

R D1-09**UTICAJ ZRAČENJA NA STARENJE SOLARNIH ČELIJA****A. VASIĆ*****Mašinski fakultet, Beograd****M. VUJISIĆ****Elektrotehnički fakultet, Beograd****SRBIJA****Kratak sadržaj:**

Široka primena fotonaponskih (PV) solarnih sistema nameće potrebu izrade solarnih ćelija od različitih materijala i struktura u cilju poboljšanja njihovih osobina i smanjenja cene solarnih ćelija i struktura. Iako efikasnost pojedinih savremenih solarnih ćelija baziranih na p-n spoju, u laboratorijskim uslovima dostiže 25% (što je blizu teorijskog maksimuma od 31%), dalje poboljšanje osobina ovih uređaja danas predstavlja glavni preduslov njihove šire upotrebe. Poslednjih godina, tržište fotonaponskih uređaja je izuzetno napredovalo, uz godišnji rast od oko 30% godišnje (u poslednjih 5 godina). Iz tog razloga je proučavanje spoljašnjih činilaca koji utiču na osobine solarnih ćelija, dovodeći do pogoršanja njenih osnovnih parametara od izuzetnog značaja. U ovom radu prikazani su rezultati dobijeni analizom uticaja zračenja na starenje, pa samim tim i na kvalitet solarnih ćelija kao fotonaponskih generatora.

Ključne reči: zračenje, solarna ćelija, starenje, eikasnost, maksimalna snaga.

1. UVOD

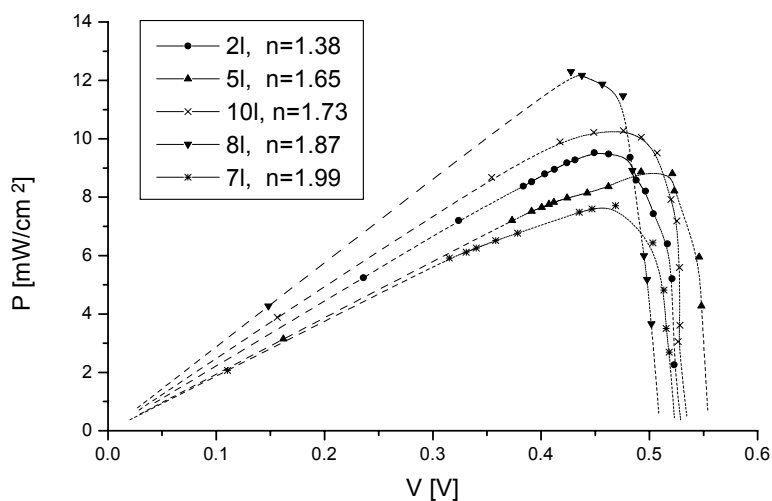
Sve šira primena solarne energije kao jednog od glavnih alternativnih izvora za dobijanje električne energije, posledica je relativno niske cene solarnih uređaja, kao i činjenice da predstavljaju ekološki najprihvatljiviji izvor energije ne ugrožavajući ni u kom pogledu životnu sredinu. Međutim, iako su danas važeći standardi u proizvodnji elektronskih uređaja najnovije generacije izuzetno visoki, svi oni su, u manjoj ili većoj meri podložni procesu starenja. Velika pažnja u istraživanjima posvećena je unapređenju tehnologije izrade fotonaponskih ćelija kako bi se povećala njihova efikasnost i smanjila cena proizvodnje. Međutim, solarne ćelije, kao efikasan i pouzdan izvor energije, često rade u uslovima u kojima ne postoji mogućnost redovnog servisiranja i zamene delova, dok su one same

