

Aneta Prijić

**ELEKTRONSKA FIZIKA ČVRSTOG
TELA**
-laboratorijske vežbe-

studijski program

Mikroelektronika i mikrosistemi

(III semestar)

Vežba 1

Zavisnost pokretljivosti nosilaca od temperature

Otpornost uzorka poluprovodničkog materijala zavisi od specifične električne otpornosti materijala ρ i dimenzija uzorka (dužine l i površine poprečnog preseka S) na osnovu relacije:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S}.$$

Specifična električna otpornost zavisi od koncentracije elektrona i šupljina u uzorku (n , p) i njihove pokretljivosti (μ_n , μ_p):

$$\rho = \frac{1}{q(n\mu_n + p\mu_p)}.$$

Ukoliko je poluprovodnik dopiran, on pokazuje tzv. primesno ponašanje sve dok je koncentracija primesa mnogo veća od koncentracije termički generisanih parova elektron-šupljina. Time je koncentracija većinskih nosilaca jednaka koncentraciji primesa i mnogo veća od koncentracije manjinskih nosilaca. Za silicijum ova aproksimacija važi do temperatura reda 150°C. Ukoliko je uzorak n-tipa ($n = N_D \gg p$) za otpornost se dobija:

$$R = \frac{l}{qSN_D\mu_n}.$$

Temperaturna zavisnost pokretljivosti elektrona u oblasti primesnog ponašanja se može aproksimirati relacijom:

$$\mu_n = AT^{-\alpha},$$

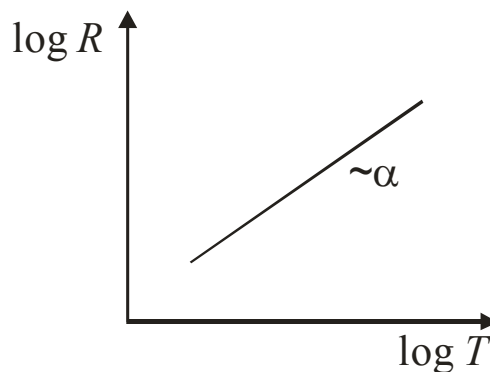
gde koeficijenti A i α zavise od koncentracije primesa. Zavisnost otpornosti od temperature postaje:

$$R = \frac{l}{qSN_D A} T^\alpha,$$

odnosno:

$$\log R = \log \frac{l}{qSN_D A} + \alpha \cdot \log T.$$

S obzirom da su q , S , N_D i A konstante, zavisnost $\log R = f(\log T)$ predstavlja pravu čiji je nagib jednak koeficijentu α . Snimanjem promene otpornosti uzorka silicijuma n-tipa sa temperaturom u oblasti primesnog ponašanja moguće je odrediti koeficijent temperaturne zavisnosti pokretljivosti α .



ELEKTRONSKA FIZIKA ČVRSTOG TELA

Student: _____

Broj indeksa: _____

Datum: _____

Vežba 1**Zavisnost pokretljivosti nosilaca od temperature****ZADATAK:**

Odrediti temperaturni koeficijent pokretljivosti elektrona u uzorku silicijuma n-tipa snimanjem zavisnosti njegove električne otpornosti u opsegu temperatura od 25°C do 120°C. Kao uzorak se koristi oblast n-tipa silicijuma unutar jednospojnog tranzistora (UJT-UniJunction Transistor) oznake 2N2160 u metalnom kućištu.

POSTUPAK:

Za snimanje tražene zavisnosti koristi se kontrolisani izvor toplote, univerzalni multimeter (unimer), precizni digitalni multimeter i odgovarajući stalak za učvršćivanje. Dati UJT se povezuje tako da se izvodi baze (B1 i B2) koriste za merenje otpornosti, dok je izvod emitora (E) otvoren.

