

Aneta Prijić

**ELEKTRONSKA FIZIKA ČVRSTOG
TELA
-računske vežbe-**

studijski program

Mikroelektronika i mikrosistemi

(III semestar)

ANIMACIJA 1

Fermi-Dirac-ova raspodela i Fermi-jev nivo

UVODNE NAPOMENE

Ova animacija je deo skupa interaktivnih kompjuterskih animacija* namenjenih ilustraciji principa rada poluprovodničkih komponenata. Animacije su urađene u vidu međusobno povezanih *.m fajlova koji se pokreću ukucavanjem naredbe **usd1** u komandni prozor programa MATLAB (verzija 5.0 ili viša).

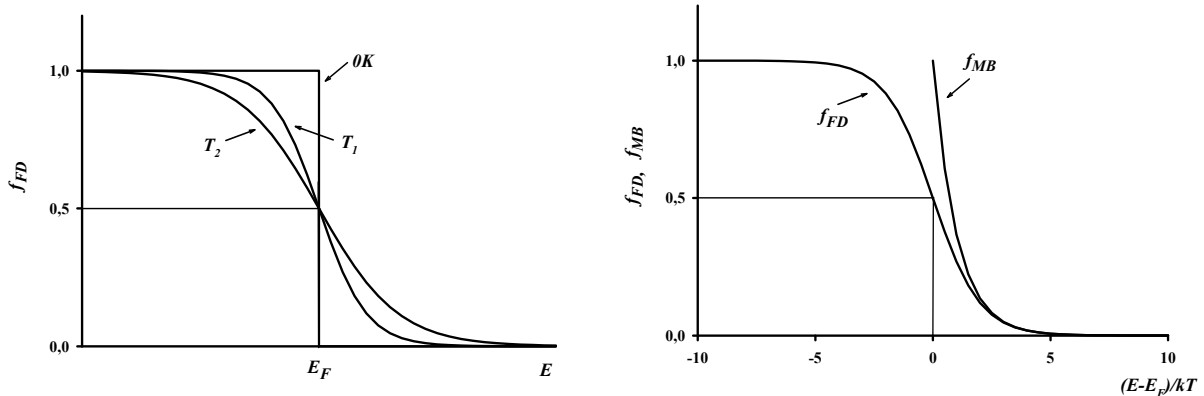
Prikazan je uticaj širine zabranjene zone (vrste poluprovodnika), temperature i koncentracije primesa na položaj **Fermi-jevog** nivoa i koncentracije slobodnih nosilaca naelektrisanja u provodnoj i valentnoj zoni poluprovodnika.

Verovatnoća da elektron zauzme stanje kome odgovara energija E na nekoj temperaturi T data je *Fermi-Dirac*-ovom funkcijom raspodele:

$$f_{FD}(E, T) = \frac{1}{1 + e^{\frac{E-E_F}{kT}}}$$

Za energetske nivoe koji su udaljeni od *Fermi-jevog* nivoa ($E-E_F \geq 3kT$) eksponencijalni član je mnogo veći od 1 tako da se *Fermi-Dirac*-ova funkcija može zameniti *Maxwell-Boltzmann*-ovom:

$$f_{MB}(E, T) = e^{-\frac{E-E_F}{kT}}$$



$$n = N_C e^{-\frac{E_C - E_F}{kT}};$$

$$p = N_V e^{-\frac{E_F - E_V}{kT}};$$

$$N_C = 2 \left(\frac{2\pi m_{de} kT}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} = 2.8 \cdot 10^{19} \left(\frac{T}{300K} \right)^{\frac{3}{2}};$$

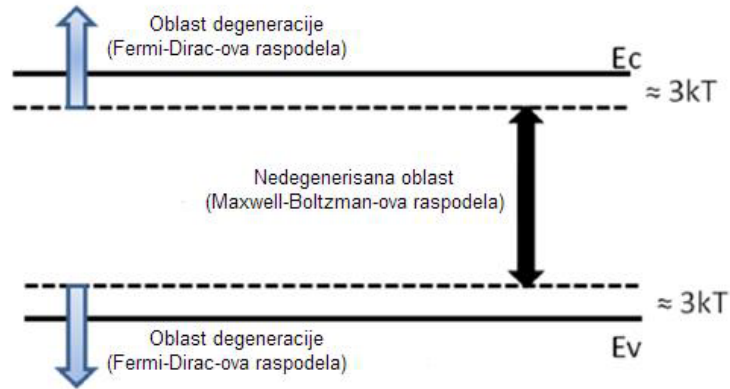
$$N_V = 2 \left(\frac{2\pi m_{dh} kT}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} = 1.08 \cdot 10^{19} \left(\frac{T}{300K} \right)^{\frac{3}{2}}.$$

* Ovo su prilagođene verzije originalnih animacija sa CD ROM-a priloženog uz udžbenik *Understanding Semiconductor Devices* (Oxford University Press, New York, 2000) čiji je autor prof. Sima Dimitrijević (Griffith University, Australia). Animacije su namenjene vežbanjima studenata na fakultetu, a bilo kakvo dodatno umnožavanje i/ili distribucija nije dozvoljeno!

Na osnovu gornjih izraza za koncentraciju sopstvenih nosilaca - n_i u slabo i umereno dopiranim poluprovodnicima važi:

$$n_i = \sqrt{N_C N_V} e^{-\frac{E_g}{2kT}}.$$

U jako dopiranom (degenerisanom) poluprovodniku za proračun koncentracije nosilaca se mora koristiti *Fermi-Dirac*-ova statistika. Važenje odgovarajuće funkcije raspodele u zavisnosti od položaja *Fermi*-jevog nivoa u odnosu na granice zona je prikazano na dijagramu.



Student: _____

Broj indeksa: _____

Datum: _____

UPUTSTVO ZA RAD

Pokrenuti program MATLAB, proveriti da li je definisana odgovarajuća putanja do direktorijuma sa *.m fajlovima, a zatim u komandni prozor ukucati naredbu: **usd1**.

- 1) Sa spiska animacija izabrati **Fermi-Dirac-ova raspodela i Fermi-jev nivo** i mišem kliknuti **START**. Pažljivo pročitati kratak opis animacije, a zatim **KLIKNI ZA NASTAVAK!**
- 2) Na monitoru se pojavljuje dijagram energetskih zona silicijuma na $T=300$ K ($E_g=1.12$ eV) sa podjednakom koncentracijom donorskih i akceptorskih primesa ($N_A=N_D=10^{14}$ cm⁻³ - može se smatrati nedopiranim poluprovodnikom) i dijagram koji predstavlja *Fermi-Dirac*-ovu funkciju raspodele, odnosno verovatnoću da elektron (crna linija) ili šupljina (bela linija) zauzme nivo kome odgovara energija E . Ovaj dijagram može biti prikazan u linearnoj ili logaritamskoj razmeri. Desno, jedna ispod druge, nalaze se komande za izbor materijala (podešavanje širine zabranjene zone), nivoa dopiranja (tj. koncentracije primesa) N- i P-tipa, izbor temperature kristala i završetak vežbe (ZATVORI).
- 3) Ne menjajući početna podešavanja (materijal, dopiranje, temperatura), uočiti prisustvo izvesnog broja slobodnih elektrona u provodnoj i šupljina u valentnoj zoni, kao i verovatnoću zauzimanja odgovarajućih energetskih nivoa. Lagano smanjivati širinu zabranjene zone do vrednosti $E_g=0.66$ eV (germanijum) i naniže, a zatim povećavati širinu zabranjene zone do vrednosti $E_g=1.42$ eV (galijum-arsenid) i naviše. Šta se dešava sa koncentracijama slobodnih elektrona i šupljina pri smanjivanju, a šta pri povećavanju širine zabranjene zone?