* Aleksandra Vasić, Mašinski fakultet, Kraljice Marije 16, Beograd, Srbija

izložene vrlo nepovoljnim uticajima okoline, ako što je na primer zračenje. Budući da se solarne ćelije vrlo često koriste u uslovima povećane radioaktivnosti (visoki, nepristupačni planinski predeli, vazduhoplovna i svemirska tehnologija i sl.), to je problem njihove radijacione otpornosti veoma aktuelan. Iz tog razloga, stabilnost i dugovečnost karakteristika solarnih ćelija predstavlja osnovni zahtev njihovih korisnika. Cilj ovog rada je da se ispita stabilnost osobina solarnih ćelija tokom eksploatacije u uslovima dejstva radioaktivnog zračenja (dinamička radijaciona otpornost), kao i stepen ireverzibilnih promena karakteristika ćelije, akumuliranih dejstvom radioaktivnog zračenja (statička radijaciona otpornost).

2. UTICAJ ZRAČENJA NA OSOBINE SOLARNIH ĆELIJA

Silicijum se još uvek smatra osnovnim poluprovodničkim materijalom u mikroelektronici, tako da solarne ćelije na bazi kristalnog silicijuma dominiraju svetskim tržištem: u 2001. godini, različite forme kristalnog silicijuma pokrivala su više od 85% ukupnog svetskog tržišta, dok je njihov udeo u proizvodnji solarnih ćelija tokom 2002. godine dostigao čak 93%. Fundamentalna istraživanja kod monokristalnih fotonaponskih tehnologija usmerena su ka defektima i nečistoćama u kristalu silicijuma, koji utiču na vreme života nosilaca naelektrisanja, zatim boljem razumevanju transportnih procesa, optičkih osobina (apsorpcije) koje određuju sposobnost stvaranja para elektron-šupljina, i sl. [1,2]. Iako su analitičke veze između osnovnih fizičkih i izlaznih veličina teorijski dobro poznate, sam proces proizvodnje i međuzavisnost mnogih parametara mogu dovesti do odstupanja od očekivanih rezultata. Efikasnost konverzije upadnog sunčevog zračenja u električnu energiju (η) najčešće je korišćena mera kvaliteta solarnih ćelija kao fotonaponskih generatora struje/napona [3]. Definisana kao odnos maksimalne snage koju uređaj daje, P_m i ukupne uložene snage, P_s (fluks sunčevog zračenja) i izražena u procentima, predstavlja osnovni energetski izlazni parametar ćelije. Sposobnost solarne ćelije da pretvori deo sunčeve energije u električnu, zavisi od velikog broja fundamentalnih i tehnoloških faktora kao što su redna i paralelna otpornost, struja zasićenja, spektralna raspodela intenziteta sunčevog zračenja i sl. Maksimalna snaga $P_m = J_m V_m$ (J_m , V_m – struja i napon u tački maksimalne snage, respektivno) se najjednostavnije može dobiti sa grafika zavisnosti izlazne snage od napona (sl. 1), na kome se najbolja usklađenost otpornosti potrošača sa generatorom (solarnom ćelijom) manifestuje kao maksimalna vrednost snage.



Sl. 1. Simulacija zavisnosti P-V karakteristika od faktora idealnosti n [23n].

S obzirom na činjenicu da strujno-naponska (J - V) karakteristika solarne ćelije definiše položaj maksimalne snage u zavisnosti od otpornosti, data otpornost koja obezbeđuje maksimalnu snagu mora da se održava na vrednosti koja daje najveću efikasnost. Sa stanovišta matematičke analize maksimalna snaga je glavni ograničavajući faktor za efikasnost, a svako smanjenje struje u tački maksimalne snage na vrednosti manje od maksimalne J_{sc} (J_{sc} – struja kratkog spoja) karakteriše se kao unutrašnji gubici ćelije. Osnovne izlazne veličine solarne ćelije, V_{oc} (V_{oc} – napon otvorenog kola), J_{sc} i P_m , u velikoj meri zavise od osnovnih parametara solarnih ćelija (i p-n spojeva uopšte), kao što su redna otpornost, paralelna otpornost, faktor idealnosti i gustina struje zasićenja (R_s , R_{sh} , n i J_0). Faktor idealnosti, kao veoma značajna karakteristika svih poluprovodničkih uređaja može se dobiti iz gradijenta strujno-naponske (J - V) karakteristike pri određenoj temperaturi i odražava sva odstupanja strujnog toka od idealnog modela, na taj način indirektno utičući na smanjenje efikasnosti [4].

