

# I-V KARAKTERISTIKE Ag/n-Si(111) SCHOTTKY-JEVE BARIERE NANESENE PO METODI CURKA IONIZIRANIH SKUPKOV, CIS

Bruno Cvikl\*, Tomo Mrdjen, Matjaž Koželj in Miran Kramberger\*\*,

Institut "J. Stefan", Univerza v Ljubljani, Jamova 39, 61000 Ljubljana, Slovenija

\*Tehniška fakulteta, Univerza v Mariboru, Smetanova 17, 62000 Maribor, Slovenija

\*\* Iskra SEMICON, d.d., Gabrsko 12, 61320 Trbovlje, Slovenija

## I-V characteristics of the Ag/n-Si(111) Schottky barrier deposited by the ionized cluster beam method, IBC

### Abstract

An expression for the current density of tunneling electrons at the metal-semiconductor contact, i.e. in the reverse direction of an I-V Schottky diode characteristic has been derived. The derivation is based upon the assumption that the ionized donors charge density is a linear decreasing function of the distance from the semiconductor surface, the depth denoted by  $x_1$  whereafter remains constant throughout the depleted region. The parameter  $x_1$  is defined as an effective range of the ionized metal donors within the interior of the semiconductor and depends upon the particular metal deposition method. The results of the derivation offer the basis for the understanding the reverse current I-V characteristics of the Ag/n-Si(111) Schottky diodes deposited by the ionized cluster beam, IBC, deposition method.

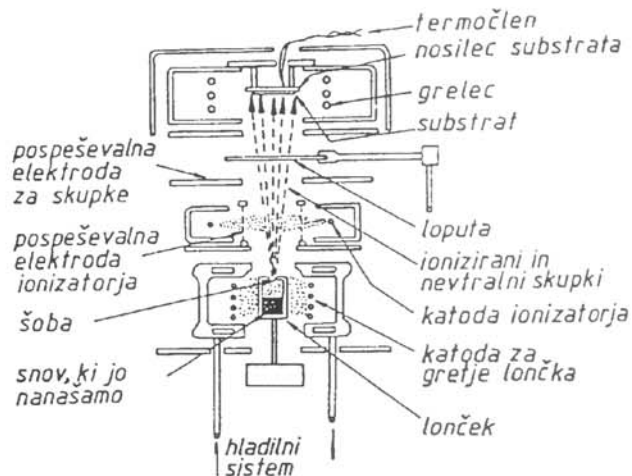
### Povzetek

Izpeljan je izraz za gostoto toka elektronov za primer tuneliranja elektronov ob stiku kovina/polprevodnik, to je v zaporni smeri I-V karakteristike Schottkyjevih diod. Izpeljava temelji na predpostavki, da pojava gostota negibljivih enkrat ioniziranih nosilcev naboja linearno do globine  $x_1$ , nakar je do konca osiromašenega področja konstantna. Parameter  $x_1$  je definiran kot efektivni doseg ionov kovine v notranjost polprevodnika in je odvisen od metode njenega nanašanja. Rezultati izračuna podajajo kvantitativno osnovo za razumevanje zaporne I-V karakteristike po metodi curka ioniziranih skupkov CIS nanesenih Ag/n-Si(111) Schottkyjevih diod.

## 1 UVOD

Dobro je poznano dejstvo [1,2], da je mogoče z metodo curka ioniziranih skupkov, CIS (slika 1), dobiti visokokvalitetne tanke plasti raznovrstnih snovi, kot so n.p.r.: kovine, polprevodniki, termo-električni materiali, dielektriki, magnetni materiali in celo nekatere organske spojine. Postopek nanašanja tankih plasti poteka za vse omenjene snovi enako in ga je moč strniti na naslednji način: adiabatna ekspanzija, skozi ustrezno šobo v talilnem lončku uparjene snovi v območje visokega ali ultravisokega vakuumu, vodi do nastanka skupkov taljenca, to je grozdov nekaj sto ali tisoč med seboj spojenih atomov ali molekul. Le-ti na poti na ustrezno izbrano podlago potujejo najprej skozi ionizator, kjer so podvrženi prhanju z elektroni. V odvisnosti od eksperimentalnih pogojev se do približno 35% skupkov ionizira in le-te je nato pred samim vpadom na podlago moč pospešiti v statičnem električnem polju ter tako vplivati na njihovo translacijsko kinetično energijo. Poudariti gre, da k rasti tanke plasti, to je pojavu, ki je sicer še neraziskan, prispevajo

