Učinak kvantnomehaničkog tuneliranja u radu tranzistora

Galov, Daniel

Undergraduate thesis / Završni rad

2015

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Chemical Engineering and Technology / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:149:256291

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**



Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Chemical Engineering and Technology University of Zagreb







Sveučilište u Zagrebu

Fakultet kemijsko inženjerstva i tehnologije

Sveučilišni preddiplomski studij

Daniel Galov

ZAVRŠNI RAD

Zagreb, rujan 2015.

Sveučilište u Zagrebu

Fakultet kemijsko inženjerstva i tehnologije

Sveučilišni preddiplomski studij

Daniel Galov

UČINAK KVANTNOMEHANIČKOG TUNELIRANJA U RADU TRANZISTORA

ZAVRŠNI RAD

Učinak kvantnomehaničkog tuneliranja na rad tranzistora

Sažetak

Tranzistor predstavlja temelj svijeta mikroelektronike. Ova naprava omogućava funkcioniranje svih ostalih tehničkih naprava i samim time je nezamjenjiv čimbenik u daljnjem razvoju i usavršavanju tehnologije. Cilj ovog rada je povezivanje kvantne kemije s mikroelektronikom i upoznavanje s tzv. kvantim tranzistorom ili tranzistorom s efektom tuneliranja koji predstavlja, po svim empirijskim dokazima i istraživanjima koja su učinjena, novo poglavlje u optimizaciji rada svih tehnoloških naprava. Ne samo da su testni rezultati rada ovakvog tranzistora znatno bolji od svih dosadašnjih tipova tranzistora već su i njegove dimenzije rekordno umanjene čineći mikroelektronske sklopove kompaktnijima nego ikad dosada. Rezultati su pokazali da se korištenjem principa kvantnog tuneliranja u proizvodnji integriranih krugova otvaraju vrata bezbrojnim novim mogućnostima izrade tranzistora, a samim tim se granice performansi tehničkih naprava pomiču u nedogled daleko.

Ključne riječi: mikroelektronika, tranzistor, kvantnomehaničko tuneliranje

Quantum mechanical tunneling effect in the functioning of transistors

Summary

The transistor represents the foundation of the world of microelectronics . This device makes the functioning of all other technological devices possible and thereby it is an irreplacable factor in the further development and perfecting of technology . The goal of this work is connecting quantum chemistry with microeletronics and getting to know the so called quantum transistor or tunneling field effect transistor which represents , by all empiric evidences a new chapter in the optimisation of technological devices . Not only are the test results of this transistor far better than all the other types of transistors but also are its dimensions record low making microelectronic devices more compact than ever . Results have shown that by the use of quantum tunneling in the fabrication of integrated circuits , countless new doors are opened for new ways of making transistors and by that the limitations of technical devices' performances are moved into infinity .

Key words : microelectronics, transistor, quantum tunneling

SADRŽAJ

1. UVOD 1
2. POLUVODIČI 2
2.1. Općenito o poluvodičima 2
2.2. Kako poluvodič radi 2
2.3. Energetske vrpce poluvodiča 5
3. TRANZISTORI 6
3.1. Općenito o bipolarnim tranzistorima 6
3.2. Struktura bipolarnih tranzistora 7
3.3. Načini rada bipolarnih tranzistora 8
3.4. Unipolarni tranzistori 11
3.5. MOSFET – Tranzistor s efektom polja s izoliranom upravljačkom elektrodom 11
3.6. Osnovni princip rada n-kanalnog tranzistora obogaćenog tipa 12
3.7. Osnovni princip rada n-kanalnog tranzistora osiromašenog tipa 15
4. KVANTNOMEHANIČKO TUNELIRANJE 16
5. TRANZISTORI S TUNELIRANJEM 17
5.1. Tunelirajući tranzistor s efektom polja – TFET 17
5.2. Nanokristalni tranzistor s efektom polja – ncFET 19
6. EKSPERIMENT 22
6.1. Opis i provedba eksperimenta 22
6.2. Rasprava rezultata 26
7. ZAKLJUČAK 27
8. POPIS SIMBOLA 28
9. LITERATURA 29

1. UVOD

Stalnim napretkom industrije i tehnologije potreba za boljim i bržim instrumentima stalno raste. Uz to, očekuju se sve manja i kompaktnija mjerila i računala. Nezaobilazni čimbenik u proizvodnji i optimizaciji suvremenih instrumenata i računala je tranzistor koji omogućava funkcioniranje svih elektronskih naprava.

Kako je vrijeme odmicalo, postalo je jasno da će se konvencionalnim načinom izrade tranzistora doseći određena granica. Točnije, dimenzije i odlike tranzistora postale su predvidljive pa su tako i granice tih elemenata postale jasne . Drugim riječima, postalo je jasno da će MOSFET tranzistori biti vrhunac mikroelektronike fabricirane načinom koji se do tada upotrebljavao. Završetak napretka izrade tranzistora značio bi samo jedno, tehnološku stagnaciju, odnosno tehnologija bi dosegla svoj maksimum i ne bi više postojali načini unapređivanja. Usporedno s razvojem tranzistorske tehnologije, od otkrića radioaktivnosti 1896. godine pa nadalje, javlja se novo područje kemije koje će najzad pružiti rješenje stagnaciji u razvoju tranzistora. Riječ je o kvantnoj kemiji, koja kroz dvadeseto stoljeće dolazi do procvata i upoznaje nas sa sasvim novim svijetom i mogućnostima . Konačno 1957. godine fenomen kvantnog tuneliranja u čvrstim materijalima se priznaje kao posljedica razvoja poluvodiča, tranzistora i dioda. Ovim otkrićem način izrade i princip funkcioniranja tranzistora se zauvijek mijenja. Omogućena je izrada, bržih, kompaktnijih i ekonomičnijih tranzistora čime su sve prepreke u tehnološkom napretku izbrisane.

Iz priloženog vidimo da su novi tranzistori ključ za boljitak cjelokupne tehnologije i kako je njihova optimizacija nezaobilazan faktor koji će utjecati na budućnost svijeta na kojem živimo. Bez njihovog stalnog napretka, nema napretka u ostalim granama tehnologije.

2. POLUVODIČI

2.1.Općenito o poluvodičima

Poluvodič je materijal koji ima električnu vodljivost u sredini između izolatora i vodiča. Točnije, poluvodiči imaju specifični električni otpor u rasponu od 10^{-3} do 10^{9} Ω cm, metali od 10^{-4} Ω cm i niže, a izolatori od 10^{10} Ω cm i više. Naravno da je ovakva, potpuno kvantitativna klasifikacija uvjetovana dogovorom i ovisi o okolnim uvjetima.

Budući da poluvodiči čine temelj mikroelektronike (naročito tranzistora), itekako je nužno razmotriti fizičke i kemijske aspekte poluvodiča prije ulaska u daljnju problematiku rada tranzistora.

Među poluvodljivim materijalima, silicij se pokazao kao najprikladniji za izradu integriranih krugova. Ovaj materijal ubrzo je zamjenio germanij (koji je igrao povijesnu ulogu u rastu i razvoju tranzistorskih tehnologija) i do danas ne postoji prikladniji element za izradu mikroelektroničkih naprava. Iz tog razloga, u daljnjem tekstu i ilustracijama o poluvodičima koristit ću isključivo električne i fizičke parametre silicija, koji su smjestili ovaj materijal na sami vrh mikroelektroničke industrije.

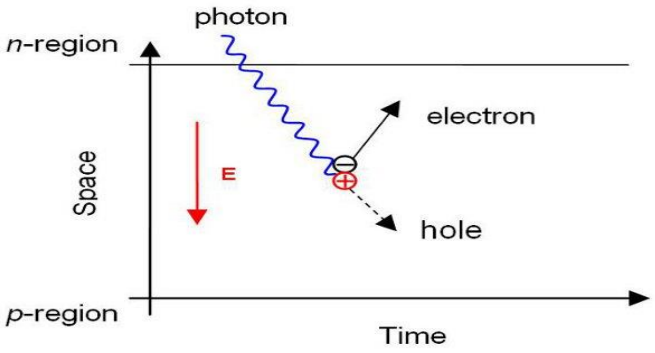
2.2.Kako poluvodič radi

Jedan od najbitnijih parametara svih materijala, pa tako i poluvodiča, je specifični električni otpor. Jasno je da materijal može pokazati električnu vodljivost samo ako ima slobodne nositelje naboja, koji se mogu kretati kristalnom strukturom čvrste tvari pod utjecajem električnog polja.

Čisti, savršeni poluvodič s idealnom kristalnom rešetkom naziva *se intrinsični poluvodič.* Pri apsolutnoj nuli (0 K) takav poluvodič nema slobodnih nositelja naboja te predstavlja idealni izolator. Kako temperatura raste , kristalna ćelija prima dodatnu energiju koja inducira vibracijsko kretanje atoma smještenih na rubovima ćelija. U skladu s čestičnom interpretacijom zračenja, nositelji energije, koji induciraju mehaničke vibracije atoma poznati su kao fononi (kvant energije mehaničkih vibracija u čvrstom tijelu), te predstavljaju analoge fotona.

S porastom temperature, broj i energija fonona raste na dovoljno visoku razinu te dolazi do pucanja kovalentnih veza između atoma u kristalnoj rešetci. Pucanje kovalentne veze rezultira nastankom para nositelja naboja; jedan slobodni elektron te upražnjeno mjesto, koje jednostavno nazivamo šupljinom, u blizini atoma koji je izgubio elektron (Slika 1.). Proces stvaranja slobodnog elektrona i šupljine naziva se termalna uzbuda.

Jedan od valentnih elektrona susjednog atoma napušta svoju kovalentnu vezu kako bi upotpunio nastalu šupljinu i ponovno uspostavio prethodno puknutu vezu, te za sobom ostavlja novu šupljinu. Ovakvo napuštanje vlastite veze s ciljem upotpunjavanja prethodno razderane veze se periodički ponavlja te se nastala šupljina ponaša kao nositelj pozitivnog naboja. Poput elektrona, šupljina izvršava nasumičnu kretnju kroz kristalnu rešetku u određenom vremenu , koje nazivamo životni vijek šupljine, do trenutka kad se ponovno rekombinira sa slobodnim elektronom iz jednog od susjednih atoma.