Spoljašnji faktori kao što su nivo osvetljenja, temperatura okoline, zračenje i sl., dovode do privremenih ili trajnih promena unutar same ćelije, utičući na vreme života nosilaca naelektrisanja, transportne procese i kolekciju nosilaca na izlaznim krajevima. Trajna oštećenja u materijalu od kojih su sačinjene solarne ćelije prouzrokovana su sudarima upadnih čestica zračenja sa atomima u kristalnoj rešetki. To je posebno izraženo kada su upadne čestice teške, kao na primer neutroni, koji u sudaru sa atomima silicijuma mogu da dovedu do pomeranja atoma iz kristalne rešetke, što prouzrokuje poremećaj ili zakrivljenje lokalne strujture rešetke. Ako je energija upadnog neutrona dovoljno velika, on može da saopšti dovoljno energije atomu kojeg je izbacio iz rešetke da taj atom može da izbacii iz rešetke i druge atome. Ovaj fenomen može da se nastavi kaskadno i da formira defekte unutar strukture rešetke. Ukoliko su stvoreni defekti tipa vakancija, one mogu da se kombinuju sa atomima nečistoća, donorskim atomima ili drugim prisutnim vakancijama i na taj način stvore temperaturno stabilne defekte. Ovakvi defekti, takozvani defektni kompleksi, predstavljaju efektivne rekombinacione centre ili "zamke" za nosioce naelektrisanja, utičući na njihovo vreme života, tip transportnog procesa i promenu otpornosti uređaja. Povećanje otpornosti do koga dolazi kod n-tipa poluprovodnika može se u najvećoj meri da objasni uvođenjem divakancijskih i donor-vakancija defektnih kompleksa koji nastaju kao posledica dejstva upadnih neutrona. Ovi defektni kompleksi dovode do osiromašenja, tj. do smanjenja broja elektrona kao većinskih nosilaca u provodnoj zoni, usled njihovog zarobljavanja. Ova pojava se naziva uklanjanje nosilaca i dovodi do smanjenja provodnosti poluprovodnika, odnosno, do povećanja njegove otpornosti. Sličan efekat se javlja i kod poluprovodnika p-tipa, s tim što su u tuom slučaju u pitanju akceptor i šupljine kao većinski nosioci.

Svi ovi efekti dovode do degradacije osobina solarnih ćelija. Mnogi eksperimenti su pokazali da struja kratkog spoja i izlazna snaga opadaju sa povećanjem doze zračenja [5,6], dok napon otvorenog kola može znatno da opadne i pri nižim primljenim dozama [6]. Promena struje kratkog spoja najviše je povezana sa vremenom života nosilaca naelektrisanja, dok promene napona otvorenog kola nastaju usled oštećenja p-n spoja. Iz tog razloga teške čestice (protoni, neutroni) dovode do fizičkog oštećenja kristalne structure ćelije i trajnog pogoršanja karakteristika uređaja.

