

NUMERIČNI MODEL DELOVANJA DIODE

Miran Kramberger, Miroslav Mićović

KLJUČNE BESEDE: Polprevodniki, polprevodniške strukture, silicijeve diode, numerično modeliranje, parametri, karakteristike.

POVZETEK: Izdelan je numerični model, ki opisuje izotermno delovanje enodimenzionalnih polprevodniških struktur. Kot primer je bila modelirana p^+nn^+ diodna struktura, rezultati pa primerjani z izmerjenimi. Opisani so osnovni fizikalni pojavi pri delovanju bipolarne strukture, katerih aproksimacije so uporabljene v modelu.

NUMERICAL MODEL OF DIODE OPERATION

KEY WORDS: semiconductors, semiconductor structure, silicon diodes, parameters, characteristics.

ABSTRACT: numerical model for isotherm operation of onedimensional semiconductor structure was made out. It has been tested on p^+nn^+ diode structure. The results were compared with measured parameters. Basic physical effects by operating of bipolar structure, approximations of which were used in model, are described.

UVOD

Kvalitativno je mogoče opisati delovanje polprevodniških struktur s Shockleyjevo teorijo spojev različno dopiranih plasti polprevodnikov⁽¹⁾. Zadovoljivo natančnost pri opisu delovanja polprevodniških naprav, posebej pri dizajniranju le-teh pa dosežemo z numeričnimi modeli. Numerični model nam globlje razkrije osnovne procese, ki potekajo med delovanjem in poglubi razumevanje delovanja polprevodniških elementov. Pričujoči članek predstavlja model, katerega numerični algoritem je prevzet po Gummlu⁽²⁾ in De Mariu⁽³⁾ in izhaja iz osnovnih principov. Omeji se na enodimenzionalne strukture pri stacionarnih pogojih in konstantni temperaturi. Uporabljen je na p^+nn^+ diodni strukturi. Iz primerjave izračunanih in na enaki strukturi izmerjenih parametrov in karakteristik je razvidno dobro ujemanje, kar opravičuje uporabo naštetih približkov.

NUMERIČNI MODEL

Porazdelitev elektrostatskega potenciala v odvisnosti od porazdelitve električnega naboja opisuje Poissonova enačba:

$$\frac{\delta^2 \Phi}{\delta Z^2} = \frac{q}{\epsilon} (N(Z) - n(Z) + p(Z))$$

Φ - elektrostatski potencial

$N(Z)$ - porazdelitev ioniziranih nečistoč = $N_D^+(Z) - N_A^-(Z)$

N_D^+ - koncentracija ioniziranih donorjev

N_A^- - koncentracija ioniziranih akceptorjev

Odvisnost gostote električnega toka vrzeli in elektronov od oblike elektrostatskega potenciala in gradienta koncentracij elektronov ter vrzeli podajata enačbi:

$$j_p = -q \left(D_p \frac{\delta p(Z)}{\delta Z} + \mu_p p(Z) \frac{\delta \Phi}{\delta Z} \right)$$

$$j_n = q \left(D_n \frac{\delta n(Z)}{\delta Z} - \mu_n n(Z) \frac{\delta \Phi}{\delta Z} \right)$$

D_n - difuzijski koeficient elektronov

D_p - difuzijski koeficient vrzeli

μ_p - gibljivost vrzeli

μ_n - gibljivost elektronov

Fermi - Diracova kvantna porazdelitvena funkcija opisuje energijsko porazdelitev elektronov in vrzeli. Kot dober približek pri sobni temperaturi in srednji gostoti vzamemo Boltzmanovo porazdelitveno funkcijo. V intrinzičnem siliciju je podana lega elektronskega potenciala Φ prek zveze:

$$\mu_i(Z) = -q \Phi(Z) = \frac{E_c(Z) - E_v(Z)}{2} + \frac{kT}{2} \cdot \ln \frac{N_v}{N_c}$$

E_c - minimalna energija elektronov v prevodnem pasu

E_v - maksimalna energija vrzeli v valenčnem pasu

N_v - efektivna gostota stanj v prevodnem pasu

N_c - efektivna gostota stanj v valenčnem pasu

μ_i - kemijski potencial v intrinzičnem siliciju

Ravnovesno koncentracijo prostih vrzeli in elektronov podajata enačbi:

$$n(Z) = n_i \exp \left(\frac{\mu + q \Phi}{kT} \right)$$

$$p(Z) = n_i \exp \left(- \left(\frac{\mu + q \Phi}{kT} \right) \right)$$

μ - kemijski potencial (Fermijev nivo)

n_i - koncentracija elektronov in vrzeli v intrinzičnem siliciju

Difuzijski koeficient elektronov povezuje z gibljivostjo enačba:

$$D_n = \frac{2 \frac{kT}{q} \mu_n F_{V/2} \left(\frac{\epsilon_p - \epsilon_c}{kT} \right)}{F_{-V/2} \left(\frac{\epsilon_p - \epsilon_c}{kT} \right)}$$

$F_{V/2}$ in $F_{-V/2}$ sta Fermijeva integrala

Dokler je koncentracija prostih elektronov mnogo višja kot N_c je dobra aproksimacija Einsteinova zveza:

$$D_n = \mu_n \frac{kT}{q}$$

podobno velja tudi za vrzeli

$$D_p = \mu_p \frac{kT}{q}$$

Celotna gostota električnega toka j_T je enaka $j_T = j_p + j_n$

Ker smo se omejili na stationarne pojave lahko zapišemo kontinuitetno enačbo kar:

$$\frac{dj_T}{dZ} = 0$$

Upoštevanje generacij in rekombinacije nam da še kontinuitetni enačbi za gostoti tokov vrzeli in elektronov:

$$\frac{dj_p}{dZ} = -qG \quad \frac{dj_n}{dZ} = qG$$

G - generacijsko - rekombinacijska hitrost, ki je zaradi zakona o delovanju mas v stationarnih pogojih enaka za vrzeli in elektrone.

V ravnovesju velja še $p(z) \cdot n(z) = n_i^2$

Fizikalne količine, ki nastopajo v zapisanih enačbah najprej zapišemo v brezdimenzijski obliki. Vpeljemo normalizacijske faktorje:

* Debyeova dolžina v intrinzičnem Si, L_d , ki podaja povprečno prosto pot nosilcev električnega toka.

$$L_D = \sqrt{\frac{\epsilon \epsilon_0 kT}{q^2 n_i}} = 3,34 \cdot 10^{-5} \mu m$$

* termična napetost $V_T = \frac{kT}{q} = 2,59 \cdot 10^{-2} V$

* n_i , ki znaša pri sobni temperaturi $1,45 \cdot 10^{-10} cm^{-3}$

* difuzijski koeficient $D_0 = 1 cm^2/sek$.