Kojim izrazom je matematički opisano ovakvo ponašanje koncentracije slobodnih nosilaca?

Pri kojoj širini zabranjene zone praktično nestaju slobodni nosioci naelektrisanja?

Da li se menja položaj Fermijevog nivoa u odnosu na širinu zabranjene zone?

Da li se menjaju *Fermi-Dirac*-ove funkcije raspodele za elektrone i šupljine? Zašto?

- 4) Vratiti širinu zabranjene zone na 1.12 eV (silicijum), a zatim lagano (korak po korak, pojedinačnim klikom na strelice) snižavati, a potom povišavati temperaturu kristala.

Da li se menja položaj *Fermi*-jevog nivoa sa promenom temperature?

Da li se menjaju *Fermi-Dirac*-ove funkcije raspodele za elektrone i šupljine sa promenom temperature? Skicirati ove zavisnosti za $T=100$ K, $T=300$ K i $T=600$ K

Numerički proveriti tvrđenje da se *Fermi-Dirac*-ova funkcija raspodele može aproksimirati *Maxwell-Boltzmann*-ovom kada je *Fermi*-jev nivo udaljen od odgovarajućeg energetskog nivoa onosno kada je $E-E_f \geq 3kT$. (uzeti $E-E_f = kT; 3kT; 5kT$)

Šta se dešava sa koncentracijama slobodnih elektrona i šupljina pri snižavanju, a šta pri povišavanju temperature?

Na kojoj temperaturi nestaju slobodni nosioci naelektrisanja?

Podesiti temperaturu na oko 450 K (zabeležiti tačnu vrednost), a zatim menjati širinu zabranjene zone i zabeležiti vrednost pri kojoj sada nestaju slobodni nosioci iz provodne i valentne zone.

- 5) Vratiti širinu zabranjene zone na 1.12 eV (silicijum) i temperaturu na 300 K. Lagano povećavati koncentraciju donorskih primesa, a zatim je vratiti na početnu vrednost, pa povećavati koncentraciju akceptora. Šta se dešava sa koncentracijama slobodnih elektrona i šupljina pri povećavanju koncentracije donora, a šta pri povećavanju koncentracije akceptora?

Kako se ponaša *Fermi*-jev nivo pri promeni koncentracije primesa? Skicirati položaj *Fermi*-jevog nivoa u odnosu na granice zona pri koncentracijama primesa $N_A=10^{14} \text{ cm}^{-3}$, $N_D=10^{17} \text{ cm}^{-3}$ (izraziti n-tip poluprovodnika) i $N_A=10^{17} \text{ cm}^{-3}$, $N_D=10^{14} \text{ cm}^{-3}$ (izraziti p-tip poluprovodnika).

Vratiti koncentraciju akceptora na početnu vrednost ($N_A=10^{14} \text{ cm}^{-3}$), a zatim podesiti koncentraciju donora na oko 10^{16} cm^{-3} . Povećavati temperaturu i zabeležiti vrednost temperature pri kojoj se pojavljuju slobodne šupljine u valentnoj zoni?

Odakle potiču ove šupljine kad je $N_D \gg N_A$?

- 6) Postaviti koncentracije donora i akceptora na bliske vrednosti (npr. $N_A=N_D=10^{17} \text{ cm}^{-3}$). Lagano (korak po korak, pojedinačnim klikom na strelice) snižavati, a potom povišavati temperaturu kristala. Šta se dešava sa koncentracijama slobodnih elektrona i šupljina pri snižavanju, a šta pri povišavanju temperature?

Kakav je ovo tip poluprovodnika?

- 7) Iz prethodnih razmatranja (i na osnovu poznatih matematičkih relacija) zaključuje se da:
- a) *Fermi-Dirac*-ova funkcija raspodele zavisi od:

 - b) Položaj *Fermi*-jevog nivoa u odnosu na granice zona zavisi od:

 - c) Koncentracije slobodnih nosilaca u provodnoj i valentnoj zoni zavise od:
- 8) Vratiti se na početni spisak animacija (ZATVORI).

ANIMACIJA 2

Driftovska brzina

UVODNE NAPOMENE

Ova animacija je deo skupa interaktivnih kompjuterskih animacija* namenjenih ilustraciji principa rada poluprovodničkih komponenata. Animacije su urađene u vidu međusobno povezanih *.m fajlova koji se pokreću ukucavanjem naredbe **usd1** u komandni prozor programa MATLAB (verzija 5.0 ili viša).

Driftovska brzina elektrona v_{ndrift} i šupljina v_{pdrift} (cm/s) predstavlja brzinu kretanja nosilaca pod uticajem električnog polja. Ovo kretanje je usmereno. Elektroni se kreću suprotno od smera polja, a šupljine u smeru polja. Vrednosti driftovskih brzina elektrona i šupljina su srazmerne jačini električnog polja K (V/cm), pri čemu koeficijent proporcionalnosti predstavljaju pokretljivosti nosilaca μ_n i μ_p (cm²/Vs).

$$v_{ndrift} = \mu_n K$$

$$v_{pdrift} = \mu_p K$$

Osim toga driftovska brzina zavisi od efektivne mase nosilaca, odnosno od vrste materijala u kome se nosioci kreću. Ova zavisnost je predstavljena kroz vrednost pokretljivosti nosilaca. Vrednost driftovske brzine pri jakim električnim poljima ulazi u zasićenje.

* Ovo su prilagođene verzije originalnih animacija sa CD ROM-a priloženog uz udžbenik *Understanding Semiconductor Devices* (Oxford University Press, New York, 2000) čiji je autor prof. Sima Dimitrijević (Griffith University, Australia). Animacije su namenjene vežbanjima studenata na fakultetu, a bilo kakvo dodatno umnožavanje i/ili distribucija nije dozvoljeno!

Student: _____

Broj indeksa: _____

Datum: _____

UPUTSTVO ZA RAD

Pokrenuti program MATLAB, proveriti da li je definisana odgovarajuća putanja do direktorijuma sa *.m fajlovima, a zatim u komandni prozor ukucati naredbu: usd1

- 1) Sa spiska animacija izabrati **Driftovska brzina** i mišem kliknuti START. Pažljivo pročitati kratak opis animacije, a zatim KLIKNI ZA NASTAVAK.
- 2) Na monitoru se pojavljuju ilustracija kristalne rešetke poluprovodnika i dijagram koji prikazuje zavisnost driftovske brzine elektrona od jačine električnog polja. U gornjem desnom uglu moguće je podešavanje (mišem) jačine polja i efektivne mase elektrona (tj. izbor materijala), a u donjem desnom uglu nalaze se komande za pokretanje animacije (START), njeno zaustavljanje (ZAUSTAVI) i završetak vežbe (ZATVORI).
- 3) Pokrenuti animaciju ne menjajući početna podešavanja za jačinu polja ($0 \text{ V}/\mu\text{m}$) i materijal ($m_{eff} = 0.5m_0$). Posmatrati kretanje elektrona i zaustaviti animaciju nakon 30-60 s. Da li se može definisati globalni smer kretanja elektrona u kristalu? Zašto?
- 4) Podesiti jačinu polja na $1 \text{ V}/\mu\text{m}$ i pokrenuti animaciju (u ovom slučaju animacija se sama zaustavlja kad elektron napusti kristal). U čemu se kretanje elektrona razlikuje od prethodnog slučaja?

Kolika je vrednost driftovske brzine?

Kako je usmereno polje?

Da li se elektron kreće po istoj putanji ako se ponovo pokrene animacija ne menjajući polje? Zašto?

- 5) Podesiti jačinu polja na $3 \text{ V}/\mu\text{m}$ i ponovo pokrenuti animaciju. U čemu se kretanje elektrona razlikuje od prethodna dva slučaja?