Uzorak se uglavi u odgovarajući nosač i pomoću stalka za učvršćivanje priljubi ravnim delom kućišta na grejnu ploču kontrolisanog izvora toplote. Između komponente i grejne ploče se postavlja liskunska folija kojom se obezbeđuje električna izolovanost kućišta od provodne ploče grejača. S obzirom da je komponenta u metalnom kućištu, toplota sa grejne ploče se dobro prenosi u njenu unutrašnjost i može se smatrati da su temperature komponente i grejne ploče jednake. Temperatura grejne ploče se zadaje preko prednje komandne table izvora toplote, a njena vrednost kontroliše preko unimera. Na preciznom digitalnom multimetru se vrši očitavanje vrednosti otpornosti uzorka.

Na kontrolisanom izvoru toplote podesiti manuelni rad i vrednost temperature HI (high) na 25°C. Pritisnuti dugme HEAT kojim se aktivira grejač. Pošto je grejač velike snage brzo se dostiže postavljena vrednost temperature što se indikuje paljenjem crevene lampice AT HIGH. Na unimeru se očitava vrednost napona koja je proporcionalna temperaturi grejne ploče. Kada se očitavanje na njemu ustabililo postignuto je ravnotežno stanje i tada očitati vrednost otpornosti uzorka na preciznom digitalnom multimetru. Zatim povišati temperatura HI za 5°C i kada se uspostavi novo ravnotežno stanje (stabilno očitavanje na unimeru) zabeležiti novu vrednost otpornosti (na preciznom digitalnom multimetru). Postupak ponavljati povišavanjem temperature HI u koracima od 5°C do vrednosti od 120°C i beležiti odgovarajuće otpornosti. Kada se dostigne 120°C pritisnuti dugme COOL kako bi se deaktivirao grejač i omogućilo hlađenje grejne ploče.

Rezultate merenja upisati u datu tabelu i izračunati vrednosti $\log T = \log_{10} T$ (T u K) i $\log R = \log_{10} R$ (R u Ω). Nacrtati zavisnost $\log R = f(\log T)$. Dobijenu zavisnost aproksimirati pravom linijom. Nagib dobijene prave određuje vrednost temperaturnog koeficijenta pokretljivosti α :

$$\alpha = \frac{\Delta(\log R)}{\Delta(\log T)}$$

Odrediti ovu vrednost.

ELEKTRONSKA FIZIKA ČVRSTOG TELA

Student: _____

Broj indeksa: _____

Datum: _____

$T(^{\circ}\text{C})$	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70
$R(\text{k}\Omega)$										
$\log T$										
$\log R$										

$T(^{\circ}\text{C})$	75	80	85	90	95	100	105	110	115	120
$R(\text{k}\Omega)$										
$\log T$										
$\log R$										

Vežba 2

Kapacitivnost P-N spoja pri inverznoj polarizaciji

Vrednost širine prelazne oblasti kod **strmog P-N spoja** ($N_A \gg N_D$ - p⁺-n spoj) zavisi od primenjenog napona inverzne polarizacije V na osnovu relacije:

$$w \approx x_n = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s(V_{bi}+V)}{qN_D}}$$

Time zavisnost kapacitivnosti od primenjenog napona (njegove apsolutne vrednosti V) ima oblik:

$$C = \varepsilon_s \frac{S}{w} = S \sqrt{\frac{q\varepsilon_s N_D}{2(V_{bi}+V)}}$$

odnosno:

$$\frac{1}{C^2} = \frac{2}{S^2} \cdot \frac{V_{bi}+V}{q\varepsilon_s N_D} = \frac{2V_{bi}}{q\varepsilon_s S^2 N_D} + \frac{2V}{q\varepsilon_s S^2 N_D},$$

$$\frac{1}{C^2} = \frac{1}{C_0^2} + a \cdot V.$$

Grafik zavisnosti $1/C^2 = f(V)$ predstavlja pravu čiji je odsečak na ordinati:

$$\frac{1}{C_0^2} = \frac{2V_{bi}}{q\varepsilon_s S^2 N_D},$$

gde je C_0 kapacitivnost p-n spoja bez spoljašnje polarizacije. Koeficijent pravca ove prave je:

$$a = \frac{2}{q\varepsilon_s S^2 N_D}.$$

Ukoliko je poznata površina p-n spoja S , na osnovu vrednosti $1/C_0^2$ i a jednostavno se određuju ugrađeni napon i koncentracija primesa u n oblasti spoja:

$$V_{bi} = \frac{1/C_0^2}{a},$$

$$N_D = \frac{2}{q\varepsilon_s S^2 a}.$$

Kod P-N spojeva gde koncentracija primesa u n oblasti nije konstantna (**spoj nije strm**) profil ove koncentracije se može odrediti numerički na osnovu niza vrednosti kapacitivnosti za različite vrednosti inverzne polarizacije. Zavisnost koja važi je:

$$N_D(x) = \frac{C^3}{q\varepsilon_s S^2 \left| \frac{dC}{dV} \right|},$$

$$x = \frac{\varepsilon_s S}{C}.$$

Svakoј vrednosti kapacitivnosti C odgovara debljina x koja je jednaka širini prelazne oblasti, a vrednost koncentracije primesa na toј debljini je N_D . Vrednost x se posmatra od metalurškog spoja prema oblasti niže koncentracije primesa (ovde prema n oblasti).

Varikap diode (diode čiji se kapacitet izrazito menja sa primenjenom polarizacijom) se realizuju sa superstrmim p-n spojem. Kod njega je koncentracija primesa u n oblasti uz metalurški spoj najviša i opada ka dubini poluprovodnika. Kod ovih dioda se kapacitivnost menja na osnovu relacije:

$$C = \frac{C_0}{\left(1 + \frac{V}{V_{bi}}\right)^{1/m+2}},$$

gde koeficijent m zavisi od profila primesa u n oblasti i u idealnom slučaju iznosi $-3/2$.

ELEKTRONSKA FIZIKA ČVRSTOG TELA

Student: _____

Broj indeksa: _____

Datum: _____

Vežba 2

Kapacitivnost P-N spoja pri inverznoj polarizaciji

ZADATAK:

Snimiti zavisnost kapacitivnosti od primenjene inverzne polarizacije odabrane testne diode koja se odlikuje strmim P-N spojem. Na osnovu ove zavisnosti odrediti ugrađeni napon P-N spoja ove diode, kao i vrednost koncentracije primesa u niže dopiranoj oblasti. Snimiti i profil koncentracije primesa u n-oblasti testne diode i uporediti ga sa izračunatom vrednošću.

Snimiti zavisnost kapacitivnosti od primenjene polarizacije odabrane varikap diode kao i profil koncentracije primesa u njenoj n-oblasti.

POSTUPAK:

Za snimanje traženih zavisnosti koristi se računarski vođeni C-V merač, odgovarajući interfejs sa računarem, računar i prilagođeni nosač za učvršćivanje varikap dioda. Testna dioda je Si ispravljačka dioda sa strmim P-N spojem koja je namenjena testiranju ispravnosti C-V merača. Varikap diode su 3 različite diode (BB105, BB109G i BB209G) namenjene ugradnji u tjunere TV i radio aparata. Sve 3 varikap diode imaju maksimalni dozvoljni inverzni napon polarizacije od 30V.

ZADATAK 1

Na C-V meraču postaviti opseg merenja na **200pF** i postaviti testnu diodu na odgovarajuće izvode tako da joj je katoda na HI konektoru, a anoda na LO konektoru. **Paziti na način priključivanja kako bi razmatrana komponenta bila inverzno polarisana.** Pokrenuti program za realizaciju C-V merenja. Pritisnuti dugme **Connect** kako bi se ostvarila komunikacija računara sa meračem. Pritiskom na dugme **Diode C-V** pokrenuti program za merenje kapacitivnosti dioda. Postaviti vrednosti parametara na $V_{min}=0V$, $V_{max}=20V$, $Step=0,1V$, $Pause=500ms$. Pritisnuti dugme **Test** i pratiti poruke na ekranu. Kada se merenje završi zapisati fajl sa izmerenim vrednostima CAP.TXT. U ovom fajlu se nalaze parovi vrednosti napona polarizacije u V i odgovarajuće kapacitivnosti diode u pF. Zatvoriti program Diode C-V.