* kapacitivnost plasti s širino L_d

$$C_0 = \frac{\epsilon \epsilon_0}{L_d} = 3,1 \cdot 10^{-6} \frac{F}{m^2}$$

Definicije normaliziranih količin:

$$Z \quad x = \frac{Z}{L_D}$$

$$\Phi \quad \Psi = \frac{\Phi}{V_t}$$

$$V_d \quad V_d = \frac{V_d}{V_t} \text{ vgrajena napetost na p-n spoju}$$

$$V_a \quad V_a = \frac{V_a}{V_T} \text{ priključena napetost}$$

$$\mu \quad \mu = \frac{\mu}{qV_T} \text{ Fermijev nivo}$$

$$E = \frac{-\delta\Phi}{\delta X} \quad E = \frac{\epsilon L_d}{V_T} \text{ električna poljska jakost}$$

$$N \quad N = \frac{N}{n_i}$$

$$n, p \quad \frac{n}{n_i}, \quad \frac{p}{n_i}$$

$$j_T, j_p, j_n \quad J_T, J_p, J_n \quad J_T = -\frac{j_T L_d}{q D_0 n_i}$$

$$G \quad U = \frac{GL_d^2}{D_0 n_i}$$

$$D_n, D_p \quad \gamma_n^{-1}, \gamma_p^{-1} \quad \gamma_n^{-1} = \frac{D_n}{D_0}$$

$$\mu_n, \mu_p \quad \gamma_n^{-1}, \gamma_p^{-1} \quad \gamma_n^{-1} = \frac{\mu_n V_T}{D_0}$$

$$C \quad C = \frac{\Phi}{C_0}$$

Dobimo enačbe v brezdimenzijski obliki:

$$\frac{d^2 \Psi}{dx^2} = n(x) - p(x) - N(x) \quad J_T = J_p + J_n$$

$$J_p = \frac{1}{\gamma_p} (p(x) \frac{d\Psi}{dx} + \frac{dp}{dx}) \quad \frac{dJ_T}{dx} = 0$$

$$J_n = \frac{1}{\gamma_n} (n(x) \frac{d\Psi}{dx} - \frac{dn}{dx}) \quad \frac{dJ_p}{dx} = U(x) \quad (3)$$

$$p(x) \cdot n(x) = 1 \quad \frac{dJ_n}{dx} = -U(x) \quad (4)$$

Omejimo se na diodno strukturo p^+nn^+ .

ROBNI POGOJI

Koncentracija manjšinskih nosilcev električnega toka na zunanjem stiku strukture je enaka 0. Področja z močnim električnim poljem v notranjosti so od kontaktov toliko oddaljena, da nanje ne vplivajo. Zunanji kontakti so na mestih $x = 0$ ter $x = L$:

$$n(0) = N_d(0) - N_a(0) \quad p(0) = \frac{1}{n(0)}$$

$$p(L) = N_a(L) - N_d(L) \quad n(L) = \frac{1}{p(L)}$$

Koncentracije $n(0)$, $p(0)$, $n(L)$, $p(L)$ so neodvisne od časa in priključene napetosti. Zunanja napetost je pritisnjena med točki $x=0$ ter $x=L$ in je enaka $V_a = \psi(0) - \psi(L)$ Izberemo $\psi(0) = 0$

INTERACIJSKI ALGORITEM

Po integraciji enačb 1, 2 ter upoštevanju robnih pogojev dobimo:

$$n(x) = e^{\psi(x)} \left(n(0) e^{-\psi(0)} - \int_0^x \gamma_n(x') Jn(x') e^{-\psi(x')} dx' \right)$$

$$p(x) = e^{-\psi(x)} \left(p(L) e^{\psi(L)} + \int_L^x \gamma_p(x') Jp(x') e^{\psi(x')} dx' \right)$$

Enačbi za gostoti tokov vrzeli in elektronov dobimo z integracijo enačb 3, 4.

$$Jn(x) = - \int U(x') dx' + Kn$$

$$Jp(x) = - \int U(x') dx' + Kp$$

Konstanti K_n in K_p dobimo po krajšem računu z upoštevanjem robnih pogojev (ref. 4).

Potencial zapišemo kot vsoto približka in popravka:

$$\psi(x) = \psi'(x) + \delta\psi(x)$$

ter zanemarimo člene reda večjega kot 1 v $\delta\psi(x)$

Dobimo enačbo za popravek k potencialu:

$$\frac{\sigma^2 \delta\psi(x)}{dx^2} - \delta\psi(x) (n'(x) + p'(x)) = - \frac{\sigma^2 \psi(x)}{dx^2} + n'(x) - p'(x) - N(x)$$

Robna pogoja za popravek sta

$$\delta\psi(0) = 0 \quad \text{in} \quad \delta\psi(L) = 0$$

Diferencialno enačbo prevedemo v diferenčno obliko. Računski interval razdelimo na intervale enake dolžine. Dobimo sistem linearnih enačb, ki ima tridiagonalno obliko. Rešimo ga z metodo Gaussove eliminacije.

DIFERENCIALNA KAPACITETA

Na p-n spoju je vgrajena plast z visokim električnim poljem, ki lahko doseže jakost 10^6 V/cm ter se prostorsko razširja tudi 200 μ m. Izmerimo lahko kapacitivnost

take plasti, ki se spreminja s pritisnjeno napetostjo in je seveda odvisna od detaljne strukture diode. Diferencialna kapaciteta C je definirana kot kvocient naboja, ki steče v diodo in spremembe napetosti, ki tak tok povzroči. Upoštevati je potrebno le tok elektronov, saj je dotok vrzeli zaradi zahteve po električni nevtralnosti približno enak:

$$C = \frac{dQ}{dV} = A \frac{\int_0^L (n(x)v - n(x)v_{dv}) \cdot dx}{dV}$$

OPIS PARAMETROV MODELA

a) Koncentracije ioniziranih nečistoč

Koncentracija ioniziranih donorjev je:

$$N_d^+ = N_d \left(1 - \frac{1}{1 + \frac{1}{g} e^{\frac{E_o - E_F}{kT}}} \right)$$

g - degeneracijski faktor osnovnega stanja je enak 2

E_d - lega donorskega nivoja v prepovedanem pasu

V primeru fosforja je

$$N_{d+} (N_d = 1 \cdot 10^{16}/\text{cm}^3) = 0,999 \cdot 10^{16}/\text{cm}^3 \text{ in}$$

$$N_{d+} (N_d = 1 \cdot 10^{18}/\text{cm}^3) = 0,86 \cdot 10^{18}/\text{cm}^3$$

Koncentracija ioniziranih akceptorjev N_a^+ pa je:

$$N_a^+ = \frac{N_a}{1 + g e^{\frac{E_A - E_F}{kT}}}$$

g - degeneracija osnovnega stanja je enaka 4

E_a - lega akceptorskega nivoja v prepovedanem pasu

V primeru bora je:

$$N_{a+} (N_a = 1 \cdot 10^{16}/\text{cm}^3) = 0,993 \cdot 10^{16}/\text{cm}^3 \text{ in}$$

$$N_{a+} (N_a = 1 \cdot 10^{18}/\text{cm}^3) = 0,93 \cdot 10^{18}/\text{cm}^3$$

Na metalurškem p-n spoju je koncentracija nosilcev električnega toka enaka n_i .