tako ionizirani kot nevtralni skupki, pri čemer obstajajo indicacije, da h kvaliteti po tej metodi nanesenih tankih plasti odločilno doprinaša predvsem ionizacija samih skupkov. Raznovrstni pojavi, ki nastopijo ob trku skupkov s površino podlage, so opisani v [1/ in [3/]. Med slednjimi so posebej svojevrstni in za področje praktične uporabe zlasti zanimivi tisti pojavi, ki nastopijo na vmesni plasti tedaj, ko se z metodo CIS (v odvisnosti od eksperimentalnih parametrov - pospeševalne napetosti  $U_a$  in toka ionizacije skupkov  $I_a$ ) nanaša kovino na podlago izbranega polprevodnika. Tako dobljena sestava izkazuje večinoma usmereniške karakteristike in se imenuje Schottkyjeva dioda. Pod ustrezno eksperimentalno izbranimi pogoji nanaša lahko omenjeno usmereniško vedenje zamenja linearna tokovna I-V karakteristika, kar pomeni, da se sestava tokrat preobrazí v navadni (omski) upor. Pogoji nanosa in značilnosti izmerjenih odvisnosti tovrstnih I-V krivulj, slika 2, Ag/n-Si(111) Schottky-jevih diod, nanesenih po metodi CIS, so podrobneje opisani v [2/.

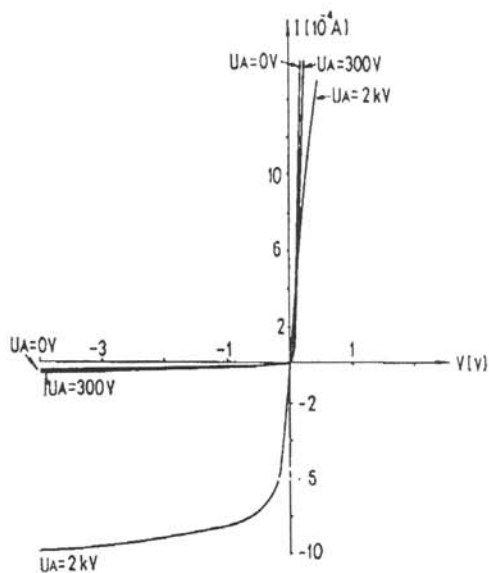


Slika 1. Shema vakuumskega sistema za nanašanje tankih plasti po metodi curka ioniziranih skupkov.

Pričujoči članek obravnava t.im. zaporno karakteristiko omenjenih diod za primer prve, v [2/ razdelane hipoteze, po kateri bi naj bila izrazita sprememba I-V v soodvisnosti (za različne vrednosti pospeševalne na-

petosti  $U_a$  ioniziranih skupkov), ki se predvsem odraža v njenem zapornem delu, posledica spremembe koncentracije Ag mikrodlecev v globino silicijeve rezine. V skladu s hipotezo predpostavimo tedaj, da je koncentracija Ag atomov funkcija njihovega povprečnega dosega ( $l_e$ -ta pa je odvisen od pospeševalne napetosti  $U_a$ ), ki ga je moč dovolj dobro oceniti s standardnimi izračuni /4/. Srebrovi ioni s Si ne tvorijo silicidne spojine in zato je mogoče pričakovati, da lahko zapletena porazdelitev nehomogene prostorske koncentracije  $Ag^+$  ionov v notranjosti Si rezine povzroči zožitve Schottkyjeve potencialne bariere in na takšen način vodi do povečane verjetnosti tuneliranja nosilcev nabojev (elektronov) skozi bariero.