Pritiskom na dugme **Diode N-w** pokrenuti program za određivanje koncentracije primesa u n oblasti diode. Postaviti vrednosti parametara na $V_{min}=0V$, $V_{max}=20V$, $Step=0,2V$, $Pause=500ms$ i $Area=1600mils^2=1mm^2$. Pritisnuti dugme **Test** i pratiti poruke na ekranu. Kada se merenje završi zapisati fajl sa izračunatim vrednostima CONC.TXT. U ovom fajlu se nalaze parovi vrednosti širine prelazne oblasti u μm i odgovarajuća vrednost koncentracije primesa na tom rastojanju od metalurškog spoja u cm^{-3} . Zatvoriti program Diode N-w.

1. Na osnovu vrednosti iz fajla CAP.TXT nacrtati grafik $C=f(V)$.
2. Za vrednosti napona polarizacije do 4V izračunati $1/C^2$ i nacrtati grafik $1/C^2=f(V)$. Dobijenu zavisnost aproksimirati pravom linijom i odrediti ugrađeni napon V_{bi} i koncentraciju primesa u n oblasti. Uzeti da je površina P-N spoja $S=1mm^2$, $\epsilon_s=\epsilon_{rsi}\epsilon_0=11.7\times 8.85\times 10^{-14}F/cm$.
3. Na osnovu vrednosti iz fajla CONC.TXT nacrtati profil primesa u n oblasti $N_D=f(x)$.
4. Uporediti rezultate za N_D dobijene pod 2. i 3. Da li je ova dioda zaista sa strmim (skokovitim) P-N spojem?

ELEKTRONSKA FIZIKA ČVRSTOG TELA

Student: _____

Broj indeksa: _____

Datum: _____

ELEKTRONSKA FIZIKA ČVRSTOG TELA

Student: _____

Broj indeksa: _____

Datum: _____

ZADATAK 2

Varikap diodu uglaviti u nosač i povezati na odgovarajuće izvode C-V merača tako da joj je katoda na HI konektoru, a anoda na LO konektoru. **Paziti na način priključivanja kako bi razmatrana komponenta bila inverzno polarisana.** Pokrenuti program za merenje kapacitivnosti dioda **Diode C-V**. Postaviti vrednosti parametara na $V_{min}=0V$, $V_{max}=25V$, $Step=0,2V$, $Pause=500ms$. Pritisnuti dugme **Test** i pratiti poruke na ekranu. Kada se merenje završi zapisati fajl sa izmerenim vrednostima CAP.TXT. U ovom fajlu se nalaze parovi vrednosti napona polarizacije u V i odgovarajuće kapacitivnosti diode u pF. Zatvoriti program Diode C-V.

Pokrenuti program za određivanje koncentracije primesa u n oblasti diode **Diode N-w**. Postaviti vrednosti parametara na $V_{min}=0V$, $V_{max}=25V$, $Step=0,2V$, $Pause=500ms$ i $Area=400mils^2=0.258mm^2$. Pritisnuti dugme **Test** i pratiti poruke na ekranu. Kada se merenje završi zapisati fajl sa izračunatim vrednostima CONC.TXT. U ovom fajlu se nalaze parovi vrednosti širine prelazne oblasti u μm i odgovarajuća vrednost koncentracije primesa na tom rastojanju od metalurškog spoja u cm^{-3} . Zatvoriti program Diode N-w.

