



**Prikazivanje radova za savetovanja i simpozijume
format 21x29,7cm/A4 prema SRPS ISO 353 (za štampu)**

ODREĐIVANJE TEMPERATURSKE ZAVISNOSTI KARAKTERISTIKA SOLARNIH ĆELIJA MERENJIMA FREKVENTNOG ŠUMA I FAKTORA IDEALNOSTI

ALEKSANDRA VASIĆ*

MAŠINSKI FAKULTET U BEOGRADU, BEOGRAD, SRBIJA

KORALJKA KOVAČEVIĆ-MARKOV

**ELEKTROPRIVREDA REPUBLIKE SRPSKE, TREBINJE, REPUBLIKA SRPSKA,
BIH**

MILOŠ ZDRAVKOVIĆ, MILOŠ VUJISIĆ, EDIN DOLIĆANIN

ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET U BEOGRADU, BEOGRAD, SRBIJA

Kratak sadržaj — Prilikom procesa detekcije zračenja uticaj temperature i termički indukovani šum u fotodetektorima su veoma značajni. Degradacija električnih i optičkih karakteristika fotodetektora pri povišenim temperaturama su jedan od glavnih ograničavajućih faktora za njihovu upotrebu. S obzirom na to da većina električnih procesa u poluprovodničkim uređajima u manjoj ili većoj meri zavisi od temperature, istraživanja na temperaturama višim od sobne mogu da otkriju moguće promene izlaznih karakteristika uređaja. Sa tehnološkog stanovišta, termički izazvan šum povećava minimalni signal koji može da se detektuje, što je posebno značajno za nisko energetske detektore i detektore nejonizujućeg zračenja. U ovom radu je uticaj povišene temperature proučavan preko merenja frekventno zavisnog šuma i osnovnih izlaznih karakteristika solarnih ćelija.

Ključne reči — Temperaturska zavisnost - $1/f$ šum - Solarne ćelije - Faktor idealnosti.

1 UVOD

Intenzivna minijaturizacija poluprovodničkih uređaja baziranih na poluprovodničkim spojevima povećava značaj temperaturskih efekata i termički izazvanog šuma u takvim uređajima. Silicijumske solarne ćelije pripadaju širokoj grupi poluprovodničkih detektora iako su specifičnog dizajna (veće od većine detektora), pa ih to, zajedno sa činjenicom da su direktno izložene sunčevom zračenju čini posebno osetljivim na uticaj visoke temperature. Za više temperature termički šum je dominantan i u velikoj meri utiče na detekciju signala i izlazne karakteristike. I drugi tipovi šuma, posebno frekventno zavisni generaciono-

* Kraljice Marije 16, 11120 Beograd, Srbija; avasic@mas.bg.ac.rs

rekombinacioni šum, praskavi šum i $1/f$ šum takođe rastu sa povišenjem temperature [1]. S obzirom na to da povišena temperatura utiče na sve delove poluprovodničkog uređaja, kontaktna mreža je takođe podložna izvesnim promenama, posebno uzimajući u obzir činjenicu da se smatra da su površinski efekti glavni izvor $1/f$ šuma. Kada su u pitanju solarne ćelije, to je posebno izraženo zbog njihovog velikog odnosa površina/zapremina, pa materijal za izradu kontaktne mreže treba pažljivo da se bira.

Silicidi pripadaju grupi materijala niske otpornosti i dobre temperaturske stabilnosti, te se često koriste za proizvodnju pouzdanih kontakata [2,3]. Smatra se [4-8] da je uzrok ovog tipa šuma fluktuacija broja slobodnih nosilaca naelektrisanja usled interakcije nosilaca sa postojećim defektima, površinskim stanjima i nečistoćama. Ovi efekti su više izraženi kada je uređaj izložen višim temperaturama, s obzirom na to da u takvim uslovima defekti, površinska stanja i nečistoće koji predstavljaju zamke za nosioce naelektrisanja mogu dodatno da budu aktivirani [9]. Utvrđeno je [3,10] da neki postupci u proizvodnji silicida, kao što je implantacija As^+ jonima, dovode do poboljšanja električnih karakteristika silicida kada je u pitanju nivo šuma.

