

DIJAGNOSTIKA ŠOTKIJEVOG BARIJERNOG KONTAKTA POMOĆU MERENJA NISKOFREKVENTNOG ŠUMA

Jovan M. Hadži-Vuković, Milan M. Jevtić, *Institut za fiziku, Beograd,*

Sadržaj – U radu su izloženi eksperimentalni rezultati i analiza niskofrekventnog šuma degradiranih inverzno polarisanih Al/n-Si dioda sa šotkijevim barijernim kontaktonm. Predložen je model za dijagnostiku barijernog šotkijevog kontakta na osnovu merenja šuma. Nadjeno je da izlaganja kontakta slučajnim uključeno-isključeno električnim preopterećenjima pri direktnoj i inverznoj polarizaciji dovodi do degradacije usled nastanka defekata u oblasti kontakta u toku naprežanja velikom gustinom struje.

1. UVOD

Šotkijevi barijerni kontakti (ŠBK) su prisutni kako u diskretnim, tako i u integrisanim kolima (IK). Tipičan primer naprave sa ŠBK je Šotkijeva dioda. Sa smanjenjem dimenzija elemenata IK, zahtevi za što kvalitetnijim ŠBK su još oštriji. Sa stanovišta veličine površine ŠBK, danas su dominantna dva suprotna pravca: povećanje površine prema zahtevima snažnih IK i smanjenje površine prema zahtevima podmikronske i nanotehnologije. U oba slučaja pitanje pouzdanosti ŠBK je značajno i aktuelno.

U okviru studije pouzdanosti elektronskih naprava sastavni deo procesa utvrđivanja pouzdanosti, naročito za potrebe povratnog dejstva na usavršavanje projektovanja i tehnologije, je dijagnostika degradiranih naprava. U toku naših istraživanja ponašanja ŠBK u diskretnim napravama i IK zapažen je oblik degradacije koji se manifestuje promenom inverzne strujno-naponske karakteristike. Takvi degradirani ŠBK su izvor povećanog niskofrekventnog (NF) šuma.

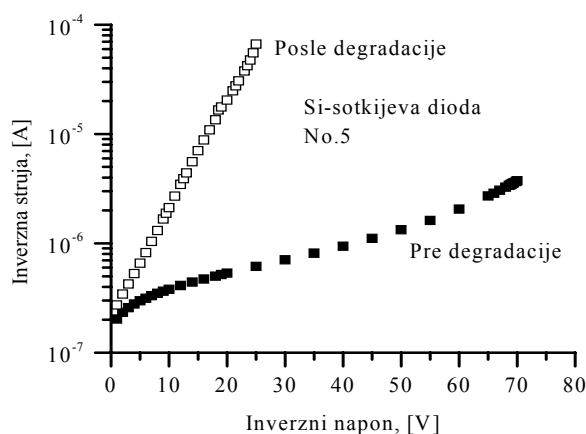
Šum se danas sve više koristi kao sredstvo za ocenu kvaliteta i predviđanje pouzdanosti elektronskih komponenata [1], tako da se već govori o šumnoj spektroskopiji kao metodi za dijagnostiku defekata u elektronskim napravama [2]. Pri tome se, u cilju potpunije analize, vrše i merenja zavisnosti šuma od temperature [3], ili se uporedo sa merenjem šuma posmatra i neka dodatna električna karakteristika naprave, kao na primer, strujno-naponska karakteristika [4].

Malo je radova posvećeno dijagnostici defekata u ŠK pomoću šuma. To je uglavnom radjeno koristeći analizu šuma u vremenskom domenu. Nadjeno je da je postojanje RTS šuma u direktno polarisanoj Šotkijevoj diodi u korelaciji sa povećanjem struje i nižim probojnim naponom [5]. Pomoću merenja parametara RTS šuma utrdjeno je prisustvo centara sa dubokim energetskim nivoima [5], [6]. Predmet ovog rada je dijagnostika degradirane Al/n-Si Šotkijeve diode pomoću merenja spektralne gustine struje šuma sa ciljem da se odgonentne mehanizam degradacije i oceni mogućnost da se ova vrsta testa upotrebi za "otkrivanje" skrivenih nesavršenosti. Te skrivene nesavršenosti u ŠBK često su praćene smanjenjem visine barijere. U odeljku 2 rada dati su rezultati merenja inverzne I-V karakteristike i spektra šuma, a u odeljku 3 definisan je model za

dijagnostiku i dati su rezultati analize, a na kraju su izloženi zaključci.