V izračunu upoštevamo popolno ionizacijo donorskih in akceptorskih nečistoč, kar je zadovoljliva aproksimacija pri modeliranih koncentracijah dopiranja.

b) Gibljivost

V modelu je uporabljena empirična odvisnost gibljivosti od koncentracije nečistoč pri sobni temperaturi (ref. 6):

$$\mu_n = \mu_{n \min} + \frac{\mu_{n \max} - \mu_{n \min}}{1 + \left(\frac{N_d + N_a}{N_{ref n}} \right)^\alpha}$$

$$\mu_p = \mu_{p \min} + \frac{\mu_{p \max} - \mu_{p \min}}{1 + \left(\frac{N_d + N_a}{N_{ref p}}\right)^\beta}$$

$\mu_{n \min} = 92 \text{ cm}^2/\text{sek}$
 $\mu_{p \min} = 47,7 \text{ cm}^2/\text{V sek}$

$\mu_{n \max} = 1360 \text{ cm}^2/\text{V sek}$
 $\mu_{p \max} = 495 \text{ cm}^2/\text{V sek}$
 $N_{ref n} = 1,3 \cdot 10^{17}/\text{cm}^3$
 $N_{ref p} = 6,3 \cdot 10^{16}/\text{cm}^3$
 $\alpha = 0,91$
 $\beta = 0,76$

c) Življenski čas manjših nosilcev električnega toka

Generacijsko rekombinacijska hitrost kot posledica "trap" nivoja z energijo E_t v prepovedanem pasu G je (ref. 7):

$$G = \frac{(pn - n_i^2)}{(n + n_i e^{\frac{E_t - \mu_i}{kT}})\tau_p + (p + n_i e^{\frac{\mu_i - E_t}{kT}})\tau_n}$$

K rekombinacijam prispevajo največ nečistoče in defekti, katerih energijski nivoji ležijo v bližini intrinzičnega Fermijevega nivoja, zato opišemo rekombinacije na množici nečistoč z različnimi legami nivojev z enim samim nivojem, ki leži na μ_i . Vpeljemo povprečni življenski čas:

$$\tau = \frac{\tau_n + \tau_p}{2}$$

Tako dobimo poenostavljeno generacijsko rekombinacijsko hitrost G:

$$G = \frac{pn - n_i^2}{(n + p + 2 n_i)\tau}$$

Na strukturi p^+nn^+ lahko izmerimo preklonni čas τ_{RR} (ref. 8), v katerem preide dioda iz stanja prehoda v stanje zapore električnega toka. Najprej poganjamo skozi diodo tok 10 mA v prevodni smeri. Pri takem toku je vbrizganje nosilcev električnega toka v bazo iz p^+ in n^+ plasti veliko (reda velikosti $10^{17}/\text{cm}^3$). Koncentracija vrzeli je enaka koncentraciji elektronov.

(glej slike 14, 15, 16.)

Za tem preklopimo električni tok v zaporno smer. Koncentracija nosilcev električnega toka se manjša z rekombinacijami in črpanjem s pomočjo vsiljenega zapornega toka, dokler ne doseže ravnovesne porazdelitve v zapornem stanju. Generacijsko rekombinacijski člen še nadalje poenostavimo tako, da privzamemo $p=n$ ter $\tau_n = \tau_p = \tau_0$

Dogajanje v bazi opiše enačba:

$$\frac{dQ}{dt} + \frac{Q}{t_0} = I_t$$

Rešitev ima obliko:

$$Q(t) = Q_F \left(\left(1 + \frac{I_R}{I_F}\right) e^{-\frac{t}{t_0}} - \frac{I_R}{I_F} \right)$$

robna pogoja sta $Q(\tau_{RR}) = 0$ in $I_R = I_F$

I_R - vsiljeni električni tok v zaporni smeri
 I_F - električni tok v prevodni smeri

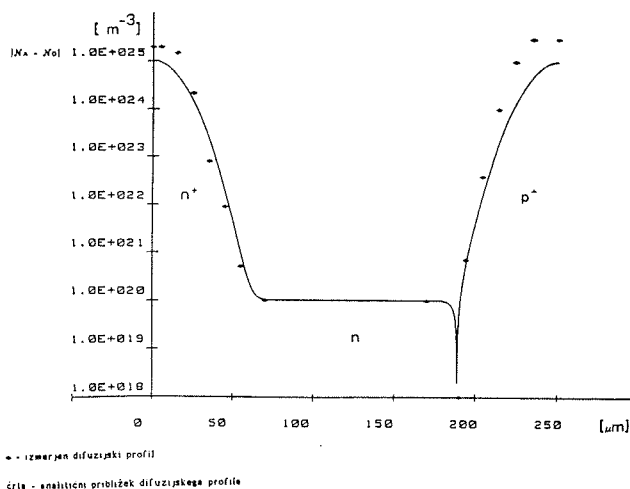
$$\tau_0 = \tau_{RR} \ln 2 \quad \tau = \frac{\tau_{RR} \ln 2}{2}$$

Tako dobimo odvisnost življenskega časa manjšinskih nosilcev električnega toka od preklopnega časa diode.

PRIMERJAVA NAPOVEDI MODELA Z MERITVAMI

Modelirane in izmerjene so bile tri strukture p^+nn^+ izdelane s sočasno difuzijo bora in fosforja v nasprotni ploskvi $\langle 111 \rangle$ orientirane ploščice silicija n tipa, predopirane s tremi različnimi koncentracijami fosforja, debele 250 μm . Difuzija je potekala 22 ur na temperaturi 1250°C v mešanici dušika in kisika. Kot izvor dopanta smo uporabili spin-on silica filma bora in fosforja. Kontakti na ploščici so bili standardni brez tokovno nanešeni sintrani nikljevi kontakti. Na plast niklja je bila brez tokovno nanešena še plast zlata. Rezina je bila procesirana do izdelanih diodnih skeletov po standardni tehnologiji za izdelavo 2A diod v Iskri Polprevodniki Trbovlje. Meritve so bile opravljene na neinkapsuliranih skeletih. Diodna tabletko je bila kvadratne oblike z dolžino stranice 2 mm.

Odvisnost koncentracije dopanta od koordinate prečno na rezino je bila za vse primere izmerjena z metodo spreading resistance na klinu zbrušeni pod kotom 2°. Primer porazdelitve dopanta je prikazan na sliki 4.



Slika 4

$P-n$ spoj se nahaja na globini okoli 60 μm . V modelu je porazdelitev dopanta aproksimirana z Gaussovo funkcijo, ki se v področju električno aktivnih koncentracij dobro ujema z izmerjeno:

$$N_a(x) = N_{a0} e^{-\frac{(L-x)^2}{x_j^2}}$$

$$N_d(x) = N_{d0} e^{-\frac{x^2}{x_j^2}}$$

Izmerjeni parametri na diodnih čipih:

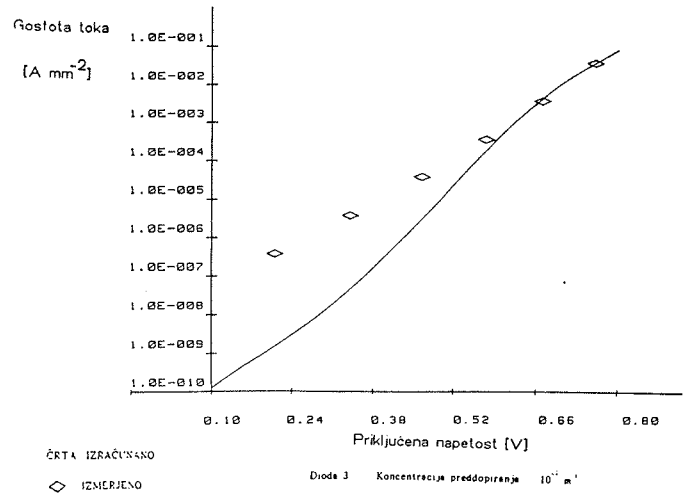
1. $N = 1 \cdot 10^{14} / \text{cm}^3$, $\tau_{RR} = 8,7 \mu\text{sec.}$, $U_{BR} = 1560 \text{ V}$
 $d = 250 \mu\text{m}$
2. $N = 1 \cdot 10^{15} / \text{cm}^3$, $\tau_{RR} = 4,3 \mu\text{sec.}$, $U_{BR} = 260 \text{ V}$
 $d = 250 \mu\text{m}$
3. $N = 1 \cdot 10^{16} / \text{cm}^3$, $\tau_{RR} = 2,8 \mu\text{sec.}$, $U_{BR} = 106 \text{ V}$
 $d = 200 \mu\text{m}$