S druge strane, s obzirom na to da svi dinamički procesi u poluprovodničkim uređajima zavise od temperature [1, 11-13], proučavanje promena parametara spoja (faktora idealnosti, struje zasićenja itd.) usled povišenja temperature je od velikog značaja. Jedan od najvažnijih procesa kod poluprovodničkih uređaja baziranih na spoju je transport generisanih nosilaca naelektrisanja preko spoja. Tip i temperaturska zavisnost transportnog mehanizma dobija se iz merenja strujno-naponske ($I-V$) karakteristike fotodetektora u mraku. Osnovni parametar koji može da se dobije iz $I-V$ podataka je faktor idealnosti (n), direktni pokazatelj zavisnosti izlaznih parametara od osobina električnog transporta u spoju. Ne-idealno ponašanje uređaja se odražava u vrednosti n veće od 1, a takođe i u temperaturskoj zavisnosti faktora idealnosti. Ova zavisnost je rezultat prisustva različitih transportnih mehanizama koji doprinose diodnoj struji na različitim temperaturama. Određivanje dominantnog strujnog mehanizma je veoma teško zato što relativne vrednosti ovih komponenti zavise od različitih parametara, kao što su gustina međupovršinskih stanja, koncentracija nečistoća i defekata, visina potencijalne barijere, napon uređaja i njegova temperature. Osnovni transportni procesi koji mogu čak i istovremeno da postoje su termojonska emisija, emisija putem polja, rekombinacija-tunelovanje kroz međupovršinska stanja, injekcija manjinskih nosilaca i rekombinacija [11]. Pored $I-V$ merenja na različitim temperaturama, merenja $n(V)$ i $n(T)$ zavisnosti može da suzi mogućnosti dominantnih strujnih komponenti. Vrednosti faktora idealnosti za različite temperature može da ukaže ne samo na transportni mehanizam, već indirektno i na prisustvo i moguću aktivaciju defekata i nečistoća koje se ponašaju kao rekombinacioni centri. Takođe, prisustvo defekata u materijalu se smatra osnovnim uzrokom postojanja strujnog šuma. Neki tipovi šuma kod fotodetektora su povezani sa prisustvom prekomerne struje [11], povezujući optičke i električne karakteristike takvih uređaja.

Cilj ovog rada je da prikaže temperatursku zavisnost osnovnih karakteristika solarnih ćelija koristeći temperatursku zavisnost $1/f$ šuma u silicidima i faktora idealnosti kod fotodioda.

2 EKSPERIMENTALNA PROCEDURA

U ovom eksperimentu su, usled velike složenosti teme istraživanja, izvršena tri tipa merenja. Proučavanje temperaturske zavisnosti $1/f$ šuma u silicidima obavljeno je za TiN/Ti/Si uzorke. Za sve uzorke su izvršene jonska implantacija jonima As^+ , odgrevanje i električna karakterizacija osobina. Implantacija arsena je izvršena na 350 keV, a doze implantacije su se kretale od 1×10^{15} jona/cm² do 1×10^{16} jona/cm². Uzorci su izlagani termičkom tretmanu na različitim temperaturama u trajanju od 20 min. Za razliku od drugih merenja sličnog tipa, ova

merjenja su bila bazirana na temperaturskoj zavisnosti nivoa šuma u silicidima na dve temperature: -18°C i 50°C . Nivo šuma je meren standardnom ORTEC opremom (za automatsku kalibraciju je korišćen MAESTRO II kod).

Eksperimentalna merjenja promena izlaznih karakteristika solarnih ćelija su vršena na komercijalno dostupnim solarnim ćelijama baziranim na enkapsuliranom polikristalnom silicijumu. Strujno-naponska merjenja su korišćena za karakterizaciju izlaznih veličina solarnih ćelija. Temperaturska zavisnost je merena o opsegu od sobne temperature (21°C) do oko 40°C .