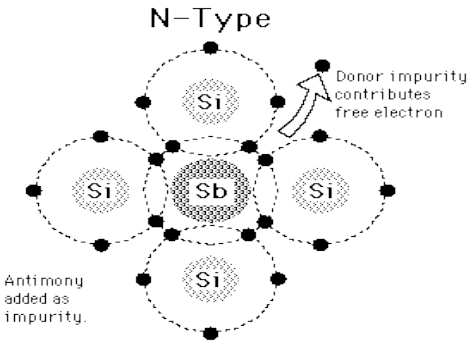


Slika 1. Termalna uzbuda i nastanak para slobodnih nositelja naboja

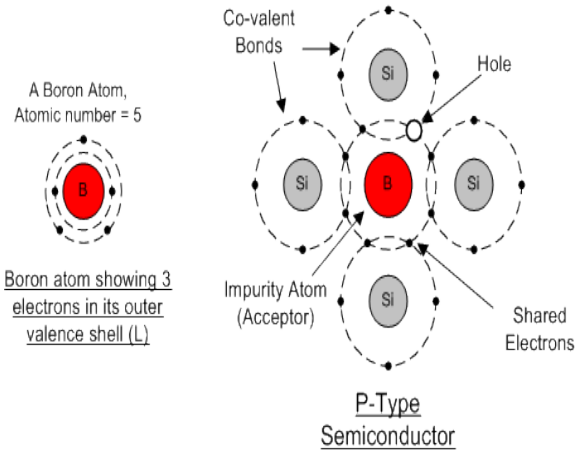
Fononi nisu jedine čestice koje mogu stvoriti slobodne nostielje naboja. Drugi kvanti energije poput svijetla, X-zraka i γ – zraka također imaju tu sposobnost. Međutim bitno je i spomenuti da izlaganje jednom od navedenih zračenja nema identičan učinak kao izlaganje toplinskom zračenju. Točnije, izlaganje zračenju ekvivalentno je lokalnom zagrijavanju bez učinaka toplinske kondukcije. Ako valna duljina zraka veća od dimenzija kristalne ćelije i kristal je u odnosu na valnu duljinu tanak (transparentan na radijaciju), rezultat ozračivanja biti će u suštini jednak zagrijavanju.

Poluvodiči imaju dvije vrste slobodnih nositelja naboja, kao što smo vidjeli, elektrone i šupljine . Kod intrinsičnih poluvodiča, oni se uvijek pojavljuju i rekombiniraju u parovima, tako da je broj nastalih slobodnih elektrona uvijek jednak broju šupljina. Vodljivost u intrinsičnim poluvodičima se stoga naziva intrinsična vodljivost. Vodljivost koja nastaje zbog postojanja nečistoća unutar kristala naziva se ekstrinsična vodljivost. Rezultat dopiranja kristala nečistoćama ovisi o tome koliko su atomi nečistoća valentni. Ako dopiramo slicij peterovalentim elementom, primjerice fosforom, antimonom ili arsenom, četiri od pet

valentnih elektrona ove nečistoće će interagirati sa četiri elektrona susjednog atoma kako bi stvorili četiri kovalentne veze (Slika 2.). Peti elektron peterovalentne nečistoće je slabo vezan za svoju jezgru te ga je veoma jednostavno učiniti slobodnim nositeljem naboja pomoću fonona. Kada se to dogodi atom nečistoće postaje nepokretljivi ion s pozitivnim nabojem. Slobodni elektroni nastali zbog nečistoća priključuju se slobodnim elektronima nastalima djelovanjem fonona te broj nositelja naboja znatno raste čime uvelike i raste vodljivost. Ovakvu vrstu poluvodiča dopiranu peterovalentnim atomima nazivamo n-tipom poluvodiča (n dolazi od negativno). Nečistoće koje imaju sposobnost darivanja valentnog elektrona u kristalnu rešetku nazivamo donorima.



Slika 2. N tip poluvodiča



Slika 3. P tip poluvodiča

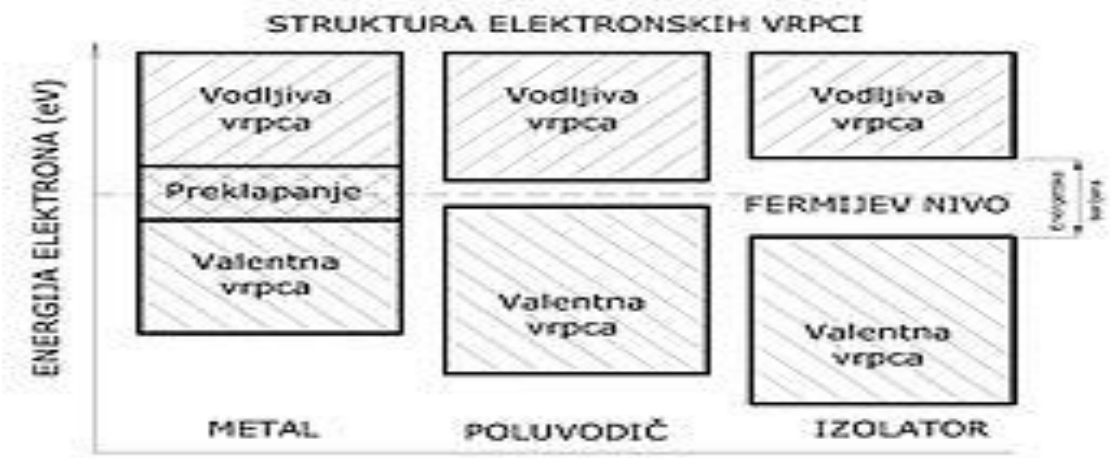
Ako se slicij onečisti trovalentnim atomom kao na primjer galijem, borom ili aluminijem tada će sva tri valentna elektrona interagirati sa susjednim atomima slicija i stvoriti kovalentne veze (Slika 3.). Očigledno jedna od četiri kovalentne veze ostaje nepotpuna te joj je potreban dodatni elektron. Valentni elektron susjednog atoma napusta stabilnu konfiguraciju kako bi upotpunio kovalentnu vezu nečistoće , ostavljajući za sobom šupljinu. Atom nečistoće sada je postao stacionarni ion negativnog naboja. Vodljivost materijala na ovaj način raste zbog povećanog broja pozitivnih nositelja naboja, točnije zbog povećanog broja šupljina te se, na ovaj način dopirani poluvodiči, nazivaju p-tipom poluvodiča. Nečistoće zbog kojih nastaje veći broj šupljina se nazivaju akceptori jer prihvaćaju elektrone od susjednih atoma.

Za otimanje elektrona iz kovalentne veze jednog od atoma nečistoća ili jednog od atoma silicija, u svrhu upotpunjivanja nepotpune veze akceptora, potrebna je određena količina energije koju nazivamo energija aktivacije. Iz navedenog razloga, pri apsolutnoj nuli

ionizacija ne postoji, dok pri radnim temperaturama u rasponu od minus 60°C i više atomi nečistoća iz treće i pete skupine dodani siliciju ili germaniju se ioniziraju potpuno.

2.3.Energetske vrpce poluvodiča

Čvrsto tijelo sastoji se od velike nakupine atoma koji međusobno jako interagiraju zbog malih međuatomskih udaljenosti. Umjesto kombiniranja diskretnih energetskih nivoa u atomima, karakteristika je čvrstih tvari da se spomenuti energetski nivoi preklapaju i formiraju energetske vrpce. Svaka pojedina vrpca sastoji se od određenih energetskih nivoa koji se grupiraju kako se atomi međusobno približavaju. U skladu s time, kristal s međuatomskim razmakom d, sadrži konačni raspored energetskih vrpci; dijagram vrpci u kojem se energetske vrpce izmjenjuju sa zabranjenim vrpcama vidljiv je na Slici 4.



Slika 4. Diagrami energetskih vrpci za intrinsične poluvodiče

Najviša vrpca naziva se vodljivom vrpcom ispod koje se nalazi valentna vrpca koja je kod poluvodiča odjeljena zabranjenom vrpcom. Pri apsolutnoj nuli valentna vrpca je uvijek potpuno popunjena elektronima, bila vodljiva vrpca popunjena samo u dnu (metali) ili potpuno prazna (poluvodiči i izolatori). Slika 4. odnosi se na intrinsični poluvodič. Kod

ekstrinsičnih poluvodiča dijagrami energetskih vrpci izgledaju drugačije (Slika 5.)



Slika 5. Dijagrami energetskih vrpci za ekstrinsične poluvodiče

Kao što se vidi iz dijagrama, donorski i akceptorski energetski nivoi popunjavaju zabranjene vrpce: donorski nivoi su bliže dnu vodljive vrpce, a akceptorski nivoi su bliže vrhu valentne vrpce. Također je bitno spomenuti da se energetski nivoi nečistoća ne preklapaju u vrpce jer je koncentracija nečistoća većinom niska te su udaljenost među atomima prevelike da bi interakcije među atomima bile dovoljno velike da tvore vrpcu. U slučaju visokih koncentracija 10^{18} - 10^{19} cm^{-3} i više energetski nivoi nečistoća se preklapaju i tvore vrpce nečistoća koje se kombiniraju sa najbližim vrpcama poluvodiča. Iz ovog razloga visoko dopirani poluvodiči nazivaju se degeneriranim ili polumetalima.

3. TRANZISTORI

3.1.Općenito o bipolarnim tranzistorima

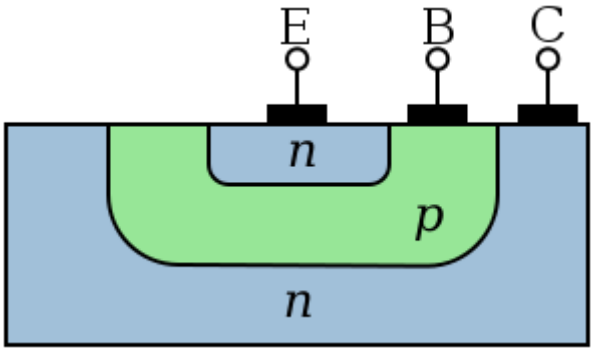
Tranzistori su poluvodička pojačala, točnije, uređaji koji imaju sposobnost pojačavanja električne snage. Postoji veliki broj tranzistora koji se razlikuju izgledom i strukturom, ali po načinu rada svi spadaju u dvije skupine; bipolarni i unipolarni tranzistori .

