

## EFIKASNOST FOTOTERMALNIH KONVERTORA SA NANOFILM-PREVLAKAMA

Jovan P. Šetrajčić i Igor J. Šetrajčić, *Univerzitet u Novom Sadu, PMF, Departman za fiziku, Vojvodina – Srbija*  
 Siniša M. Vučenočić, *Univerzitet u Banjoj Luci, PMF, Katedra za fiziku, Republika Srpska – BiH*  
 Danijela Bradić, *Univerzitet u Banjoj Luci, ETF, Katedra za fiziku, Republika Srpska – BiH*

**Sadržaj** – U radu su predstavljene solarne ćelije za fototermalnu konverziju Sunčeve energije, sa aspekta potencijalne mogućnosti povećanja njihove relativno male efikasnosti upotrebom/nanošenjem ultratankih film-prevlaka na spoljašnje površine solarne ćelije. Rezultati istraživanja ponašanja fononskog podsistema u ultratankim metalo-oksidskim filmovima pokazuju pojačanje amplitude i energije oscilovanja kristalne rešetke na graničnim površinama, a time i povećanje toplotne provodnosti.

### 1. UVOD

U ovom radu će se analizirati doprinos nanostrukturnih materijala za povećanje energetske konverzije kod fototermalnih solarnih ćelija.

Stepen korisnog dejstva ovog tipa solarne ćelije zavisi od sledećih uticaja [1–3]:

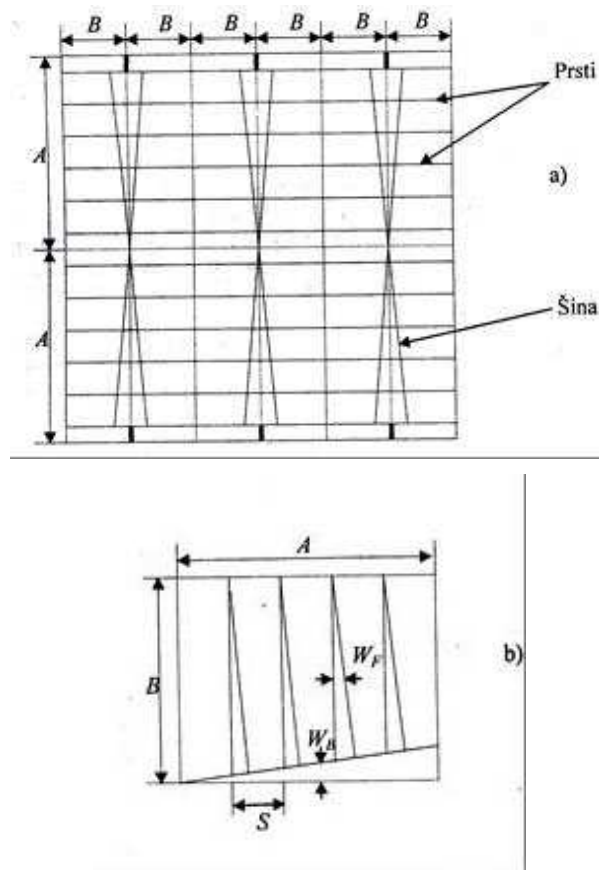
- 1) Malog koeficijenta transformacije elektromagnetne u toplotnu energiju unutar konvertorskog uređaja; ovo je najveći problem i on diktira efikasnost fototermalne konverzije ispod 30 %.
- 2) Refleksije zraka, posebno u IC oblasti, na površini ćelije; gubitak energije pre konverzije u toplotu može se smanjiti na ispod 3 % nanošenjem antirefleksionog sloja.
- 3) Debljine solarne ćelije; osetljivi deo ćelije nije dovoljno debeo da bi se apsorbovali svi fotoni, pa se jedan broj gubi, bilo tako što se apsorbuje na zadnjem kontaktu ili što prolazi kroz ćeliju; ovaj gubitak se može smanjiti ispod 1 % izborom reflektujućeg zadnjeg kontakta, koji vraća fotone u telo konvertora.

Poznata je činjenica da se odgovarajućim dizajnom može optimizovati efikasnost solarne ćelije, mi ćemo prikazati najperspektivniji model. Pored toga, naša hipoteza je da se i odgovarajućim metalo-oksidskim premazima nanoskopskih dimenzija, pogotovo sa donje strane konvertora, ova efikasnost može znatno povećati.

