

Mogućnosti poboljšanja karakteristika solarnih ćelija-novi pristup

ALEKSANDRA VASIĆ, Mašinski fakultet, Kraljice Marije 16, 11120 Beograd, Srbija
MILOŠ VUJISIĆ, Elektrotehnički fakultet, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11000 Beograd, Srbija
KOVILJKA STANKOVIĆ, Institut Vinča, Beograd, Srbija

Kratak sadržaj: Sve veća potreba čovečanstva za energijom u svakom aspektu života, donela je, pored izuzetno brzog napretka tehničke civilizacije, a samim tim i uslova života ljudi i niz teškoća. Do sada najčešće korišćena fosilna goriva dovodila su, a i sada dovode do veoma velike degradacije životne sredine, što uz činjenicu da spadaju u neobnovljive izvore energije i da su dostupne količine ove vrste goriva ograničene, predstavlja glavne nedostatke. Iz tog razloga održivi razvoj i prelazak na obnovljive izvore energije su jedina moguća dugoročna perspektiva. Fotonaponska (PV) konverzija sunčeve energije u tom pogledu predstavlja jednu od najsavremenijih tehnologija koja omogućava primenu PV sistema za različite namene. Međutim, kao i drugi izvori energije i PV konverzija ima određena ograničenja koja se u prvom redu odnose na relativno nisku efikasnost PV modula. Poslednjih godina, u svetskim razmerama, postoji uočljivo povećanje ulaganja u istraživanja i razvoj fotonaponske konverzije, kako bi se što jeftinije i efikasnije proizvodile PV komponente i time bitno povećala njihova primena. U ovom radu prikazane su neke mogućnosti povećanja efikasnosti PV sistema, kako sa stanovišta klasičnih (poluprovodničkih) modula i panela, tako i upotrebe novih materijala.

Ključne reči: Obnovljivi izvori enerije - održivi razvoj - PV moduli – efikasnost.

1. Uvod: Osnovni gradivni element fotonaponskih solarnih sistema, solarna ćelija, predstavlja složenu strukturu čiji je glavni deo (aktivni sloj) napravljen od poluprovodničkih materijala. S obzirom na to da je silicijum za sada najviše korišćen element za proizvodnju solarnih ćelija, najveći broj istraživanja je usmeren ka poboljšanju fizičkih osobina silicijumskih struktura. Mada su specifičnog dizajna (u prvom redu se misli na veličinu), silicijumske solarne ćelije spadaju u široku grupu poluprovodničkih detektora. Jedna od najvažnijih karakteristika detektora je njihova energetska rezolucija koja prvenstveno zavisi od šuma. Iz tog razloga je snižavanje šuma veoma važno za dobijanje kvalitetnih detektora. Poznato je da se niskofrekventni $1/f$ manifestuje kao slučajna fluktuacija izlazne struje ili napona, što dovodi do smanjenja efikasnosti uređaja. Smatra se [1,2] da je uzrok ovog tipa šuma fluktuacija broja slobodnih nosilaca naelektrisanja usled interakcije nosilaca sa postojećim defektima, površinskim stanjima i nečistoćama. Ukoliko su u pitanju uređaji velikih površina (kao što su solarne ćelije), površinski efekti mogu biti najvažniji uzrok postojanja $1/f$ šuma, pa je dobar kvalitet kontakata od velike važnosti. Silicidi pripadaju grupi materijala niske otpornosti i dobre temperaturske stabilnosti, te se često koriste za proizvodnju pouzdanih kontakata. Utvrđeno je [3,4] da neki postupci u proizvodnji silicida, kao što je implantacija As^+ jonima, dovode do poboljšanja električnih karakteristika silicida kada je u pitanju nivo šuma.

Drugi najčešći izvor šuma je povezan sa nepovoljnim uslovima rada uređaja, tj. izlaganje zračenju. To je posebno izraženo kada je u pitanju kombinovano zračenje (na primer γ zračenje i neutroni, kao kod istrošenog nuklearnog goriva), zato što dolazi do različitih vrsta radijacionih

oštećenja. Glavni efekat koji izaziva zračenje je povećanje struje zasićenja unutar ili na površini osiromašene oblasti. Trajna oštećenja u poluprovodničkom materijalu su prouzrokovana sudarima čestica upadnog zračenja sa atomima kristalne rešetke pri čemu se stvaraju defekti u strukturi. To dovodi do degradacije transportnih osobina materijala, posebno vremena života manjinskih nosilaca naelektrisanja [5-9]. Defekti stvoreni zračenjem predstavljaju rekombinacione centre za manjinske nosioce naelektrisanja u baznom sloju i time povećavaju rednu otpornost uređaja. Pri izuzetno velikim dozama zračenja redna otpornost baznog sloja može biti toliko velika da značajno utiče na snagu generisanu u uređaju, što dovodi do smanjenja efikasnosti. Međutim, postoje izvesni nagoveštaji da niske doze zračenja mogu da imaju pozitivan uticaj na rad uređaja, zato što, pod određenim uslovima mogu dovesti do relaksacije kristalne rešetke.