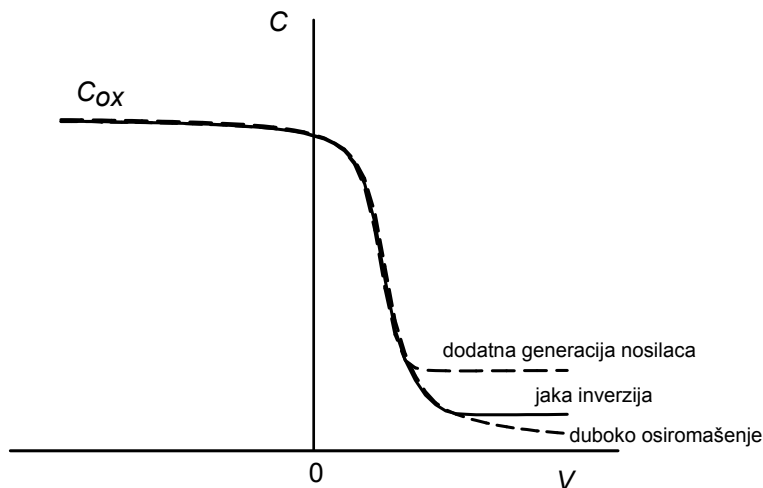
1. Na osnovu vrednosti iz fajla CAP.TXT nacrtati grafik $C=f(V)$.
2. Na osnovu vrednosti iz fajla CONC.TXT nacrtati profil primesa u n oblasti $N_D=f(x)$ za vrednosti x do $4\mu m$. Da li je ova dioda sa superstrmim spojem?
3. Promena vrednosti kapacitivnosti P-N spoja je izrazitija pri direktnoj nego pri inverznoj polarizaciji. Zbog čega se diode polarišu inverzno kada se u elektronskim kolima koristi zavisnost njihove kapacitivnosti od primenjenog napona?

Vežba 3

Kapacitivnost MOS strukture (C-V kriva MOS kondenzatora)

Kriva zavisnosti kapacitivnosti MOS kondenzatora u širokom opsegu primenjenog napona osnovne polarizacije i superponiranom naponu male amplitude i visoke frekvence prolazi kroz oblast akumulacije, osiromašenja, slabe, umerene i jake inverzije. Ukoliko se osnovni napon polarizacije pri snimanju C-V krive brzo menja nosioci neophodni za formiranje invertovanog sloja ne uspevaju da se termički generišu i MOS struktura umesto u jaku inverziju ulazi u oblast takozvanog dubokog osiromašenja. Da bi se postigla jaka inverzija MOS strukture osnovni napon polarizacije mora da se sporo menja (manje od 50 mV/s) ili da se u strukturi generišu nosioci neophodni za nastanak invertovanog sloja (dejtstvom svetlosnog impulsa).

Dodatna generacija nosilaca dejstvom konstantnog svetlosnog izvora na MOS strukturu omogućava nastajanje invertovanog sloja pri nižim primenjenim naponima i užoj osiromašenoj oblasti što se na C-V krivoj ogleda kroz višu vrednost minimalne kapacitivnosti.



U akumulaciji je kapacitivnost MOS strukture jednaka kapacitivnosti oksida:

$$C_{ox} = \varepsilon_{ox} \varepsilon_0 \frac{A}{t_{ox}},$$

gde je $\varepsilon_0 \varepsilon_{ox} = 3.45 \cdot 10^{-13} \text{F/cm}$, A površina, a t_{ox} debljina oksida MOS strukture. Na osnovu ove relacije može se odrediti debljina oksida MOS strukture:

$$t_{ox} = \varepsilon_{ox} \varepsilon_0 \frac{A}{C_{ox}}.$$

Napon praga MOS strukture se definiše kao vrednost primenjenog napona pri kome nastaje jaka inverzija. Sa C-V krive se vrednost napona praga može odrediti na osnovu vrednosti polarizacije pri kojoj se dostiže minimalna kapacitivnost MOS strukture.

ELEKTRONSKA FIZIKA ČVRSTOG TELA

Student: _____

Broj indeksa: _____

Datum: _____

Vežba 3

Kapacitivnost MOS strukture (C-V kriva MOS kondenzatora)**ZADATAK:**

Snimiti zavisnost kapacitivnosti testne MOS strukture od primenjenog napona polarizacije pri superponiranoj visokofrekventnoj pobudi. Razmatrati slučajeve brze i spore promene primenjenog osnovnog napona i slučaj dodatnog generisanja nosilaca putem svetlosnog izvora. Na osnovu ove zavisnosti odrediti debljinu oksida MOS strukture, kao i vrednost njenog napona praga.