### 2. OPTIMIZACIJA SOLARNIH ĆELIJA

Postoji nekoliko mehanizama gubitaka snage udruženih sa gornjom kontaktnom površi solarne ćelije. Ovo su gubici prouzrokovani u serijskom otporu metalnih traka i kontaktnom otporu između ovih traka i poluprovodnika. Konačno, ovo su gubici prouzrokovani u senci provodnika kod ovih ćelija. Zato je značajna oblast dizajna solarne ćelije upravo – dizajn gornje metalne kontaktne rešetke. U ovom delu biće razmotren dizajn kontakta za kvadratne ili pravougaone solarne ćelije [3]. Za zajednički dizajn kontakta, dva tipa metalnih elemenata mogu biti poistovećeni kao što je naznačeno na sl.1a. Šine su relativno teške oblasti metalizacije direktnih kontakata kod spoljašnjih primesa u ćeliji. Prsti su

fini elementi koji ukupnu, kolektivnu struju isporučuju u šinu. Simetrične kontaktne šeme (takve kao na slici 1a) mogu biti dole prekinute jedinične ćelije (kao na slici 1b).



Sl. 1: Šema dizajna gornjeg kontakta (a) i tipična jedinična ćelija (b)

Maksimum snage izlaza ove jedinične ćelije može biti dobijen kod  $ABJB_{mpB}VB_{mpB}$ , gde je  $AB$  oblast jedinične ćelije, a  $JB_{mpB}$  i  $VB_{mpB}$  predstavljaju gustinu električne struje i napon, respektivno, u tački maksimalne snage [4]. Specifična otpornost prouzrokovana u prstima i šinama može biti izračunat korišćenjem integralnog prilaza koristeći izračunatu prouzrokovanu snagu u gornjem sloju ćelije:

$$p \equiv \frac{P_{\text{prouz}}}{P_{\text{mp}}} = \frac{\rho_s S^2 J_{\text{mp}}}{12 V_{\text{mp}}} \quad (1)$$

gde  $\rho_s$  – predstavlja slojna specifična otpornost. Normalizacija maksimuma izlaza jedinične ćelije rezultuje:

$$p_{rf} = \frac{1}{m} B^2 \rho_{smf} \frac{J_{\text{mp}} S}{V_{\text{mp}} W_f} \quad (2)$$

$$p_{rb} = \frac{1}{m} A^2 B \rho_{smb} \frac{J_{\text{mp}}}{V_{\text{mp}} W_f}$$

za frakcioni otpor prouzrokovane snage u prstima i šinama, respektivno, a  $\rho_{smf}$  i  $\rho_{smb}$  su slojni specifični otpori kontaktnog metalnog sloja za prste i šine. Vrednost faktora  $m$  je 4 ako je respektivni element linearno sužen i 3 ako je podjednake širine.  $WB_{FB}$  i  $WB_{BB}$  su prosečne širine prstiju ili šina unutar ćelije, a  $S$  je razmak (prored) između prstiju, kao što je prikazano na slici 1b.

Delimični gubici snage zbog „bacanja“ senke pomoću prstiju i šina su:

$$p_{sf} = \frac{W_F}{S}; \quad p_{sb} = \frac{W_B}{B} \quad (3)$$

Zanemarivanjem struje koja teče direktno od poluprovodnika do šine, gubitak kontakata otpora postoji jedino usled prstiju. Delimični gubitak snage usled ovog efekta je jedna generalna aproksimacija:

$$p_{cf} = \rho_{mf} \frac{J_{mp}}{V_{mp}} \frac{S}{W_F} \quad (4)$$

Optimalne dimenzije šine se mogu odrediti sumiranjem odgovarajućih jednačina i diferenciranjem po  $WB_{BB}$ . Rezultat daje da se optimalna vrednost dešava kada je gubitak usled otpornosti jednak njegovom gubitku usled senčenja:

$$(p_{rb} + p_{sb})_{\min} = 2B \sqrt{\frac{\rho_{smb}}{m} \frac{J_{mp}}{V_{mp}}} \quad (5)$$

$$W_B = AB \sqrt{\frac{\rho_{smb}}{m} \frac{J_{mp}}{V_{mp}}}$$

Ovo ukazuje na to da su gubici snage oko 13% niži kada se koristi "zašiljena" (konusna) šina ( $m = 4$ ) pre nego šina konstantne širine ( $m = 3$ ).

### 3. ULOGA ULTRATANKIH PREVLAKA

U najopštijem slučaju efikasnost solarne konverzije može se dovesti u direktnu vezu sa oscilacijama jona kristalne rešetke: što su ovi efekti izraženiji, veća je i efikasnost solarne ćelije.