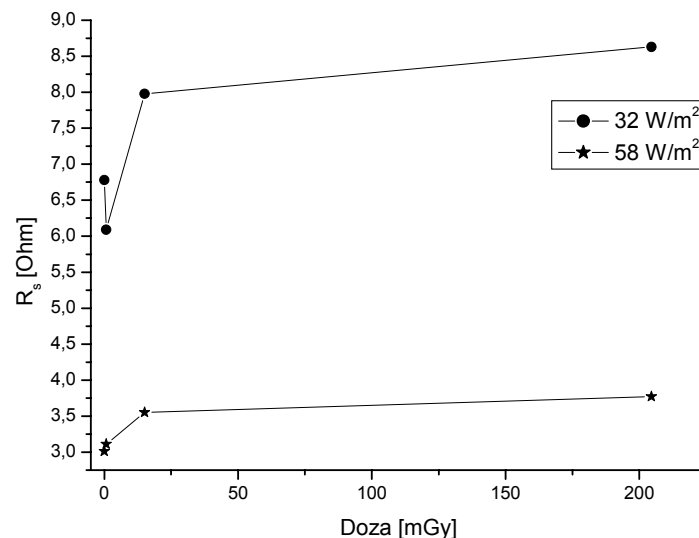
3. EKSPERIMENTALNI RAD

Eksperimentalni deo ovog rada baziran je na snimanju strujno-naponskih karakteristika solarnih ćelija standardnim mernim uređajima uz varijacije parametara merenja kao što su: tip (proizvođač) solarnih ćelija, intenzitet osvetljenja, energija i doza radioaktivnog zračenja. 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. Kao uzorci su korišćene monokristalne silicijumske solarne ćelija, dok je za ozračivanje neutronima upotrebljen tačkasti neutronske izvor Pu-Be. Korišćena je konfiguracija u kojoj su uzorci bili u direktnom kontaktu sa neutronske izvorom, pri čemu je ostvarena maksimalna doza $dD/dt = 0,36 \text{ mGy/h}$. Sva J - V merenja vršena su pre prvog ozračivanja i neposredno posle svakog koraka ozračivanja za dva nivoa intenziteta osvetljenja od 32 W/m^2 i 58 W/m^2 .

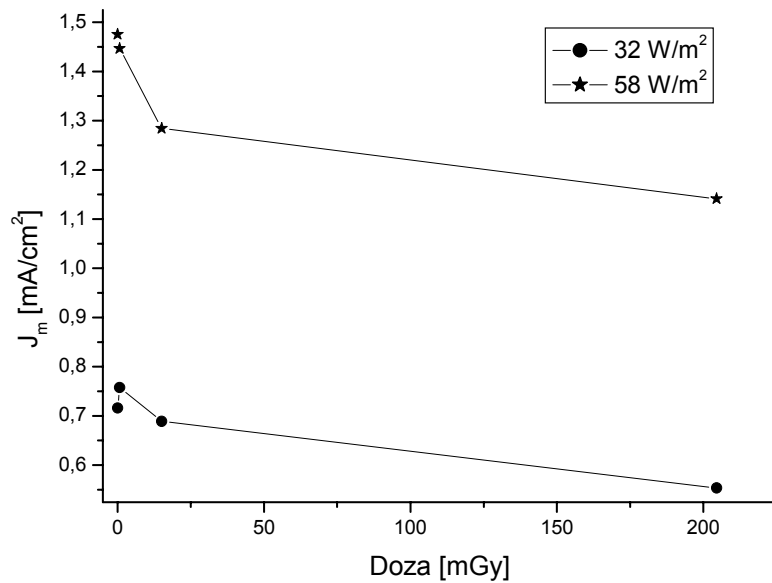
4. REZULTATI I DISKUSIJA

S obzirom na to da se solarne ćelije koriste kao električni generatori, prilikom njihove izrade se teži da njihova unutrašnja otpornost bude što manja. Međutim, specifičnost izrade solarnih ćelija, u prvom redu njene relativno velike dimenzije, dovode do velikih vrednosti, u prvom redu redne otpornosti. Smatra se da je eliminisanje gubitaka usled postojanja redne otpornosti mera uspešnosti dizajna svake pojedinačne ćelije, bez obzira na njenu površinu. Prisustvo redne i paralelne otpornosti dovodi i do izaženije zavisnosti izlaznih karakteristika od intenziteta osvetljenja. Pri visokim nivoima osvetljenja posebno je potrebno smanjiti rednu otpornost, što može da se postigne povećanjem broja linija gornje kontaktne mreže. Međutim, bez obzira na kvalitet dizajna i tehnološkog procesa proizvodnje, starenje solarnih ćelija neminovno dovodi do povećanja redne otpornosti. To je posebno izraženo ukoliko su ćelije izložene nepovoljnim uslovima rada, kao što je na primer zračenje, što se jasno može videti i na primeru korišćenih uzoraka. Kod svih uzoraka je primećen, u početku nagli rast redne otpornosti sa povećanjem doze zračenja (sl. 2).