Temeljni mehanizam na kojem počiva način rada svakog bipolarnog tranzistora je unošenje što većeg broja manjinskih nositelja naboja. Iz tog razloga su pn poluvodički spojevi

osnovni element za izradu bipolarnih tranzistora. Termin "bipolaran" proizlazi iz činjenice da obje vrste nositelja naboja sudjeluju u radu tranzistora (elektroni i šupljine).

3.2.Struktura bipolarnih tranzistora

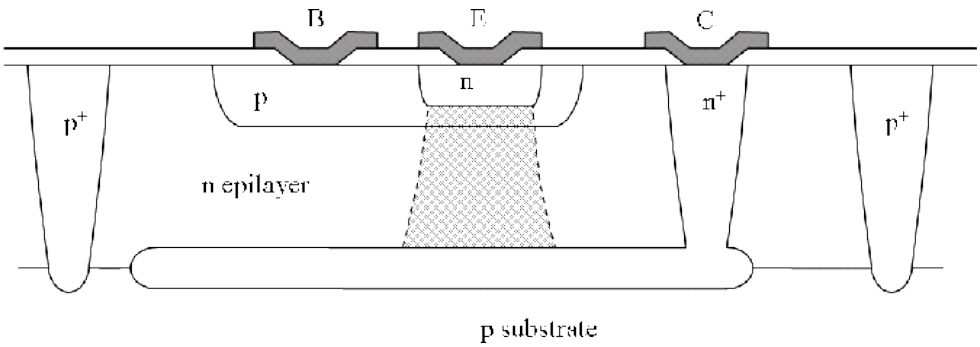
U bipolarnim tranzistorima jedan pn spoj se znatno razlikuje od drugog, kao što je vidljivo na Slici 6. Gornji pn spoj ima znatno manju površinu od donjeg pn spoja. Također, kod većine tranzistora jedan od gornjih slojeva (uglavnom manji n poluvodički dio) znatno više dopiran od drugog. S obzirom na tu činjenicu tranzistore možemo smatrati asimetrčnim uređajima.



Slika 6. Struktura bipolarnog tranzistora

Nazivi pojedinih dijelova, reflektiraju asimetričnu prirodu tranzistora: visoko dopirani, manji n poluvodički dio (n1) naziva se emiter (E), manje dopirani i površinom puno veći n poluvodički dio (n2) naziva se kolektor (C). Poluvodički spojevi n1-p i n2-p sa slojem p u sredini (koji nazivamo baza(B)) nazivaju se emiterski i kolektorski spoj.

Radno područje poznato pod nazivom aktivno područje tranzistora, nalazi se u uskom području točno ispod emiterskog spoja (na Slici 7. iscrtkano područje). Ostatak tranzistorske površine je pasivan i u jednu ruku ne pogoduje radu tranzistora ali sa strukturalnog i tehnološkog stajališta čini u potpunosti nezamjenjiv dio ove naprave.

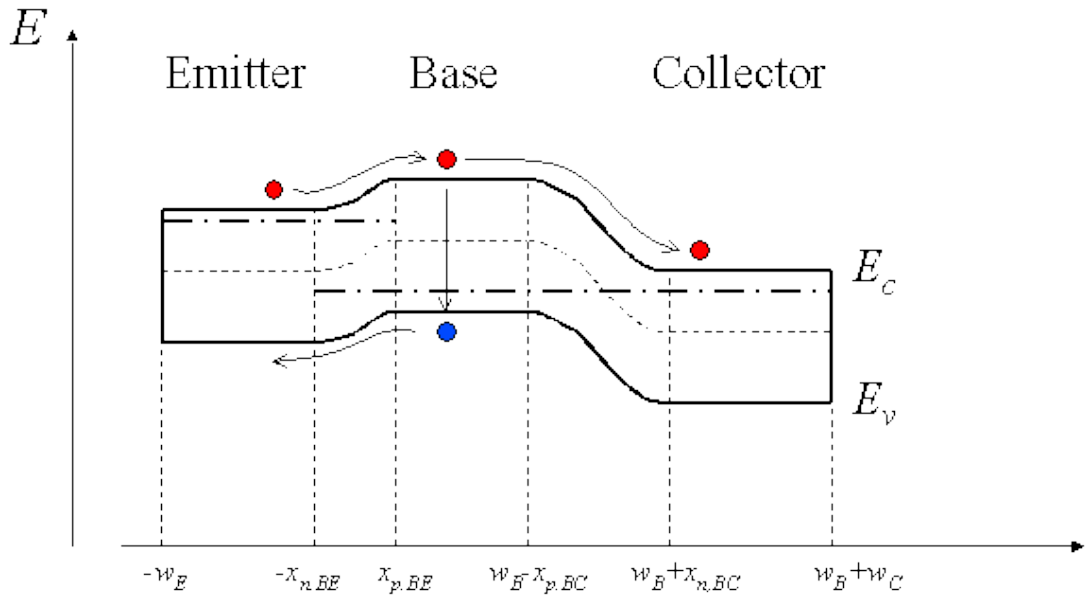


Slika 7. Aktivno područje tranzistora

Emiterski spoj interagira sa kolektorskim spojem zbog veoma male debljine baze. Kod modernih tranzistora ta baza ne prelazi debljinu od 1 μm. Tranzistor prikazan na Slici 6. sastoji se od n-tipa emitera i kolektora i p-tipa baze i naziva se npn tranzistor. Budući da npn tranzistori igraju vodeću ulogu u svijetu mikroelektronike daljnje analize rada tranzistora provodit ce se uglavnom na ovom tipu. Tranzistori sa p-tipom emitera i kolektora te sa n-tipom baze nazivaju se pnp tranzistori i također imaju široku primjenu. Po principu rada, ovakvi tranzistori se ne razlikuju od npn tranzistora, međutim voltaže pri kojima rade su suprotnog polariteta.

3.3. Načini rada bipolarnih tranzistora

U svome normalnom režimu rada (unaprijedno aktivno područje rada) emiterski spoj je propusno polariziran a kolektorski spoj zaporno. Emiter propušta elektrone kroz bazu. Velika većina tih elektrona ne stiže se rekombinirati u tankoj bazi, već privučeni poljem na zaporno polariziranoj baznokolektorskoj barijeri (manjinskim nositeljima iz baze ta polarizacija nije zaporna) prolaze u kolektor čineći kolektorsku struju. Slika 6. prikazuje dijagram energetskih vrpci za normalni režim rada tranzistora.



Slika 7. Dijagram energetskih vrpci tranzistora

Jasno je da kolektor, budući da je spojen na pozitivni naboj, može primati samo elektrone. Iz tog razloga bitno je da se emiterska struja sastoji uglavnom od elektrona. Ovo je ujedno i razlog iz kojeg se emiter dopira znatno jače od baze.

Razlika emiterske i kolektorske struje jest mala struja baze kojom se nadoknađuju u bazi rekombinirani nositelji.

$$I_B=-(I_C+I_E)$$

I_B – Struja baze

Ic- Struja kolektora

I_E – Struja emitera

$$I_C=I_S*e^{Vbe/Vt}$$

V^{be} – Napon spoja BE

I_s – Struja zasićenja

$$Ie=-I_s/\alpha_f \ * \ e^{Vbe/Vt}$$

α_f - Strujno pojačanje u spoju zajedničke baze

Unatoč asimetričnoj prirodi tranzistora, moguće je zamijeniti uloge emitera i kolektora na način da se kolektoru narine propusna polarizacija a emiteru zaporna polarizacija. Ovakav režim rada naziva se reverzno aktivno područje. Prijenos struje u ovom režimu rada znatno je lošiji od prijenosa u unaprijednom aktivnom području rada. Razlozi su sljedeći: mali broj slobodnih nostielja naboja zbog slabog dopiranja kolektora te mala površina emitera u odnosu na kolektor (samo mali broj iz kolektora emitiranih elektorna može ući u emiter).

$$I_E = I_S \cdot e^{\frac{V_{BC}}{V_T}}$$

$$I_B = \frac{I_S}{\beta_R} e^{\frac{V_{BC}}{V_T}}$$

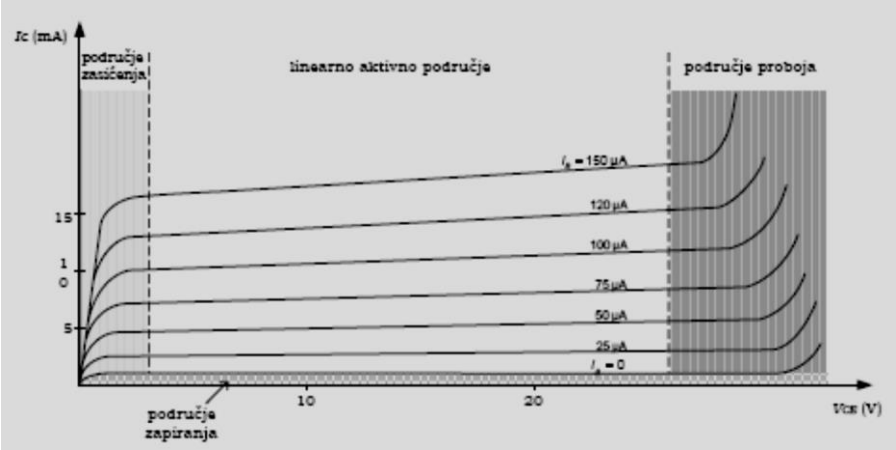
gdje je :

β_r – reverzno strujno pojačanje signala.

U području zasićenja, obje barijere propusno su polarizirane, baza je zasićena nosiocima i tranzistor se ponaša kao uključena sklopka u strujnom krugu (stanje "ON"). Zasićenje se ostvaruje pri malim naponima V_{CE}, a kolektorska struja I_C razmjerna je gotovo linearno (po Ohmovom zakonu) naponu V_{CE}. Ovakav režim rada naziva se područje zasićenja i zapiranja .

U području zapiranja bipolarnog tranzistora obje barijere polarizirane su reverzno i propuštaju vrlo male reverzne struje, pa se u jednostavnim modelima uzima da vrijedi $I_C=I_B=I_E=0$. Tranzistor se u strujnom krugu tada ponaša kao isključena sklopka (stanje "OFF").