Za određivanje temperaturske zavisnosti faktora idealnosti korišćene su komercijalno dostupne p-i-n i p-n silicijumske fotodiode (tipovi BP 104, BPW34, BPW 43 i SFH 205). Direktno polarizovana strujno-naponska karakteristika u mraku je merena za četiri različite temperature, koristeći standardnu konfiguraciju (strujno-naponski izvor i dva digitalna multimetra). Temperaturski opseg je bio u skladu sa preporukama proizvođača (21°C - 83°C). Izmereni I - V podaci su analizirani ORIGIN programskim paketom. Parametri diode su dobijeni korišćenjem standardnog i numeričkog metoda fitovanja uzimajući u obzir korekciju usled prisustva redne otpornosti.

Ekperimenti su izvedeni u dobro kontrolisanim laboratorijskim uslovima pri čemu je kombinovana merna nesigurnost za sva merjenja bila manja od 5% [14,15].

3 REZULTATI I DISKUSIJA

3.1 Merenje nivoa šuma

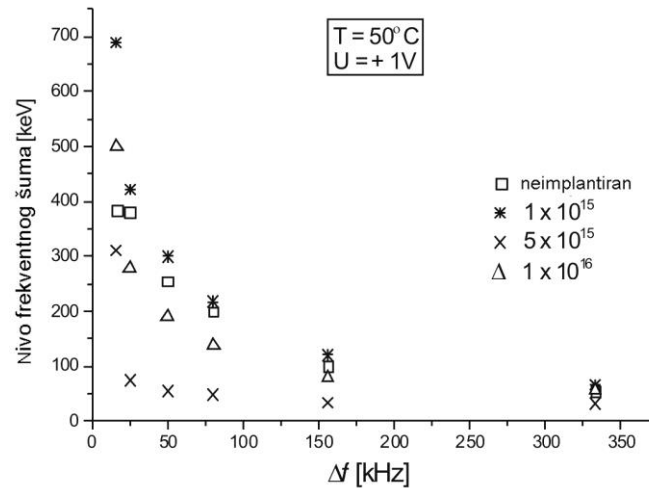
Temperaturska zavisnost $1/f$ šuma primećena je, kako je moglo da se očekuje, za sve tipove silicida. Spektar frekventno zavisnog šuma na nižim (-18°C) i višim (50°C) temperaturama prikazani su na slikama 1 i 2, respektivno. Ne samo da je potvrđena pretpostavka da više temperature indukuju viši nivo šuma, već je i primećeno da doza implantacije korišćena za proizvodnju silicida može da utiče na povišenje šuma. Mogućnost poboljšanja karakteristika silicida jonskom implantacijom i termičkim odgrevanjem je ranije primećena [10], ali prvenstveno u vezi sa radijacionim oštećenjima. Strukturalna RBS analiza je pokazala da jonska implantacija ne dovodi do redistribucije komponenti za niže implantacione doze. Primećeno je prisustvo TiSi_2 i TiSi_2 faze kod implantiranih uzoraka. U svim slučajevima gornji TiN sloj je ostao nedirnut, ali je za više doze implantacije (1×10^{16} jona/ cm^2) registrovana poremećena struktura.

Međutim, ova temperatursko zavisna merjenja ukazuju na još jednu veoma važnu činjenicu da jonska implantacija može da obezbedi temperatursku stabilnost silicida kada je u pitanju $1/f$ šum. Naime, sa slika 1 i 2 se vidi da uzorci implantirani dozom od 5×10^{15} jona/ cm^2 imaju najniži šum i veoma dobru temperatursku stabilnost. To može da dovede do poboljšanja električnih karakteristika silicida i uređaja baziranih na silicidima kao kontaktima (na primer, solarne ćelije).