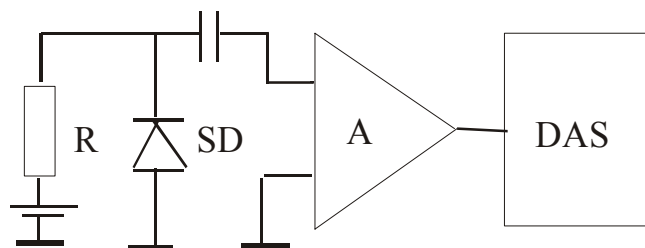
2. EKSPERIMENTALNI REZULTATI

Kao test uzorci upotrebljene su Al/n-Si Šotkijeve diode sa probojnim naponima oko 70V i napona praga u direktnu oko 0,2V. Izlagane su slučajnim uključeno/isključeno električnim preopterećenjima naizmenično pri inverznoj i direktnoj polarizaciji. Simulirano je stanje slučajnih preopterećenja pri uključivanju/isključivanju napajanja uređaja. Jedna od karakterističnih degradacija inverzne I-V karakteristike pri ovoj vrsti električnih naprežanja prikazana je na sl.1.



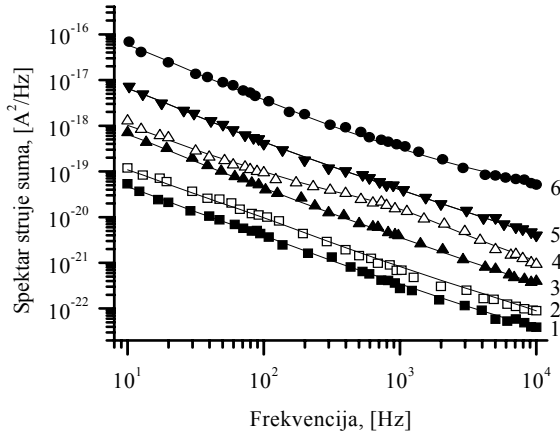
Sl.1 Inverzna I-V karakteristika pre i posle degradacije Si Šotkijeve diode

Primetan je porast inverzne struje, dok je registrovan pad probojnog napona na 35V. Inverzna struja u idealnoj ŠK strukturi je opisana termoionskom emisijom sa efektom polja, pri čemu efekat električnog polja doprinosi njenoj zavisnosti od napona. U neidealnoj strukturi, zbog prisutva tankog površinskog oksidnog sloja i defekata u kontaktu i na periferiji mogu biti prisutni i drugi mehanizmi provodjenja struje, tunelovanje i cureće struje, što doprinosi odstupanju I-V karakteristike od idealne. Pri višim strujama mora se voditi računa o rednoj otpornosti diode.



Sl.2 Šema sistema za merenje spektra šuma (A - niskošumni pojačavač, DAS - dinamički analizator signala, SD - Šotkijeva dioda, R - metaloslojni otpornik)

Da bismo došli do dodatnih informacija o degradaciji merili smo spektar šuma u frekvijskom opsegu 10Hz do 10kHz sa mernim sistemom čija je šeme data na sl.2. Pre degradacije diode nisu pokazivale 1/f šum iznad nivoa šuma mernog sistema. Posle degradacije registrovan je niskofrekventni šum. On je prikazan na sl.3.