Odmah se postavlja pitanje kako povećana efikasnost solarne konverzije može biti posledica prisustva ultratankih film-prevlaka, jer prevlaka u suštini predstavlja dodatnu „barijeru“ i „smetnju“ toplotnom fluksu kao posledici fononskog transfera. Verujemo da odgovor leži kao u posebnostima mehaničkog oscilovanja jona premaza. Naime, moguće je napraviti potpunu analogiju tankih elektrodnih premaza sa ultra-tankim filmovima. Na osnovu saznanja o osobenostima uloge fononskog podsistema ultratankih filmova, što je i referisano u prethodnim radovima [6–9], ovde će biti predstavljen ovaj mehanizam povećanja efikasnosti solarne konverzije.

Kvantno-mehaničko razmatranje prostiranja malih mehaničkih oscilacija, tj. fonona i termodinamičko ponašanje ultratankog filma istraženo je i referisano u našim prethodnim radovima [5–8] najbitniji rezultati se mogu rezimirati u nekoliko sledećih stavki.

1) Spektar dozvoljenih energija akustičkih fonona je diskretan i poseduje gep, što je odlika optičkih fonona i posledica postojanja vrlo ograničene debljine<sup>1</sup> film-strukture.

2) Srednje vrednosti kvadrata pomeraja i kvadrata impulsa zavise od prostornog položaja i određene su date izrazima:

$$\langle u_n^2 \rangle = \frac{\hbar}{M} \frac{1}{N_x N_y} \frac{1}{N_z + 2} \sum_{k_x, k_y} \sum_{\mu=1}^{N_z+1} \frac{1}{\omega_{k_x, k_y, \mu}} \cdot \sin^2(n_z + 1) \frac{\pi\mu}{N_z + 2} \coth \frac{\hbar\omega_{k_x, k_y, \mu}}{2\Theta}; \quad (6)$$

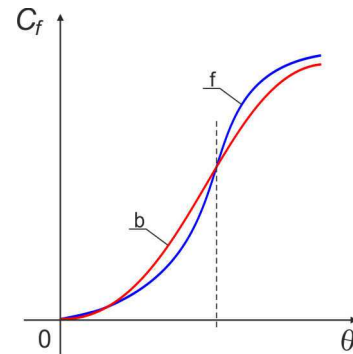
$$\langle p_n^2 \rangle = \frac{\hbar M}{N_x N_y (N_z + 2)} \sum_{k_x, k_y} \sum_{\mu=1}^{N_z+1} \omega_{k_x, k_y, \mu} \cdot \sin^2(n_z + 1) \frac{\pi\mu}{N_z + 2} \coth \frac{\hbar\omega_{k_x, k_y, \mu}}{2\Theta}, \quad (7)$$

iz kojih se vidi da ona predstavljaju izraze za stojeće talase, pri čemu se trbusi nalaze na graničnim površima filma, što ukazuje da atomi na tim ravnima imaju najveću energiju i amplitudu oscilovanja.

3) Zavisnosti redukovane specifične toplote ultratanke [7,8]:

$$C_f = \frac{3}{2\pi} \frac{\Delta^2}{E_0^2} \left[ \frac{\Delta}{\theta} (e^{\Delta/\theta} - 1) + 3Z_1(\Delta/\theta) + 6 \frac{\theta}{\Delta} Z_2(\Delta/\theta) + 6 \left( \frac{\theta}{\Delta} \right)^2 Z_3(\Delta/\theta) \right], \quad (8)$$

(gde je  $\theta = k_B T$ ) i balk film-strukture od temperature poseduju dva preseka (sl. 2) i da je na višim temperaturama (sobnim i nešto iznad njih):  $C_f > C_b$ .



Sl. 2: Temperatursko ponašanje toplotne kapacitivnosti balk (b) i film-strukture (f)

Ovo pokazuje da su ultratanki filmovi u toj temperaturnoj oblasti bolji toplotni provodnici.

Nadalje, ovo nam daje pravo da zaključimo da bi fototermaalni konvertori imali veći stepen iskorišćenja ukoliko bi sa donje strane bili „presvučeni“ nekim nanoslojnim metal-oksidsnim materijalom, jer bi efikasnije provodili/odvodili na kolektorima izdvojenu toplotu. Ovo je u skladu sa rezultatima prikazanim u radovima [9–11].