Kad zaporni napon na BC prijelazu nadmaši dopuštenu vrijednost tranzistor ulazi u područje proboja (*breakdown*) s porastom kolektorske struje *I*c i termičkim uništenjem.



Slika 8. Područja djelovanja bipolarnog tranzistora

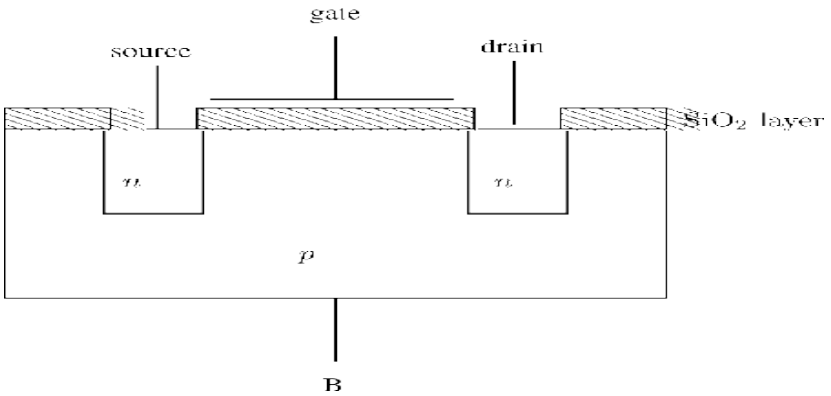
3.4. Unipolarni tranzistori

Poput bipolarnih tranzistora, unipolarni se sastoje najčešće od 3 elektrode. Koriste se kao pojačalo ili kao sklopka. Osnovna razlika između unipolarnih i bipolarnih tranzistora jest činjenica da je u unipolarnim tranzistorima izlazna struja upravljana ulaznim naponom tj. električnim poljem nastalim kao posljedica ulaznog napona. Otud potječe i skraćenica FET (eng. Field Effect Transistor – Tranzistor s efektom polja).

Još jedna odrazlika je i princip rada koji u unipolarnim tranzistorima ovisi samo o većinskim nositeljima, ne i manjinskim. Samo je jedan polaritet nositelj naboja, zato se i zovu unipolarni tranzistori.

3.5. MOSFET – Tranzistor s efektom polja s izoliranom upravljačkom elektrodom

Kod ove vrste tranzistora uopće ne postoji vodljivi kontakt između upravljačke elektrode i poluvodičkog materijala, pa ulazne struje nema. Drugim riječima, ulazni otpor je vrlo velik, praktično beskonačan. Postoje dva tipa i dva " podtipa" ovih tranzistora. Razlikujemo n-kanalni i p-kanalni tranzistor od kojih svaki može biti osiromašenog ili obogaćenog tipa.

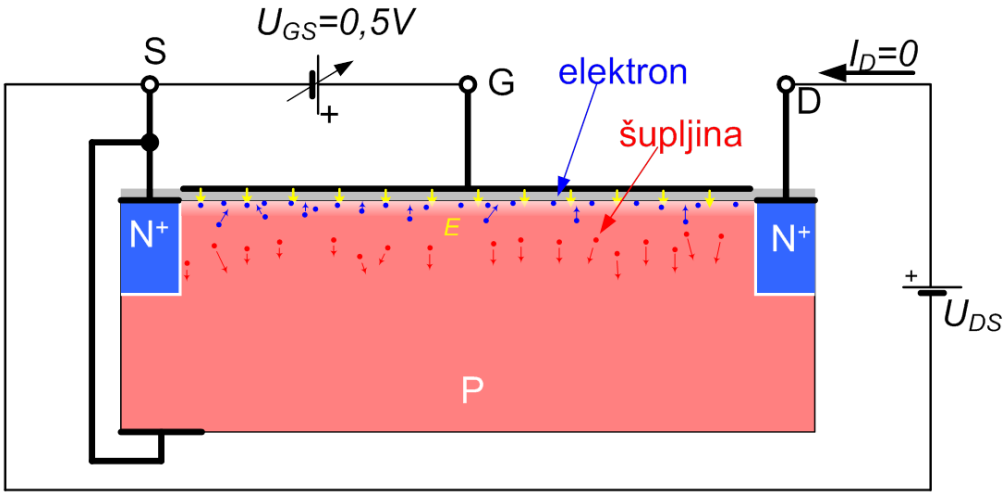


Slika 9. Struktura N kanalnog mosfet

Realna struktura n kanalnog tranzistora prikazana je na slici 9. Metalna elektroda koja izaziva efekt polja naziva se upravljačka elektroda (eng. gate). Ostale dvije elektrode, koje su jako dopirane, se nazivaju dovod (source) i odvod (drain). Ove dvije elektrode su u principu zamjenjive. Sloj SiO_2 služi kao izolator u induciranju efekta polja. Nositelji naboja se pod utjecajem određenog napona kreću prema odvodnoj elektrodi kroz (u ovom primjeru) n - kanal. Ako je kanal n tipa, nositelji naboja su elektroni a odvod je pozitivna elektroda. Dovodna elektroda je obično spojena na poluvodičku ploču koja je suprotnog tipa od kanala koji se želi stvoriti (za n-kanal se koristi p-podloga).

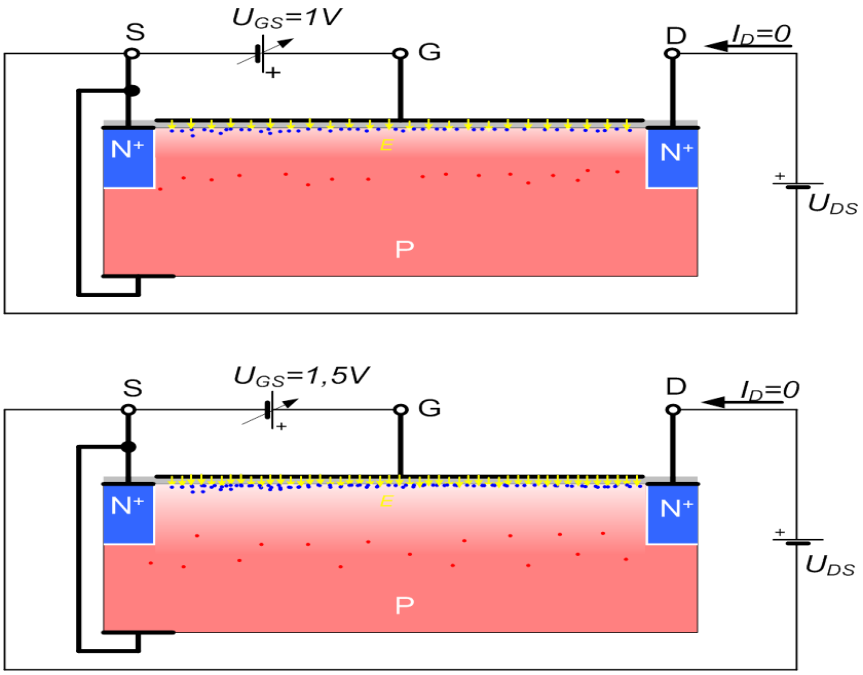
3.6.Osnovni princip rada n-kanalnog tranzistora obogaćenog tipa

Između upravljačke elektrode i podloge formira se električno polje tako da upravljačka elektroda (na + potencijalu) privlači elektrone (manjinske nositelje) iz podloge, a odbija šupljine (većinske nositelje). Na slici 10 vidljivo je da se elektroni skupljaju na vrhu podloge. Koncentracija elektrona u ovom tankom sloju poluvodiča sve je veća u odnosu na šupljine koje su većinski nositelji naboja u p tipu poluvodiča.



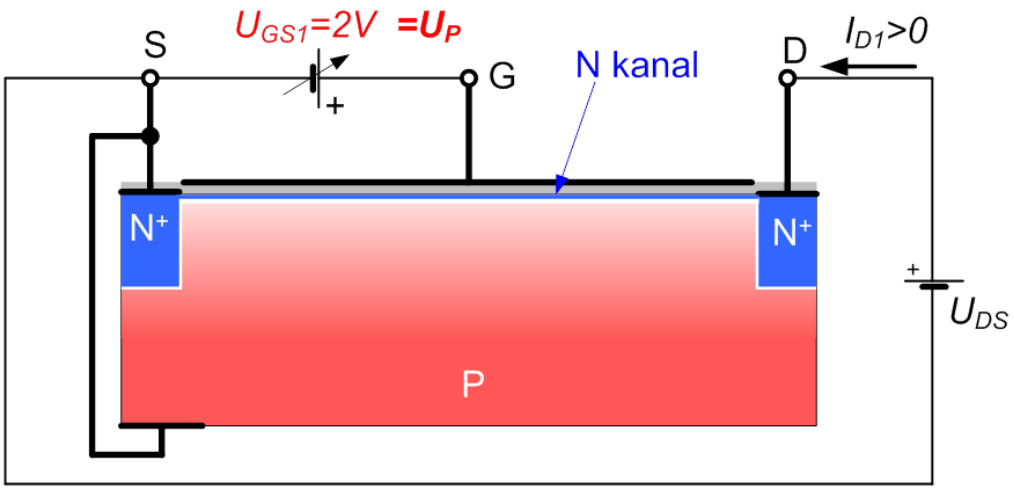
Slika 10 . Povećanje koncentracije elektrona u površinskom sloju podloge

Pri tome nema nikakve ulazne struje, za ovu fazu procesa dovoljno je samo električno polje koje se stvara između upravljačke elektrode i podloge. Daljnjim povećanjem ulaznog napona U_{GS} , sve više elektrona se skuplja pri vrhu podloge (na Slici 11 prikazano blijeđenjem crvene boje) i sve više šupljina se potiskuje dublje u podlogu. Pri ovome je desni PN spoj i dalje zaporno polariziran (N strana je na većem potencijalu od P strane) pa izlazne struje I_D i dalje nema.