Sl.3 Spektralna gustina struje šuma za različite vrednosti inverzne struje degradirane Šotkijeve diode: 1 – 3,1 μ A, 2 – 5,31 μ A, 3 – 8,91 μ A, 4 – 13,71 μ A, 5 - 261 μ A, 6 - 621 μ A (simboli – eksperimentalni rezultati, puna linija – fitovane krive)

Pored očekivanog porasta spektra šuma sa porastom inverzne struje primećuje se da spektar ne odgovara idealnom 1/f šumu, što je posebno vidljivo, na primer, u slučaju inverzne struje 13,7 μ A. Ovakav izgled spektra šuma ukazuje na prisutvo i drugih izvora NF šuma: g-r i/ili RTS šuma. Treba napomenuti da je izbor merenje šuma pri inverznoj polarizaciji učinjen posebno zbog toga da bi bili u prilici da analiziramo defekte u Si uz medjupovršinu. Dobijeni rezultati nameću pitanja: šta je izvor ovakvog šuma i da li je, i ako jeste, kako je povezan sa I-V karakteristikom?

3. DIJAGNOSTIKA DEGRADIRANOG ŠBK

Da bismo iskoristili rezultate merenja šuma za dijagnostiku degradiranog ŠBK neophodno je uočiti koji su mogući izvori šuma u njemu, posebno oni koji su povezani sa defektima. Hsu [7] je pretpostavio da su izvori prekomernog šuma u Šotkijevoj diodi fluktuacije zahvata elektrona klopama u oblasti osiromašenja, posebno na periferiji kontakta. Kasnije [8], [9] je korišćena ista ideja, s tim što se smatralo da su za šum odgovorni duboki g-r centri u oblasti osiromašenja. Slično je pokušano [5] da se RTS šum u Šotkijevoj kontaktu objasni modulacijom transporta nosilaca fluktuacijama zahvata elektrona klopom ili slučajnim prekidanjem lokalne strujne putanje u okolini defekta.

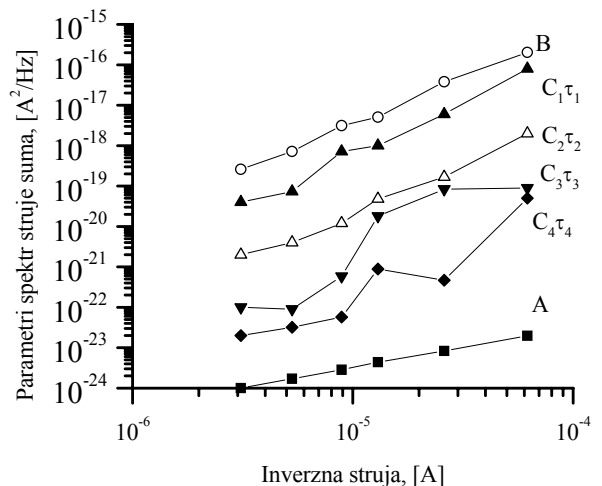
Formiranje dobrog ŠBK zavisi od stanja poršine poluprovodnika pre nanošenja metalnog sloja. Postojanje tankog sloja oksida i "hrapava" površina su, na primer, neke neregularnosti površine. Pokazalo se [10] da prisutni "šiljci" na hrapavoj površini mogu biti mesta degradacije kontakta. Otvoreno je pitanje da li se mogu takvi šiljci otkriti pomoću merenja šuma pre ili posle degradacije.

Naši eksperimentalni rezultati za degradirane ŠBK mogu se rezimirati na sledeći način: (a) ŠBK ne pokazuje pre degradacije značajan 1/f šum u merenom opsegu frekvencija od 10Hz do 10kHz; (b) 1/f šum nakon degradacije je intenzivan; (c) prisutno je odstupanje od idealnog 1/f spektra (uočava se prisustvo izvora šuma sa lorencovim spektrom); (d) degradirana je inverzna I-V karakteristika (porast struje) (e) degradiran je probojni napon (smanjen). Ono što nas posebno interesuje je da li se na osnovu rezultata za šum može nešto više reći o prirodi degradacije?