U_{BR} - napetost plaznega naboja, izmerjena pri zapornem toku $10 \mu\text{ A}$

N - koncentracija s fosforjem preddopirane baze

d - debelina rezine silicija

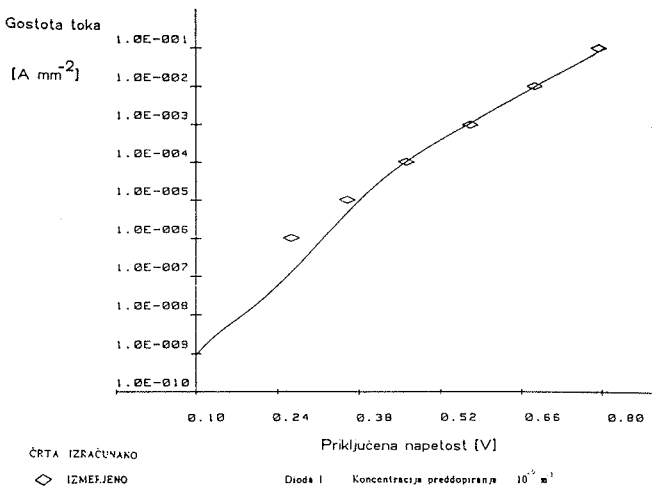
Na slikah 23, 24 in 25 je prikazana odvisnost gostote toka v prevodni smeri od priključene napetosti za vse tri primere. S polno črto je podana odvisnost izračuna z modelom, izmerjene vrednosti so podane s točkami.



ČRTA IZRAČUNANO
 ◇ IZMERJENO
 Diode 3 Koncentracija preddopiranja 10^{16} m^{-3}

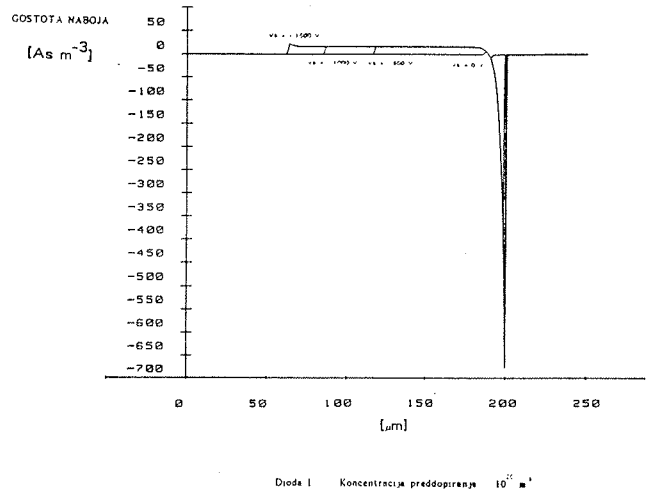
Slika 25

Na slikah 17, 18 in 19 je prikazana porazdelitev gostote naboja v zaporni smeri za vse tri primere. Na slikah so zapisane napetosti preboja posamezne diode, izračunane z modelom.



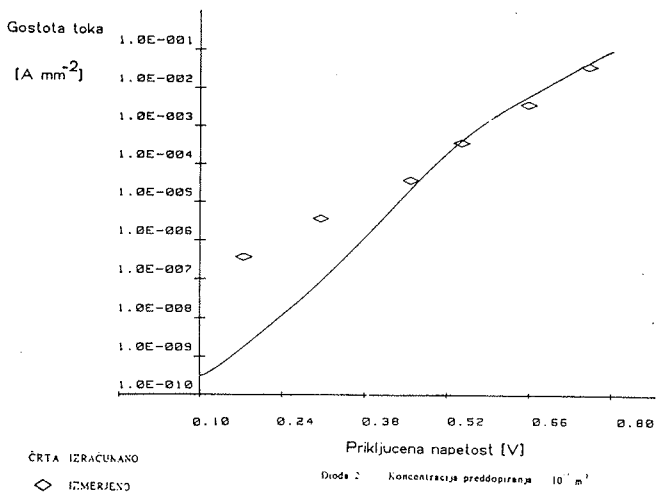
ČRTA IZRAČUNANO
 ◇ IZMERJENO
 Diode 1 Koncentracija preddopiranja 10^{14} m^{-3}

Slika 23



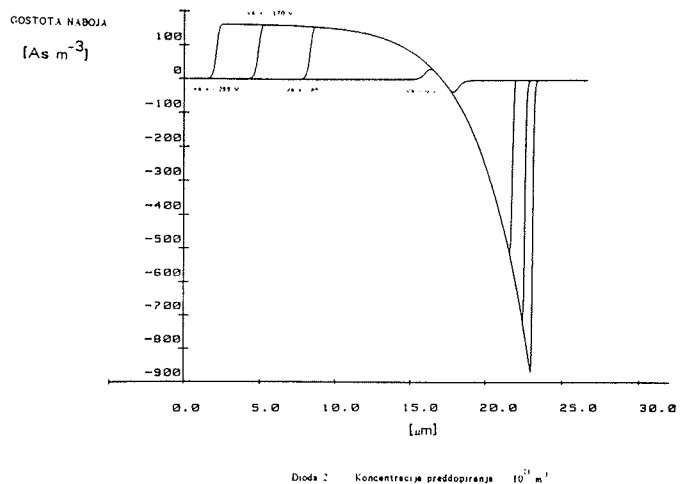
Diode 1 Koncentracija preddopiranja 10^{16} m^{-3}

Slika 17



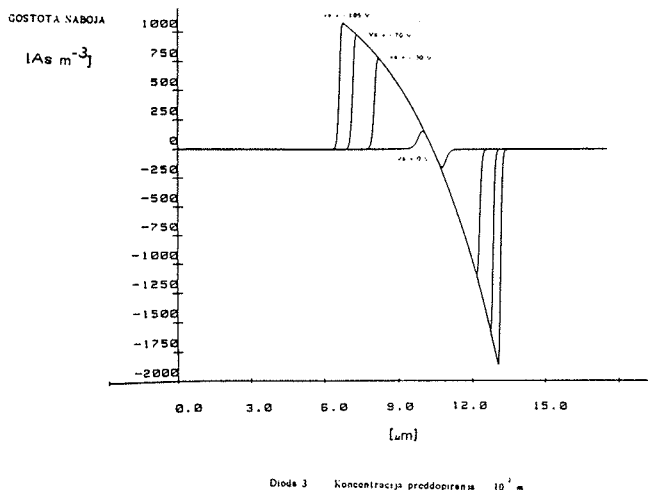
ČRTA IZRAČUNANO
 ◇ IZMERJENO
 Diode 2 Koncentracija preddopiranja 10^{15} m^{-3}

Slika 24



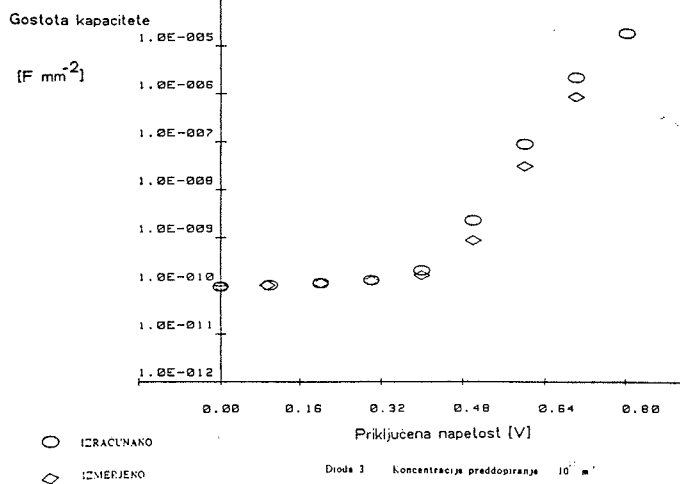
Diode 2 Koncentracija preddopiranja 10^{15} m^{-3}

Slika 18



Slika 19

Gostota kapacitete modeliranih primerov je podana na slikah 20, 21, 22.