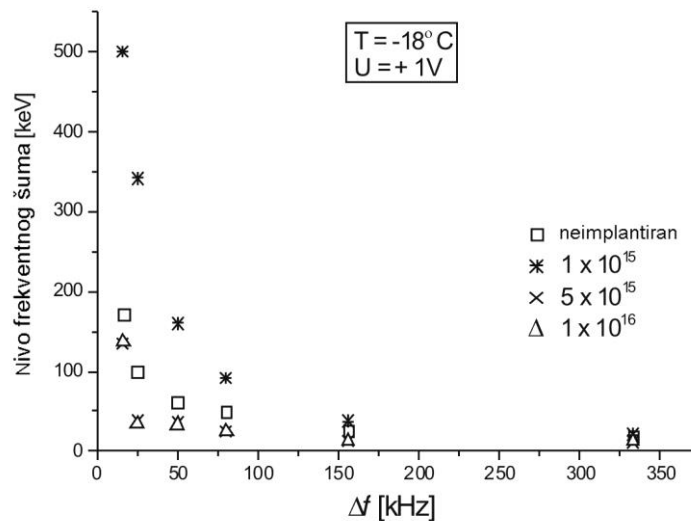
3.2 Temperaturska zavisnost električnih karakteristika fotodetektora

Iako je strujni transportni mehanizam (teoretski) sličan za sve poluprovodničke uređaje bazirane na p-n spoju (na primer solarne ćelije), sam izbor materijala i njegova struktura (monokristalni, polikristalni ili amorfni) imaju uticaja na transportne procese. Amorfni silicijum, a-Si, na primer, je materijal sa direktnim energetskim procepom i veoma velikom gustinom stanja unutar energetskog procepa koja mogu da se ponašaju kao rekombinacioni centri za nosioce naelektrisanja, što dovodi do pogoršanja izlaznih karakteristika uređaja baziranih na njemu.

Polikristalne i amorfne solarne ćelije su pouzdanije od amorfni, mada prisustvo defekata i nečistoća u osnovnom materijalu može tokom vremena da proizvede neke negativne efekte. To je posebno naglašeno ako su ta stanja lokalizovana unutar energetskog procepa i aktivirana tokom rada usled porasta temperature, na primer. U tim slučajevima ona postaju zamke za optički proizvedene parove elektron-šupljina, smanjujući broj kolektovanih nosilaca naelektrisanja. Makroskopski, ovaj uticaj se može primetiti kao smanjenje izlazne struje ili napona i na kraju dovesti do smanjenja efikasnosti solarne ćelije.



Slika 1. Nivo frekventno zavisnog šuma za tri implantirana i jedan neimplantiran uzorak na -18°C .

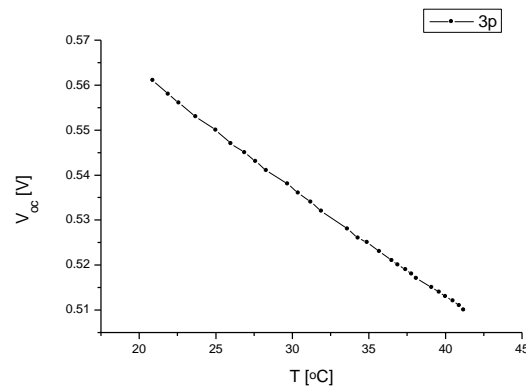


Slika 2. Nivo frekventno zavisnog šuma za tri implantirana i jedan neimplantiran uzorak na 50°C .

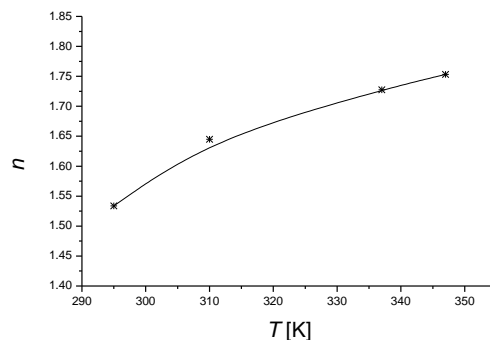
To je u saglasnosti sa amorfizacijom silicijumske podloge i ukazuje na to da implantacija utiče na fizičke osobine TiN/Ti/Si strukture.

