

SCHOTTKYJEVA BARIERA - MODERNI POGLEDI NA STAR PROBLEM II. del - TRANSPORT NABOJA SKOZI STIK KOVINA-POLPREVODNIK

Dean Korošak, Bruno Cvikl, Fakulteta za gradbeništvo, Univerza v Mariboru, Maribor in
Institut J. Stefan, Ljubljana

Schottky barrier -modern views on an old
problem (Part II)

ABSTRACT

In the second part of the paper the transport mechanisms of the metal-semiconductor contact are discussed. An overview of the basic transport mechanism contributing to the current density through the ideal Schottky structure is given. An existence of possible additional charge transport mechanism due to the presence of the disordered interfacial control layer in ICB deposited Schottky heterostructures is further discussed. The influence of such a transport mechanism on the current-voltage characteristic is described.

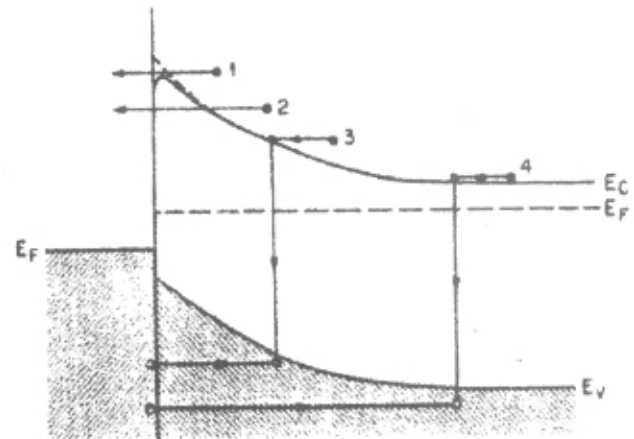
POVZETEK

V drugem delu prispevka opisujemo transportne lastnosti stika kovine in polprevodnika. V začetku je podan pregledni opis različnih mehanizmov prenosa naboja v idealni Schottkyjevi diodi. V nadaljevanju je opisan transport naboja v neidealnem stiku z vmesno kontrolno plastjo, ki nastane pri nanašanju z metodo CIS. Dodatni transport naboja v takšnih Schottkyjevih heterostrukturah lahko povzroči kontinuum elektronskih stanj, ki se pojavi na meji med neurejenim in urejenim delom polprevodnika. Opisan je vpliv takšnega transporta naboja na tokovno karakteristiko diode.

1 UVOD

Po opisu stika med kovino in polprevodnikom v termičnem ravnovesju v prvem delu prispevka [1], se v nadaljevanju ukvarjamo z opisom transporta naboja skozi stik, ko je priključen na zunanji izvir napetosti. S priključitvijo stika na zunanjo napetost se podre termično ravnovesje prevodniških elektronov in po zaključnem električnem krogu teče makroskopski tok. V primerjavi s p-n stikom je v stiku kovina-polprevodnik tok določen z večinskimi nosilci naboja za dani tip (n/p) polprevodnika (elektroni/vrzel). Ko stik kovine in polprevodnika kaže anizotropne električne lastnosti glede na smer toka, govorimo o Schottkyjevi diodi. Če pa je tokovna karakteristika (odvisnost toka od zunanje napetosti) v nekem območju zunanje napetosti linearna, je stik ohmski. Ohmski kontakt lahko nastane pri stiku kovine in polprevodnika, kjer je izstopno delo kovine manjše kot elektronska afiniteta polprevodnika ($\Phi_m < \chi_s$), tako da Fermijeva energija elektronov v kovini leži nad dnom prevodnega pasu v polprevodniku ali pa kjer je bariera dovolj ozka, da elektroni z lahkoto tunelirajo skozi njo.