Napred naveden glavni nedostatak PV modula, relativno mala energetska efikasnost (u odnosu na cenu proizvodnje), predstavlja vrlo važan ograničavajući faktor šire upotrebe solarnih sistema. Iz tog razloga istraživanja se sve više usmeravaju ka razvijanju novih poluprovodničkih tehnologija koje se baziraju na potpuno različitoj grupi materijala. Jedna od mogućih grupa takvih materijala su organski provodnici i poluprovodnici. Zamena tradicionalnih neorganskih poluprovodnika organskim molekulima, polimerima ili čak biološkim materijalom je nedavno nazvana "molekularnom elektronikom" [10]. U današnjoj "eri polimera", napravljen je značajan napredak u razvoju različitih polimernih materijala koji veoma brzo i uspešno zamenjuju konvencionalne materijale kao što su metali i poluprovodnici. Ovakvi materijali predstavljaju dobru alternativu tradicionalnim neorganskim materijalima zbog svoje izuzetno male veličine, obilnosti, raznovrsnosti, jednostavne proizvodnje i dobrog odnosa cene proizvodnje - efikasnost. Posebno važna osobina, karakteristična za molekularne elektronske materijale je molekularna arhitektura ili molekularni inženjering koji omogućava dobru kontrolu električnih/optičkih osobina uređaja promenom strukture organskih molekula pre proizvodnje datog uređaja.

Tri različite mogućnosti poboljšanja izlaznih karakteristika solarnih sistema prikazane su u ovom radu. Prve dve se odnose na smanjenje šuma kod silicijumskih solarnih ćelija poboljšanjem osobina kontaktnih slojeva i upotrebom malih doza zračenja. Treći aspekt se odnosi na potpuno nov pristup izboru materijala za proizvodnju fotonaponskih ćelija upotrebom organskih molekula.

2. Smanjenje šuma kod silicijumskih solarnih

2.1. Eksperimentalna procedura

Prilikom određivanja 1/f šuma istraživana je uticaj implantacije jonima arsena na nivo frekventnog šuma TiN/Ti kontakata na silicijumu p-tipa. Svi uzorci su izlagani jonskoj implantaciji i zagrevanju, a zatim su im merene električne karakteristike. 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. Strukturna analiza je urađena Ruthrford-ovim rasejanjem unazad (RBS). Nivo šuma je meren standardnom ORTEC opremom (za automatsku kalibraciju je korišćen MAESTRO II kod).

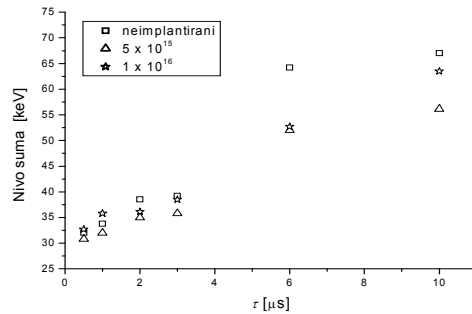
Uticaj zračenja na karakteristike solarnih ćelija određivan je merenjem strujno-naponskog izlaza kod monokristalnih solarnih ćelija različitih proizvođača. Za ozračivanje neutronima upotrebljen tačkasti neutronski izvor Pu-Be. Korišćena je konfiguracija u kojoj su uzorci bili u direktnom kontaktu sa neutronskim izvorom, pri čemu je ostvarena maksimalna doza $dD/dt = 0,36$ mGy/h. Sva $J-V$ merenja vršena su pre prvog ozračivanja i neposredno posle svakog koraka ozračivanja za dva nivoa intenziteta osvetljenja od 32 W/m² i 58 W/m². Ozračivanje uzoraka i merenja izvršena su u Laboratoriji za nuklearnu tehniku, Laboratoriji za tehnologiju materijala Elektrotehničkog fakulteta i u Laboratoriji Zavoda za fiziku tehničkih fakulteta Univerziteta u Beogradu.