Kada je u pitanju temperaturna zavisnost karakteristika solarnih ćelija, iako je primećen porast struje sa povišenjem temperature, visoka temperature je imala negativan uticaj na glavne izlazne karakteristike kao što je efikasnost. To je posledica činjenice da napon otvorenog kola veoma brzo opada sa povišenjem temperature, kao što se može videti na slici 3.

Brzina opadanja ($\partial V_{oc}/\partial T$) za ovu ćeliju je bila $-2,48 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ (koristeći linearni metod aproksimacije) i to je čini posebno osetljivom na porast temperature. To može da bude usled zavisnosti V_{oc} od struje mraka J_0 ćelije. Naime, opadanje V_{oc} sa porastom J_0 je povezano sa dominantnim transportnim procesom u uređaju, a pošto povišenje temperature neizostavno dovodi do porasta J_0 , opadanje V_{oc} je očekivano. Takođe, opadanje napona u tački maksimalne snage ima veliki uticaj na efikasnost. Jedan od glavnih razloga tog opadanja je porast faktora idealnosti, pa se može reći da faktor idealnosti utiče na efikasnost ćelija upravo preko napona. To je posebno značajno zato što je kod realnih uređaja n veće od 1, ukazujući na mnogo složeniju temperatursku zavisnost osnovnih karakteristika kao što su difuziona dužina ili vreme života nosilaca.



Slika 3. Temperaturska zavisnost napona otvorenog kola V_{oc} .



Slika 4. Temperaturska zavisnost faktora idealnosti.

Direktna zavisnost faktora idealnosti od temperature kod fotodetektora data je na slici 4, gde je vidljiva, manje više linearna zavisnost. Sa fizičkog stanovišta, ovakvo ponašanje može da se objasni činjenicom da su sa povišenjem temperature izraženije nesavršenosti u materijalu. Naime, defekti u kristalnoj rešetki kao što su vakancije i intersticije teže da se akumuliraju kada su termički stimulisane, remeteći periodičnost potencijalnog polja u kristalu i dovodeći do vrednosti faktora idealnosti veće od 1.

Pored toga, dislokacije i nečistoće u materijalu sa energetskim stanjima duboko u energetskom procepu takođe teže da se talože. Takva lokalizovana stanja se ponašaju kao zamke ili rekombinacioni centri za nosioce naelektrisanja, modulišući izlaznu struju i indukujući strujni šum u fotodetektorima. Praskavi i $1/f$ šum su primeri nisko frekventnog šuma koji karakterišu diskretne fluktuacije struje, koja se najčešće naziva prekomerna struja. Ova prekomerna struja je primećena kod svih uzoraka na srenjim naponima, ukazujući na postojanje niskofrekventnog šuma u uređajima.

4 ZAKLJUČAK

Jedno od osnovnih ograničenja za rad solarnih ćelija je degradacija električnih i optičkih karakteristika na povišenim temperaturama. Prvi deo rada je bio orijentisan na frekventno zavisani $1/f$ šum u kontaktnim slojevima i utvrđeno je da implantaciona doza ima veliki uticaj i na fizičke i na električne karakteristike silicida. Rezultati merenja šuma su takođe pokazali da jonska implantacija može uspešno da se primeni u cilju homogenizacije silicida i veoma dobre temperaturske stabilnosti. S druge strane, podaci dobijen $I-V$ merenjima ukazuju da iako je primećen značajan porast struje solarnih ćelija sa povišenjem temperature, ostale električne karakteristike veoma brzo opadaju dovodeći do opadanja efikasnosti. Degradacija električnih i optičkih karakteristika uređaja može da se prati pomoću faktora idealnosti. Primećeno povećanje faktora idealnosti sa povišenjem temperature ukazuje na porast strujnog šuma i praga detekcije, kao i opadanja rezolucije fotodetektora. Iz tog razloga se praćenje karakteristika uređaja mora kontinualno da sprovodi, posebno zato što su solarne ćelije izložene otežanim uslovima rada kao što je povišena temperatura.

ZAHVALNICA

Rad je urađen pod pokroviteljstvom Ministarstva za nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije u okviru projekta 171007.