Mehanizmi transporta naboja skozi idealni stik kovine in polprevodnika (v smislu definicije iz prvega dela prispevka [1]) so prikazani na sliki 1. Glavni mehanizmi transporta naboja v stiku kovine in polprevodnika so: prenos naboja čez vrh potencialne bariere, tuneliranje skozi bariero in rekombinacija v osiromašenem in nevtralnem področju polprevodnika. V idealnih stikih brez vmesne kontrolne plasti je pri višjih (sobnih) temperaturah najpomebnejši prenos naboja čez vrh bariere, pri nizkih temperaturah pa tuneliranje skozi bariero.



Slika 1: Mehanizmi transporta v idealnem stiku kovine in polprevodnika. Termoionska emisija in difuzija (1), termoionska poljska emisija in poljska emisija oz. tuneliranje skozi bariero (2), rekombinacija v depletiranem področju (3) in rekombinacija v nevtralnem področju (4). E_c je rob prevodnega pasu, E_v je rob valenčnega pasu, E_f je Fermijeva energija. Bariera je pri vrhu zaobljena zaradi vpliva zrcalnega potenciala elektrona. Po [2].

Gostoto toka naboja v Schottkyjevi diodi je mogoče zapisati s posplošeno obliko diodne karakteristike:

$$j = j_0 \left(\exp\left(\frac{eU}{\tilde{E}}\right) - 1 \right), \quad (1)$$

kjer je j_0 gostota toka v zaporni smeri ($U < 0$), ki je lahko odvisna tudi od zunanje napetosti, \tilde{E} pa je odvisen od posameznega mehanizma transporta. Skupna gostota toka je vsota vseh prispevkov različnih mehanizmov prenosa naboja.

2 TRANSPORT NABOJA V IDEALNEM STIKU KOVINE IN POLPREVODNIKA

Oblika bariere $E_c(z)$ na stiku kovine in polprevodnika je odvisna od porazdelitve prostorskega naboja v osiromašenem področju polprevodnika, če zanemarimo vpliv prostih nosilcev naboja in je rešitev Poissonove enačbe v depletiranem področju. Za konstantno gostoto naboja v depletiranem področju (kontinuumaska aproksimacija) $n(z) = N_D$ je bariera parabolične oblike:

$$E_c(z) = \Phi_b + \frac{e^2 N_D}{2\epsilon\epsilon_0} (z^2 - 2zw). \quad (2)$$

Tukaj je Φ_b višina bariere na meji med kovino in polprevodnikom, ϵ dielektrična konstanta polprevodnika,

$$w = \sqrt{2\epsilon\epsilon_0(\Phi_b - eU - \xi) / e^2 N_D},$$

pa je širina depletiranega področja, ki je odvisna od zunanje napetosti U in razlike med dnom prevodnega pasu in Fermijevo energijo polprevodnika daleč od meje s kovino ξ /2/. Do začetka osiromašenega področja poteka transport elektronov iz notranjosti polprevodnika zaradi prispevkov električnega polja in difuzije (drift-diffusion current). Za transport elektronov z energijo nad višino bariere, ki prehajajo mejo med kovino in polprevodnikom, pa je pomembno njihovo gibanje po depletiranem področju ob meji. Če ob tem doživljajo le malo trkov, lahko prehod skozi mejo opišemo s termično emisijo (podobno kot izhlapevanje elektronov iz kovine), v nasprotnem primeru pa z difuzijo skozi depletirano področje. Mehanizem prenosa naboja, ki se mu podreja večina elektronov, ki zadanejo ob bariero, določa razmerje med številom elektronov, ki jih zaustavi potencialna bariera, in številom elektronov, ki se zaustavijo s trki v barieri. Z drugimi besedami, primerjati je treba dolžino, na kateri se energija elektrona v barieri spremeni za kT s povprečno prosto potjo /3/. Povprečna prosta pot elektrona v siliciju je približno 7,6nm /2/, dolžina, na kateri se bariera spremeni za kT , pa je približno