V literaturi /5/ je poznano dejstvo, da se ionska implantacija dopantov Sb v rezino Si, pri čemer so dopanti umeščeni na določeni, od energije implantacije odvisni tanki planarni plasti, ki je vzporedna površini podlage, odraža v zožitvi (v zaporni smeri) Schottkyjeve potencialne bariere. Makroskopsko vzeto, se omenjeni pojav opiše kot navidezno zmanjšanje vrednosti višine bariere in to je bilo tudi eksperimentalno potrjeno /5/. Pri tem pojavu gre za nastanek močno povečane električne poljske gostote v tanki plasti implantiranih Sb donorjev pod površino Si, ki povzroči, da se Ni/n-Si (na površino Si nanosena tanka plast Ni) Schottkyjeva potencialna bariera z rastočo energijo implantacije (in torej z globino implantirane plasti Sb) zmanjšuje za največ približno 30% njene prvotne vrednosti.



Slika 2. Izmerjeni I-V diagrami Schottky-jevih diod Ag/n-Si(111) pri različnih vrednostih pospeševalne napetosti  $U_a$  ( 0V, 300 V, 2000 V)

V našem primeru gre pa za drugačne pojave. Poudariti gre, da tu ni mogoče govoriti o klasični implantaciji donorjev drugačne kemijske sestave v notranjost Si podlage, marveč se (domnevno) spremeni - v splošnem zelo zapletena - globinska porazdelitev Ag

ionov /1,3/, ki jo spremlja ustrezna sprememba odvisnosti vedenja I-V krivulj. Sestavi Ag/n-Si(111) Schottkyjeve diode kažejo zaporni tok, ki je funkcija pospeševalne napetosti  $U_p$ , Ag ionov, za katerega je značilno dvoje:

- a) nastanek pregiba (nezveznost odvoda toka v zaporni smeri I-V krivulje) in
- b) pregib se z rastočo pospeševalno napetostjo oddaljuje od koordinatnega izhodišča I-V diagrama - zaporni tok z rastočo napetostjo  $U_p$  narašča, slika 2.

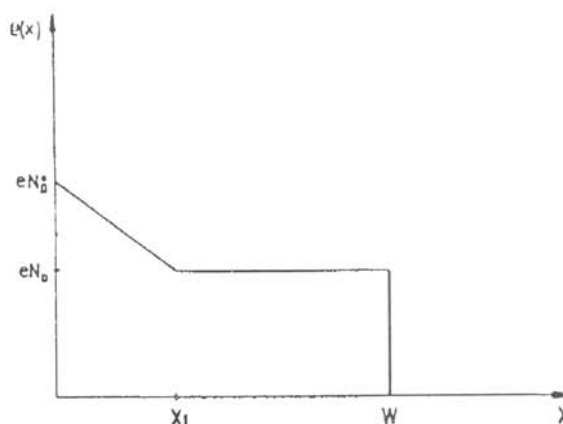
### 2 Ag/n-Si(111) SCHOTTKY-JEVA BARIERA PO METODI CIS

Augerjev spekter globinske sestave Ag/n-Si(111) Schottkyjeve diode za primer nanosa po metodi CIS, za vrednost  $U_a = 600$  V in pa I-V diagram za različne vrednosti parametra pospeševalne napetosti ioniziranih Ag skupkov, slika 2, so prikazani v /2/. Za razliko od zgoraj opisanega eksperimenta /5/, doseženega z implantacijo ustreznih donorjev (t.j. Sb atomov) v rezino Si, v danem primeru: a) neposredno dodatno dopiranje ne nastopa in b) nehomogena koncentracija Ag atomov se po globini Si rezine spreminja in je v največji meri odvisna od vrednosti pospeševalne napetosti  $U_a$ .