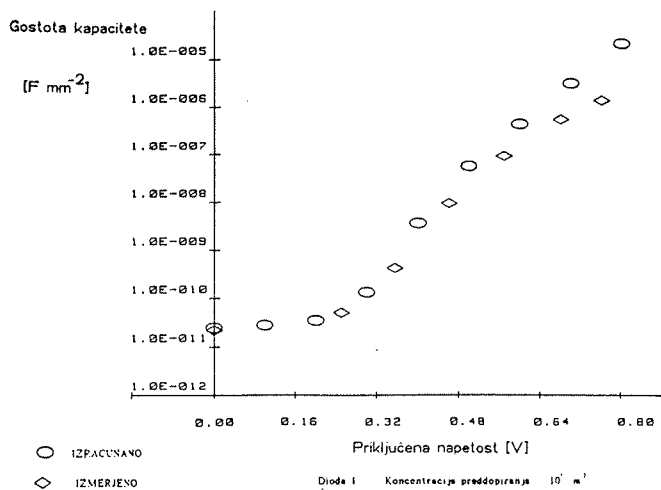
Slika 22

DISKUSIJA

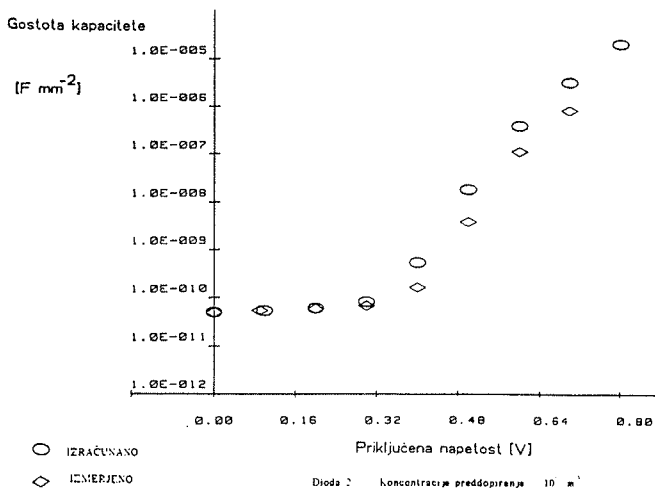
I (U) karakteristika v prevodni smeri

Največja sprememba električnega potenciala je na metalurškem p-n spoju. Pri višanju prevodne napetosti se le-ta počasi manjša in pri določeni mejni napetosti U_m v električnem smislu izgine, saj ga preplavijo gibljivi nosilci električnega toka, katerih koncentracija postane enaka koncentraciji dopiranja baze.

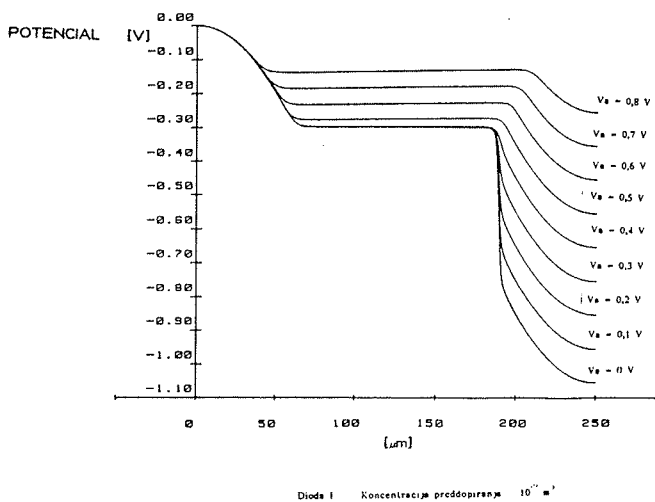
Na slikah 5, 6 in 7 so podane porazdelitve električnega potenciala v prevodni smeri diode za vse tri modelirane primere.



