} = G_0 \cdot \left[U_{GS} - U_{GS0} - \frac{2}{3} \cdot \frac{(U_k - U_{GS0})^{\frac{3}{2}} - (U_k - U_{GS})^{\frac{3}{2}}}{\sqrt{U_k - U_{GS0}}} \right] \quad (5.1.12)$$

U području zasićenja funkcija $I_D = f(U_{GS})$ je ujedno i prijenosna karakteristika koja se može približno prikazati paraboličnom funkcijom:

$$I_D = I_{DSS} \cdot \left(1 - \frac{U_{GS}}{U_{GS0}} \right)^2 \quad (5.1.3.1)$$

u odsječku određenom točkama U_{GS0} i I_{DSS} (struja I_D pri naponu $U_{GS} = 0$). Dio parabole izvan tog područja nema fizikalnoga značenja, slika 5.1.3.1.



Slika 5.1.3.1: Statičke karakteristike n-kanalnog FETa.

Definicija, tehnološka izvedba i tipovi MOSFET-a

MOS unipolarni tranzistor može biti izveden kao n-kanalni na p-podlozi ili kao p-kanalni na n-podlozi, obogaćenog ili osiromašenog tipa. Podloga je silicij s relativno malom gustoćom primjese na koju se nanosi tanki sloj silicijeva dioksida SiO_2 debljine $t_{ox} \approx 0.1 \mu m$. Zatim se određenim planarnim postupkom (fotolitografski postupak) otvaraju "difuzijski prozori" u oksidnom sloju kroz koje se difuzijom unosi primjesa, oblikujući tako područje uvoda i odvoda u podlozi. Gustoća primjese u području uvoda i odvoda je relativno velika. Dio poluvodiča između uvoda i odvoda označen je kao kanal kroz koji struja može teći jedino ako su u njemu nosioci naboja istog tipa kao i većinski nosioci područja uvoda i odvoda. To znači da je za n-kanalni MOSFET uz površinu između p-podloge i izolatora (u kanalu) nužno stvoriti višak elektrona, odnosno uspostaviti inverzijski sloj između uvoda i odvoda. To je temeljni preduvjet za vođenje MOSFETa.

Inverzijski sloj i mogući modovi rada MOSFET-a; PRIJENOSNE KARAKTERISTIKE

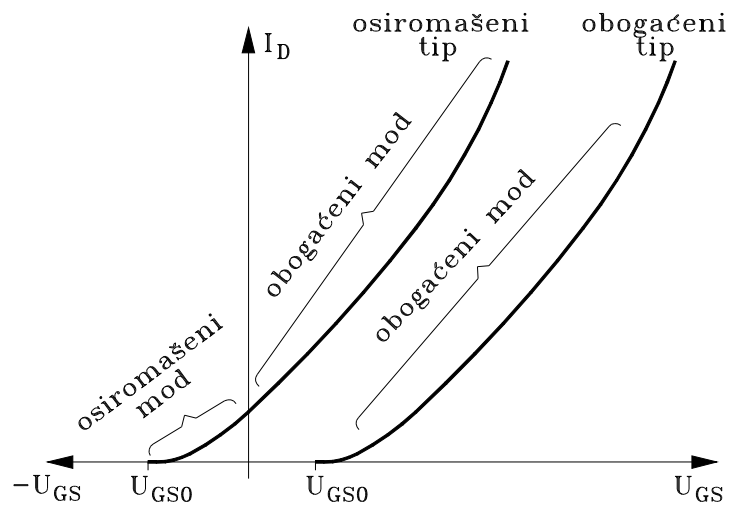
Inverzijski sloj

Inverzijski sloj može nastati pod utjecajem priključenog napona odgovarajućeg polariteta između vrata i uvoda, U_{GS} . Tako npr. za p-kanalni MOSFET pozitivni napon U_{GS} izvlači elektrone iz dubine podloge te ih gomila uz spoj podloge i izolacijskog sloja obogaćujući tako područje kanala elektronima, slika 5.2.1. Što je veći pozitivni napon U_{GS} to je veća i vodljivost kanala, te je uz stalan napon između odvoda i uvoda U_{DS} veća i struja I_D između njih. Struja I_D može teći uz priključeni napon U_{DS} samo ako

je napon U_{GS} pozitivan i veći od određene vrijednosti koja se naziva napon praga U_{GS0} . S obzirom na iznesene značajke takav n-kanalni MOSFET pripada skupini obogaćenog tipa.