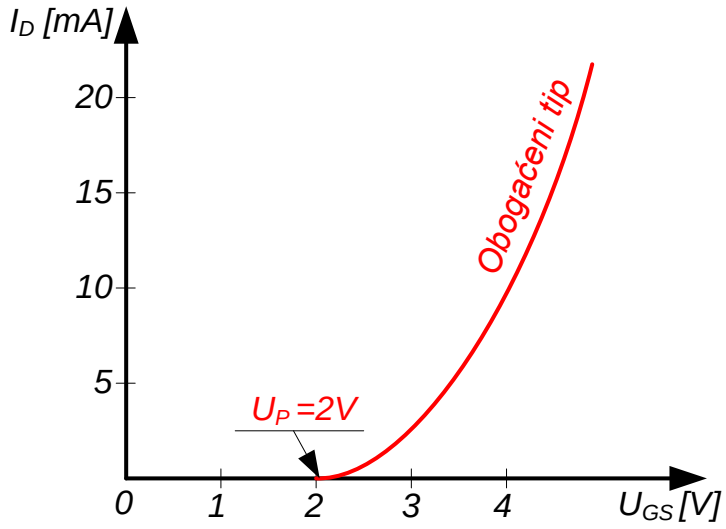
Slika 11. Povećanje koncentracije elektrona u površinskom sloju uslijed rasta ulaznog napona

Ako se U_{GS} nastavi povećavati, za dovoljno velik iznos U_{GS} koncentracija elektrona pri vrhu podloge toliko raste da se izjednači sa koncentracijom šupljina. Ovo područje se više ne ponaša kao P tip poluvodiča , već se može smatrati N tipom poluvodiča tj. možemo reći da je formiran N kanal (Slika 12.). Ovaj efekt naziva se inverzija kanala a iznos napona koji je bio potreban za ovo je napon praga U_P (u ovom primjeru U_P= 2V). Sada više nemamo dva PN spoja, već samo jedan, a s obzirom na to da su dva N područja sada spojena N kanalom, struja I_D počinje teći kroz kanal između dovodne i odvodne elektrode.



Slika 12. Formiranje N kanala

Prijenosna karakteristika (Slika 13.) grafički prikazuje kako ulazni napon U_{GS} upravlja izlaznom strujom I_D. Dok je ulazni napon manji od napona praga ovaj tranzistor je "izgašen" tj. nema izlazne struje. Nakon inverzije kanala U_{GS} dosegne U_P te se daljnjim povećanjem U_{GS} povisuje koncentracija elektrona pa je otpor kanala sve manji odnosno izlazna struja I_D nelinearno raste sa rastom ulaznog napona.

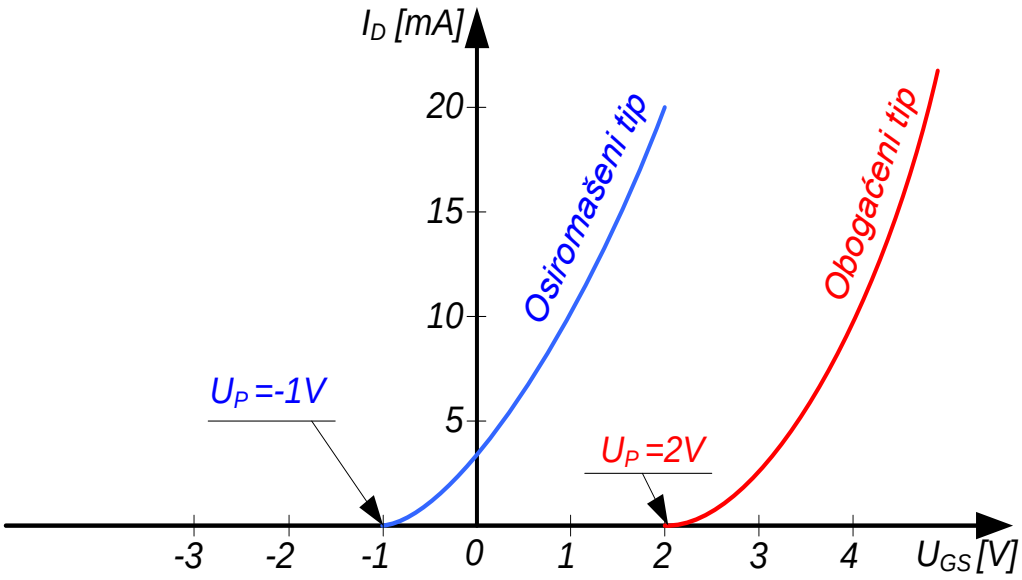


Slika 13. Prijenosna karakteristika obogaćenog N kanalnog tranzistora

3.7. Osnovni princip rada n-kanalnog tranzistora osiromašenog tipa

Princip rada ovakvog tranzistora isti je kao princip rada obogaćenih tranzistora uz razliku da će, kod ovakvih tranzistora kanal inicijalno postojati. Stoga, čak i ako ulaznog napona nema (U_{GS}=0), kod osiromašenog tipa MOSFETa postoji kanal , pa samim time i I_D. Shodno tome, mogu raditi i za $U_{GS} < 0$, pri tome se elektroni "odbijaju" iz kanala pa otpor raste (kanal se osiromašuje).

Osiromašeni MOS-ovi mogu raditi u dva moda rada: obogaćeni mod pri $U_{GS} > 0$ (kanal se obogaćuje) i osiromašeni mod pri $U_{GS} < 0$ (kanal se osiromašuje). Ako se U_{GS} nastavi smanjivati, kada je $U_{GS} \leq U_P$ (napon praga je kod osiromašenih NMOSa negativan) izlazna struja I_D pada na 0 tj. toliko elektrona se odbije iz kanala, da on prestane postojati . Prijenosna karakteristika na Slici 14. potkrepljuje upravo iznešene tvrdnje.

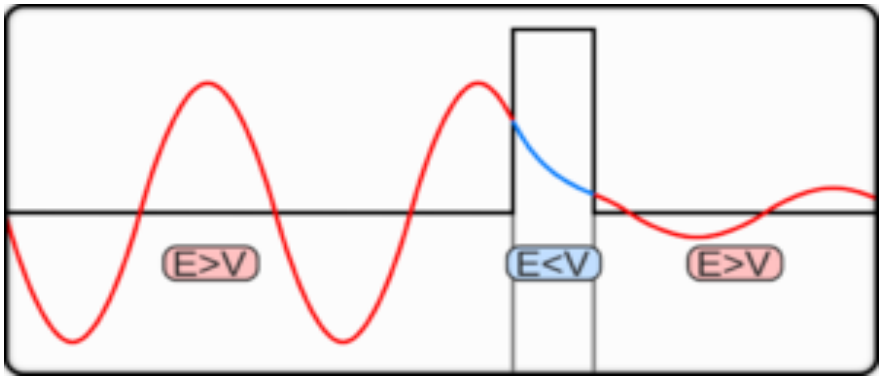


Slika 14. Prijenosna karakteristika osiromašenog N kanalnog tranzistora

4. KVANTNOMEHANIČKO TUNELIRANJE

Pojam kvantnomehaničko tuneliranje odnosi se na pojavu u kojoj čestica prolazi kroz barijeru koju prema Newtonovim zakonima ne bi mogla savladati. Ovaj fenomen igra veoma bitnu ulogu u fizičkim fenomenima poput nuklearne fisije i fuzije, koje se odvijaju u velikim zvijezdama poput sunca te pronalaze primjenu u modernim uređajima kao što su diode s efektom tuneliranja i skenirajući tunelski mikroskop.

Kako bi razumjeli pojavu, čestice koje putuju kroz potencijalne barijere mogu se usporediti sa lopticom koja se pokušava otkotrljati preko brežuljka; kvantna mehanika i klasična mehanika se razlikuju u shvaćanju ove pojave. Klasična mehanika predviđa da će se loptica, koja nema dovoljno energije otkotrljati unatrag. Ili da će se, zbog nedovoljne količine energije da prodre kroz brežuljak, odbiti od zid. U najekstremnijem slučaju, loptica sa velikom količinom energije će se jednostavno ukopati u površinu zida . Prema učenju kvantne mehanike, loptica koja predstavlja česticu će, s veoma malom vjerovatnošću prodrijeti na drugu stranu barijere. Razlog postojanju ovih razlika u tumačenju jest taj da se u kvantnoj mehanici čestica ujedno smatra valom i česticom (Slika 15.).



Slika 15. Energija čestice koja je "tunelirala" kroz barijeru je ista ali je amplituda sinusoide smanjena

Dimenzije pri kojima se fenomen tuneliranja odvija ovisi o valnoj duljini vala koji prolazi kroz barijeru. Za elektrone debljina barijere je svega nekoliko nanometara dok npr. za alfa čestice koje tuneliraju iz jezgre atoma van, debljina barijere mora biti znatno manja.

Prema Schrödingerovoj jednadžbi (koja se koristi zbog valne prirode čestica) kinetička energija čestice u području barijere bi trebala biti negativna. Prema Newtonovim zakonima materijalna čestica ne može ući u područje u kojem bi mu kinetička energija bila negativna. Međutim, delokalizirana čestica može proći kroz takvo područje ako su uvjeti povoljni . Stoga elektron koji se približava barijeri predstavljamo valnom frontom koji u nekim materijalima može biti duga 10 – 20 nm. Ovo znatno otežava točan grafički prikaz tuneliranja.

