

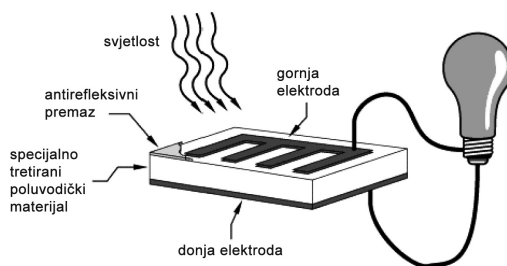
# Fotonaponske ćelije na temelju listova fleksibilnog grafena

Kristijan Velebit<sup>1</sup>

U prvom broju Matematičko-fizičkog lista (1/249) školske godine 2012./2013. u rubrici "Iz svijeta znanosti" objavljen je kratak članak na temu "Prozirne solarne ćelije", koji izvještava o izradi prozirne solarne ćelije bazirane na polimeru kao aktivnom materijalu, rad istraživačkog tima s University of California u SAD-u [1]. Nedavno su znanstvenici s prestižnog Massachusetts Institute of Technology (MIT) proizveli novu vrstu fotonaponske ćelije na temelju listova fleksibilnog grafena prevučenog slojem nanožica [2]. Vodeću ulogu među njima imao je tim predvođen dr. Silvijom Gradečak<sup>2</sup>, bivšom studenticom fizike na Prirodoslovno-matematičkom fakultetu u Zagrebu.

## Što su solarne ćelije

Solarne ćelije su fotonaponske ćelije koje pretvaraju upadno elektromagnetsko zračenje u elektricitet, pri čemu su solarne ćelije, kako im i ime kaže, predviđene i projektirane za najveću učinkovitost pri obasjavanju sunčevom svjetlosti. S obzirom da Sunce obasjava površinu Zemlje snagom od približno 1000 W po kvadratnom metru, očigledna je korist tehnologije pretvorbe sunčevog zračenja u elektricitet. Fotonaponske ćelije se upotrebljavaju kao izvor električne energije na satelitima čak od 1958. godine, ali razvojem tehnologije njihove proizvodnje, pojavljivale su se i nove mogućnosti upotrebe.



Slika 1. Slika (preuzeta s

<http://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2002/solarcells/>)  
ilustrira osnove strukture solarne ćelije. Poluvodički materijal je posebno tretiran tako da je na jednoj strani pozitivno nabijen, a na drugoj negativno. Svjetlost koja pada na njega se apsorbira i izbija elektrone, te se strujni krug zatvara pomoću gornje i donje elektrode.

<sup>1</sup> Autor je sistematičar u Laboratoriju za fiziku transportnih svojstava, Instituta za fiziku u Zagrebu; e-pošta: kvelebit@ifs.hr

<sup>2</sup> Silvija Gradečak je izvanredna profesorica na Department of Materials Science and Engineering (DMSE), Massachusetts Institute of Technology (SAD), e-pošta: gradecak@mit.edu; (<http://web.mit.edu/gradeckgroup>)

Fotonaponske ćelije izrađuju se od posebnih materijala, trenutno je pretežito riječ o siliciju. Kad svjetlost padne na površinu silicija, dio nje se apsorbira u ovom poluvodičkom materijalu pri čemu se stvaraju parovi elektrona i šupljina koji se mogu gibati u materijalu (slika 1). Frekventni pojas svjetla koji će biti apsorbiran je određen fizikalnim svojstvima silicija. Da bi se u poluvodiču apsorbirala upadna svjetlost i oslobodio elektron, potrebno je upadno zračenje određene energije. Za apsorpciju u siliciju potrebna je energija od 1.1 eV. Ako je energija zračenja manja od potrebne energije, ona neće biti apsorbirana u materijalu, već će zračenje proći kroz materijal kao da je proziran. Ako je energija zračenja veća od potrebne, dešava se isto, osim ako je ona višekratnik potrebne energije, pa se može stvoriti više parova elektrona i šupljina, ali ovaj efekt nije značajan.

Nakon što imamo parove slobodnih elektrona i šupljina, potrebno je elektrone dovesti na jednu elektrodu, a šupljine na drugu, zatvarajući time strujni krug. U tu svrhu dno silicijske fotonaponske ćelije prekriveno je metalom koji služi kao jedna elektroda. Druga elektroda treba se nalaziti povrh fotonaponske ćelije, ali time se zaklanja put upadnom zračenju. Stoga se ovdje stavlja metalna mreža (slika 1) kojom se postiže kompromis između gubitaka zbog slabe provodnosti silicija na dijelovima ćelije gdje nema metala i gubitaka zbog zaklanjanja upadnog zračenja tamo gdje ima metala. Ta mreža ne smije biti previše tanka jer bi onda njen otpor bio prevelik, te bismo imali novi izvor gubitaka. Upotrebom prozirnih elektroda na vrhu fotonaponske ćelije može se izbjeći problem zaklanjanja upadnog zračenja, ali i taj pristup ima svojih nedostataka.