V prvem približku je mogoče predpostaviti, da pojema koncentracija Ag atomov v rezini Si linearno z oddaljenostjo od površine in je na dani oddaljenosti homogena po celi plasti, ki je vzporedna površini podlage. Naj  $N_d$  označuje koncentracijo donorjev fosforja v rezini Si,  $N_{so}$  koncentracijo Ag ionov na površini,  $N_n$  pa koncentracijo vseh donorjev, ki se nahajajo v notranjosti rezine. V skladu s predpostavko velja (sl. 3):

$$N_n = (N_d - N_{so})x/x_1 + N_{so} \quad 0 \leq x \leq x_1 \quad (1)$$

$$N_n = N_d \quad x_1 \leq x \leq w$$



Slika 3. Gostota donorjev v notranjosti polprevodnika, zajeta v modelnem izračunu zaporne karakteristike Ag/n-Si(111) Schottkyjevih diod, nanosenih po metodi curka ioniziranih skupkov, CIS.

pri čemer pomeni označba  $w$ , kot je to običajno /6/, širino z elektroni osiromašenega področja polprevodnika, to je območja, kjer se nahaja presežni pozitivni naboj zaradi prisotnosti negibljivih, v kristalno mrežo vpetih ioniziranih donorjev. V izrazu (1), pomeni  $x_1$  povprečni doseg Ag ionov v notranjost Si in je v največji meri odvisen od vrednosti pospeševalne napetosti ioniziranih skupkov  $U_a$ .

Gornji porazdelitvi presežnega naboja ustrezni vrednosti električnega potenciala  $V$  in odgovarjajoče električne poljske jakosti  $E$  se izračuna iz običajnega izraza  $\text{div } D = r(x)$ , ( $D = \epsilon_s E$ ,  $\epsilon_s = \epsilon \epsilon_0$  in  $r(x) = eN_n$ ), zapisanega v eni razsežnosti. Pogoji, ki jim morata zadostiti oba iskana izraza, so:

$$V(x) = \begin{cases} V_1(x) & 0 \leq x \leq x_1 \\ V_2(x) & x_1 \leq x \leq w \\ V_s & w \leq x \end{cases}$$

pri čemer je  $V_s$  (= konstanta) vrednost električnega potenciala v notranjosti polprevodnika, daleč od površine. Zahtevamo, da sta tako potencial kot električna poljska gostota (normalna komponenta) v točki  $x = x_1$  zvezna,

$$V_1(x_1) = V_2(x_1)$$

$$E_1(x < x_1) = E_2(x > x_1) \text{ za } x = x_1 \quad (2)$$

Potencial se tedaj lahko zapiše v obliki:

$$V_1(x) = -\frac{e(N_d - N_{so})}{2\epsilon_s} \left[ \frac{x^3}{3x_1} + x_1x - \frac{x_1^2}{3} \right] + \frac{eN_d}{\epsilon_s} \left( wx - \frac{w^2}{2} \right) - \frac{eN_{so}}{2\epsilon_s} x^2 \quad 0 \leq x \leq x_1$$

$$V_2(x) = -\frac{eN_d}{2\epsilon_s} (x - w)^2 \quad x_1 \leq x \leq w \quad (3)$$