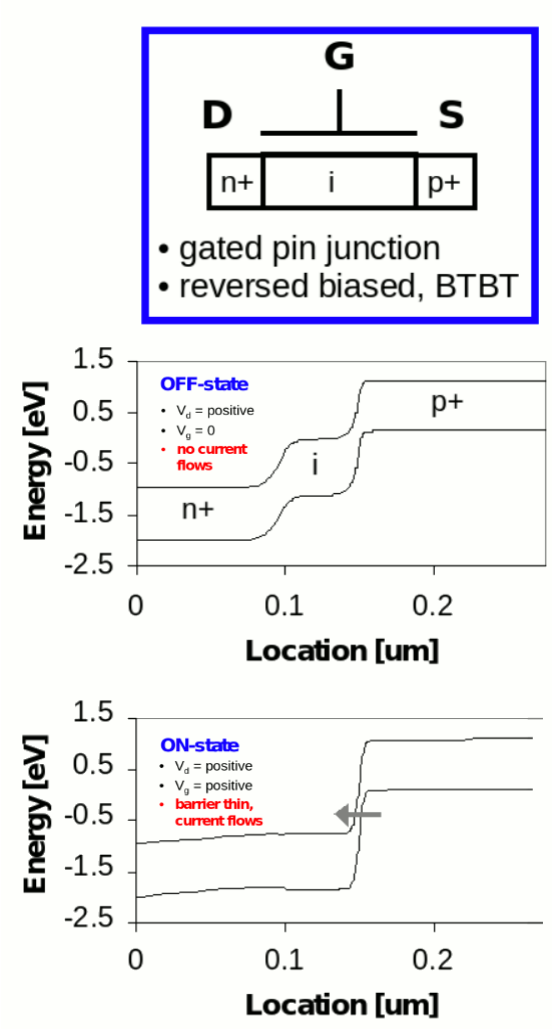
5. TRANZISTORI S TUNELIRANJEM

5.1. Tunelirajući tranzistor s efektom polja – TFET

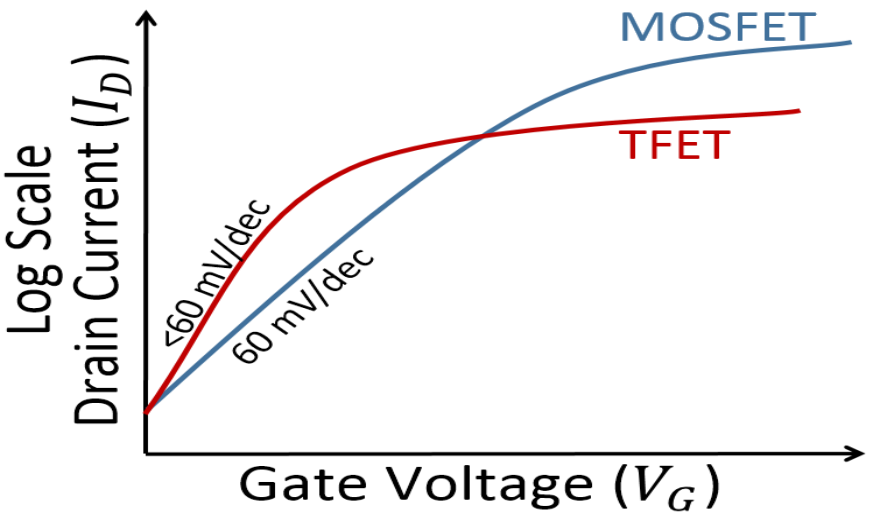
Kod TFET tranzistora javlja se tuneliranje između energetskih vrpci. Točnije elektron iz valentne vrpce poluvodiča tunelira kroz zabranjeni pojas do vodljive vrpce. Zabranjeni pojas se ponaša kao potencijalna barijera kroz koju elektron prolazi. Kod direktnog tuneliranja elektron putuje kroz potencijalnu barijeru bez emisije ili absorbcije fotona dok se, kod indirektnog tuneliranja, javlja promjena energije zbog emisije ili absorbcije fonona. Proces direktnog tuneliranja je visoko nefavoriziran kod materijala poput silicija, jer je zabranjeni pojas za direktno tuneliranje znatno veći od pojasa za indirektno tuneliranje te se shodno tome

jako smanjuje vjerovatnost prolaska elektrona kroz barijeru. Glavni izazov kod izrade novih, komercijalno konkurentnih TFET tranzistora je postizanje dovoljno velike izlazne struje I_D koja se postiže kreiranjem većeg nivoa dopiranja. Slika 16 prikazuje izgled N kanalnog TFET tranzistora koji uključuje: visoko dopiranu dovodnu elektrodu (p^+ source) , područje kanala napravljeno od izolatora i odvodnu elektrodu (n^+ drain) .

Dok se kod MOSFET tranzistora broj slobodnih nositelja naboja povećava termalnom injekcijom, TFET tranzistori se koriste tuneliranjem među vrpcama što ih čini energetski prihvatljivijim i bržim. Kao što je vidljivo iz priloženih dijagrama energetskih vrpci, u "Off" stanju tranzistora postoji široka potencijalna barijera , posljedično tome se ne javlja tuneliranje. Međutim, kada napon na upravljačkoj elektrodi premaši vrijednost napona praga , potencijalna barijera se znatno sužava te je omogućeno tuneliranje. Točnije, postizanjem dovoljno velikog napona, valentna vrpca izolatora se podiže iznad vodljive vrpce dovodne elektrode te se uspostavlja vodljivi kanal. Ovo nazivamo "On" stanjem tranzistora. Budući da se za dobivanje velikog broja slobodnih nositelja naboja, kod ovih tranzistora koristi tuneliranje, moguće je ostvariti iznos nagiba (strminu) prijenosne karaktersitike manji od 60 mV/dec što je, dosadašnjim tehnologijama i tipovima tranzistora bilo nemoguće (Slika 17). Drugim riječima, ovaj revolucionarni mikroelektronski element omogućuje da se uz manji napon ostvaruje veće pojačanje. Cilj optimizacije rada TFET tranzistora je postizanje što veće izlazne struje u stanju "ON", što manju vrijednost nagiba prijenosne karakteristike i što manja izlazna struja za "OFF" stanje tranzistora. Kako bi novi tranzistor bio konkurentan ciljane vrijednosti koje se moraju postići su ; izlazna struja za "ON" stanje reda veličine od nekoliko stotina miliampera, nagib prijenosne karakteristike znatno manji od 60 mV/dec te omjer struja u stanju "ON " i "OFF" veći od 10^5.



Slika 16 . N kanalni TFET sa dijagramima vrpci za ''ON'' i ''OFF'' stanje



Slika 17 . Usporedba prijenosnih karakteristika MOSFET i TFET tranzistora

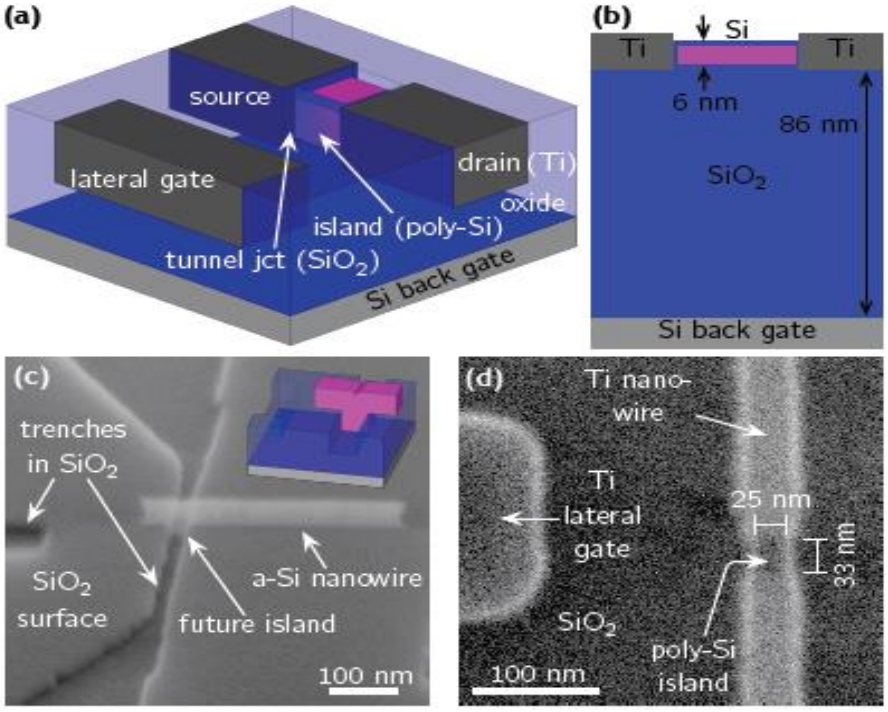
5.2. Nanokristalni tranzistor s efektom polja – ncFET

Pricip rada ovakvog tranzistora je sličan tunelirajućem tranzistoru sa dvije barijere. Barijere su sačinjene od jako tankog silicijevog dioksida, a područje kanala od polikristaličnog silicija. Silicijev nanokristal premošten je sa dvije metalne elektrode (source / drain). Ovako izrađen tranzistor omogućava nagib prijenosne karakteristike manji od 60 mV/dec i zanemarivo malen gubitak struje u off stanju. Izgled tranzistora prikazan je na slici 18. Širina nanocjevčice koja tvori dovodnu i odvodnu elektrodu je 25 nm, a debljina joj je 20 nm. Bočna upravljačka elektroda smještena je 180 nm od silicijevog "otočića" koji se nalazi između dovodne i odvodne elektrode. Širina kanala je 25 nm.

Kao što je vidljivo iz I_D – U_G dijagrama na Slici 19., izlazna struja eksponencijalno raste s naponom na upravljačkoj elektrodi, što je jasan znak da dolazi do tuneliranja. Budući da je dovodna elektroda sačinjena od metala, opskrba elektronima nije limitirajući faktor. Štoviše, na ovaj način sačinjena dovodna elektroda može proizvesti znatno veće električno polje od dopiranih spojeva.

U skladu s tim, bolja elektrostatika upravljačke elektrode rezultirat će većom izlaznom strujom u "ON" stanju rada tranzistor. Kod ovako izrađenih tranzistora, dobivene vrijednosti izlazne struje od 2.5 μA/μm pri U_G= 25V već konkuriraju strujama koje mogu proizvesti TFET tranzistori. Pretpostavlja se da je, daljnjom optimizacijom rada ovih tranzistora,

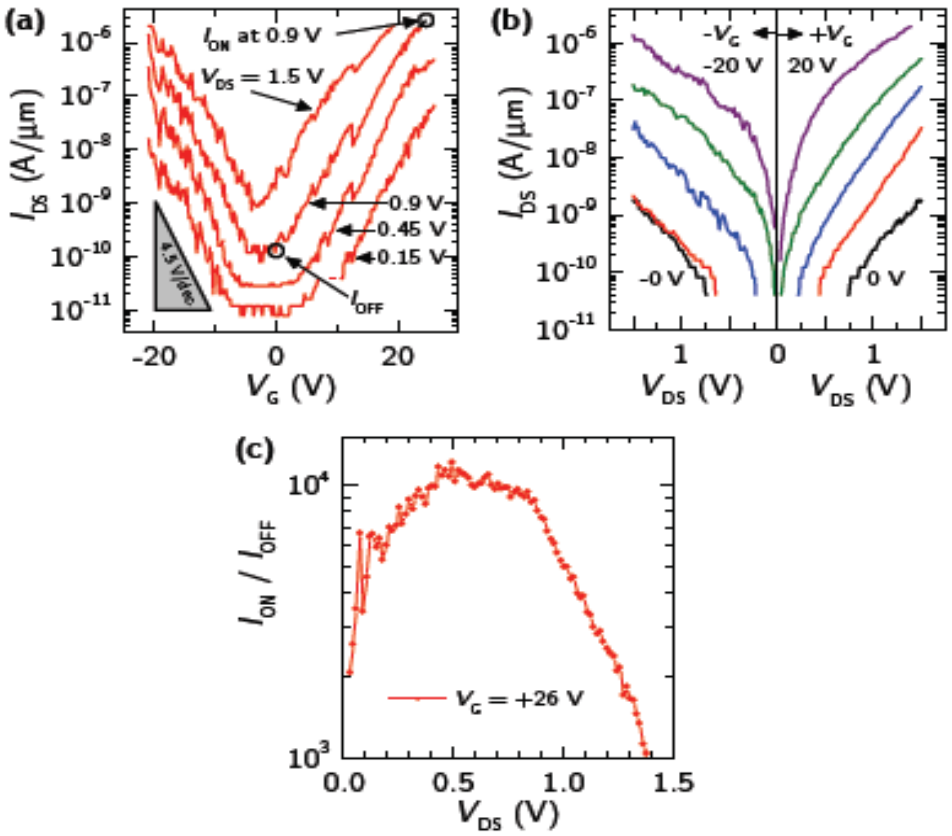
moguće doseći izlazne struje u "ON" stanju i do 150 μA/μm , čime bi ovi tranzistori sustigli TFET tranzistore i FET tranzistore sa Schottky barijerom.