$$d \approx L_{Di} \sqrt{N_i / N_D} \sqrt{kT / \Phi_b},$$

kjer je L_{Di} intrinzična Debyejeva dolžina (24 μm za silicij), N_i pa intrinzična gostota elektronov. Ob gostoti donorskih primesi $N_D = 10^{18} \text{cm}^{-3}$ je $d \approx 0,6 \text{ nm}$, kar je približno desetina povprečne proste poti elektrona. V tem primeru je glavni mehanizem prenosa naboja termična emisija, kjer je gostota toka /4/:

$$j = A * T^2 \exp(-\Phi_b / kT) [\exp(eU / kT) - 1]. \quad (3)$$

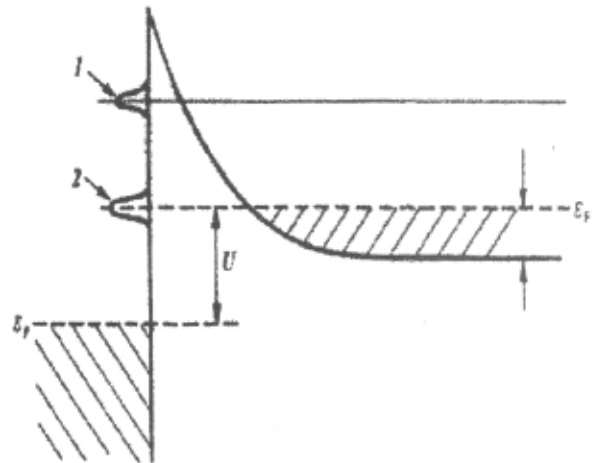
A^* je modificirana Richardsonova konstanta z efektivno maso elektrona v polprevodniku. V primeru, ko je glavni način prenosa elektronov čez bariero difuzija, je gostota toka /4/:

$$j = \frac{eN_c D_e}{w} \int_0^w \exp(E_c / kT) dz \quad (4)$$

N_c je efektivna gostota stanj elektronov v polprevodniku, D_e pa difuzijska konstanta. Tok v zaporni smeri je pri difuziji odvisen od oblike dna prevodnega pasu in tako tudi od zunanje napetosti ter ne doseže nasičenja.

Z nižanjem temperature se zmanjšuje tudi gostota prevodniških elektronov v prevodnem pasu in s tem tudi delež termične emisije oziroma difuzije v skupni gostoti toka. Pri nižanih temperaturah lahko postane v skupnem toku pomemben delež tunelskega toka, ki ga tvorijo elektroni, ki tunelirajo skozi potencialno bariero (2 na sliki 1), vendar le v degeneriranih polprevod-

nikih s Fermijevo energijo nad dnom prevodnega pasu (slika 2) /5/.



Slika 2: Termična poljska emisija (1) in poljska emisija (2) na stiku kovine in degeneriranega polprevodnika /5/

Velika koncentracija donorskih primesi pri degeneriranih polprevodnikih povzroči zraven povečanja gostote elektronov v prevodnem pasu tudi ožjo bariero in tako poveča prepustnost za tuneliranje. Pri zelo nizkih temperaturah večina elektronov tunelira pri Fermijevi energiji s poljsko emisijo (2, slika 2), pri zvišanih temperaturah pa elektronom pomaga termično vzbujevanje proti vrhu bariere pri termični poljski emisiji (1, slika 2). Za dovolj velike vrednosti zunanje napetosti ($eU > 3kT$) imata tudi poljska emisija in termična poljska emisija obliko (1):

$$j = j_{0,fe} \exp(eU / E_{00}) \quad (5)$$

$$j = j_{0,tf} \exp(eU / E_0)$$

kjer je E_{00} parameter pri poljski emisiji, odvisen samo od snovnih konstant polprevodnika, temperaturna odvisnost termične poljske emisije pa se pokaže skozi zvezo med E_{00} in E_0 : $E_0 = E_{00} \coth(E_{00}/kT)$. Zaporna tokova sta pri obeh mehanizmih transporta funkciji višine bariere, parametra E_{00} in zunanje napetosti.