V zgornjih izrazih je privzeto, da je pozitivni naboj ioniziranih donorjev različnih kemijskih sestavin enak  $e$ . Odgovarjajoča vrednost električne poljske jakosti je tedaj podana z izrazoma:

$$E_1(x) = \frac{e}{\epsilon_s} \left\{ (N_d - N_{so}) \left( \frac{x^2}{2x_1} + \frac{x_1}{2} \right) - (N_d w - N_{so} x) \right\} \quad x \leq x \leq x_1$$

$$E_2(x) = \frac{e}{\epsilon_s} N_d (x - w) \quad x_1 \leq x \leq w$$

Gostoto zapornega toka, to je površinsko gostoto elektronov, ki teče iz kovine v polprevodnik, se izračuna s pomočjo propustnostnega koeficienta  $\gamma$ , izpeljanega v okviru WKB približka za primer kvantnomehanskega tuneliranja nosilcev naboja skozi potencialno bariero /7/. Propustnostni koeficient  $\gamma$  se za primer tuneliranja iz kovine v polprevodnik zapiše:

$$\gamma = \frac{2\pi}{h} \int_0^{x_2} \left[ 2m_0 (W_p - E_k) \right]^{1/2} dx \quad (4)$$

in gostota toka delcev skozi bariero je tedaj podana z izrazom,

$$J = J_v e^{-2\gamma} \quad (5)$$

V gornjih izrazih pomenijo  $W_p$ ,  $E_k$  in  $J_v$  potencialno energijo elektronov, njihovo kinetično energijo ter gostoto vpadnega toka elektronov na mejo,  $m_0$  maso elektrona in  $h$  Planckovo konstanto.

Lahko je pokazati, da se enačba (5) prevede na izračun v odvisnosti od pogojev a)  $x_1 \leq x_2$  ali b)  $x_1 \leq x_2$  naslednjega izraza za zaporni tok (t.j. tok v smeri kovina-polprevodnik), če le privzamemo za vpadno gostoto toka elektronov Maxwellsko porazdelitev:

$$J = \frac{4\pi k T m^* e}{h^3} \int_0^{q_b} e^{-E'/kT} e^{-(32\pi m^* q/h^2)^{1/2}} I(E', U) dE' \quad (6)$$

pri čemer je  $k$  Boltzmanova konstanta,  $T$  absolutna temperatura,  $q_b$  višina Schottkyjeve bariere,  $m^*$  efektivna masa elektrona v smeri  $\langle 111 \rangle$  v siliciju in  $q$  naboj elektrona.

Funkcija  $I(E', U)$  je definirana z izrazom:

a)  $x_1 \leq x_2$  in  $0 \leq x \leq x_2$

$$I(E', U) = \int_0^{x_1} \sqrt{V_1(x) + V_2(x_2)} dx + \int_{x_1}^{x_2} \sqrt{V_2(x) + V_2(x_2)} dx \quad (7)$$

pri čemer je  $x_2$  rešitev izraza ( $x_2$  je definiran s pogojem  $E_c(x_2) = E'$  in  $E_c$  je energija prevodnega pasu polprevodnika (slika 4),

$$V_2(x_2) = \xi - U - E'/q \quad (8)$$

in je implicitno odvisna od vrednosti zaporne napetosti med kovino in polprevodnikom  $U$ .

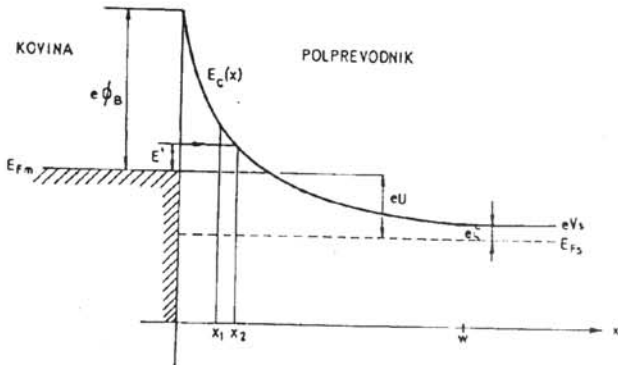
b)  $x_1 \leq x_2$  in  $0 \leq x \leq x_2$

$$I(E', U) = \int_0^{x_2} \sqrt{V_1(x) + V_1(x_2)} dx \quad (9)$$

toda sedaj je razdalja  $x_2$  (ki je prav tako funkcija zaporne napetosti  $U$ ) podana z rešitvijo izraza:

$$V_1(x_2) = \xi - U - E'/q \quad (10)$$

Integracija po energiji E poteka od Fermijevega nivoja v kovini, slika 4.