Slika 18 . a) Shematski prikaz tranzistora . b) Presjek shematskog prikaza sa odgovarajućim dimenzijama . c) Bočna slika tranzistora u fazi izrade , učinjena skenirajućim elektronskim mikroskopom . Prikazuje nancijev sa dovodnom i odvodnom elektrodom , bočnu upravljačku elektrodu i silicijevu nanocijev koja se preklapa sa odvodnom/dovodnom elektrodom formirajući tranzistorski "otočić" d) Tlocrt izrađenog tranzistora učinjen pomoću skenirajućeg elektronskog mikroskopa

Pri niskim vrijednostima za U_G i U_{DS} kod ovih tranzistor, na Slici 19. a) vidljiv je gubitak struje. Točnije, gubi se 120 pA/μm uz $U_{DS} = 0.9$ V što je 830 puta manji gubitak od gunitka kod obogaćenih MOSFET tranzistora. Veoma važan parametar je i odnos izlaznih struja u "ON" i "OFF" stanju. Kao što je vidljivo iz slike 2 c) omjer I_{on}/I_{off} se održava iznad 10^3 za spektar napona od 0V do 1.5V i dostiže vrijednost od $1.2 * 10^4$. Taj omjer čini ncFET prikladnim za rad pri niskim i pri visokim naponima. Dok bi za poboljšanje I_{off} bio potreban znatno duži kanal , I_{on} se lako može povećati. Redizajniranjem struktura unutar tranzistora predviđene vrijednosti za I_{on}/I_{off} dostižu i do 10^6 a za I_{on} do 150 μA/μm, što je dovoljno da se ovaj model tranzistora odmah smatra konkurentnim MOSFET tranzistoru. Važno je i

napomenuti da je izlazni napon za "ON" stanje od 150 µA/µm u jednom eksperimentu ostvaren.

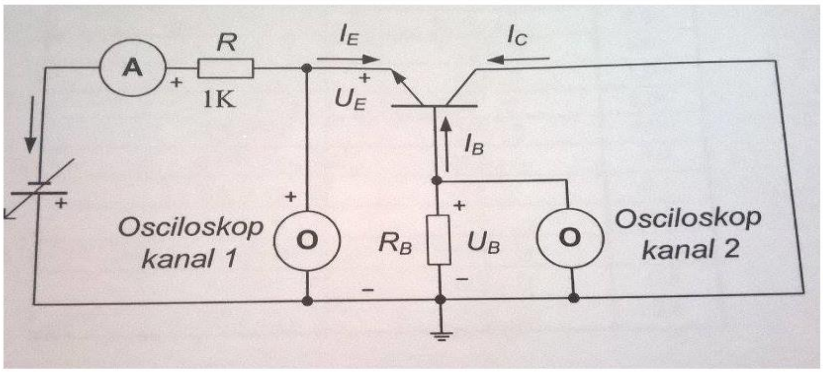


Slika 19 . a) I_{DS}-V_G karakteristika za V_{DS}= 0.15 V , 0.45 V , 0.9 V i 1.5 V b) I_{DS}-V_{DS} karakteristika za pozitivne i negativne vrijednosti V_G c) Odnos I_{on}/I_{off} kao funkcija napona V_{DS}

6. EKSPERIMENT

6.1. Opis i provedba eksperimenta

Cilj ovog eksperimenta je određivanje statičke karakteristike npn tranzistora. Uspješnim i preciznim određivanjem tog odnosa možemo dati grafičku usporedbu triju opisanih vrsta tranzistora: bipolarni, unipolarni i tranzistori s tuneliranjem. Važno je i napomenuti da se mjerenja na npn tranzistoru vrše u normalnom aktivnom području rada.



Slika 20. Sklop za mjerenje

Spoj se sklapa prema slici 20. Otpornik R_B pri mjerenju tranzistora u normalnom aktivnom području ima otpor R_B= 100 kΩ. Pomoću izvora napajanja namješta se istosmjerna struja emitera I_E prema vrijednostima upisanim u tablicu 1. Struja emitera očitava se na ampermetru. Pomoću osciloskopa mjere se naponi na emiteru U_E i bazi U_B . Napon U_{BE} dobiva se kao razlika napona:

$$U_{BE} = U_B - U_E .$$

Struja baze dobiva se iz poznate vrijednosti otpornika R_B i izmjerenog napona baze U_B :

$$I_B = -U_B / R_B .$$

Tranzistor radi u normalnom aktivnom području kada je pn spoj baza-emiter propusno polariziran , a pn spoj baza-kolektor zaporno polariziran . Za npn tranzistor to znači da napon U_{BE} mora biti pozitivan, a napon U_{BC} mora biti negativan.

$$U_{BE} > 0 \quad i \quad U_{BC} < 0$$

U slučaju da je napon $U_{BC} < 0$, tranzistor radi na granici normalnog aktivnog područja i područja zasićenja. Budući da je kolektor spojen na masu, a napon baze U_B je mali, može se pretpostaviti da je $U_{BC} \approx 0$.

Iz poznatih vrijednosti struja I_E i I_B faktor strujnog pojačanja u spoju zajedničkog emitera β određuje se prema:

$$I_E = -(1+\beta)\, I_B$$

odakle slijedi da je:

$$\beta = -(I_E / I_B) - 1$$

Iz poznatog faktora β dobiva se faktor strujnog pojačanja u spoju zajedničke baze prema:

$$\alpha = \beta/(\beta+1)$$

Struja kolektora računa se iz izraza:

$$I_C \approx \beta I_B$$

I_E (mA)	U_E (mV)	U_B (mV)	U_{BE} (mV)	I_B(μA)	α	β	I_C (mA)
-0,5	-905	-302	603	3,01	0,994	165,11	0,497
-1,0	-1200	-615	585	6,15	0,994	161,60	0,415
-1,5	-1500	-880	620	8,8	0,994	169,45	1,491
-2,0	-1720	-1110	610	11,1	0,994	179,18	1,989
-2,5	-2000	-1360	640	11,36	0,995	219,07	2,49

Tablica 1. Rezultati mjerenja i računanja za napon $U_{BC} \approx 0$. Treba primijetiti da je napon U_B negativan , te da je napon U_E također negativan , ali da je napon $U_{BE} > 0$ što je osnovni uvjet da bi spoj baza – emiter bio propusno polariziran

Iz izračunatih parametara za α i β kreće se u izračun za statičku karakteristiku. Izlazne karakteristike tranzistora u spoju zajedničke baze dobro su opisane izrazom:

$$I_C = -\alpha I_E + I_{CB0}\left(1 - \exp\left(-U_{CB}/U_T\right)\right)$$

Gdje je I_C struja kolektora (izlazna struja), I_E struja emitera (ulazna struja), U_{CB} između kolektora i baze (izlazni napon), α i I_{CB0} su konstante, a U_T= 25,84 mV je naponski ekvivalent temperature.

Potrebno je odrediti struje kolektora I_C za struje emitera -1 mA i -2 mA za napone U_{CB} zadane u tablici 2 (α=0,995 i I_{CB0}=0,1Na). Porast struja odvoda tranzistora u području zasićenja se zanemaruje.

U_{CB} (V)	I_E= -1mA	I_E= -2mA
	I_C (mA)	
-0,5	-24,329	-23,334
-0,4	0,467	1,462
-0,3	0,984	1,979
-0,2	0,994	1,989
-0,1	0,995	1,989
0,0	0,995	1,990
1,0	0,995	1,990
2,0	0,995	1,990
3,0	0,995	1,990
4,0	0,995	1,990
5,0	0,995	1,990

Tablica 2. Struja kolektora I_C za zadane struje emitera I_E i napone U_{CB}

I_E= -1 mA

$I_{C1} = -\alpha I_E + I_{CB0}\left(1 - \exp\left(-U_{CB1}/U_T\right)\right)$= -24,329 mA

$I_{C2} = -\alpha I_E + I_{CB0}\left(1 - \exp\left(-U_{CB2}/U_T\right)\right)$ =0,467 mA