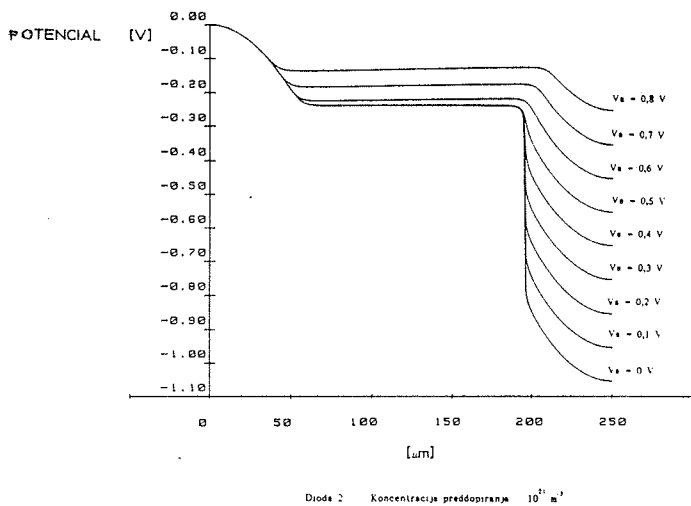
Slika 20



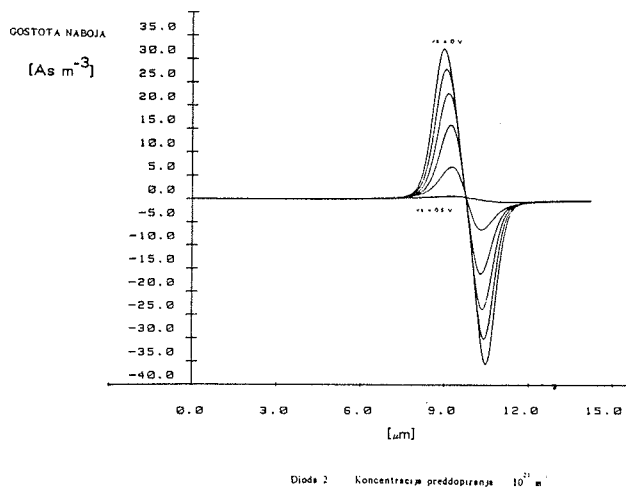
Slika 21



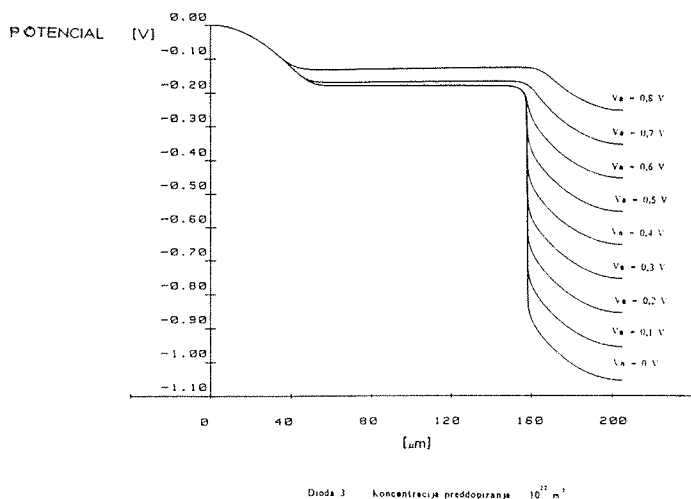
Slika 5



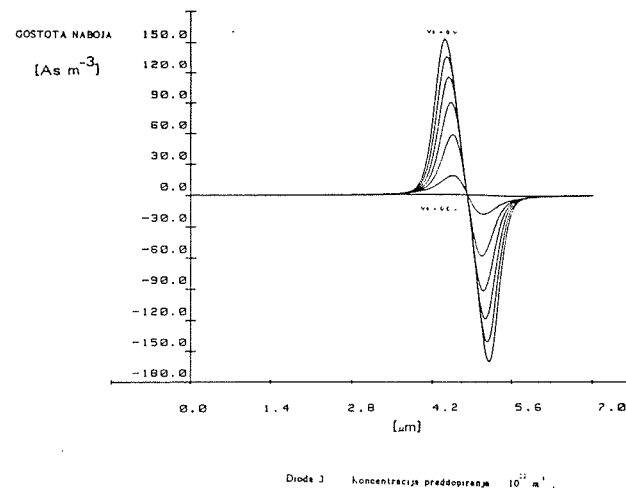
Slika 6



Slika 9



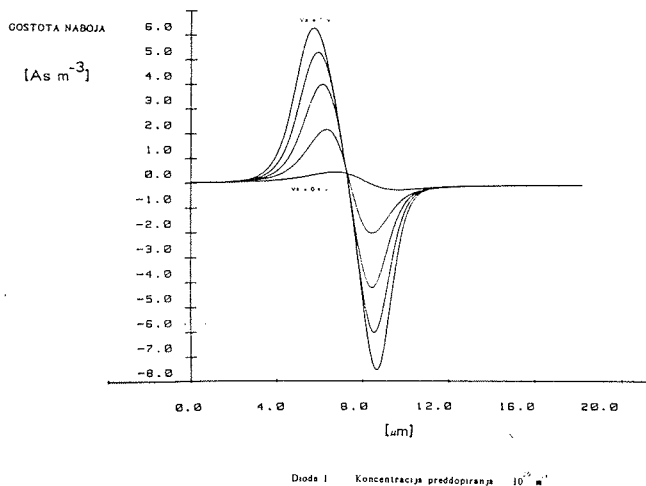
Slika 7



Slika 10

Ker so spremembe potenciala pri majhnih prevodnih napetostih omejene na bližino metalurškega p-n spoja je na slikah 8, 9 in 10 podana odvisnost električnega potenciala v okolici p-n spoja v povečanem merilu.

Mejna napetost je pri primeru 1 enaka 0,4 V, v primeru 2 je $U_m = 0,52$ V in v primeru 3 $U_m = 0,60$ V, kar kaže na dobro korelacijo med razliko Fermijevih nivojev v p-n spoju in mejno napetostjo.



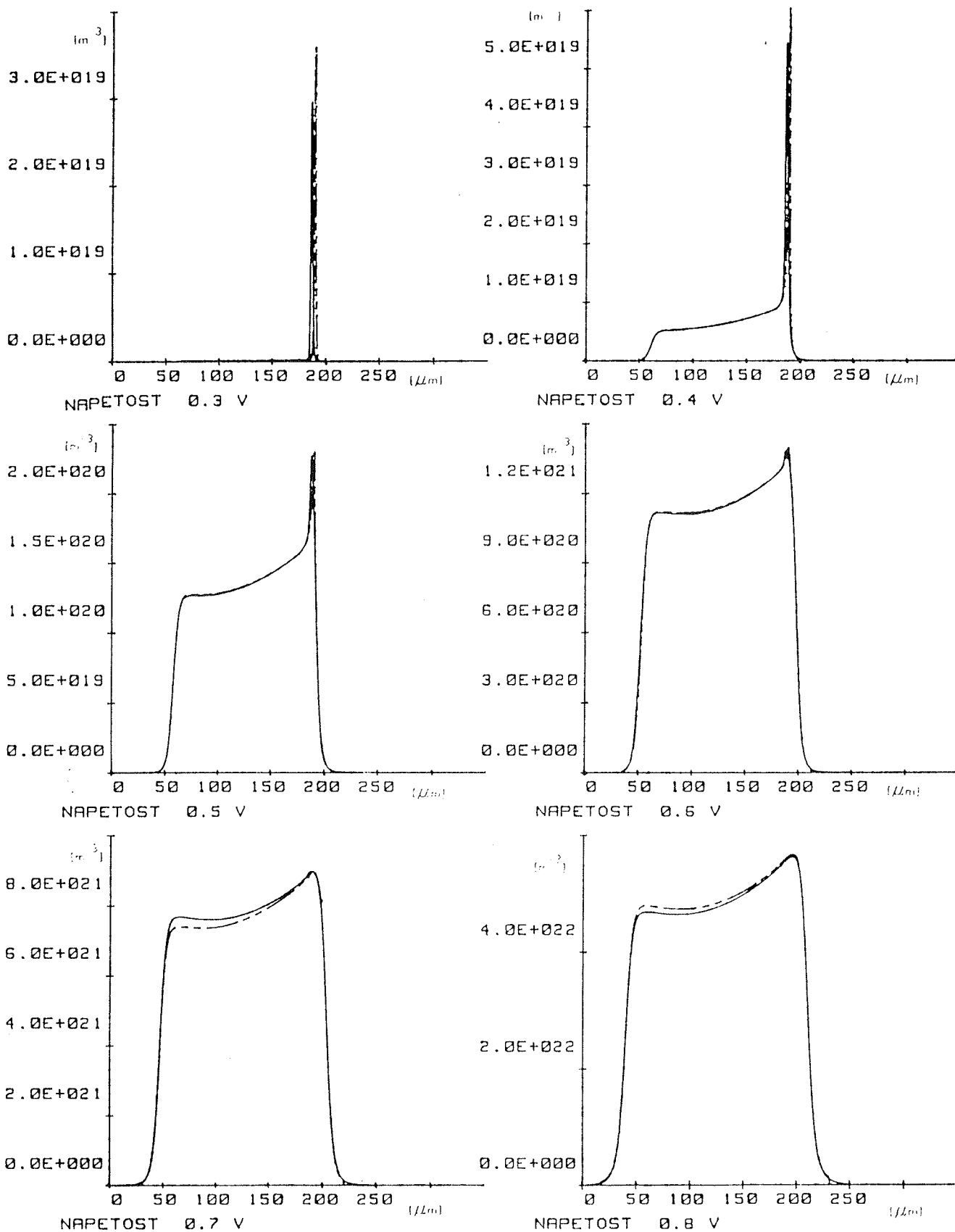
Slika 8

K električnem toku skozi diodo prispevajo pri prevodnih napetostih manjših kot U_m v glavnem rekombinacije elektronov in vrzeli v področju električnega polja na p-n stiku, pri višjih napetostih pa difundirajo manjšinski nosilci izven področja p-n spoja ter tako modulirajo električno prevodnost posebno v šibkeje dopirani bazi. Rekombinacije potekajo znotraj celotne baze, pri napetosti okoli 0,8 V pa začno potekati rekombinacije tudi v delih močno dopiranih p^+ in n^+ plasti.