2.2 Rezultati i diskusija

Merenja 1/f šuma kod silicida su pokazala da implantacija As jonima različitih doza može da ima uticaj na kvalitet silicida kao kontakata. Strukturna RBS analiza je pokazala da prilikom niskih doza implantacije nije došlo do preraspodele komponenata. U svim slučajevima, implantacija nije imala uticaja na gornji TiN sloj, ali je za veće doze implantacije (1×10^{16} jona/cm²) primećena izvesna

poremećenost strukture, što ukazuje na amorfizaciju silicijumske podloge. Ta amorfizacija se produbljuje sa povećanjem doze, što znači da jonska implantacija ima uticaja na fizičke osobine TiN/Ti/Si kontakata.

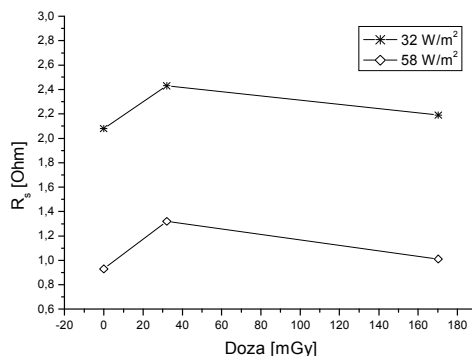
Ovakav uticaj je potvrđen merenjima nivoa šuma. Nivo šuma (spektar) je meren za različite vremenske konstante τ (frekventne opsege $\tau \sim 1/f$). Spektri nivoa frekventnog šuma ($1/f$) za neimplantirane uzorke i za dve različite doze implantacije (1×10^{15} jona/cm² do 1×10^{16} jona/cm²) prikazani su na slici 1.



Sl. 1. Nivo frekventnog šuma za tri TiN/Ti/Si uzorka.

Sa slike se vidi da, iako doze implantacije imaju različit uticaj u različitim frekventnim opsezima, doza od 5×10^{15} jona/cm² ima najpovoljniji uticaj u celom frekventnom opsegu. To ukazuje da ova doza pospešuje stvaranje homogenijih silicida i stvaranje Ti-Si faze sa nižom koncentracijom kristalnih defekata (posle odgrevanja). Niža koncentracija tačkastih defekata i dislokacija i homogeniji prelaz silicid/silicijum, imaju za posledicu niži nivo šuma, posebno ako su uzorci implantirani posle odgrevanja. Ove metode dovode do poboljšanja elektrišnih karakteristika silicida i uređaja koji ih koriste kao kontakte.

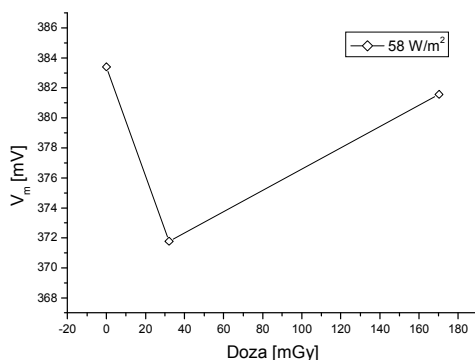
Još jedan mogući metod poboljšanja osobina, u prvom redu solarnih ćelija, je ozračivanje. Negativan uticaj zračenja na poluprovodničke uređaje je dobro poznat i detaljno proučavan. To se posebno odnosi na solarne ćelije koje se koriste u svemiru i izložene su različitim vrstama zračenja (i talasnim i čestičnim).



Sl. 2. Zavisnost redne otpornosti od doze.

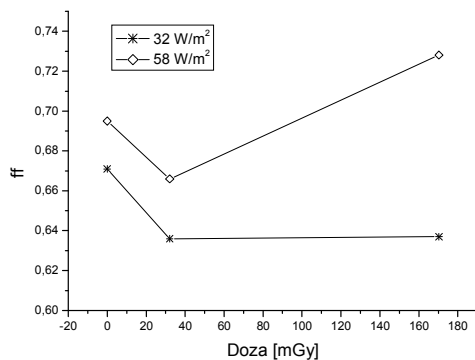
Njihov poseban dizajn (odnos površina/zapremina) ih čini posebno osetljivim na radijaciona oštećenja, pa poboljšanje električnih osobina oštećenih ćelija predstavlja cilj mnogih eksperimenata.