Sl. 2. Zavisnost redne otpornosti od primljene doze zračenja za dva nivoa osvetljenja.

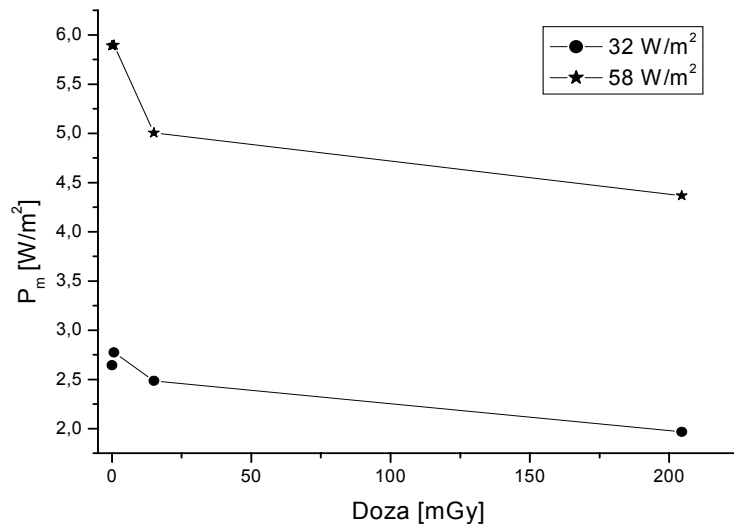
Sa daljim porastom primljene doze, tendencija rasta se nastavljala za oba nivoa osvetljenja, ali sa nešto blažim nagibom. Pri nižem nivou osvetljenja od 32 W/m^2 , za početne (niske) doze zračenja primećen je mali pad redne otpornosti, što sa stanovišta tehnologije izrade solarnih ćelija ukazuje na moguće povoljno dejstvo niskih doza. Naime, bez obzira na kvalitet same izrade, prilikom procesa proizvodnje bilo kog poluprovodničkog uređaja stvaraju se defekti u strukturi koji dovode do naprezanje kristalne rešetke. Manje doze zračenja mogu dovesti do otpuštanja, relaksacije kristalne rešetke i smanjenja redne otpornosti a samim tim i do povećanja struje kroz uređaj, kao što se i može videti na slici 3, gde je prikazana zavisnost gustine struje u tački maksimalne snage od doze.



Sl. 3. Zavisnost J_m od primljene doze zračenja za dva nivoa osvetljenja.

Međutim, malo početno povećanje struje pri niskim nivoima osvetljenja nije primećeno i pri višem nivou osvetljenja, koji sa stanovišta korišćenja solarnih ćelija kao generatora energije ima veću ulogu.