Na slikah 14, 15 in 16 so prikazane porazdelitve gostote vbrzganih nosilcev za vse tri primere v odvisnosti od pritisnjene napetosti.

Porazdelitev gostot vbrizganih nosilcev

polna črta Δn , prekinjena črta Δp

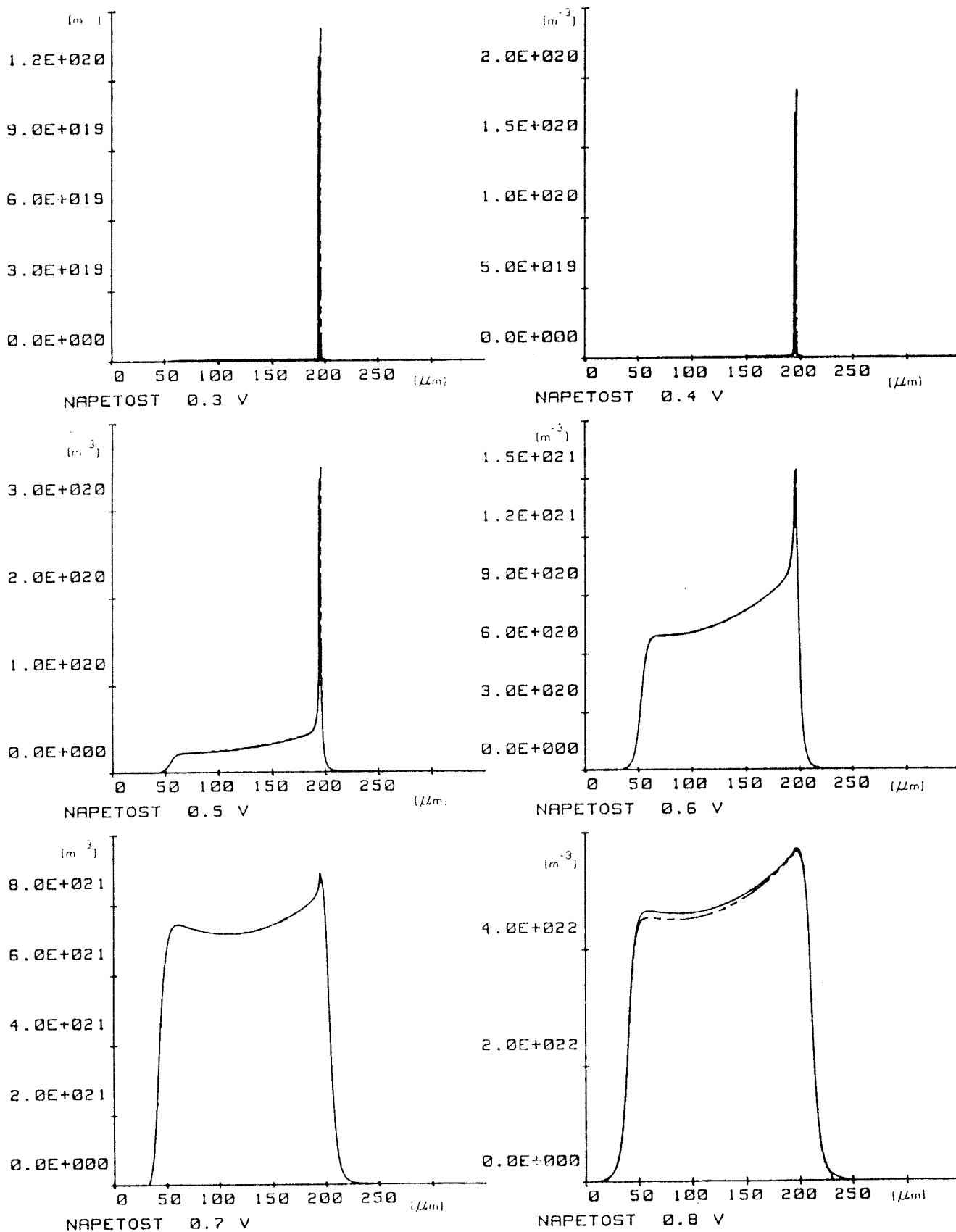


Dioda 1 Koncentracija preddopiranja $10^{20} m^{-3}$

Slika 14

Porazdelitev gostot vbrizganih nosilcev

polna črta Δn , prekinjena črta Δp

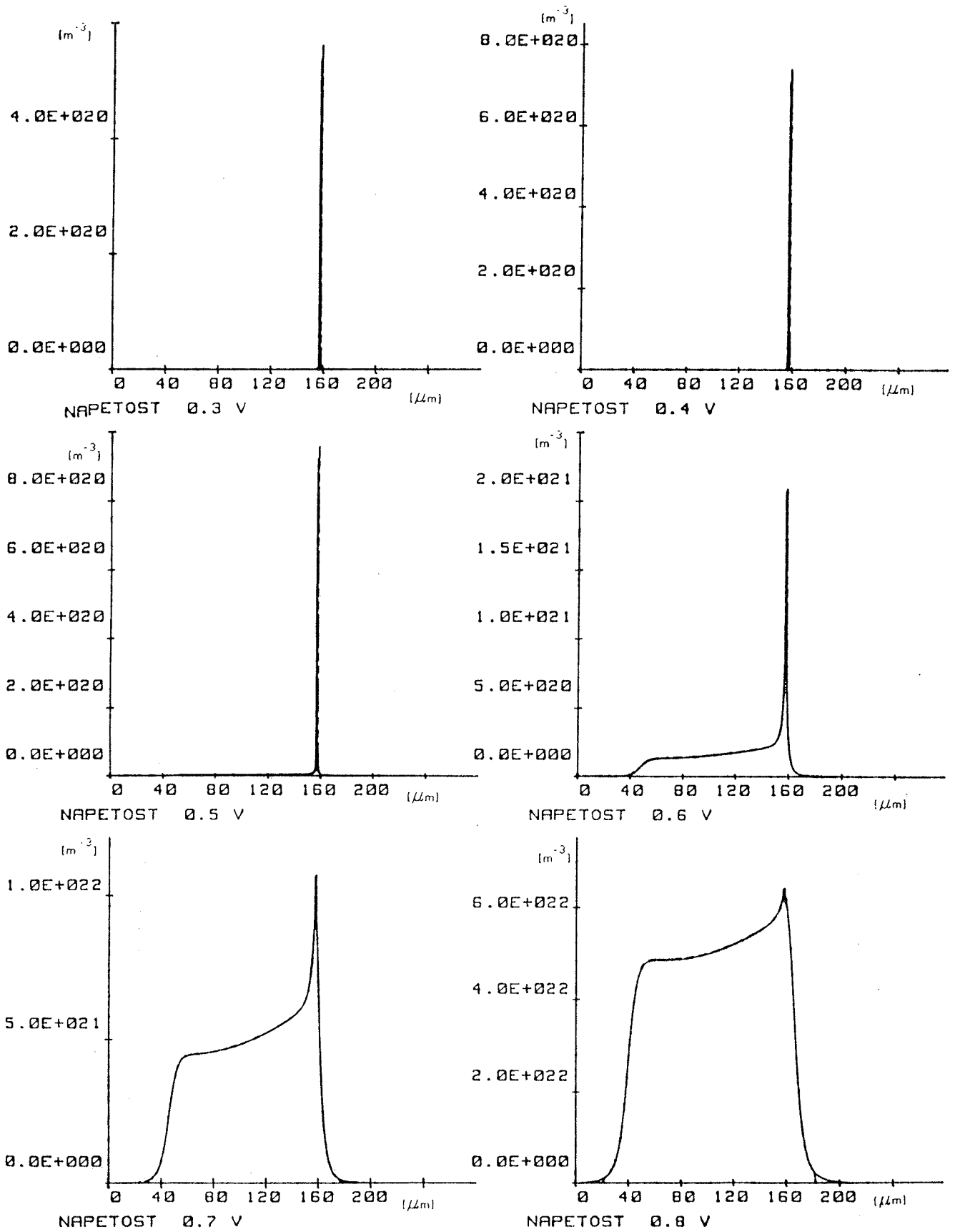


Dioda 2 Koncentracija predopiranja $10^{21} m^{-3}$

Slika 15

Porazdelitev gostot vbrizganih nosilcev

polna črta Δn , prekinjena črta Δp



Dioda 3 Koncentracija predopiranja 10^{22} m^{-3}

Slika 16

Gostoti tokov vrzeli in elektronov nista povsem simetrični zaradi različnih gibljivosti le-teh. Pri mejni napetosti je gostota električnega toka primera 1 enaka $j_1 = 10 \mu\text{A}/\text{mm}^2$, v primeru 2 je $j_2 = 100 \mu\text{A}/\text{mm}^2$ in primeru 3 je $j_3 = 300 \mu\text{A}/\text{mm}^2$.

Ujemanje modelnega izračuna z izmerjenimi vrednostmi je odlično za prevodne napetosti nad U_m . Pri nižjih napetostih se gostota električnega toka v vseh treh opisanih primerih približuje $100 \text{mA}/\text{mm}^2$ in postanejo razlike med modelom in eksperimentom velike. Pojasnimo si to lahko s prevajanjem električnega toka po površini diode, ki je določeno s tehnologijo obdelave in pasivacije odprtega p-n spoja ter neodvisno od detaljne strukture diode. Koncentracija manjšinskih nosilcev v bazi močno narašča s pritisnjeno napetostjo v prevodni smeri in doseže pri $U_f = 0,8 \text{ V}$ že red velikosti $10^{17}/\text{cm}^3$. Opisani model, ki ne upošteva Augerjevih rekombinacij, začne zato najprej slabše konvergirati pa tudi ujemanje z meritvijo je slabše. Pri $U_f > 1 \text{ V}$, ko so koncentracije vbrizganih nosilcev v bazi višje od $10^{18}/\text{cm}^3$ in začne prevladovati Augerjev rekombinacijski člen nad Shockley-Reed-Hallovim pa model celo divergira.

I (U) karakteristika v zaporni smeri

Višanje napetosti v zaporni smeri povzroči večanje električne poljske jakosti na p-n spoju in širjenje področja z močnim električnim poljem. Širi se predvsem v bazo, ki je šibkeje dopirana, saj mora biti količina naboja na n-strani enaka kot na p strani spoja, p-stran pa je močno dopirana. Električna poljska jakost narašča dokler ne doseže najvišje možne vrednosti, ki je določena z energijo nosilcev električnega toka, ki jo le-ta dobi s pospeševanjem med dvema trkoma in mora biti enaka ali večja od ionizacijske energije silicijevega atoma. Takrat se sproži plast nosilcev in tok v zaporni smeri trenutno močno naraste, kar imenujemo plazni preboj. Električna poljska jakost, ki je potrebna za preboj v siliciju je okrog $1 \cdot 10^5 \text{ V}/\text{cm}$ pri šibkeje dopiranih bazah in narašča z dopiranjem.