Prispevek drugih mehanizmov transporta naboja v vsoti posameznih tokov k prevladujoči termični emisiji se navadno opiše z empiričnim parametrom idealnosti n , tako da je gostota toka /4/:

$$j = j_0 \exp(eU / nkT) [1 - \exp(-eU / kT)] \quad (6)$$

kjer je j_0 zaporni tok pri termični emisiji. K povečanju faktorja idealnosti nad 1 prispevajo difuzija, rekombinacija, termična poljska emisija in puščanje diode pri robovih. Analiza merjenih karakteristik na osnovi zgornjega izraza za gostoto toka (6) je mogoča le, ko ni prispevka poljske emisije oziroma dokler za elektrone na stiku med kovino in polprevodnikom dobro velja Boltzmannova statistika. Vpliv drugih mehanizmov

transporta ob termični emisiji, se pokaže kot odvisnost nasičenja (t.j. tok za dovolj velike vrednosti zaporne napetosti) oziroma višine bariere od zunanje napetosti. V linearnem približku je zveza med spremembo višine bariere in faktorjem idealnosti naslednja:

$$n^{-1} = 1 - \frac{\partial \Phi_b}{e \partial U} \quad (7)$$

Lastnosti stika med kovino in polprevodnikom se navadno analizira z empiričnim izrazom (6) ob upoštevanju vpliva serijskega upora nevtralnega dela polprevodnika R_s na tokovno karakteristiko. Za dovolj velike vrednosti zunanje napetosti velja:

$$j = A * T^2 \exp(-\Phi_b / kT) \exp[e(U - IR_s) / nkT]. \quad (8)$$

Pri določanju in interpretaciji lastnosti stika na osnovi gornjega izraza je potrebna velika previdnost. Pogosto dobro geometrično ujemanje izmerjene in izračunane tokovne karakteristike še ne pomeni, da lahko »apriori« sklepano na primarni mehanizem transporta na stiku brez podrobne fizikalne slike. Še posebej to velja pri neidealnih stikih, narejenih z metodami, ki lahko posegajo v samo strukturo kovine in polprevodnika.

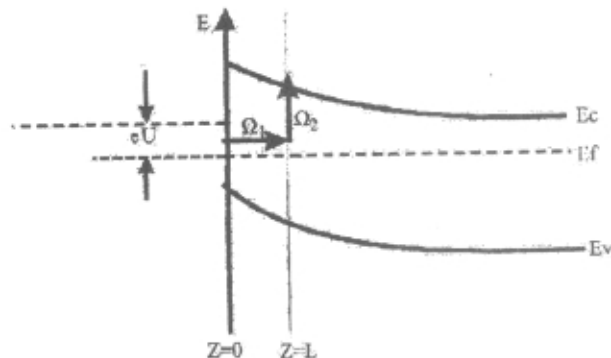
3 TRANSPORT NABOJA V SCHOTTKYJEVIH STRUKTURAH, IZDELANIH PO METODI CIS

Bistvena lastnost Schottkyjevih struktur, izdelanih s curkom ioniziranih skupkov atomov (CIS), je nastanek tanke (nekaj mrežnih razdalj v siliciju) neurejene plasti DICL (disordered interfacial control layer), katere lastnosti so določene s kovinskimi atomi, vgrajenimi v kristalno mrežo polprevodnika, in s kontinuumom lokaliziranih stanj v energijski reži DIGS (disorder induced gap states) na meji med DICL in urejenim delom polprevodnika /6/. Navzočnost DICL lahko močno vpliva tako na potencialno bariero v termičnem ravnovesju z vpetjem Fermijevega nivoja /1/, kot na transportne lastnosti. Vpliv DICL na tokovno karakteristiko CIS-Schottkyjevih struktur je dvojen:

- zaradi spremenjenega prostorskega naboja v DICL glede na idealno osiromašeno področje polprevodnika se spremeni oblika dna prevodnega pasu, kar vpliva na difuzijo po osiromašenem področju in termično emisijo čez bariero
- lokalizirana stanja v energijski reži polprevodnika omogočajo tuneliranje elektronov tudi pri energijah pod robom prevodnega pasu.