LITERATURA

- [1] S. Parker, Solid-State Physics Source Book, McGraw-Hill, New York, 1988.
- [2] M. Stojanović, C. Jeynes, N. Bibić, M. Milosavljević, A. Vasić, Z. Milošević, Frequency noise level of As ion implanted TiN-Ti-Si structures, Nucl. Instr. Meth. B 115 (1996) 554-556.
- [3] M. Stojanović, A. Vasić, C. Jeynes, Ion implanted silicides studies by frequency noise level measurements, Nucl. Instrum. Meth. B 112 (1996) 192-195.
- [4] P.V.V. Jayaweera, P.K.D.D.P. Pitigala, A.G.U. Perera, K. Tennakone, $1/f$ noise and dye-sensitized solar cells, Semicond. Sci. Tech. 20 (2005) 40-42.
- [5] P.V.V. Jayaweera, P.K.D.D.P. Pitigala, M.K.I. Senevirante, A.G.U. Perera, K. Tennakone, $1/f$ noise in dye-sensitized solar cells and NIR photon detectors, Infrared Phys. Techn. 50 (2007) 270-273.
- [6] M. Vujisic, K. Stankovic, A. Vasic, Comparison of gamma ray effects on eproms and eeproms, Nucl. Technol. Radiat. 24 (2009) 61-67.
- [7] K. Stankovic, M. Vujisic, E. Dolicanin, Reliability Of Semiconductor And Gas-filled Diodes For Over-voltage Protection Exposed To Ionizing Radiation, Nucl. Technol. Radiat. 24 (2009) 132-137.
- [8] N. Marjanovic, M. Vujisic, K. Stankovic, D. Despotovic, P. Osmokrovic, Simulated Exposure Of Titanium Dioxide Memristors To Ion Beams, Nucl. Technol. Radiat. 25 (2010)
- [9] M. Alurralde, M.J.L. Tamasi, C.J. Bruno, M.G. Martinez Bogado, J. Pla, J. Fernandez Vasquez, J. Duran, J. Shuff, A.A. Burlon, P. Stoliar, A.J. Kreiner, Experimental and theoretical radiation damage studies on crystalline silicon solar cells, Sol. Energ. Mat. Sol. C. 82 (2004) 531-542.
- [10] A. Vasić, P. Osmokrović, M. Vujisić, Č. Dolićanin, K. Stanković, Possibilities of improvement of silicon solar cell characteristics by lowering noise, J. Optoelectron. Adv. M. 10 (2008) 2800-2804.

- [11] A. Vasić, P. Osmokrović, S. Stanković, B. Lončar, Study of increased temperature influence on the degradation of photodetectors through ideality factor, *Mat. Sci. Forum* 453-454 (2004) 37-42.
- [12] Sanjai Kumar, P.K. Singh, G.S. Chilana, Study of silicon solar cell at different intensities of illumination and wavelengths using impedance spectroscopy *Sol. Energ. Mat. Sol. C.* 93 (2009), 1881-1884.
- [13] N.H. Reich, W.G.J.H.M. van Sark, E.A. Alsema, R.W. Lof, R.E.I. Schropp, W.C. Sinke, W.C. Turkenburg, Crystalline silicon cell performance at low light intensities, *Sol. Energ. Mat. Sol. C.* 93 (2009), 1471-1481.
- [14] K. Stankovic, M. Vujisic, Lj. Delic, Influence Of Tube Volume On Measurement Uncertainty Of GM Counters, *Nucl. Technol. Radiat.* 25 (2010) 46-50.
- [15] K. Stankovic, M. Vujisic, Influence of radiation energy and angle of incidence on the uncertainty in measurements by GM counters, *Nucl. Technol. Radiat.* 23 (2008) 41-42.