Slika 4. Shematska predstavitev energijskih razmer Schottky-jeve potencialne bariere,  $e\phi_B$ , nastale ob stiku kovina polprevodnik.  $E_c$  je energija spodnjega roba prevodnega pasu polprevodnika,  $x_1$  je povprečni doseg Ag ionov v notranjosti rezine Si,  $U$  je zaporna napetost,  $eV_s$  je potencialna energija elektronov daleč v notranjosti polprevodnika,  $w$  podaja širino z elektroni osiromašenega področja in  $E'$  je kinetična energija v Si tunelirajočih elektronov kovine.  $E_{Fm}$  in  $E_{Fs}$  sta Fermijevi energiji Ag in Si.

V gornjih izrazih je potrebno poznati širino z elektroni osiromašenega območja v polprevodniku  $w$ . S pomočjo slike 4 je moč v ta namen izraziti naslednjo povezavo:

$$q\phi_B = \frac{eqx_1}{6\epsilon_s} (N_{so} - N_d) + \frac{eqN_d}{2\epsilon_s} w^2 + q\xi - qU, \quad (11)$$

pri čemer je izraz  $\xi$  definiran z

$$\xi = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_c}{N_d}, \quad (12)$$

kjer je  $N_c$  efektivna gostota stanj v prevodnem pasu polprevodnika. Enačba (5) v povezavi z enačbo (10) je željeni izraz, ki podaja odvisnost gostote naboja srebrovih ionov  $N_{so}$  v polprevodniku na vrednost zapornega toka skozi Schottkyjevo diodo.

### 3 REZULTAT IN DISKUSIJA

Na sliki 2 predstavljene meritve I - V soodvisnosti za nekatere izmed po CIS metodi nanosenih diod kot funkcija pospeševalne napetosti skupkov,  $U_a \neq 0$ , kažejo značilno koleno v zaporni smeri. Jasno je razvidno, da postaja prelom tem bolj izrazit in odgovarjajoči zaporni tok tem večji, čim višja je pospeševalna napetost, to pa pomeni čim večji je povprečni doseg  $Ag^+$  ionov v polprevodniku. Izračunani povprečni

doseg podaja za nekatere vrednosti vpadne energije Ag ionov tabela 1. Doseg je izrednoten pod predpostavko, da Ag ioni vpadajo pravokoto na površino 3 nm debele planarne plasti  $SiO_2$ , ki se navadno stvori na rezini Si v prosti atmosferi tako, da lahko šele pri dovolj veliki vpadni energiji prodrejo v notranjost samega polprevodnika. Doseg v tabeli 1 podaja zgolj slednjo razdaljo.

Tabela 1

| Energija (eV) | 100 | 400 | 800 | 1000 | 2000 | 3000 |
|---------------|-----|-----|-----|------|------|------|
| Doseg (nm)    | 1.8 | 3.3 | 4.2 | 4.6  | 6.0  | 7.1  |