### 4. ZAKLJUČAK

U fononskom podsistemu ultratankih filmova, odgovorom za mehaničke osobine, dolazi do pojave pojačanog oscilovanja i formiranja stojećih talasa. Usled pojačanja fononskog uticaja za očekivati je i njihovo pozitivno

<sup>1</sup> Ovaj efekat u literaturi poznat je kao boks kvantizacija ili efekat dimenzionog kvantovanja

delovanje na veličinu jon-fonon interakcije, jer znatniji deo mehaničke energije ide na ovo povećanje. Usled toga možemo zaključiti da bi odgovor na mehanizam bolje efikasnosti toplotnog transporta mogao da bude u pozitivnom uticaju vibracija kristalne rešetke metalo-oksidnih prevlaka donjeg dela solarnog fototermalnog konvertora.

Na taj način fototermalni konvertorski sklop ima perspektivu da efikasnost postojećih solarnih ćelija – adekvatnom upotrebom gornjih i donjih nanoskopskih prevlaka, poveća i preko 50 %. Ovaj rezultat treba shvatiti samo uslovno, više kvalitativno nego kvantitativno, jer se bazira na proceni povećanja fundamentalne termodinamičke karakteristike – specifične toplote film-struktura i činjenice da se toplotni transfer opisuje istom karakteristikom. Ovde nisu uzeti u obzir, odnosno – zanemareni su, gubici toplote usled refleksije toplotnog fluksa na granici spoja kolektor-prevlaka, a i eksperimentalnih saznanja iz citirane literature. Pravilan rezultat usledio bi tek nakon sprovedenih sopstvenih eksperimentalnih istraživanja.

### Zahvalnica

Istraživanja čiji su rezultati ovde prezentovani, finansijski su pomognuta od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije (ON-171039 i TR-34019), te od Ministarstva nauke i tehnološkog razvoja Republike Srpske (19/6-020/961-23/14), kao i Sekretarijata za nauku i tehnološki razvoj APV (114-451-2048).

### 5. LITERATURA

- [1] J.-M. Tarascon, M. Armand, *Nature* 414 (2001) 359-367.
- [2] P.L. Taberna, S. Mitra, P. Poizot, P. Simon & J.-M. Tarascon, *Nature Materials* 5 (2006) 567-573.
- [3] S. Pejovnik, R. Dominko, M. Bele, M. Gaberscek and J. Jamnik, *Journal of Power Sources* 184/2 (2008) 593-597.
- [4] T. Pavlović, B. Čabrić: *Fizika i tehnika solarne energetike, Građevinska knjiga*, Beograd 2007.
- [5] J.P. Šetrajčić, V.M. Zorić, S.M. Vučenović, D.Lj. Mirjanić, V.D. Sajfert, S.K. Jaćimovski and D.I. Ilić, *Materials Science Forum* 555 (2007) 291-296.
- [6] J.P. Šetrajčić, D.Lj. Mirjanić, S.M. Vučenović, D.I. Ilić, B. Markoski, S.K. Jaćimovski, V.D. Sajfert and V.M. Zorić, *Acta Phys. Pol. A* 115 (2009) 778-782.
- [7] S.K. Jaćimovski, J.P. Šetrajčić, V.M. Zorić and D.I. Raković, *Tehnika – Novi materijali* 20/4 (2011) 533-538.
- [8] J.P. Šetrajčić, V.M. Zorić, N.V. Delić, D.Lj. Mirjanić and S.K. Jaćimovski, Phonon Participation in Thermodynamics and Superconductive Properties of Thin Ceramic Films, Chapter 15, pp. 317-348, In „Thermodynamics”, Ed.M.Tadashi, ISBN: 978-953-307-544-0, InTech, Vienna 2011.
- [9] J. Hong, Ch. Wang, U. Kasavajjula, *Journal of Power Sources* 162 (2006) 1289–1296.
- [10] Yoon Seok Jung, Andrew S. Cavanagh, Anne C. Dillon, Markus D. Groner, Steven M. George, and Se-Hee Leea, *Journal of The Electrochemical Society* 157/1 (2010) A75-A81.
- [11] J. A. Duffie, W. A. Beckman, *Solar Engineering of Thermal Processes*, J. Wiley & Sons, New York 2013.

**Abstract** – In this paper are presented the solar cells for photothermal conversion of solar energy, from the point of view of potential possibility of increasing their relatively low efficiency by using/laying ultrathin coatings on external surfaces of solar cell. The results of research of the behaviour of phonon sub-system in ultrathin metal-oxide films have shown an increase in amplitude and energy of oscillation of crystal lattice on border surfaces, and consequently an increase in thermal conductivity.

### EFFICIENCY OF PHOTO-THERMAL CONVERTORS WITH NANOFILM COATINGS

Jovan P. Šetrajčić, Igor J. Šetrajčić,  
Siniša M. Vučenović, Danijela Bradić