TEMPERATURE DEPENDENCE OF SOLAR CELL CHARACTERISTICS THROUGH FREQUENCY NOISE LEVEL AND IDEALITY FACTOR MEASUREMENTS

ALEKSANDRA VASIĆ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING, UNIVERSITY OF BELGRADE, BELGRADE, SERBIA

KORALJKA KOVAČEVIĆ-MARKOV

POWER UTILITY OF THE REPUBLIC OF SRPSKA, REPUBLIC OF SRPSKA, BIH

MILOŠ ZDRAVKOVIĆ, MILOŠ VUJISIĆ, EDIN DOLIĆANIN

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING, UNIVERSITY OF BELGRADE BELGRADE, SERBIA

Abstract— Temperature effects and thermally induced noise in photodetectors are significant in the detection processes. Degradation of electrical and optical characteristics of the photodetectors in the increased temperature conditions is one of the most important limitation factors for their application. Since most of the electrical processes in semiconductor devices depend, in some extent, on the temperature, investigations at temperatures higher than room temperature may reveal possible changes in output characteristics of the device. From the technological point of view, thermally induced noise increase minimum signal that can be detected, which is specially important for the low energy and non ionizing radiation detectors, since the noise level presents the major performance limitation. In this paper these effects are studied through frequency noise level measurements and measurements of the main output characteristics of solar cells.

Key words — Temperature dependence - $1/f$ noise - Solar cells - Output voltage - Ideality factor.

**ODREĐIVANJE TEMPERATURSKE ZAVISNOSTI KARAKTERISTIKA
SOLARNIH ČELIJA MERENJIMA FREKVENTNOG ŠUMA I FAKTORA
IDEALNOSTI**

**TEMPERATURE DEPENDENCE OF SOLAR CELL CHARACTERISTICS
THROUGH FREQUENCY NOISE LEVEL AND IDEALITY FACTOR
MEASUREMENTS**

ALEKSANDRA VASIĆ

MAŠINSKI FAKULTET U BEOGRADU, BEOGRAD, SRBIJA

KORALJKA KOVAČEVIĆ-MARKOV

**ELEKTROPRIVREDA REPUBLIKE SRPSKE, TREBINJE, REPUBLIKA SRPSKA,
BIH**

MILOŠ ZDRAVKOVIĆ, MILOŠ VUJISIĆ, EDIN DOLIĆANIN

ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET U BEOGRADU, BEOGRAD, SRBIJA

Kratak sadržaj - Prilikom procesa detekcije zračenja uticaj temperature i termički indukovani šum u fotodetektorima su veoma značajni. Degradacija električnih i optičkih karakteristika fotodetektora pri povišenim temperaturama su jedan od glavnih ograničavajućih faktora za njihovu upotrebu. S obzirom na to da većina električnih procesa u poluprovodničkim uređajima u manjoj ili većoj mjeri zavisi od temperature, istraživanja na temperaturama višim od sobne mogu da otkriju moguće promene izlaznih karakteristika uređaja. Sa tehnološkog stanovišta, termički izazvan šum povećava minimalni signal koji može da se detektuje, što je posebno značajno za nisko energetske detektore i detektore nejonizujućeg zračenja. U ovom radu je uticaj povišene temperature proučavan preko merenja frekventno zavisnog šuma i osnovnih izlaznih karakteristika solarnih ćelija. Prvi deo rada je orijentisan na frekventno zavisni $1/f$ šum u kontaktnim slojevima i utvrđeno je da implantaciona doza ima veliki uticaj i na fizičke i na električne karakteristike silicida. Rezultati merenja šuma su takođe pokazali da jonska implantacija može uspešno da se primeni u cilju homogenizacije silicida i veoma dobre temperaturske stabilnosti. S druge strane, podaci dobijeni $I-V$ merenjima ukazuju da iako je primećen značajan porast struje solarnih ćelija sa povišenjem temperature, ostale električne karakteristike veoma brzo opadaju dovodeći do opadanja efikasnosti. Degradacija električnih i optičkih karakteristika uređaja može da se prati pomoću faktora idealnosti. Primećeno povećanje faktora idealnosti sa povišenjem temperature ukazuje na porast strujnog šuma i praga detekcije, kao i opadanje rezolucije fotodetektora.

Ključne reči – Temperaturska zavisnost - $1/f$ šum - Solarne ćelije - Faktor idealnosti.