Radijaciona oštećenja nastala usled interakcije neutrona (teških čestica) sa strukturom ćelije su prvenstveno povezana sa izmeštanjem atoma silicijuma iz njihovih mesta u kristalnoj rešetki, što dovodi do razaranja i deformacije lokalne kristalne strukture i stvaranje defekata. Takvi defekti predstavljaju rekombinacione centre ili zamke za manjinske nosioce naelektrisanja, smanjujući njihovo vreme života, što dovodi do pogoršanja električnih parametara ćelije, kao što je povećanje redne otpornosti (R_s). Velika redna otpornost obično ukazuje na prisustvo atoma nečistoća i defekata unutar osiromašenog sloja koji predstavljaju zamke bilo za rekombinaciju, bilo za tunelski efekat, što dovodi do povećanja struje mraka ćelije i nivoa šuma. Takav efekat je primećen kod većine merenih uzoraka, međutim, kod izvesnog broja uzoraka je pored početnog porasta otpornosti prilikom ozračivanja, sa povećanjem doze zračenja došlo do pada R_s (slika 2). Opadanje otpornosti ukazuje na poboljšanje izlaznih karakteristika ćelija i veoma je značajno sa stanovišta konstrukcije i proizvodnje solarnih ćelija zato što ukazuje na mogući povoljan uticaj određenih doza zračenja, čak i kada su u pitanju neutroni.



Sl. 3. Zavisnost napona u tački maksimalne snage (V_m) od doze.

Posebno je važno što su i drugi parametri datih uzoraka (napon u tački maksimalne snage V_m i faktor ispunje ff) pokazali slične tendencije (sl.3 i 4.). Naime, posle početnog pogoršanja usled izlaganja zračenju, kod oba parametra je došlo do porasta vrednosti sa povećanjem doze zračenja. Iako donekle neočekivano, ovo ponašanje može da se objasni činjenicom da nečistoće i defekti u strukturi koji neizbežno nastaju tokom procesa proizvodnje bilo kog poluprovodničkog uređaja, stvaraju izvesnu napregnutost kristalne rešetke. Određene doze zračenja bi mogle, slično kao i odgrevanje, da dovedu do relaksacije kristalne strukture i smanjenja redne otpornosti.



Sl. 4. Zavisnost faktora ispunje od doze.

S obzirom na činjenicu da maksimalna snaga i faktor ispunje direktno određuju efikasnost solarne ćelije, njihovo povećanje će dovesti i do povećanja efikasnosti.

3. Novi materijali

Iako se silicijum još uvek smatra osnovnim poluprovodničkim materijalom za izradu solarnih ćelija, odnos cena proizvodnje/efikasnost, kao i izvesni drugi nedostaci, doveli su do potpuno novog pristupa u istraživanjima materijala za fotonaponsku konverziju. Naime, početkom 21.veka razvijene su organske fotonaponske ćelije čija cena je bila znatno niža od cene proizvodnje konvencionalnih sistema. Solarne ćelije koje koriste organske materijale zasnovane su na procesu fotosinteze u biljkama, što dovodi do fotohemijskih procesa. Organska fotonaponska ćelija koristi foto-osetljive pigmente koji su naneti na poluprovodnički material. Kada sunčeva svetlost obasja takvu ćeliju, generiše se slobodan electron iz molekula pigmenta, koji krećući se kroz poluprovodnički material stvara električnu struju. Procenjuje se da će proizvodne cene takvih ćelija biti između 10% i 20% cene solarne ćelije proizvedene na konvencionalni način.

U novu grupu materijala koji se proučavaju za proizvodnju solarnih ćelija spadaju i provodni i poluprovodni polimeri. Bilo koji polimer koji ima veliku otpornost u mraku a može da transportuje fotoindukovane nosioce naelektrisanja kada je izložen svetlosti, može da se koristi kao fotoprijemnik. Iako još uvek nedovoljno razvijene, solarne ćelije bazirane na polimerima pružaju mnoge pogodnosti, posebno kada je u pitanju cena uređaja i smanjenje veličine i težine. Nove tehnologije su i u ovoj oblasti dale značajan doprinos, pa je razvijena nova vrsta nano-fotonaponskih ćelija sa povećanom efikasnošću. Nano ćelije su napravljene ugradnjom tankih štapičastih elemenata u poluprovodni polimerni sloj, koji se nalazi između dve electrode. Štapičasti elementi su debljine oko 200 nm i ponašaju se kao provodne žice koje apsorbujući svetlost proizvode električnu struju. Istraživači predviđaju da bi efikasnost ovakvih nano ćelija mogla da dostigne efikasnost silicijuskih fotonaponskih sistema.