POSTUPAK:

Za snimanje traženih zavisnosti koristi se računarski vođeni C-V merač sa pripadajućim testnim postoljem (proberom), odgovarajući interfejs sa računarom i računar. C-V merač generiše osnovnu naponsku pobudu i superponirani naponski signal male amplitude (20 mV) i visoke frekvence (1MHz). Osnovna naponska pobuda se menja u definisanim koracima i određenom brzinom. Za svaki naponski korak se meri kapacitivnost strukture i na taj način dobija C-V kriva. Testna struktura je osnovna Si pločica sa p-tipom supstrata na kome su definisani MOS kondenzatori sa metalnim gejtom kružnog oblika.

ZADATAK

Na C-V meraču postaviti opseg merenja na **2000pF**. Postaviti testnu MOS strukturu na ploču probera i povezati sa C-V meračem odgovarajuće izvode (HI i LO konektore). Ploča probera je provodna i preko nje se ostvaruje kontaktiranje supstrata MOS kondenzatora. Kontaktiranje gejta testne strukture se vrši preko glave probera smeštenog na vrhu kontaktne igle. Kontaktna glava probera prijanja za metalni gejt pomoću odgovarajućeg zavrtnja na nosaču. **Pažljivo spuštati glavu probera do površine strukture kako se ne bi oštetila kontaktna igla.** Pokrenuti program za realizaciju C-V merenja. Pritisnuti dugme **Connect** kako bi se ostvarila komunikacija računara sa meračem. Pritiskom na dugme **MOS C-V** pokrenuti program za merenje kapacitivnosti MOS strukture. Postaviti vrednosti parametara na $V_{min}=-5V$, $V_{max}=5V$, $Step=0,2V$, $Pause=200ms$. Pritisnuti dugme **Test** i pratiti poruke na ekranu. Obratiti pažnju da poklopac probera treba da bude zatvoren pri merenjima. Kada se merenje završi zapisati fajl sa izmerenim vrednostima CAP.TXT. U ovom fajlu se nalaze parovi vrednosti **napona polarizacije u V** i odgovarajuće **kapacitivnosti MOS strukture u pF**. Promeniti vrednost parametra $Pause$ na 2000ms. Pritisnuti dugme **Test** i pratiti poruke na ekranu. Kada se merenje završi zapisati novi fajl sa izmerenim vrednostima CAP.TXT. Zatvoriti program MOS C-V.

U osnovnom meniju pritisnuti dugme **Lamp Bright**. Time se u proberu pali svetlo koje služi kao dodatni generator nosilaca. Pritiskom na dugme **MOS C-V** pokrenuti program za merenje kapacitivnosti MOS strukture. Postaviti vrednosti parametara na $V_{min}=-5V$, $V_{max}=5V$, $Step=0,2V$, $Pause=200ms$. Pritisnuti dugme **Test** i pratiti poruke na ekranu. Obratiti pažnju da poklopac probera treba da bude zatvoren pri merenjima. Kada se merenje završi zapisati fajl sa izmerenim vrednostima CAP.TXT. Zatvoriti program MOS C-V.

ELEKTRONSKA FIZIKA ČVRSTOG TELA

Student: _____

Broj indeksa: _____

Datum: _____

Na osnovu vrednosti iz fajlova CAP.TXT nacrtati grafike $C=f(V)$ odnosno 3 C-V krive.

1. Na osnovu vrednosti kapacitivnosti u akumulaciji (C_{ox}) odrediti debljinu oksida testne MOS strukture ako se zna da su kondenzatori kružne površine čiji je prečnik 1,8 mm.
2. Na osnovu vrednosti kapacitivnosti na početku jake inverzije bez dodatne generacije nosilaca proceniti napon praga testne MOS strukture.
3. Na osnovu vrednosti kapacitivnosti na početku jake inverzije uz postojanje dodatne generacije nosilaca proceniti napon praga testne MOS strukture. Za koliko je dodatna generacija nosilaca snizila vrednost napona praga?