Kolika je sada vrednost driftovske brzine?

- 6) Ne menjajući jačinu polja ($3 \text{ V}/\mu\text{m}$), povećati efektivnu masu elektrona na neku vrednost $m_{\text{eff}} > m_0$. Pokrenuti animaciju. U čemu je razlika u odnosu na prethodni slučaj?

Šta se dešava sa driftovskom brzinom (kolika je sada njena vrednost)?

- 7) Na osnovu prethodnih rezultata navesti kako se menja driftovska brzina elektrona sa promenom jačine električnog polja, a kako sa promenom efektivne mase elektrona (izborom materijala)?
- 8) Vratiti se na početni spisak animacija (ZATVORI).

ANIMACIJA 3

Zavisnost pokretljivosti nosilaca od temperature i dopiranja

UVODNE NAPOMENE

Ova animacija je deo skupa interaktivnih kompjuterskih animacija* namenjenih ilustraciji principa rada poluprovodničkih komponenata. Animacije su urađene u vidu međusobno povezanih *.m fajlova koji se pokreću ukucavanjem naredbe **usd1** u komandni prozor programa MATLAB (verzija 5.0 ili viša).

Pokretljivost nosilaca naelektrisanja jako zavisi od temperature i koncentracije primesa. Ovo je posledica sudara nosilaca sa atomima osnovnog poluprovodnog materijala koji osciluju (fononima) i jonizovanim atomima primesa. Što je broj sudara veći, pokretljivost je manja. Ovi sudari predstavljaju tzv. proces rasejanja nosilaca.

Sa povećanjem koncentracije primesa na određenoj temperaturi pokretljivost se smanjuje jer je veći broj jonizovanih atoma primesa sa kojima nosioci mogu da se sudare.

U sopstvenom i slabo dopiranom poluprovodniku sa porastom temperature pokretljivost opada jer su oscilacije osnovnih atoma veće i mogućnost sudara raste.

U umerenim i jako dopiranim poluprovodnicima, pored sudara sa osnovnim atomima, nosioci se sudaraju i sa jonizovanim atomima primesa. Tako pri nižim temperaturama od sobne dominira efekat rasejanja na jonizovanim primesama, dok pri temperaturama višim od sobne dominira efekat rasejanja na fononima.

* Ovo su prilagođene verzije originalnih animacija sa CD ROM-a priloženog uz udžbenik *Understanding Semiconductor Devices* (Oxford University Press, New York, 2000) čiji je autor prof. Sima Dimitrijević (Griffith University, Australia). Animacije su namenjene vežbanjima studenata na fakultetu, a bilo kakvo dodatno umnožavanje i/ili distribucija nije dozvoljeno!

Student: _____

Broj indeksa: _____

Datum: _____

UPUTSTVO ZA RAD

Pokrenuti program MATLAB, proveriti da li je definisana odgovarajuća putanja do direktorijuma sa *.m fajlovima, a zatim u komandni prozor ukucati naredbu: usd1

- 1) Sa spiska animacija izabrati **Zavisnost pokretljivosti nosilaca od temperature i dopiranja** i mišem kliknuti START. Pažljivo pročitati kratak opis animacije, a zatim **KLIKNI ZA NASTAVAK**.
- 2) Na monitoru se pojavljuje ilustracija kristalne rešetke poluprovodnika, a ispod nje su dijagrami koji prikazuju zavisnost driftovske brzine elektrona od jačine električnog polja i zavisnost pokretljivosti elektrona od temperature za tri različita nivoa dopiranja (nula, srednje, visoko). Desno, jedna ispod druge, nalaze se komande za podešavanje jačine električnog polja, temperature kristala, nivoa dopiranja (tj. koncentracije primesa), pokretanje animacije (START), njeno zaustavljanje (ZAUSTAVI) i završetak vežbe (ZATVORI).
- 3) Podesiti jačinu polja na maksimalnu moguću i, ne menjajući temperaturu, pokrenuti i posmatrati animaciju za svaku od tri koncentracije primesa (nula, srednja, visoka). Kako se menjaju driftovska brzina i pokretljivost elektrona sa porastom koncentracije primesa? (Vidi dijagrame!)

Kako se ovo odražava na kretanje elektrona u kristalu?

- 4) Ne menjajući jačinu polja, sniziti temperaturu kristala na 120 K, a zatim pokrenuti i posmatrati animaciju za svaku od tri koncentracije primesa (nula, srednja, visoka). Kakav je uticaj sniženja temperature na driftovsku brzinu i pokretljivost nosilaca kod sopstvenog poluprovodnika (koncentracija primesa: nula)?

Kakav je uticaj kod dopiranog poluprovodnika (srednja i visoka koncentracija primesa)?

- 5) Ne menjajući jačinu polja, povećati temperaturu kristala na 600 K, a zatim pokrenuti i posmatrati animaciju za svaku od tri koncentracije primesa (nula, srednja, visoka). Kakav je uticaj povišene temperature na driftovsku brzinu i pokretljivost nosilaca kod sopstvenog poluprovodnika (koncentracija primesa: nula)?

Kakav je uticaj kod dopiranog poluprovodnika (srednja i visoka koncentracija primesa)?

- 6) Skicirati dijagram zavisnosti pokretljivosti elektrona od temperature za tri različita nivoa dopiranja (nula, srednje, visoko).

- 7) Vрати se na početni spisak animacija (ZATVORI).

ANIMACIJA 4

Driftovska struja predstavljena preko energetske zone

UVODNE NAPOMENE

Ova animacija je deo skupa interaktivnih kompjuterskih animacija* namenjenih ilustraciji principa rada poluprovodničkih komponenata. Animacije su urađene u vidu međusobno povezanih *.m fajlova koji se pokreću ukucavanjem naredbe **usd1** u komandni prozor programa MATLAB (verzija 5.0 ili viša).

Driftovska struja je posledica driftovskog kretanja nosilaca u poluprovodniku (posledica postojećeg električnog polja). Bez prisustva električnog polja nosioci se, usled termičke energije i sudara sa fononima i jonizovanim atomima primesa, kao i postojećim defektima kreću haotično. Električno polje u poluprovodniku se uspostavlja priključenjem napona na njegove krajeve. Ovo električno polje izaziva usmereno kretanje nosilaca i proticanje tzv. driftovske struje. Pri tome su gustine driftovskih struja elektrona i šupljina J_{ndrift} , J_{pdrift} (A/cm^2) srazmerne jačini primenjenog električnog polja.

$$J_{ndrift} = qn v_{ndrift} = qn \mu_n K$$

$$J_{pdrift} = qp v_{pdrift} = qp \mu_p K$$

Primenjeni napon se na zonskom energetskom dijagramu predstavlja kroz postojanje nagiba granica zona

* Ovo su prilagođene verzije originalnih animacija sa CD ROM-a priloženog uz udžbenik *Understanding Semiconductor Devices* (Oxford University Press, New York, 2000) čiji je autor prof. Sima Dimitrijević (Griffith University, Australia). Animacije su namenjene vežbanjima studenata na fakultetu, a bilo kakvo dodatno umnožavanje i/ili distribucija nije dozvoljeno!