$I_{C3}= -\alpha I_E + I_{CB0}(1 – \exp(-U_{CB3}/U_T)) = 0{,}984$ mA

$I_{C4}= -\alpha I_E + I_{CB0}(1 – \exp(-U_{CB4}/U_T)) = 0{,}994$ mA

$I_{C5}= -\alpha I_E + I_{CB0}(1 – \exp(-U_{CB5}/U_T)) = 0{,}995$ mA

$I_{C6}= -\alpha I_E + I_{CB0}(1 – \exp(-U_{CB6}/U_T)) = 0{,}995$ mA

$I_{C7}= -\alpha I_E + I_{CB0}(1 – \exp(-U_{CB7}/U_T)) = 0{,}995$ mA

$I_{C8}= -\alpha I_E + I_{CB0}(1 – \exp(-U_{CB8}/U_T)) = 0{,}995$ mA

$I_{C9}= -\alpha I_E + I_{CB0}(1 – \exp(-U_{CB9}/U_T)) = 0{,}995$ mA

$I_{C10}= -\alpha I_E + I_{CB0}(1 – \exp(-U_{CB10}/U_T)) = 0{,}995$ mA

$I_{C11}= -\alpha I_E + I_{CB0}(1 – \exp(-U_{CB11}/U_T)) = 0{,}995$ mA

$I_E= -2$ mA

$I_{C1}= -\alpha I_E + I_{CB0}(1 – \exp(-U_{CB1}/U_T)) = -23{,}334$ mA

$I_{C2}= -\alpha I_E + I_{CB0}(1 – \exp(-U_{CB2}/U_T)) = 1{,}462$ mA

$I_{C3}= -\alpha I_E + I_{CB0}(1 – \exp(-U_{CB3}/U_T)) = 1{,}979$ mA

$I_{C4}= -\alpha I_E + I_{CB0}(1 – \exp(-U_{CB4}/U_T)) = 1{,}989$ mA

$I_{C5}= -\alpha I_E + I_{CB0}(1 – \exp(-U_{CB5}/U_T)) = 1{,}989$ mA

$I_{C6}= -\alpha I_E + I_{CB0}(1 – \exp(-U_{CB6}/U_T)) = 1{,}999$ mA

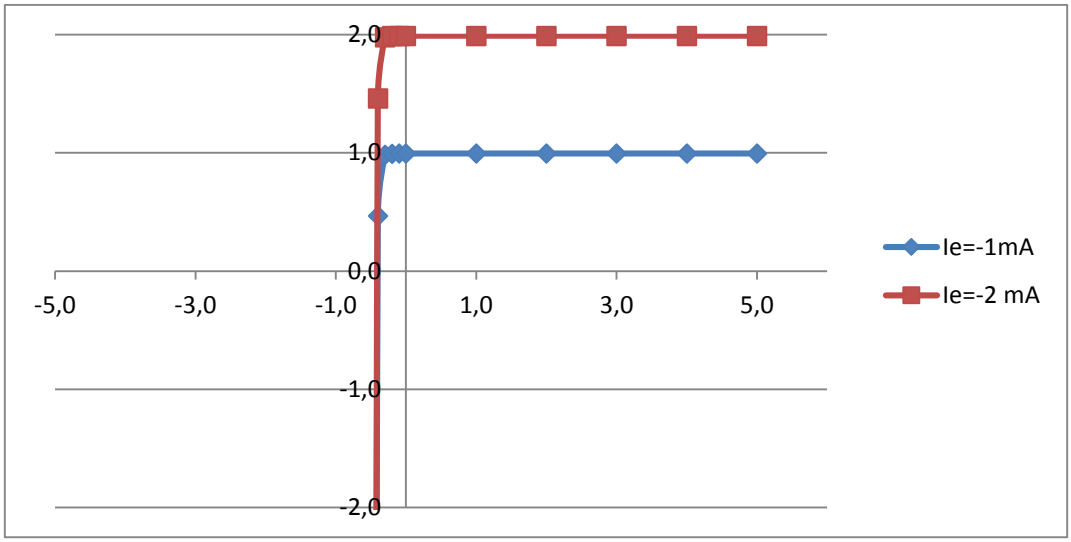
$I_{C7}= -\alpha I_E + I_{CB0}(1 – \exp(-U_{CB7}/U_T)) = 1{,}999$ mA

$I_{C8}= -\alpha I_E + I_{CB0}(1 – \exp(-U_{CB8}/U_T)) = 1{,}999$ mA

$I_{C9}= -\alpha I_E + I_{CB0}(1 – \exp(-U_{CB9}/U_T)) = 1{,}999$ mA

$I_{C10}= -\alpha I_E + I_{CB0}(1 – \exp(-U_{CB10}/U_T)) = 1{,}999$ mA

$I_{C11}= -\alpha I_E + I_{CB0}(1 – \exp(-U_{CB11}/U_T)) = 1{,}999$ mA



Slika 21. Struja kolektora I_C prema tablici 2

6.2. Rasprava rezultata

Uz pomoć grafičkog rezultata ovog eksperimenta, možemo usporediti performanse tranzistora koje smo u ovom radu opisali. Za početak možemo napraviti usporedbu sa unipolarnim N kanalnim tranzisorom (obogaćenog tipa). Ako usporedimo prijenosne karakteristike MOSFET N kanalnog tranzistora sa prijenosnom karakteristikom npn tranzistora razlike su jasno vidljive (Slike 13 i 21). Očito je da MOSFET tranzistor pri manjim naponima ostvaruje veće vrijednosti izlazne struje. Samom tom činjenicom možemo zaključiti da je gubitak struje na MOSFET tranzistoru manji nego kod bipolarnih tranzistora. Nadalje, možemo zaključiti da je odnos struja u "ON" i "OFF" stanju veći kod MOSFET tranzistora što ih , uz gore navedene odlike rada čini mnogo boljima za rad.

Usporedbu MOSFET i TFET tranzistora dali smo u poglavlju 4.1. Njihove razlike najbolje su uočljive na slici 17. Osim što mogu ostvariti veće izlazne struje od MOSFET tramzistora TFET tranzistori prvi su tip tranzistora koji je uspio ostvariti nagib prijenosne karakteristike manji od 60 mV/dec i samim time on predstavlja revoluciju u svijetu mikroelektronike. Također smo vidjeli kako odnos izlaznih struja u "ON" i "OFF" stanju kod ncFET tranzistora može dosegnuti vrijednosti i do 10^6 što je veća vrijednost od svih drugih tipova tranzistora. Iz obavljenog eksperimenta i navedenih činjenica jasno je da su TFET tranzistori neosporivo najkvalitetniji mikroelektronski elementi.

7. ZAKLJUČAK

U ovom radu, iznesene su najbitnije karakteristike različitih vrsta tranzistora koji su se kroz vrijeme razvijali. Vidjeli smo da je, stalnim tehnološkim napredkom potreba za manjim i ekonomičnijim tranzistorima postajala sve veća. Konačno, razvojem kvantne kemije i primjenom kvantnomehaničkog tuneliranja u radu tranzistora ostvaren je boljitak čiji potencijali još nisu do kraja iskorišteni.

Kvantni tranzistori predstavljaju novo poglavlje u razvoju mikroelektronike. Vidjeli smo da tri glavna parametra prema kojima se ocjenjuje rad tranzistora (I_{ON}/I_{OFF} , nagib prijenosne karakteristike i gubitak struje) itekako pokazuju da su TFET tranzistori daleko prihvatljiviji u radu nego dosadašnji tranzistori. Izlazne struje koje se postižu u nanokristalnim tranzistorima s efektom polja (ncFET) daljnjim unaprijeđenjem mogu dostići vrijednosti i do 150 μA/μm čime su ovi tranzistori izjednačeni po izlaznim strujama sa Schottky FET trantzistorima i TFET tranzistorima , uz manje gubitke struje i veće odnose I_{ON}/I_{OFF} . Također, na primjeru nanokristalnog tranzistora s efektom polja (ncFET) možemo uočiti da optimizacijom i redizajniranjem ovih tranzistora njihove karakteristike postaju sve bolje i prihvatljivije za rad. Stariji tipovi tranzistora, kao što smo pokazali u eksperimentalnom djelu rada, svojim karakteristikama više ne mogu konkurirati kvantnim tranzistorima. Međutim, bipolarni tranzistori, koji pokazuju od svih najlošije strujno naponske karakteristike, još uvijek nalaze primjenu u određenim instrumentima za čiji rad su prikladni (npr . različiti emiteri radiovalova). Također, unipolarni tranzistori i danas nalaze primjenu ali sa znatno lošijim karakteristikama od kvantnih tranzistora.

Iz svega navedenog, vidljivo je da je razvoj tranzistora s kvantnim tuneliranjem tek u svojim početcima. Mogućnosti izrade sklopova s kvantnim tranzistorima su brojne i još neotkrivene, a karakteristike stavljaju karakteristike unipolarnih i bipolarnih tranzistora u sjenu.

8. POPIS SIMBOLA

E_C - energija vodljive vrpce

E_V – energija valentne vrpce

Eg – energija zabranjene vrpce

U_B- napon baze

U_{CB} – napon na spoju kolektor baza

U_{BE} – napon na spoju baza emiter

U_T – naponski ekvivalent temperature

I_B – struja baze

Ic- struja kolektora

I_E – struja emitera

β_r – reverzno strujno pojačanje signala

α_f - strujno pojačanje u spoju zajedničke baze

V^{be} – napon spoja BE

I_s – struja zasićenja

U_{GS} – ulazni napon MOSFET tranzistora

U_P – napon praga

I_D- izlazna struja

9. LITERATURA

- Butković, Ž., Divković Pukšec, J., Barić, A., Elektronika 1, nastavni materijal, Zagreb, 2012.
- Esfandyarpour, R., Tunneling field effect transistors, coursework, Stanford university, 2012.
- Harvey-Collard, P., Droin, D., Pioro-Ladriere, M., A silicon nanocrystal tunnel field effect transistor, 2014.
- http://andersoninstitute.com/quantum-tunneling.html (pristup 10. kolovoza 2015.)
- http://infoscience.epfl.ch/record/148596/files/EPFL_TH4729.pdf (pristup 18. kolovoza 2015.)
- http://phys.org/news/2013-06-harnessing-potential-quantum-tunneling-transistors.html (pristup 8. kolovoza 2015.)
- http://spectrum.ieee.org/semiconductors/devices/the-tunneling-transistor (pristup 12. kolovoza 2015.)
- Koričić,M., Križan, M., Krois, I., Mandić, T., Poljak,M., Žonja, S., Elektronika 1, laboratorijski priručnik, Zagreb, 2014., str. 22-29
- Neamen, D.A., Semiconductor physics and devices, The McGraw-Hill companies , 2003., str. 104-115
- Neamen, D.A., The field effect transistor , u: Neamen, D.A., Microelectronics circuit analysis and design, The McGraw-Hill companies, 2007., str. 126-146
- Stepanenko, I.P., Fundamentals of microelectronics, MIR publishers, Moscow, 1982., str.22-65
- Sze,S.M., Physics of semiconductor devices, A division of John wiley and sons, London, 2003., str. 77-96, str.319-351