V modelu neidealnega stika kovine in polprevodnika je na meji kovina/DICL kontinuum elektronskih stanj v energijski reži MIGS, ki ga povzročajo repi v polprevodnik eksponentno padajočih valovnih funkcij elektronov in na meji DICL/urejen polprevodnik kontinuum lokaliziranih elektronskih stanj DIGS v razdalji L od meje s kovino. Transport elektronov se lahko odvije v dveh korakih. Ob negativni (zaporni) zunanji napetosti elektron z energijo E v prvem koraku elastično tunelira iz zasedenega MIGS-stanja v prosto DIGS-stanje, nakar se v drugem koraku termično vzbudi do dna prevod-

nega pasu, kjer postane prevodniški elektron. Opisani mehanizem je prikazan na sliki 3.



Slika 3: Transport naboja skozi energijsko režo polprevodnika v neidealnem kontaktu kovine in polprevodnika z neurejeno vmesno kontrolno plastjo

Celotni hamiltonijan stika kovine in polprevodnika lahko zapišemo kot vsoto posameznih prispevkov, ki opišejo kovino, urejeni polprevodnik in sklopitveno vmesno plast:

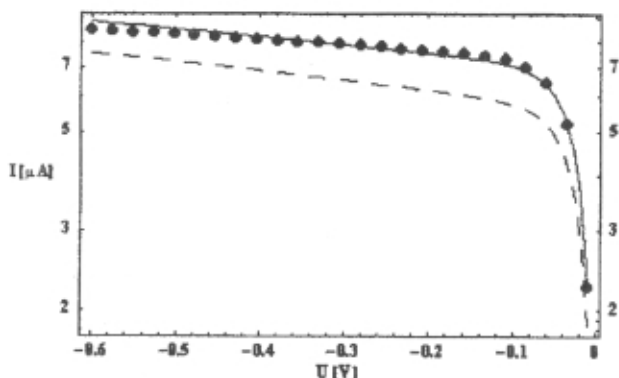
$$\hat{H} = \hat{H}_{\text{kovina}} + \hat{H}_{\text{polprevodnik}} + \hat{H}_{\text{DICL}} \quad (9)$$

Tuneliranje elektrona skozi vmesno plast je odvisno od gostote stanj na levi, gostote stanj na desni, zasedenosti obeh stanj, matričnega elementa sklopitvenega dela hamiltonijana in energije elektrona /7,8/. Podobno je prehod iz zasedenega DIGS-stanja odvisen od gostote stanj, energijske razlike med dnom prevodnega pasu in stanjem DIGS ter temperature. Tuneliranje zaradi DICL najbolj opazno vpliva na zaporni del tokovne karakteristike, ki je za takšen neidealni kontakt vsota gostot tokov zaradi idealne termične emisije (t.j. $n=1$), tuneliranja in puščanja, ki ga opišemo z ohmskim uporom R_I .

Vpliv tunelskega toka (slika 4) je bil izračunan ob naslednjih poenostavitvah:

- matrični element sklopitvenega dela hamiltonijana je konstanten
- lokalizirana elektronska stanja eksponentno padajo s konstatnim valovnim vektorjem q
- gostota stanj MIGS in DIGS je konstanta v energijski reži z enako lokalno Fermijevo energijo E_{HO} .

Polna črta pomeni gornjo vsoto prispevkov posameznih mehanizmov transporta k skupni gostoti toka, črtkana črta pa delno vsoto idealne termične emisije in toka zaradi puščanja stika. Parametri pri izračunu tunelskega toka so bili: višina bariere 0,7 eV (za stik Ag/n-Si), Fermijeve energije lokaliziranih stanj $E_{HO}=0,5$ eV, matrični element $H_{\text{DICL}}=0,1$ eV, širina DICL $L=2,5$ nm, valovni vektor lokaliziranih stanj $q=5$ nm⁻¹, gostota stanj MIGS in DIGS 10^{12} eV⁻¹ cm⁻², $R_s=20,2$ Ω, $R_I=3 \cdot 10^5$ Ω. Točke so izmerjene vrednosti stika Ag/n-Si(100), izdelanega po metodi CIS s pospeševalno napetostjo 600 V.