Student: _____

Broj indeksa: _____

Datum: _____

UPUTSTVO ZA RAD

Pokrenuti program MATLAB, proveriti da li je definisana odgovarajuća putanja do direktorijuma sa *.m fajlovima, a zatim u komandni prozor ukucati naredbu: usd1

- 1) Sa spiska animacija izabrati **Driftovska struja predstavljena preko energetskih zona** i mišem kliknuti START. Pažljivo pročitati kratak opis animacije. Na desnoj strani nalazi se komanda za podešavanje napona polarizacije (tj. jačine električnog polja u poluprovodniku), opcija Elektron – Šupljina, kao i komande za pokretanje animacije (START), njeno zaustavljanje (ZAUSTAVI) i završetak vežbe (ZATVORI).
- 2) Ne menjajući početno podešavanje napona (3 V), pokrenuti animaciju koja ilustruje drift elektrona u provodnoj zoni. Kad elektron napusti poluprovodnik ZAUSTAVI-ti animaciju, a zatim izabrati opciju Šupljina i pokrenuti animaciju koja ilustruje drift šupljine u valentnoj zoni. Ponovo ZAUSTAVI-ti animaciju kad šupljina napusti poluprovodnik.
- 3) Ponoviti postupak iz tačke (2) za napone od 0, 1 i 5 V. Uočiti promenu nagiba energetskih zona pri promenama napona. Opisati uticaj napona polarizacije na "slučajno" kretanje elektrona i šupljine!

Da li postoji driftovsko kretanje nosilaca pri naponu od 0 V?

Ukoliko je odgovor NE, da li je u tom slučaju uopšte moguće usmereno kretanje nosilaca?

Koja je to vrsta kretanja?

- 4) Vratiti se na početni spisak animacija (ZATVORI).

ANIMACIJA 5

Haynes-Shockley-jev eksperiment

UVODNE NAPOMENE

Ova animacija je deo skupa interaktivnih kompjuterskih animacija* namenjenih ilustraciji principa rada poluprovodničkih komponenata. Animacije su urađene u vidu međusobno povezanih *.m fajlova koji se pokreću ukucavanjem naredbe **usd1** u komandni prozor programa MATLAB (verzija 5.0 ili viša).

Haynes-Shockley-jev eksperiment opisuje uticaj primenjenog električnog polja i neravnomerne raspodele koncentracije nosilaca na postojanje usmerenog kretanja nosilaca, odnosno električne struje unutar poluprovodnika.

Na komad poluprovodnika je preko odgovarajućih kontakata doveden električni napon, odnosno primenjeno električno polje kako bi se omogućilo driftovsko kretanje nosilaca. U delu poluprovodnika se vrši ubacivanje (injekcija) dodatne koncentracije nosilaca (stvara se natkoncentracija nosilaca). Injektovani nosioci se difuzionim kretanjem rasprostiru kroz ostatak poluprovodnika. Istovremenim dejstvom driftovskog i difuzionog kretanja nosilaca na kraju poluprovodnika se registruje postojanje tzv. oblaka nosilaca čiji se intenzitet menja sa vremenom. Ovakvo kretanje nosilaca predstavlja električnu struju.

* Ovo su prilagođene verzije originalnih animacija sa CD ROM-a priloženog uz udžbenik *Understanding Semiconductor Devices* (Oxford University Press, New York, 2000) čiji je autor prof. Sima Dimitrijević (Griffith University, Australia). Animacije su namenjene vežbanjima studenata na fakultetu, a bilo kakvo dodatno umnožavanje i/ili distribucija nije dozvoljeno!

Student: _____

Broj indeksa: _____

Datum: _____

UPUTSTVO ZA RAD

Pokrenuti program MATLAB, proveriti da li je definisana odgovarajuća putanja do direktorijuma sa *.m fajlovima, a zatim u komandni prozor ukucati naredbu: usd1

- 1) Sa spiska animacija izabrati **Haynes-Shockley-jev eksperiment** i mišem kliknuti START. Pažljivo pročitati kratak opis animacije.
- 2) Pokrenuti i posmatrati animaciju kojom se ilustruje **DRIFT** nosilaca. Da li postoji usmereno kretanje nosilaca i usled čega?
- 3) Pokrenuti i posmatrati animaciju kojom se ilustruje **DIFUZIJA** nosilaca. Da li postoji usmereno kretanje nosilaca i usled čega?
- 4) Pokrenuti i posmatrati animaciju kojom se ilustruje zajednička akcija oba mehanizma (ZAJEDNO). Kakvo je sada kretanje nosilaca?
- 5) Vratiti se na početni spisak animacija (ZAUSTAVI, a zatim ZATVORI).

Drift, difuzija i rekombinacija nosilaca

<http://www.acsu.buffalo.edu/~wie/applet/diffusion/diffusion.html>

Ukupna gustina struje u poluprovodniku J je jednaka zbiru driftovske i difuzione komponente:

$$J = J_{drift} + J_{diff}.$$

Driftovska komponenta struje zavisi od jačine primenjenog električnog polja K , koncentracije nosilaca (n, p) i pokretljivosti nosilaca (μ_n, μ_p):

$$J_{drift} = J_{ndrift} + J_{pdrift} = qn v_{dn} + qp v_{dp} = q(n\mu_n + p\mu_p)K$$

Difuziona komponenta struje zavisi od gradijenta koncentracije nosilaca i njihovih difuzionih konstanti (D_n, D_p):

$$J_{diff} = J_{ndiff} + J_{pdiff} = qD_n \frac{dn}{dx} - qD_p \frac{dp}{dx}$$

Gustine struja elektrona i šupljina se u literaturi često prikazuju u formi tzv. **transportnih jednačina**:

$$J_n = J_{ndrift} + J_{ndiff} = qn\mu_n K + qD_n \frac{dn}{dx}$$

$$J_p = J_{pdrift} + J_{pdiff} = qp\mu_p K - qD_p \frac{dp}{dx}$$

Promena generisane natkoncentracije manjinskih nosilaca (Δn odnosno Δp) u poluprovodniku sa vremenom je opisana tzv. **jednačinama kontinuiteta**:

$$\frac{d(\Delta n)}{dt} = G_n - \frac{\Delta n}{\tau_n} + \mu_n K \frac{d(\Delta n)}{dx} + D_n \frac{d^2(\Delta n)}{dx^2}$$

$$\frac{d(\Delta p)}{dt} = G_p - \frac{\Delta p}{\tau_p} - \mu_p K \frac{d(\Delta p)}{dx} + D_p \frac{d^2(\Delta p)}{dx^2}$$

gde G_n i G_p predstavljaju brzine generacije, a τ_n i τ_p vremena života elektrona odnosno šupljina. Jednačina kontinuiteta je izvedena uz pretpostavku da su natkoncentracije nosilaca niske u odnosu na koncentraciju većinskih nosilaca (nizak nivo injekcije nosilaca) i da je električno polje u poluprovodniku konstantno.

Data aplikacija omogućava prikaz određenih procesa vezanih za natkoncentraciju manjinskih nosilaca u uzorku poluprovodnika od Ge:

- **generacija** natkoncentracije nosilaca (parova elektrona i šupljina) putem laserskog zraka.
- **drift manjinskih nosilaca** usled primenjene polarizacije (primenjenog električnog polja). Polarizacija uzrokuje kretanje natkoncentracije nosilaca kroz poluprovodnik u smeru određenom vrstom nosilaca i polaritetom primenjene polarizacije. Položaj maksimuma u profilu koncentracije se pomera usled drifta nosilaca. Proces zavisi od vrednosti polarizacije i dužine uzorka ($K=V/l$), kao i pokretljivosti manjinskih nosilaca.
- **difuzija manjinskih nosilaca** usled gradijenta njihove koncentracije. Nakon generacije natkoncentracije nosilaca u centralnom delu Ge uzorka manjinski nosioci difunduju sa mesta više ka mestu manje koncentracije. Usled toga se profil koncentracije nosilaca proširuje, a njegova maksimalna vrednost smanjuje.
- **rekombinacija manjinskih nosilaca**. Kada se ukine generacija nosilaca natkoncentracija nosilaca se sa vremenom smanjuje usled rekombinacionih procesa i na kraju postaje jednaka nuli. Time se sistem dovodi u ravnotežno stanje. Smanjenje ukupne natkoncentracije nosilaca sa vremenom je određeno njihovim **vremenom života**.