U traženju odgovora prvo ćemo, koristeći se algoritmom šumne spektroskopije [2], [11], oceniti parametre A , B , γ , C_j i τ_j spektra struje šuma predstavljenog empirijskom relacijom

$$S_i(f) = A + \frac{B}{f^\gamma} + \sum_j \frac{C_j \tau_j}{1 + \omega^2 \tau_j^2}, \quad (1)$$

u kojoj prvi član na desnoj strani predstavlja beli šum, drugi – 1/f šum i suma – šumove sa lorencovim oblikom spektra. Relacija (1) predpostavlja da su ovi izvori različitog šuma medjusobno nezavisni. Navedeni parametri se dobijaju postupkom fitovanja eksperimentalnih rezultata za spektar šuma na sl.3 i teorijske krive prema relaciji (1). Fitovane krive su predstavljene punom linijom na sl.3, a tako dobijeni parametri spektra šuma prikazani su na sl.4. Parametar A odgovara sačmiskom šumu. Pored 1/f šuma sa $\gamma = 1$ i parametrom B , nadjena su četiri izvora šuma sa lorencovim oblikom spektra čije su karakteristične frekvencije: $f_1 = 9\text{Hz}$, $f_2 = 90\text{Hz}$, $f_3 = 900\text{Hz}$ - kriva 1 na sl.3 (850Hz - krive 2 i 3, 950Hz - krive 4, 5 i 6), $f_4 = 9\text{kHz}$ - krive 1 do 5 na sl.3 (11kHz - kriva 6). Vremenski parametri τ_j su povezani sa karakterističnim frekvencijama relacijom: $\tau_j = (2\pi f_j)^{-1}$, $j = 1,2,3,4$.

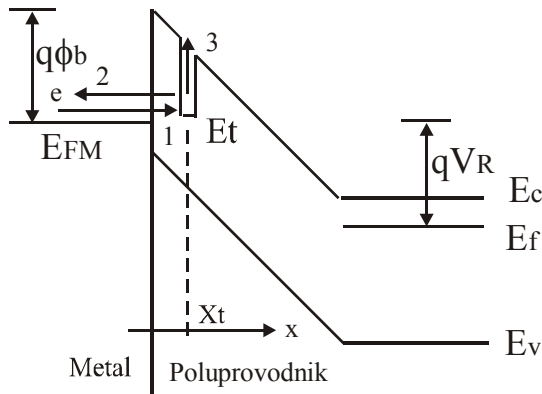


Sl.4 Parametri spektra šuma dobijeni fitovanjem eksperimentalnih rezultata na sl.3 i empirijske relacije (1)

Fitovanjem parametara šuma strujnom zavisnošću oblika I^b nadjeno je da je $B \propto I^{2,27}$ i $C_j \tau_j \propto I^{(2,35+2,76)}$. Odstupanje od I^2 zavisnosti upućuje na zaključak da su

izvori šuma fluktuacije zahvata nosilaca klopka u oblasti prostornog osiromašenja uz medjupovršinu metal-poluprovodnik, pri čemu broj klopki koje učestvuju u procesu se menja sa promenom inverznog napona, koji u našem slučaju se menja između -10 i -25V.

S obzirom da je niskofrekventni šum pre degradacije bio nizak, šum nakon degradacije je isključivo povezan sa defektima nastalim u toku degradacije i to u blizini medjupovršine. Za objašnjenje ovih rezultata predložimo sledeći model degradacije ŠBK. Pošto su uzorci bili izlagani strujnom (direktna polarizacija) i naponskom (inverzna polarizacija) naprezanju, rezultati sugerišu da je degradacija rezultat strujnog naprezanja. Naime, stalno prisutan problem kod ŠBK velike površine je neuniformnost visine barijere (VB), odnosno postojanja lokalnih smanjenja VB. Ukoliko je neuniformnost značajna ona dovodi do smanjenja efektivne visine barijere. Ova mesta snižene VB predstavljaju skrivene defekte – nesavršenosti, nazvaćemo ih "barijerne nesavršenosti". One su potencijalna mesta degradacije, jer lokalno sniženje barijere povlači za sobom veću lokalnu gustinu struje. Zbog toga, realno je da će pri strujnom naprezanju ova mesta biti izložena većim gustinama struje. Poznat je, iz proučavanja elektromigracije, efekat rastvaranja Si u Al [12]. Pri direktnoj polarizaciji šotkijevog Al/n-Si kontakta elektroni se kreću iz Si prema Al. Velika gustina struje kroz barijerne nesavršenosti može dovesti do elektromigracije medjupovršinskih atoma Si u Al. To je još više podstaknuto lokalnim zagrevanjem usled velike lokalne gustine struje. Ovaj proces dovodi do rastvaranja Si u Al formirajući tanak sloj neke vrste smeše Al i Si, formalno predstavljene kao $Al_{1-x}Si_x$, koja dovodi do dodatne deformacije barijere uz medjupovršinu, tako da je prisutno tunelovanje (povećana inverzna struja i smanjen probojni napon), i pojave defekata uz medjupovršinu intenzivirajući niskofrekventni šum. Koliko je nama poznato iz literature, ovaj model degradacije ŠBK nije do sada razmatran.