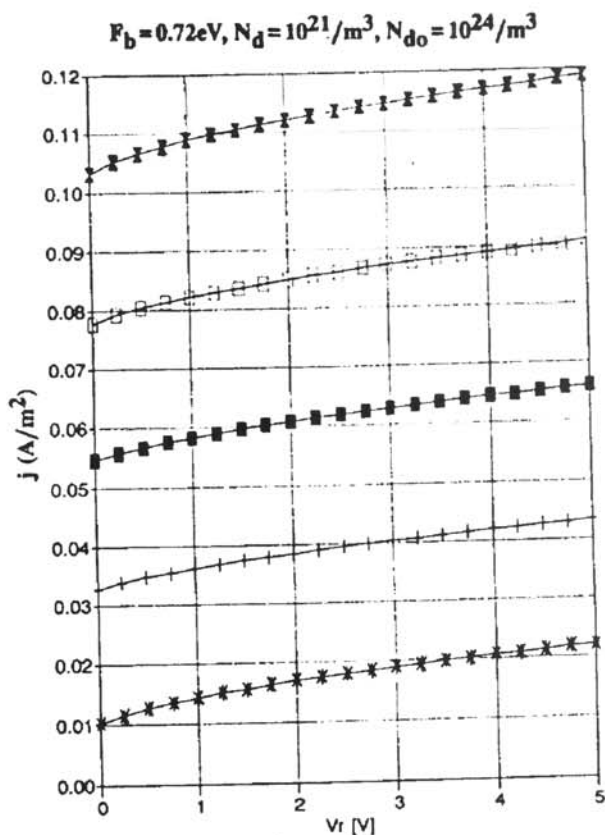
V izračunu, enačba (6), nastopa višina potencialne bariere  $\phi_B$ , ki je 0.72 eV. Poudariti gre, da v zgoraj prikazani izpeljavi ostaja višina bariere ves čas konstantna, kajti poudarek predloženega pristopa je v ugotavljanju tistega mehanizma, ki vpliva na nastanek preloma z odgovarjajočim povečanjem toka v zapornem delu I-V karakteristike. Le-ta pa bo po pričakovanju bolj ali manj neodvisen od majhne spremembe višine potencialne bariere, torej pojava, ki se hkrati z omenjenim odvija sočasno. Iz omenjenega razloga je v izpeljavi opuščena vpliv zmanjšanje bariere zaradi dodatnega potenciala slike (image potential) [5,6].

Iz enačbe (6) izračunana gostota zapornega toka  $J$  je podana na sliki 5. Vrednosti konstant, ki v izračunu nastopajo, so:  $\epsilon = 12$ ,  $N_d = 10^{21} m^{-3}$ ,  $N_{so} = 10^{24} m^{-3}$ , pri čemer je kot osnovni parameter  $x_1$  zavzel vrednosti 2 nm, 10 nm, 18 nm, 26 nm in 34 nm. Vpliv omenjenih vrednosti na velikost izrednotenega zapornega toka je očiten in kaže kvantitativno ujemanje z eksperimentom. Jasno je razviden skok v okolici zaporne napetosti  $V_r = 0$  in to pri vseh vrednostih parametra  $x_1$ , pri čemer pa je skok bistveno večji za večje razdalje, slika 5. Opisano vedenje I-V krivulj je v največji meri funkcija začetne (površinske) koncentracije ioniziranih atomov kovine,  $N_{so}$ , ki lahko prodrejo v notranjost polprevodnika. Toda, vrednost izračunane zapornega toka je za  $x_1 = 2$  nm praktično skoraj konstanta, neodvisna od koncentracije  $N_{so}$ , za večje vrednosti efektivnega dosega pa so razlike med krivuljami zelo majhne. Zaznavne razlike se pojavijo šele, ko doseže koncentracija  $N_{so}$  vrednost okoli  $10^{24}/m^{-3}$ , slika 5. Rezultati opisanih preliminarne izračunavanj kažejo, da t.im. poslabšanje eksperimentalnih I-V karakteristik v zaporni smeri verjetno niso posledica zgolj nehomogenosti električnega polja, nastalih na robovih kovine na stiku s polprevodnikom (kar v praksi rešujejo s t.im. varnostnimi kolobarji - guard rings), marveč so povezane tudi s koncentracijo gostote donorjev (za n-Si) med površino in ustrežno globino znotraj polprevodnika.