ELEKTRONSKA FIZIKA ČVRSTOG TELA

Student: _____

Broj indeksa: _____

Datum: _____

Drift, difuzija i rekombinacija nosilaca<http://www.acsu.buffalo.edu/~wie/applet/diffusion/diffusion.html>

Pokrenuti datu aplikaciju sa čekiranim opcijama **width vs. t** (promena širine profila koncentracije sa vremenom), **displcmnt. vs. t** (pomeraj maksimuma profila koncentracije sa vremenom) i **N vs. t** (promena ukupnog broja manjinskih nosilaca u uzorku sa vremenom).

ZADATAK 1. -DIFUZIJA

1. Postaviti vreme života manjinskih nosilaca na beskonačnu vrednost, napon polarizacije na 0V, p-tip materijala, dužinu uzorka na 0.4cm, temperaturu na 300K i pokretljivost nosilaca na $1900 \text{ cm}^2/\text{Vs}$.
2. Pokrenuti aplikaciju i posmatrati raspodelu (profil koncentracije) manjinskih nosilaca. Skicirati izgled raspodele manjinskih nosilaca tokom vremena i opisati je. Na koju vrstu nosilaca se ova raspodela odnosi?
3. Primećuje se da se maksimalna vrednost profila ne pomera tokom vremena. Objasniti zbog čega.
4. Zbog čega ukupan broj manjinskih nosilaca ostaje nepromenjen tokom vremena? (Posmatrati zavisnost N vs. t).

5. Generacija parova nosilaca se u ovoj aplikaciji vrši putem laserskog zraka. Koja je najveća talasna dužina laserskog zračenja koja može u Ge da izazove generaciju nosilaca? (postaviti vezu između širine zabranjene zone i energije laserskog zračenja)

ZADATAK 4. –DRIFT, DIFUZIJA I REKOMBINACIJA

1. Postaviti vreme života manjinskih nosilaca na 0.01ms, napon polarizacije na +2V, p-tip materijala, dužinu uzorka na 1cm, temperaturu na 300K i pokretljivost nosilaca na $1900 \text{ cm}^2/\text{Vs}$.
2. Pokrenuti aplikaciju i posmatrati raspodelu (profil koncentracije) manjinskih nosilaca. Skicirati izgled raspodele manjinskih nosilaca tokom vremena i opisati je.
3. Po čemu se profil koncentracije u ovom slučaju razlikuje od profila posmatranog u ZADATKU 2?
4. Promeniti vrednost temperature na 400K. Ponovo pokrenuti animaciju i utvrditi na koji proces utiče temperatura (difuziju, drift ili rekombinaciju).

ANIMACIJA 6

P-N spoj: energetske zone i kapacitivnost

UVODNE NAPOMENE

Ova animacija je deo skupa interaktivnih kompjuterskih animacija* namenjenih ilustraciji principa rada poluprovodničkih komponenata. Animacije su urađene u vidu međusobno povezanih *.m fajlova koji se pokreću ukucavanjem naredbe **usd1** u komandni prozor programa MATLAB (verzija 5.0 ili viša).

Primenom polarizacije na p-n spoj dolazi do preraspodele potencijala unutar njega, a time i do promene širine prelazne oblasti. Ukoliko je pozitivan kraj polarizacije vezan za p oblast, a negativan kraj za n oblast kaže se da je spoj **direktno polarisan** i širina prelazne oblasti se smanjuje. Analogno, kada se pozitivan kraj polarizacije veže za n oblast, a negativan kraj za p oblast kaže se da je spoj **inverzno polarisan** i širina prelazne oblasti se povećava. Vrednost širine prelazne oblasti zavisi od primenjenog napona V na osnovu relacije:

$$w = \left[\frac{2\varepsilon_s(V_{bi} \pm V)}{q} \frac{N_A + N_D}{N_A N_D} \right]^{1/2}.$$

Znak - važi za direktnu, a znak + za inverznu polarizaciju spoja, dok se V uzima po apsolutnoj vrednosti.

Kapacitivnost p-n spoja predstavlja kapacitivnost prelazne oblasti (oblasti prostornog naelektrisanja) i zavisi od njene širine, kao i od površine p-n spoja S :

$$C = \varepsilon_s \frac{S}{w} = S \left[\frac{q\varepsilon_s}{2(V_{bi} \pm V)} \frac{N_A N_D}{N_A + N_D} \right]^{1/2}.$$

Promena širine prelazne oblasti sa primenjenom polarizacijom izaziva promenu kapacitivnosti p-n spoja i koristi se u takozvanim varikap diodama čija kapacitivnost se menja u zavisnosti od napona na koji su priključene. Ovakav promenljivi kondenzator se koristi za filterska podešavanja u mikrotalasnim kolima. Kapacitivnost pri određenoj polarizaciji se često daje u obliku zavisnom od kapacitivnosti kada nema polarizacije:

$$C = \frac{C(0)}{\left(1 + \frac{V}{V_{bi}}\right)^{1/2}}.$$

Ukoliko je jedna strana p-n spoja mnogo više dopirana od druge (izrazito strmi spoj) prelazna oblast se više širi na stranu sa nižom koncentracijom primesa i izraz za kapacitivnost se može napisati u obliku:

$$C \approx \varepsilon_s \frac{S}{x_p} = S \left[\frac{q\varepsilon_s N_A}{2(V_{bi} \pm V)} \right]^{1/2} \text{ za } N_D \gg N_A$$

ili

$$C \approx \varepsilon_s \frac{S}{x_n} = S \left[\frac{q\varepsilon_s N_D}{2(V_{bi} \pm V)} \right]^{1/2} \text{ za } N_A \gg N_D.$$

* Ovo su prilagođene verzije originalnih animacija sa CD ROM-a priloženog uz udžbenik *Understanding Semiconductor Devices* (Oxford University Press, New York, 2000) čiji je autor prof. Sima Dimitrijević (Griffith University, Australia). Animacije su namenjene vežbanjima studenata na fakultetu, a bilo kakvo dodatno umnožavanje i/ili distribucija nije dozvoljeno!

ELEKTRONSKA FIZIKA ČVRSTOG TELA

Student: _____

Broj indeksa: _____

Datum: _____

UPUTSTVO ZA RAD

Pokrenuti program MATLAB, proveriti da li je definisana odgovarajuća putanja do direktorijuma sa *.m fajlovima, a zatim u komandni prozor ukucati naredbu: usd1

- 1) Sa spiska animacija izabrati **P-N spoj: energetske zone i kapacitivnost** i mišem kliknuti START. Pažljivo pročitati opis animacije, a zatim kliknuti za nastavak.
- 2) Na monitoru se pojavljuju 2D x-y prikaz P-N spoja i dijagram koji prikazuje zavisnost kapacitivnosti prelazne oblasti (oblasti prostornog naelektrisanja ili oblast osiromašenja) od inverznog napona polarizacije P-N spoja u Si. Na desnoj strani, jedna ispod druge, nalaze se komande za podešavanje inverznog napona – V_r , nivoa dopiranja P- i N-oblasti, izbor načina prikazivanja spoja (2D x-y, 2D E-x, 3D), podešavanje ugla posmatranja (azimut i nagib), kao i za pokretanje 3D demo animacija (x-y → 3D, 3D → E-x) i završetak vežbe (ZATVORI).
- 3) Ne menjajući početno podešen napon ($V_r=0$ V) podesiti dopiranje na $N_A=10^{16}$ cm⁻³, $N_D=10^{16}$ cm⁻³. Uočiti širinu oblasti osiromašenja (prikazana belom bojom), skicirati zavisnost kapacitivnosti p-n spoja od primenjene polarizacije i zabeležiti vrednost kapacitivnosti za $V_r=0$ V. Redom uključiti 2D E-x i 3D prikaze, a zatim pokrenuti i pažljivo posmatrati obe demo animacije.
- 4) Uključiti ponovo 2D x-y prikaz i podesiti inverzni napon na 1 V (ne menjati dopiranje). Redom uključiti 2D E-x i 3D prikaze, a zatim pokrenuti i pažljivo posmatrati obe demo animacije. Ponovo uključiti 2D x-y prikaz i ponoviti sve za $V_r=2$ V. Kako se menjaju širina oblasti osiromašenja, njena kapacitivnost i visina potencijalne barijere sa porastom napona inverzne polarizacije spoja?