Sl.5 Uprošćeni energetska dijagram inverzno polarisanog ŠBK sa klopkom energetskeg nivoa E_t

Na sl.5 dat je uprošćeni energetska dijagram ŠBK u kojem je prikazana klopka energetskeg nivoa E_t sa naznačenim procesima zahvata iz metala (proces – 1) i otpuštanja elektrona nazad u metal (proces – 2) ili u provodnu zonu (proces – 3), pri čemu prelaz sa klopke u provodnu zonu tunelovanjem je malo verovatno zbog velike širine barijere na tu stranu u slučaju naših uzoraka. Fluktuacija ovih procesa dovodi do fluktuacije naelektrisanja u oblasti prostornog naelektrisanja, odnosno do fluktuacije

električnog polja. Usled fluktuacija električnog polja nastaju fluktuacije visine barijere koje dovode do fluktuacija inverzne struje.

Nadjene karakteristične frekvencije lorencovih spektara šuma daju vremenske parametre fluktuacionih procesa: $\tau_1 = 17,7ms$, $\tau_2 = 1,77ms$, $\tau_3 = 0,177ms$ - kriva 1 na sl.3 (0,187ms - krive 2 i 3; 0,168ms -), $\tau_4 = 17,7\mu s$ - krive 1 do 5 na sl.3 (14,5 μs – kriva 6). Prema sl.5, vremenski parametar procesa 1 i 2 određen je tunelskim vremenskim parametrom $\tau_{tun} = \tau_{tun0} \exp(ax_t)$, dok je vremenski parametar procesa 3 zavisen od energije aktivacije procesa, odnosno dubine potencijalne jame klopke ΔE_t , tj. $\tau_{act} = \tau_{act0} \exp(\Delta E_t / kT)$. Predeksponencijalni faktori τ_{tun0} i τ_{act0} su povezani sa vibracijama rešetke i reda su 10^{-10} s. Veličina a je zavisna od visine barijere Φ_b : $a = (32\pi^2 m q \Phi_b / h^2)^{1/2}$, a energija aktivacije ΔE_t od položaja osnovnog nivoa klopke u odnosu na fermijev nivo E_{FM} u metalu. Kako se dno provodne zone u odnosu na položaj fermijevog nivoa u metalu može predstaviti relacijom:

$$E_{CFM} = q(\Phi_{b0} - V_n + V_R) \left(1 - \frac{x_t}{w_{opn}}\right)^2 + qV_n - qV_R, \quad (2)$$

to je $\Delta E_t = E_{CFM} - (E_t - E_{FM})$. U izrazu (2) pojedine veličine imaju sledeća značenja: $V_n = (E_C - E_f) / q$,