Za izračun prebojne napetosti p-n spoja se uporabljata dve analitični aproksimaciji za obliko porazdelitve dopanta v p^+ plasti.

a) Aproksimacija ostrega spoja

Prebojno napetost v odvisnosti od koncentracije dopiranja baze podaja empirična zveza $U_{BR} = 5,34 \cdot 10^{13} N^{0,75} \text{ V}$ (ref. 5)

Preddopiranje baze	prebojna napetost iz aproksimacije	prebojna napetost iz modela	izmerjena prebojna napetost
$1 \cdot 10^{14}/\text{cm}^3$	$U_{BR} = 1689 \text{ V}$	1500 V	1560 V
$1 \cdot 10^{15}/\text{cm}^3$	$U_{BR} = 300 \text{ V}$	255 V	260 V
$1 \cdot 10^{16}/\text{cm}^3$	$U_{BR} = 53,4 \text{ V}$	105 V	106 V

Iz tabele je razvidno, da velja aproksimacija ostrega spoja dobro še za dopiranje baze $1 \cdot 10^{15}/\text{cm}^3$, za dopiranje $1 \cdot 10^{16}/\text{cm}^3$ pa ne več.

b) Aproksimacija linearno nagnjenega spoja

Prebojno napetost v odvisnosti od nagiba profila dopanta podaja empirična zveza $U_{BR} = 9,17 \cdot 10^9 a^{0,4} \text{ V}$ (ref. 5) a - gradient koncentracije dopanta na p-n spoju.

Aproksimacija je smiselna le v primeru z dopiranjem baze $1 \cdot 10^{16}/\text{cm}^3$. Iz diagrama profila dopanta je ocenjen $a = 3,23 \cdot 10^{19}/\text{cm}^4$, iz tega izračunana prebojna napetost pa je $U_{BR} = 144 \text{ V}$. Prebojna napetost izračunana z modelom da $U_{BR} = 105 \text{ V}$, dejansko izmerjena prebojna napetost pa je 106 V.

Napetost preboja v silicijevih diodah lahko dobro opišemo pri bazni koncentraciji dopanta manjši kot $1 \cdot 10^{15}/\text{cm}^3$ z aproksimacijo ostrega spoja, pri baznih koncentracijah nad $1 \cdot 10^{16}/\text{cm}^3$ pa z aproksimacijo nagnjenega spoja. Točne vrednosti lahko dobimo le s pomočjo numeričnega modela.

Kapacitivnost v prevodni smeri

Kapacitivnost v prevodni smeri je pri majhnih napetostih konstantna in enaka kapacitivnosti pri $U=0$. Ko začne zaradi vsiljenega električnega toka elektroni in vrzeli preplavljati bazo pa kapacitivnost močno naraste, saj merimo kapacitivnost diode kot celote. Skladišče naboja postane baza, zato je kapacitivnost v tem delu močno odvisna od širine baza.

REFERENCE

1. W. Shockley, W. T. Read, Phys. Rev. volume 87. no. 5, (1952) 835-842
2. H. K. Gummel, IEEE Trans on Elec. devices, oct 10 (1964) 455-465
3. A. De Mari, Solid-State Electronics Vol. 11 1968 33-58
4. Diplomsko delo Miroslav Mićović (1989)
5. S. M. Sze, Physics of Semiconductor Devices (1981)
6. Properties of silicon: Inspect the institution of electrical engineers Emis data reviews series No. 4 (1988)
7. W. Shockley, Bell System Tech. J., 28, (1949) 435
8. M. Derdouri, P. Leturcq, A. Menoz-Yagüe, IEEE Trans. in Elec. devices, vol. ED-27, No. 11 (1980) 2097-2101

Miroslav Mićović, dipl. ing.
Laboratorio T.A.S.C.
Padricciano 99
Trieste, Italia
mag. Miran Kramberger, dipl. ing.
ISKRA Polprevodniki p.o.
Gabersko 12, 61420 Trbovlje

Prispelo: 05. 05. 1990 Sprejeto: 20. 05. 1990