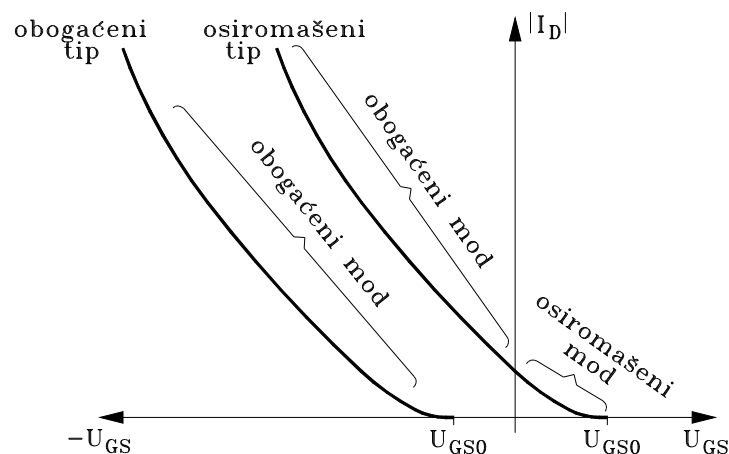
Mogući modovi rada

Značajka je n-kanalnog MOSFETA osiromašenog tipa što struja I_D može teći i pri negativnim naponima U_{GS} , pri čemu treba biti $U_{GS0} < U_{GS} < 0$ (rad u osiromašenom modu) te pri pozitivnim naponima U_{GS} (rad u obogaćenom modu). Za razliku od tranzistora osiromašenog tipa, kroz kanal tranzistora obogaćenog tipa struja može teći samo uz pozitivne napone U_{GS} pri čemu treba biti $U_{GS} > U_{GS0}$, tj. tranzistor može raditi samo u obogaćenom modu.



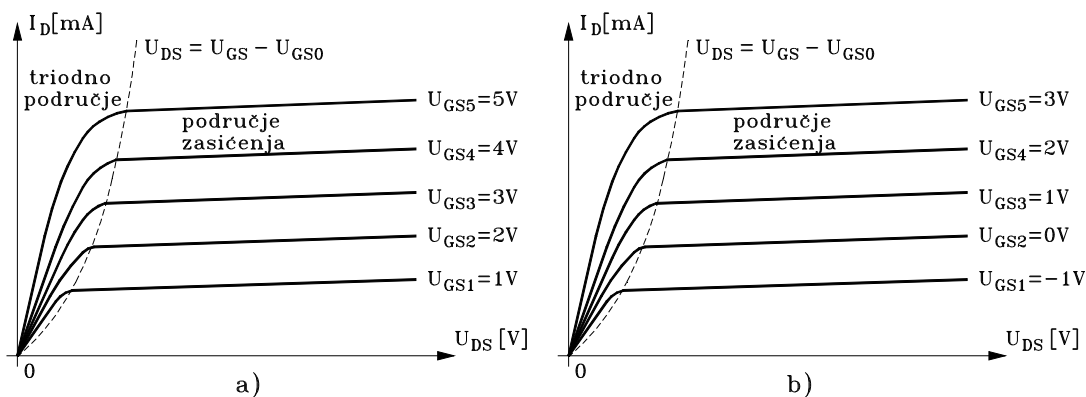
Slika 5.2.3: Prijenosne karakteristike n-kanalnog MOSFETA.

Za p-kanalni MOSFETA podloga je silicijski poluvodič n-tipa, a područja uvoda i odvoda p^+ -tipa. Napon praga p-kanalnog MOSFETA obogaćenog tipa je negativan, a tranzistor može raditi jedino u obogaćenom modu uz negativan napon U_{GS} . Za osiromašeni tip napon praga U_{GS0} je pozitivan, a tranzistor može raditi u osiromašenom modu pri $U_{GS} > 0$ i obogaćenom modu pri $U_{GS} < 0$, slika 5.2.4.



Slika 5.2.4: Prijenosne karakteristike p-kanalnog MOSFETA.

Izlazne karakteristike MOSFET-a



Slika 5.2.1.2: Izlazne karakteristike n-kanalnog MOSFETa.

a) obogaćeni tip; b) osiromašeni tip.

Kod stvarnih, izmjerenih karakteristika postoji mali porast struje I_D s porastom napona U_{DS} .

Parametri MOSFET-a

Dinamički su parametri definirani kao i za spojni FET. Primjenom njihovih definicija na odgovarajuće jednačbe za triodno područje rada, dobiva se:

$$r_d = \left. \frac{\partial U_{DS}}{\partial I_D} \right|_{U_{GS} = \text{konst.}} = \frac{1}{K \cdot (U_{GS} - U_{GS0} - U_{DS})},$$

$$g_m = \frac{\partial I_D}{\partial U_{GS}} = K \cdot U_{DS},$$

$$\mu = g_m \cdot r_d,$$

Za područje zasićenja:

$$\frac{1}{r_d} = I_{Dzas} \cdot \lambda,$$

$$g_m = K \cdot (U_{GS} - U_{GS0}).$$