- 5) Uključiti ponovo 2D x-y prikaz, vratiti inverzni napon na nulu i povećati dopiranje P-oblasti na $N_A=10^{19} \text{ cm}^{-3}$ (ne menjati dopiranje N-oblasti). Redom uključiti 2D E-x i 3D prikaze, a zatim pokrenuti i pažljivo posmatrati obe demo animacije. Kako se menjaju širina oblasti osiromašenja, njena kapacitivnost i visina potencijalne barijere sa povećanjem koncentracije akceptorskih primesa? Ponovo uključiti 2D x-y prikaz i ponoviti sve za inverzni napon od 1 V.

- 6) Vрати se na početni spisak animacija (ZATVORI).

P-N spoj, ugrađeni napon, širina prelazne oblasti

<http://www.acsu.buffalo.edu/~wie/applet/pnformation/pnformation.html>

Pri formiranju p-n (n-p) spoja nastaje **prelazna oblast** sa obe strane spoja 2 poluprovodnika koji se naziva **metalurški spoj**. U n-delu prelazne oblasti postoje nekompensovani pozitivni joni donorskih primesa čija je koncentracija N_D , dok u p-delu postoje nekompensovani negativni joni akceptorskih primesa koncentracije N_A . Ovi nekompensovani joni su nepokretna naelektrisanja i stvaraju električno polje unutar prelazne oblasti (van prelazne oblasti nema električnog polja). Usled toga na granicama prelazne oblasti postoji određena razlika potencijala tzv. **ugrađeni napon** koji zavisi od koncentracije primesa u p i n oblastima i temperature. Prelazna oblast se još naziva i **oblast osiromašenja** (jer u njoj nema slobodnih – pokretnih nosilaca) ili **oblast prostornog naelektrisanja** (jer u njoj postoje vezana naelektrisanja). Vrednost ugrađenog napona kod skokovitog p-n spoja (spoja kod koga se naglo menja koncentracija primesa iz p u n tip ili obrnuto), pod pretpostavkom postojanja totalnog osiromašenja je određena izrazom:

$$V_{bi} = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_D N_A}{n_i^2}$$

Širina prelazne oblasti sa obe strane metalurškog spoja zavisi od koncentracije primesa u p i n oblastima i vrednosti ugrađenog napona. Sa n strane širina prelazne oblasti je:

$$x_n = \left[\frac{2\varepsilon_s V_{bi}}{q} \frac{N_A}{N_D(N_A + N_D)} \right]^{1/2},$$

a sa p strane ova širina je:

$$x_p = \left[\frac{2\varepsilon_s V_{bi}}{q} \frac{N_D}{N_A(N_A + N_D)} \right]^{1/2}.$$

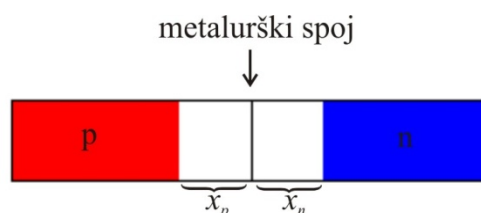
Ukupna širina prelazne oblasti je:

$$w = x_n + x_p$$

$$w = \left[\frac{2\varepsilon_s V_{bi}}{q} \frac{N_A + N_D}{N_A N_D} \right]^{1/2}.$$

Prelazna oblast se širi podjednako sa obe strane metalurškog spoja ukoliko su koncentracije primesa u p i n oblastima jednake. Kada se koncentracije razlikuju, nastaje nesimetrično širenje prelazne oblasti i to je ona veća na strani sa manjom koncentracijom primesa. Kada je koncentracija primesa u jednoj oblasti mnogo veća nego u drugoj, (najmanje 10 puta) skoro cela prelazna oblast je na strani niže koncentracije.

Pri formiranju p-n spoja ravnotežno stanje nastaje kada se *Fermi*-jevi nivoi u oba dela poluprovodnika izjednače. Time u prelaznoj oblasti postoji promena granica provodne i valentne zone i na njenim ivicama ona je jednaka vrednosti ugrađenog napona – V_{bi} .



ZADATAK 3. – P-N SPOJ KOD RAZLIČITIH POLUPROVODNIKA

1. Izabrati Ge kao materijal i postaviti koncentracije akceptora i donora na vrednost 10^{16}cm^{-3} . Kolika je vrednost ugrađenog napona, a kolika ukupna širina prelazne oblasti? Sada izabrati GaAs kao materijal i zabeležiti vrednost ugrađenog napona i ukupne širine prelazne oblasti. Uporediti vrednosti za Ge i GaAs sa onim za Si iz **ZADATKA 1**. Objasniti usled čega nastaje razlika.

ANIMACIJA 8

MOS kondenzator

UVODNE NAPOMENE

Ova animacija je deo skupa interaktivnih kompjuterskih animacija* namenjenih ilustraciji principa rada poluprovodničkih komponenata. Animacije su urađene u vidu međusobno povezanih *.m fajlova koji se pokreću ukucavanjem naredbe **usd1** u komandni prozor programa MATLAB (verzija 5.0 ili viša).

Napon praga MOS strukture na P tipu supstrata je određen izrazom:

$$V_T = V_{FB} + 2\psi_B + \frac{Q_D}{C_{ox}}$$

Napon ravnih zona V_{FB} je funkcija razlike izlaznih radova metala i poluprovodnika- ϕ_{ms} i napona u oksidu V_{ox} . Ovaj napon se izračunava na osnovu izlaznog rada metala - ϕ_m , afiniteta elektrona u poluprovodniku - χ , energetskog procepa poluprovodnika E_G , razlike između stvarnog Fermijevog nivoa i Fermijevog nivoa u sopstvenom poluprovodniku - $q\psi_B$, površinske gustine naelektrisanja u oksidu- qN_{ox} i kapacitivnosti oksida po jedinici površine - C_{ox} :

$$V_{FB} = \phi_{ms} + V_{ox} = \phi_m - \underbrace{\left(\chi + \frac{E_G}{2q} + \psi_B\right)}_{\phi_s} - \frac{qN_{ox}}{C_{ox}}$$

Razlika između stvarnog Fermijevog nivoa i Fermijevog nivoa u sopstvenom poluprovodniku - $q\psi_B$ određuje takozvani **Fermijev potencijal** ψ_B i zavisi od koncentracije primesa u poluprovodniku:

$$\psi_B = \frac{E_{Fi} - E_F}{q} = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_A}{n_i}$$

dok kapacitivnost oksida (po jedinici površine) zavisi od njegove debljine:

$$C_{ox} = \frac{\epsilon_{ox}\epsilon_0}{t_{ox}}$$

Naelektrisanje u osiromašenoj oblasti zavisi od njene širine $Q_D = qN_A w_d$ tako da se napon praga svodi na izraz:

$$V_T = V_{FB} + 2\psi_B + \frac{\sqrt{2\epsilon_0\epsilon_{Si}qN_A}}{C_{ox}} \sqrt{2\psi_B}$$