w_{opn} - širina oblasti prostornog naelektrisanja, V_R - apsolutna vrednost inverznog napona. Ako bi fluktuacioni proces bio zavisen od vremenskog parametra tunelovanja, onda navedenom opsegu vremena odgovara približno oblast položaja defekata uz površinu na rastojanju: x_t od 1,26 do 1,51nm. S druga strane, fluktuacioni proces kontrolisan termičkom aktivacijom trebalo bi da ima energije aktivacije, za isti opseg vremenskog parametra procesa, ΔE_t od 0,31 do 0,5eV. Za položaj klopki x_t od 0 do 1,51nm, položaj dna provodne zone u odnosu na fermijev nivo u metalu, prema relaciji (2), ima vrednosti: $E_{CFM}(0V)$ od 0,7 do 0,652eV; $E_{CFM}(-10V)$ od 0,7 do 0,508eV i $E_{CFM}(-25V)$ od 0,7 do 0,402eV (druge cifre odgovaraju položaju defekta $x_t = 1,5nm$). Strujama pri kojima je meren šum odgovara opseg napona polarizacije od -10 do -25V. U oceni ovih parametara uzeta je koncentracija donora u Si: $N_D = 5 \cdot 10^{17} cm^{-3}$ određeno pomoću C-V merenja, a zanemareno je prisustvo medjupovršinskih stanja. Ako se ima u vidu da će najveći doprinos fluktuacijama dati klopke sa energetskim nivoima u blizini fermijevog nivoa u metalu, onda dobijeni podaci ukazuju da pri višim naponima polarizacije učešće procesa 3 u fluktuacionom procesu se povećava, tako da se vreme emisije elektrona sa klopke skraćuje i povećava broj klopki koje učestvuju u procesu. Time se može objasniti odstupanje spektra struje šuma od I^2 zavisnosti, s jedne strane, i intenziviranje lorencovih spektara sa višim karakterističnim frekvencijama, s druge strane.

Prisustvo barijernih nesavršenosti se ne može lako identifikovati na osnovu samo I-V karakteristike ŠBK. Mogu

se naslutiti u povećanoj vrednosti inverzne struje, s obzirom da nesavršenosti mogu biti uzrok smanjenja efektivne visine barijere. Očigledno je da se moraju na neki drugi način "otkriti". Naša ispitivanja degradiranih ŠBK ukazuju da je strujnim naprezanjem ŠBK moguće te barijerne nesavršenosti degradirati tako da se one vidljivo odražavaju na strujno naponske i šumne karakteristike. S obzirom da broj nesavršenosti po površini ŠBK se menja od uzorka do uzorka, onda je povoljnije uzorke opterećivati iz naponskog izvora nego iz strujnog, kako bi lokalna gustina struje bila u korelaciji sa stepenom lokalne nesavršenosti kontakta.

Sa stanovišta primene šumne spektroskopije potrebno je primetiti određena ograničenja uslovljena veličinom površine ŠBK. Sa povećanjem površine ŠBK povećava se "radna" zapremina kontakta (medjupovršina i oblast prostornog naelektrisanja) što smanjuje nivo fundamentalnog $1/f$ šuma (obrnuto proporcionalan zapremini), pa je merenje ograničeno šumom mernog sistema. To ukazuje na potrebu da se na neki način prethodno nesavršenosti "isprovociraju" da bi bile jasno vidljive. Isto tako, posmatrajući jednu barijernu nesavršenost kao fluktuator koji se karakteriše lorencovim oblikom spektra, sa povećanjem površine ŠBK povećava se broj nesavršenosti i raste verovatnoća da one budu energetski ravnomerno raspodeljene vodeći do $1/f$ šuma sa $\gamma = 1$. Tada će nivo $1/f$ šuma biti direktno proporcionalan broju nesavršenosti.

Sa smanjenjem površine ŠBK smanjuje se radna zapremina kontakta i raste nivo fundamentalnog $1/f$ šuma. Istovremeno se smanjuje ukupni broj nesavršenosti, čije će se prisustvo manifestovati šumom sa lorencovim spektrom. Ovo navodi na zaključak da se kod ŠBK male površine mogu bez dodatnih napreznja otkriti skrivene barijerne nesavršenosti pomoću merenja šuma.