Na osnovi opisanih rezultatov modelnega izračuna zaporne I-V karakteristike Ag/n-Si(111) Schottky-jeve diode še ni mogoče ponuditi sklepa, da utegne pri določenih vrednostih parametrov gostote naboja, kot ga podaja  $x_1$ , postati zaporna karakteristika linearna. Kot je znano, izkazuje tedaj tovrstna sestava običajno

omsko upornost, katere vrednost je podana s strmino I-V karakteristike. Poudariti pa gre, da je v gornjem primeru, v nasprotju z razmišljanji podanimi v /5/, vpliv zmanjšanja efektivne potencialne bariere zanemarljiv in je torej limitni pojav omske upornosti v opisanem modelu prvenstveno prirejen ne toliko z zmanjševanjem same višine bariere, marveč z "degradacijo zaporne karakteristike", ki utegne biti odvisen, vsaj pri CIS metodi, od koncentracije nesilicidnih donorjev, kot je prikazano zgoraj.

Predstavljeni model zapornega toka skozi Schottkyjevo potencialno bariero, čeprav ustrezno popiše povečanje gostote toka s povečanim efektivnim dose-



Slika 5. Gostota toka skozi diodo v zaporni smeri v odvisnosti od zaporne napetosti za različne vrednosti parametra efektivnega dosega kovinskih donorjev v polprevodniku  $x_1$ . Koncentracija donorjev pod površino je  $N_{so} = 10^{24}/m^3$ .

gom donorjev kovine v polprevodniku, je nedodelan v smislu, da je strmina gostote zapornega toka v odvisnosti od napetosti pri vseh vrednostih  $x_1$  praktično konstantna, slika 5. Zdi se, da utegne vplivati na strmino predvsem ustrezna nehomogenost porazdelitve donorjev po notranjosti polprevodnika. Omejeni zapleteni pojav je potrebno preučiti posebej.

#### 4 SKLEP

Izpeljan je izraz za gostoto toka elektronov za primer tuneliranja nosilcev nabojev na stiku iz kovine v notranjost polprevodnika, to je v zaporni smeri I-V karakteristike Schottkyjeve diode. Izračun temelji na predpostavki, da gostota negibljivih ioniziranih donorjev pod površino polprevodnika linearno pojema do globine  $x_1$  in nato ostane konstantna vse do konca osiromašenega področja, katerega širina je definirana z razdaljo  $w$  od površine. Parameter  $x_1$  je v izračunu definiran kot efektivni doseg ionov kovine v notranjost polprevodnika, merjeno od vmesne plasti (interface) ob stiku, ta pa zavisi od metode njenega nanašanja na izbrano podlago. Numerično izvednotena karakteristika izkazuje pri vrednosti zaporne napetosti  $U = 0$  nezveznost, ki v največji meri je odvisna od efektivnega dosega in koncentracije ionov kovine na razdalji  $x_1$ .

Rezultati izračuna podajajo osnovo za razumevanje I-V karakteristik po metodi curka ioniziranih skupkov CIS, nanosenih Ag/n-Si(111) Schottkyjevih diod, kjer kot eksperimentalni parameter nastopa vrednost pospeševalne napetosti ioniziranih skupkov srebra.

#### 5 LITERATURA

- /1/ Toshinori Takagi, "Ionized-Cluster Beam Deposition and Epitaxy", Noyes Publications, ZDA, 1988, glej tudi T. Takagi, Vacuum, 36, (1986) 27
- /2/ B. Cvikl, Vakuumist 13, 18 (1993)
- /3/ H. Hsieh and R. S. Averback, Nucl. Inst. and Meth. in Phys. Research B59/60, (1991) 203, glej tudi Phys. Rev. B42, (1990) 5365
- /4/ J. A. Ziegler, J. P. Biersack, U. Littmark, The Stopping and Range of Ions in Solids, Pergamon Press, New York, 1985
- /5/ J. M. Shannon, Solid-State Electronics, 19, (1976) 537
- /6/ E. H. Rhoderick and R. H. Williams, Metal-Semiconductor Contacts, Clarendon Press, Oxford, 1988
- /7/ L. D. Landau and E. M. Lifshitz, Quantum Mechanics, Pergamon Press, 1958, stran 157