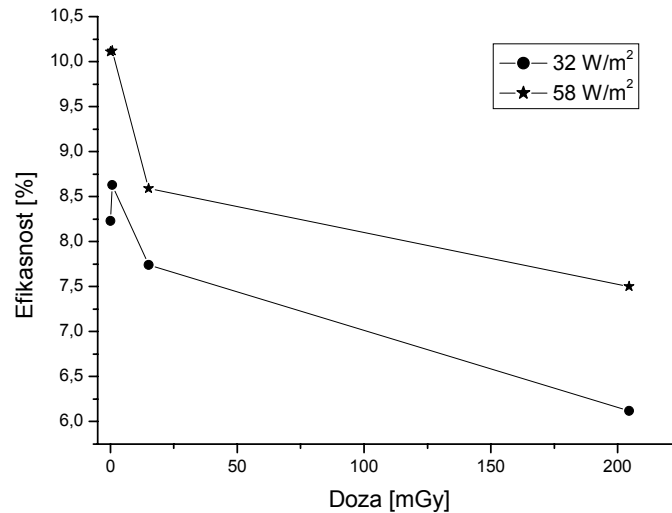
S druge strane, kao što se moglo i očekivati, sa porastom primljene doze, došlo je do smanjenja struje u tački maksimalne snage, potvrđujući teorijsku pretpostavku da povećanje redne otpornosti dovodi do gubitaka u samom uređaju. Ti gubici su se direktno manifestovali kao smanjenje maksimalne snage (sl. 4).



Sl. 4. Zavisnost P_m od primljene doze zračenja za dva nivoa osvetljenja.

Strmiji početni pad i J_m (sl. 3) i P_m (sl. 4) pri višim nivoima osvetljenja ukazuju da rekombinacioni centri stvoreni zračenjem mogu biti aktivirani bilo optički, bilo pod uticajem zračenja.

Efekat "poboljšanja" osobina posle prvog koraka ozračivanja pri niskim nivoima osvetljenja vidljiv je i kod zavisnosti maksimalne snage od doze zračenja, što može da predstavlja dodatnu temu istraživanja u cilju poboljšanja kvaliteta solarnih ćelija. Međutim, prisustvo rekombinacionih centara, smanjenje difuzione dužine i vremena života nosilaca naelektrisanja, kao rezultat starenja indukovano zračenjem, imalo je za rezultat smanjenje efikasnosti posmatranih solarnih ćelija (sl. 5).



Sl. 5. Zavisnost efikasnosti od primljene doze zračenja za dva nivoa osvetljenja.

Pri nižim dozama pad efikasnosti je izraženiji za viši nivo osvetljenja, dok je sa povećanjem primljene doze ovaj pad nešto malo veći za niži nivo osvetljenja.

5. ZAKLJUČAK

Kod svih posmatranih uzoraka primećena je degradacija osnovnih izlaznih parametara (starenje uređaja) kao posledica zračenja. Povećanje redne otpornosti je ukazalo na postojanje veće koncentracije rekombinacionih centara koji su predstavljali zamke za fotogenerisane nosioce naelektrisanja, dovodeći do smanjenja izlazne struje ćelije. Pored toga, sa povećanjem primljene doze zračenja uticaj rekombinacione komponente u ukupnoj struji uređaja je postajao dominantni, izazivajući promenu tipa transportnog procesa, što se takođe negativno odrazilo na izlazne osobine, posebno efikasnost solarnih ćelija. Prikazani rezultati su pokazali da, iako veoma pouzdani u zemaljskim uslovima, solarni sistemi su izuzetno osetljivi na zračenje, što može da ima negativan uticaj i sa finansijske strane i sa strane očuvanja čovekove okoline.

Zahvalnica

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

LITERATURA

[1] R.N. Hall, Silicon solar cells, *Solid State Electronics*, 24, 595-616 (1981)

- [2] A.L.Fahrenbruck and R.H. Bube, *Fundamentals of solar cells* (Academic Press, New York, 1983).
- [3] J.Hovel, *Semiconductors and Semimetals* (Academic Press, New York, 1975).
- [4] A. Vasic, M.Stojanovic, P. Osmokrovic & N. Stojanovic, The Influence of Ideality Factor on Fill Factor and Efficiency of Solar Cells, *Materials Science Forum*, 352, 241-246 (2000)
- [5] 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)
- [6] N. Horiushi, T. Nozaki, A. Chiba, Improvement in electrical performance of radiation-damaged silicon solar cells by annealing, *NIM A*, 443, 186-193 (2000)