Kod MOS strukture na N tipu supstrata napon praga je predstavljen izrazom:

$$V_T = V_{FB} - 2|\psi_B| - \frac{\sqrt{2\epsilon_0\epsilon_{Si}qN_D}}{C_{ox}} \sqrt{2|\psi_B|}$$

pri čemu je Fermijev potencijal:

$$\psi_B = \frac{E_{Fi} - E_F}{q} = -\frac{kT}{q} \ln \frac{N_D}{n_i}$$

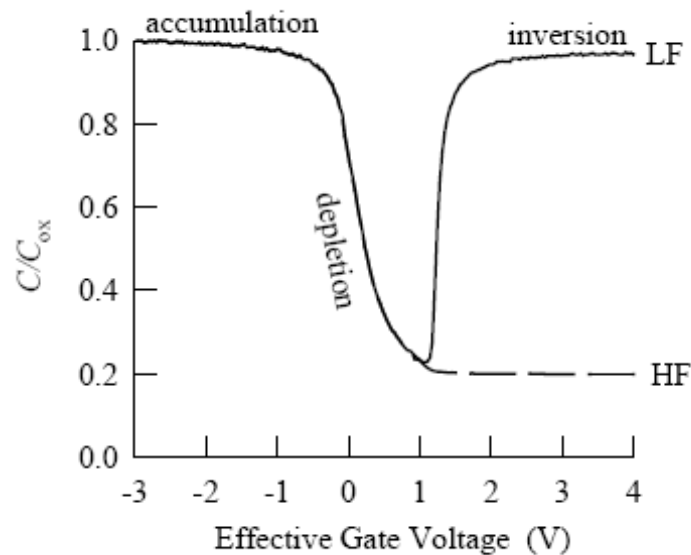
* Ovo su prilagođene verzije originalnih animacija sa CD ROM-a priloženog uz udžbenik *Understanding Semiconductor Devices* (Oxford University Press, New York, 2000) čiji je autor prof. Sima Dimitrijević (Griffith University, Australia). Animacije su namenjene vežbanjima studenata na fakultetu, a bilo kakvo dodatno umnožavanje i/ili distribucija nije dozvoljeno!

Kapacitivnost MOS strukture se sastoji od redne veze kapacitivnosti oksida i kapacitivnosti oblasti osiromašenja (sve kapacitivnosti su po jedinici površine):

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_{ox}} + \frac{1}{C_D}$$

$$C_{ox} = \frac{\epsilon_{ox}\epsilon_0}{t_{ox}}$$

$$C_D = \frac{\epsilon_{Si}\epsilon_0}{w_d}$$



U režimu **akumulacije** nema oblasti osiromašenja i ukupna kapacitivnost je jednaka kapacitivnosti oksida.

U režimu **osiromašenja** ukupna kapacitivnost zavisi od obe komponente kapacitivnosti. Kako se povećeva širina osiromašene oblasti - w_D tako se ukupna kapacitivnost smanjuje usled smanjenja C_D .

U režimu **slabe inverzije pri niskim frekvencijama** primenjenog napona (LF) obe komponente kapacitivnosti imaju udela sve dok invertovani sloj nosilaca dozvoljava da se promene napona odražavaju na širinu osiromašene oblasti.

U režimu **jake inverzije pri niskim frekvencijama** primenjenog napona (LF) visoka koncentracija nosilaca u invertovanom sloju sprečava da se primenjeni napon odražava na širinu osiromašene oblasti tako da je ukupna kapacitivnost jednaka kapacitivnosti oksida.

U režimu **inverzije pri visokim frekvencijama** primenjenog napona (HF – iznad 100Hz) nosioci u invertovanom sloju ne uspevaju da prate brze promene primenjenog napona. Ukupna kapacitivnost ima vrednost redne veze kapacitivnosti oksida i kapacitivnosti osiromašene oblasti pri njenoj najvećoj širini (kapacitivnostima minimalnu vrednost).

Student: _____

Broj indeksa: _____

Datum: _____

MOS kondenzator

UPUTSTVO ZA RAD

Pokrenuti program MATLAB, proveriti da li je definisana odgovarajuća putanja do direktorijuma sa *.m fajlovima, a zatim u komandni prozor ukucati naredbu: **usd1**

- 1) Sa spiska animacija izabrati **MOS kondenzator** i mišem kliknuti START. Pažljivo pročitati opis animacije, a zatim KLIKNUTI ZA NASTAVAK.
- 2) Na monitoru se pojavljuje ilustracija poprečnog preseka MOS strukture, ispod nje se nalazi odgovarajući dijagram energetskih zona, a desno je dijagram koji prikazuje zavisnost kapacitivnosti od napona (C - V kriva). Sasvim desno, jedna ispod druge, nalaze se komande za podešavanje napona na gejtu (V_g), vrstu i nivo dopiranja supstrata, debljinu oksida gejta (D_{ox}), izbor materijala gejta, količinu naelektrisanja u oksidu (Q_{ox}) i završetak vežbe (ZATVORI). Na MOS strukturi uočiti gejtt, oksid, supstrat i oblast osiromašenja.

UTICAJ MATERIJALA GEJTA

- 1) Postaviti materijal gejta na metal. Skicirati dijagram energetskih zona za $V_g=0$ V. Lagano smanjivati V_g . Šta se dešava sa oblašću osiromašenja, a šta sa dijagramom zona? Pri kom naponu se energetski nivoi zona potpuno ispravljaju (drugim rečima, koliko iznosi napon ravnih zona V_{fb} za ovu strukturu)? Kolika je koncentracija slobodnih nosilaca u poluprovodniku pri naponu ravnih zona?
- 2) Nastaviti sa smanjivanjem napona V_g na isti način do vrednosti $V_g=-5$ V. Šta se dešava u supstratu neposredno ispod gejta (uoči promenu boje)? Koje nosioce iz dubine supstrata ka međupovršini oksid-supstrat privlači negativni napon na gejtu, a koje odbija?

- 3) Šta se dešava sa dijagramom zona pri smanjivanju napona V_g ispod V_{fb} ? Skicirati zonski dijagram za $V_g = -5$ V. S obzirom da je supstrat P-tipa, većinski nosioci su _____, a pošto se u ovom slučaju uz međupovršinu gomilaju upravo većinski nosioci, MOS struktura je u stanju *akumulacije*.
- 4) Vratiti napon V_g na nulu i promeniti vrednost za izlazni rad materijala gejt na 4.6V. Koliki je napon ravnih zona u ovom slučaju? Promeniti materijal gejt na N+ poly, a zatim na P+ poly i u oba slučaja zabeležiti vrednost napona ravnih zona. Kako se menja napon ravnih zona sa promenom materijala gejt odnosno sa promenom vrednosti izlaznog rada?

UTICAJ POLARIZACIJE NA NOSIOCE U SUPSTRATU

- 1) Postaviti materijal gejt na metal i vratiti napon V_g na nulu. Lagano povećavati napon na gejtu V_g . Šta se dešava sa širinom oblasti osiromašenja, a šta sa dijagramom zona? Već pri naponu od oko 0.3 V, u belo obojenoj oblasti osiromašenja (neposredno ispod gejt, u blizini međupovršine oksid-supstrat) uočava se pojava zeleno obojene oblasti. Pozitivni napon primenjen na gejt privlači iz dubine supstrata ka međupovršini _____, a od međupovršine odbija _____. Prema tome, s obzirom da je supstrat P-tipa, u ovom slučaju u blizini međupovršine formira se oblast u kojoj dominiraju manjinski nosioci, odnosno dolazi do inverzije tipa poluprovodnika, pa se MOS struktura nalazi u stanju *inverzije*. Daljim povećavanjem napona V_g , ova oblast se širi i postaje sve tamnija, tj. koncentracija manjinskih nosilaca postaje sve veća (*jaka inverzija*). Šta se dešava sa dijagramom energetskih zona? Gde (u blizini kog energetskog niva) se nalazi Fermijev nivo duboko u supstratu, a gde u blizini međupovršine oksid-poluprovodnik? Skicirati zonski dijagram za $V_g = 5$ V.