Slika 4: Vpliv tunelskega toka zaradi DICL na tokovno karakteristiko neidealnega stika kovine in polprevodnika. Črtna črta je idealna termična emisija in tok zaradi puščanja stika, polna črta pa vsota idealne termične emisije, tuneliranja in puščanja. Polne pike so izmerjene vrednosti za kontakt Ag/n-Si(100) pri 600 V pospeševalne napetosti kovinskih atomov.

4 SKLEP

Opisani so najpomembnejši mehanizmi transporta naboja na stiku kovine in polprevodnika. V idealnem stiku je pri polprevodnikih z veliko mobilnostjo najpomembnejša termična emisija nosilcev čez bariero pri zvišanih temperaturah. Prispevek drugih mehanizmov je navadno podan v obliki empiričnega parametra, faktorja idealnosti, ki opisuje odmik od idealne termične emisije.

V neidealnih Schottkyjevih strukturah, izdelanih po metodi curka ioniziranih skupkov atomov, je mogoč tudi transport elektronov zaradi vmesne neurejene kontrolne plasti s kontinuumom lokaliziranih elektronskih stanj na meji med vmesno plastjo in urejenim delom polprevodnika. Takšen tunelski tok pri energijah v energijski reži polprevodnika je odvisen od gostote lokaliziranih stanj in širine vmesne plasti ter matričnega elementa hamiltonijana, ki opisuje sklopitev kovine in polprevodnika preko vmesne neurejene plasti. Navkljub grobim poenostavitvam lahko takšen prispevek k skupni gostoti toka skozi stik dobro opiše posebnosti tokovne karakteristike stika kovina-polprevodnik, izdelanega po metodi curka ioniziranih skupkov atomov.

5 LITERATURA

- /1/ D. Korošak, B. Cviki, Vakuumist, 18, 1998, 17.
- /2/ S. M. Sze, Physics of Semiconductor Devices 2nd ed., John Wiley and Sons, 1981
- /3/ H. A. Bethe, Mass. Inst. Technol. Radiat. Lab. Rep. 43, 1942, 12
- /4/ E. H. Rhoderick, R. H. Williams, Metal-Semiconductor Contacts 2nd ed., Clarendon Press, 1988
- /5/ F. A. Padovani, R. Stratton, Solid State Electron. 9, 1966, 695
- /6/ B. Cviki, D. Korošak and Zs. J. Horvath, Vacuum 50, 1998, 385
- /7/ J. Bardeen, Phys. Rev. Lett. 6, 1961, 57
- /8/ W. A. Harrison, Phys. Rev. 123, 1961, 85

VABILO

Strokovna ekskurzija v Saturnus

Društvo za vakuumsko tehniko Slovenije (DVTs) obvešča svoje člane, da organiziramo

v četrtek 17. decembra ob 11. uri

ogled nove proizvodne hale v tovarni Saturnus-Avtooprema d.d. v Ljubljani.

Sodelavci Saturnusa nam bodo pokazali nove vakuumske naprave za proizvodnjo reflektorjev za avtomobilске žaromete (naparjevalnik META, napravo za plazemsko čiščenje in aktivacijo plastičnih reflektorjev). Ogledu bo sledilo predavanje dr. Mirana Mozetiča o pomenu plazme in plazemskih tehnologij v sodobni industrijski proizvodnji. Po predavanju bo še kratek občni zbor Društva za vakuumsko tehniko Slovenije.

Vse, ki se želite udeležiti ekskurzije, prosimo, da to sporočite Janezu Novaku ali Lidiji Belič z Inštituta za elektroniko in vakuumsko tehniko (tel. 177 66 00).

Sicer pa se ob napovedani uri dobimo pred vhomom v tovarno Saturnus na Letališki 17.

A.P.