4. ZAKLJUČAK

Izloženi su rezultati analize degradiranih ŠBK u toku uključeno/isključeno naponskih napreznja pri direktnoj i inverznoj polarizaciji. Na osnovu merenja niskofrekventnog šuma i koristeći postupak šumne spektroskopije nadjeno je da su kao rezultat degradacije nastali defekti u blizini medjupovršine metal-poluprovodnik. Predložen je model degradacije koji je povezan sa barijernim nesavršenostima prisutnim u uzorcima pre testa i velikim lokalnim gustinama struje u toku testa pri direktnoj polarizaciji, a koje dovode do rastvaranja atoma Si u Al i formiranja defekata uz medjupovršinu. Na osnovu analize vremenskih parametara dobijenih na osnovu strujne zavisnosti spektra struje šuma nadjeno je da se pomenuti defekti prostiru do 1,5nm od medjupovršine i da pri većim naponima inverzne polarizacije učešće u fluktuacijama uzimaju i prelazi klopka-provodna zona.

Zahvalnica – Ovaj rad je delimično finansiralo Ministarstvo za nauku i životnu sredinu Republike Srbije.

LITERATURA

- [1] M.M. Jevtić, "Noise as a diagnostic and prediction tool in reliability physics", *Microelectron.Reliab.*, vol.35, pp.455-477, 1995.
- [2] M.M. Jevtić, "Šumna spektroskopija fotodetektora i optoizolatora", *Elektrotehnika*, God.52(6), str.1-10, 2003.
- [3] M.E. Levinshtein and S.L. Rumyantsev, "Noise spectroscopy of local levels in semiconductors", *Semicond. Sci. Technol.*, Vol.9, pp.1183-1189, 1994.
- [4] M.M. Jevtić and M.V. Lazović, "Self consistent fitting for defect analysis by low-frequency noise measurements in reverse biased p-n junctions", *Solid-State Electronics*, Vol.41, pp.1127-1131, 1997.
- [5] A.S. Royet, T. Ouisse, T. Billon, C. Jausaud and B. Cabon, "Electrical noise as a tool for assaying the defectivity of SiC Schottky diodes", *Mater.Sci.Engin.B*, Vol.62, pp.402-405, 1999.
- [6] N. Sghaier, A. Suifi, J.M. Bluet and G. Guillot, "Correlation between direct characteristic deficiencies and deep levels in 6H-SiC Schottky diodes", *Mater. Sci. Engin. C*, Vol.21, pp. 283-286, 2002.
- [7] S.T. Hsu, "Low frequency excess noise in metal-silicon Schottky barrier diodes", *IEEE Trans. Electr. Dev.*, Vol.17, pp.496-506, 1970.
- [8] W. Dabrovski and K. Korbel, "Excess generation-recombination noise in reverse biased Schottky diodes", *Solid-State Electron.*, Vol.31, pp.1657-1661, 1988.
- [9] F.V. Farmakis, J. Brini, N. Mathien, G. Kamariuos, C.A. Dimitriadis and S. Logothatidis, "Low frequency noise in Schottky barrier contacts of titanium nitride on n-type silicon", *Semicond. Sci. Technol.*, Vol.13, pp.1284-1289, 1998.
- [10] H.Y. Lee and C.T. Lee, "Investigation of degradation mechanism of Schottky diodes", *Solid-State Electron.*, Vol.47, pp.831-834, 2003.
- [11] Milan M. Jevtić, "Šumna spektroskopija elektronskih komponentata – ocena parametara spektralne gustine niskofrekventnog šuma", *Elektrotehnika*, God.53(5), str.9-19, 2004.
- [12] S. Vaidya, "Electromigration in aluminium/poly-silicon composites", *Appl. Phys. Lett.*, Vol.39, pp.990-902, 1981

Abstract – Experimental results and analysis of low frequency noise in reverse biased degraded Al/n-Si Schottky contacts are presented. A model for diagnostic of barrier contact by noise measurements is proposed. It is found that on/off electrical stress under conditions of direct and reverse bias leads to the contact degradation due to defects near interface generating during large current density stress.

DIAGNOSTIC OF SCHOTTKY BARRIER CONTACT BY LOW-FREQUENCY NOISE MEASUREMENTS

Jovan M. Hadži-Vuković, Milan M. Jevtić