U slučaju kad MOS struktura nije niti u akumulaciji niti u inverziji (što približno odgovara vrednostima napona V_g u opsegu između vrednosti napona ravnih zona i vrednosti pri kojoj počinje inverzija), u oblasti neposredno ispod gejta ne postoje značajne koncentracije bilo koje vrste slobodnih nosilaca naelektrisanja i na ilustraciji uočavamo samo belo obojenu oblast osiromašenja. Tada je MOS struktura u stanju *osiromašenja*.

- 2) Vratiti napon V_g na nulu i izabrati supstrat N-tipa. Lagano povećavati napon V_g do maksimalne, a zatim ga smanjivati do minimalne moguće vrednosti. Pri kojim naponima V_g (pozitivnim ili negativnim) se u slučaju supstrata N-tipa javlja akumulacija, a pri kojim inverzija? Pri kom naponu počinje formiranje oblasti inverzije? Kakav je zonski dijagram za tu vrednost napona? Skicirati. Koliko iznosi napon ravnih zona za ovu strukturu?

- 3) Vrsta, odnosno tip ili naziv, MOS strukture (NMOS ili PMOS) ne određuje se prema tipu dopiranja supstrata, već prema vrsti nosilaca koji se gomilaju uz međupovršinu u stanju inverzije. Prema tome, ako je supstrat N-tipa, inverzija tipa podrazumeva gomilanje _____, pa ovu strukturu nazivamo PMOS. Nasuprot tome, MOS strukturu formiranu na supstratu P-tipa nazivamo _____ jer se u stanju inverzije uz međupovršinu gomilaju elektroni.
- 4) Postaviti koncentraciju primesa pri P supstratu na vrednost $N_A=5 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, odnosno pri N supstratu na $N_D=5 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$. Menjati vrednost napona V_g u opsegu od minimalne do maksimalne vrednosti. Zabeležiti koliki je napon ravnih zona u ovom slučaju. Da li koncentracija primesa u supstratu utiče na napon ravnih zona? (Uporediti sa vrednošću iz prvog zadatka pod 1) i ovog zadatka pod 2)). Koliki je napon pri kome počinje formiranje oblasti inverzije za oba tipa supstrata? (Uporediti ove vrednosti sa vrednostima određenim pod 1) i 2)). Šta se zaključuje o uticaju dopiranja supstrata na formiranje invertovanog sloja?

MOS kondenzator je osnovna struktura koja omogućava funkcionisanje MOSFET-a (MOS tranzistora). Oblast u kojoj dolazi do inverzije tipa kod MOS tranzistora naziva se *kanal*, te stoga razlikujemo N-kanalni i P-kanalni MOS tranzistor. Napon koji treba dovesti na gejt da bi se formirao kanal naziva se *napon praga* MOS tranzistora.

UTICAJ DEBLJINE I NAELEKTRISANJA U OKSIDU GEJTA

- 1) Vratiti se na početne vrednosti animacije (metal na gejtu, P-tip supstrata, $N_A=1 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ $V_g=0 \text{ V}$). Menjati debljinu oksida gejta sa početnih 10nm na minimalnu i maksimalnu vrednost. Šta se dešava sa oblašću osiromašenja i invertovanim slojem pri smanjenju, a šta pri povećanju debljine oksida?

- 2) Vratiti debljinu oksida na vrednost od 10 nm i povećavati koncentraciju naelektrisanja u oksidu. Šta se dešava sa oblašću osiromašenja? Koliko iznosi napon ravnih zona kada je naelektrisanje u oksidu $N_{ox} = 5 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2}$? Pri kojoj vrednosti koncentracije naelektrisanja u oksidu i nultoj polarizaciji gejta se javlja invertovani sloj? Šta se može zaključiti o vrsti naelektrisanja u oksidu (pozitivno ili negativno)?

- 3) Izračunati vrednost napona ravnih zona i napona praga za MOS kondenzator na silicijumskom P supstratu sa koncentracijom primesa $N_A=1 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, metalnim gejtom, debljinom oksida $t_{ox}=10 \text{ nm}$ i naelektrisanjem u oksidu $N_{ox} = 5 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2}$. (izlazni rad metala $\phi_m=4.1 \text{ eV}$, afinitet elektrona u silicijumu $\chi=4.05 \text{ eV}$, $\epsilon_0\epsilon_{ox}=3.45 \cdot 10^{-13} \text{ F/cm}$, $n_i=1.02 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$). Uporediti izračunatu vrednost za napon ravnih zona sa vrednošću dobijenom pod 2).

C-V KRIVA MOS KONDENZATORA

- 1) Vratiti se na početne vrednosti animacije (metal na gejtu, P-tip supstrata, $N_A=1\cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, $V_g=0 \text{ V}$, $t_{ox}=10 \text{ nm}$, $N_{ox}=0$).
- 2) Postaviti vrednost napona na gejtu $V_g=-3 \text{ V}$. Na C-V krivoj posmatrati žutu tačku koja označava vrednost kapacitivnosti MOS strukture. U kom stanju se nalazi MOS struktura u ovim uslovima (akumulacija, osiromašenje ili inverzija)? Koja kapacitivnost određuje ukupnu kapacitivnost strukture?

Povećavati napon na gejtu do vrednosti $V_g=-0.5 \text{ V}$. U kom stanju je sada MOS struktura?

- 3) Postaviti vrednost napona na gejtu na vrednost $V_g=0.5 \text{ V}$. U kom stanju se nalazi MOS struktura u ovim uslovima?

Pritisnuti dugme START u okviru polja LF AC SIGNAL. Posmatrati promenu kapacitivnosti MOS strukture sa primenom niskofrekventnog naponskog signala. Na kom delu strukture se primećuje dejstvo promenljivog primenjenog napona? Čemu je jednaka ukupna kapacitivnost MOS strukture?

Pritisnuti dugme ZATVORI i promeniti primenjeni napon na HF vrednost. Pritisnuti dugme START u okviru polja HF AC SIGNAL. Posmatrati promenu kapacitivnosti MOS strukture sa primenom visokofrekventnog naponskog signala. Na kom delu strukture se sada primećuje dejstvo promenljivog primenjenog napona? Zbog čega postoji razlika u odnosu na LF signal?

- 4) Pritisnuti dugme ZATVORI i promeniti primenjeni napon na LF vrednost Postaviti vrednost napona na gejtu na vrednost $V_g=3.5 \text{ V}$. U kom stanju se na nalazi MOS struktura u ovim uslovima?

Pritisnuti dugme START u okviru polja LF AC SIGNAL. Posmatrati promenu kapacitivnosti MOS strukture sa primenom niskofrekventnog naponskog signala. Na kom delu strukture se primećuje dejstvo promenljivog primenjenog napona? Čemu je jednaka ukupna kapacitivnost MOS strukture?

Posmatrati i promenu kapacitivnosti MOS strukture sa primenom visokofrekventnog naponskog signala. Na kom delu strukture se primećuje dejstvo promenljivog primenjenog napona? Čemu je jednaka ukupna kapacitivnost MOS strukture?

- 5) Vratiti se na početni spisak animacija (ZATVORI).