4. Zaključak

S obzirom na sadašnju energetska krizu, solarna energija privlači sve veću pažnju kao alternativni, obnovljivi izvor energije i to prvenstveno zbog svoje rasprostranjenosti i činjenice da ne zagađuje životnu sredinu. Koncept održivog razvoja kao i ekonomska kriza pospešili su mnoga istraživanja u oblasti solarne energije u cilju dobijanja optimalnog (sa stanovišta cena proizvodnje/efikasnost) i čistog (sa stanovišta zaštite i očuvanja životne sredine) izvora energije. Kao što je u ovom radu prikazano, poboljšanje osobina solarnih ćelija baziranih na konvencionalnim materijalima (silicijumu) je moguće snižavanjem nivoa niskofrekventnog šuma. Utvrđeno je da jonska implantacija i odgrevanje povoljno deluju na silicide kao kontakte, snižavajući $1/f$ šum. Pored toga, dobro kontrolisane i relativno niske doze zračenja (u ovom slučaju neutronske) mogu u pojedinim slučajevima dovesti do poboljšanja izlaznih karakteristika solarnih ćelija. Konačno, poslednjih godina se pojavila nova, potpuno nova grupa materijala baziranih na organskim i polimernim materijalima koji veoma uspešno konkurišu (po svojim osobinama i prvenstveno ceni) tradicionalnim neorganskim poluprovodničkim materijalima.

Zahvalnica

Ovaj rad je urađen pod pokroviteljstvom Ministarstva za nauku i zaštitu životne okoline, u okviru projekta broj 141046.

5. Literatura

- [1] P.V.V. Jayaweera, P.K.D.D.P. Pitigala, A.G.U. Perera, and K. Tennakone, $1/f$ noise and dye-sensitized solar cells, *Semiconductor Science Technology*, 20, L40-L42 (2005)
- [2] P.V.V. Jayaweera, P.K.D.D.P. Pitigala, M.K.I. Senevirante, A.G.U. Perera, and K. Tennakone, $1/f$ noise in dye-sensitized solar cells and NIR photon detectors, *Infrared Physics & Technology*, 50, 270-273 (2007)
- [3] M.Stojanović, C.Jeynes, N.Bibić, M.Milosavljević, A.Vasić, and Z.Milošević, Frequency noise level of As ion implanted TiN-Ti-Si structures, *Nuclear Instruments and Methods B*, 115, 554-556 (1996)

- [4] M.Stojanović, A.Vasić, and C.Jeynes, Ion implanted silicides studies by frequency noise level measurements, *Nuclear Instruments and Methods B*, 112, 192-195 (1996)
- J.Hovel, *Semiconductors and Semimetals* (Academic Press, New York, 1975).
- [5] A.G. Holwes-Siedle, L. Adams, *Handbook of Radiation, Second Edition*, (Oxford University Press, 2002)
- [6] G.C. Messenger, M.S. Ash, *The Effects of Radiation on Electronic Systems* (Van Nostrand Reinhold, New York, 1992)
- [7] D.R. Alexander, Transient Ionizing Radiation Effects in Devices and Circuits, *IEEE Transaction on Nuclear Sciences*, 50, No. 3, 565-582 (2003)
- [8] N. Horiushi, T. Nozaki, A. Chiba, Improvement in electrical performance of radiation-damaged silicon solar cells by annealing, *NIM A*, 443, 186-193 (2000)
- [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, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 82, 531-542 (2004)
- [10] K.Gurunathan, A. Vadivel Murugan, R. Marimuthu, U.P. Mulik, D.P. Amalnerkar, Electrochemically synthesised conducting polymeric materials for applications towards technology in electronics, optoelectronics and energy storage devices, *Materials Chemistry and Physics*, 61, 173-191 (1999).

Abstract: Increasing need for energy in every aspect of human life has brought, beside extremely rapid progress of civilization and living conditions, some disadvantages also. Mostly used fossil fuels are producing environmental pollution, and that, together with the fact that they belong to unrenovable energy source and available amounts are highly limited present their main disadvantages. That is the reason why energy future lies in sustained development and renewable sources. Photovoltaic (PV) conversion of solar energy represents one of the most up to date technology that enables application of PV systems for different purposes. However, as other energy sources, PV conversion has certain limitations, primarily relatively low efficiency of PV modules. Recently, there is an increase in the investment in the development of photovoltaic conversion with the main aim to make it cheaper and less complicated from the technological point. In this paper some possibilities of an increase of the PV system efficiency was presented, both for conventional (inorganic) PV modules, and for modules made from some new materials.

Key words: Renewable energy sources – sustained development – PV modules – efficiency.