---

## Grafenske solarne ćelije

---

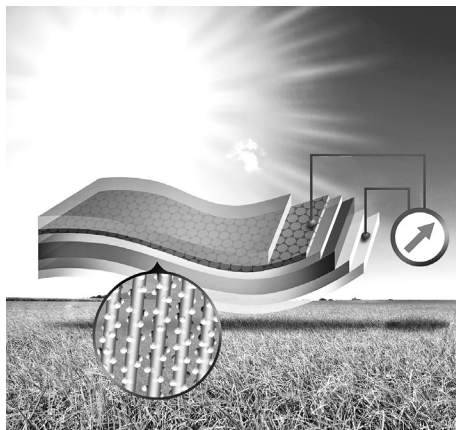
Većina današnjih solarnih ćelija se izrađuje od silicija iznimno visoke čistoće, što njihovu cijenu održava visokom. Mnogi znanstvenici stoga istražuju alternative siliciju, kao što nanostrukturirane ili hibridne solarne ćelije, u kojima se oksid indija i kositra (engl. "Indium Tin Oxide", ITO) koristi kao prozirna elektroda. Mada je ITO trenutno najbolje dostupno rješenje za prozirne elektrode, ni on nije bez nedostataka, prvenstveno zbog visoke cijene indija koji se koristi u tom spoju.

Alternativa siliciju i ITO-u ponuđena je u nedavno objavljenom članku grupe znanstvenika s MIT-a u obliku tankih grafenskih elektroda [2]. Grafenske elektrode imaju niz prednosti pred silicijskim i ITO elektrodama, kao što su fleksibilnost, mala težina, mehanička čvrstoća, kemijska stabilnost, te činjenica da se izrađuju od sveprisutnog i, u odnosu na silicij i indij, puno jeftinijeg ugljika. Za korištenje grafena u hibridnim solarnim ćelijama, potrebno je kombinirati svojstva grafena i poluvodičkih nanožica, čime se dobiva mogućnost razvoja nanostrukturiranih solarnih ćelija visoke prozirnosti i drugih, već spomenutih, svojstava.

Dosadašnje metode rasta nanožica na raznim vodljivim supstratima kao što su aluminijska folija ili ITO ne omogućuju rast jednodimenzionalnih poluvodičkih nanostrukture na grafenu bez mijenjanja njegovih električnih i strukturnih svojstava. Znanstvenici s MIT-a ovaj problem su riješili korištenjem hidrotermalne metode za rast visoko kvalitetnih nanožica cinkovog oksida (ZnO) na grafenu. Ključan korak u njihovoj metodi je depozicija jednolikog, visoko kvalitetnog, početnog sloja cinkovog oksida. Pri tome problem predstavlja to što ZnO slabo moči grafen, pa se umjesto jednolikog sloja stvaraju ZnO otoci na površini grafena. Ovaj efekt nepovoljno utječe na daljnji rast ZnO nanožica, pošto on jako ovisi o početnom ZnO sloju. Ovo rezultira vrlo nejednolikom raspodjelom nanožica, kao i slabom povezanosti grafena s nanožicama. Za rješenje tog

problema bilo je potrebno razviti nedestruktivnu metodu modificiranja površine grafena kako bi se omogućila jednolika raspodjela ZnO početnog sloja. U tu svrhu površina grafena je modificirana nanošenjem sloja vodljivog polimera (PEDOT:PEG(PC) ili RG-1200), koji bolje moči površinu grafena, te omogućuje bolju kemijsku kompatibilnost površine grafena s početnim ZnO slojem, kao i prijenos naboja između cinkovog oksida i grafena.

Nakon uspješnog kombiniranja svojstava grafena i početnog ZnO sloja slijedi rast ZnO nanožica u strogo kontroliranim uvjetima. Na tako pripremljenu podlogu se nanose materijali koji reagiraju na svjetlost, kao što su kvantne točke olovo(II)-sulfida (PbS) ili posebni polimer kao što je P3HT. Ti materijali ulaze duboko u mrežu ZnO nanožica, što je nužno za učinkovito razdvajanje naboja (slika 2). Za zatvaranje strujnog kruga, povrhu tog sloja potrebno je staviti drugu elektrodu, za što su znanstvenici s MIT-a koristili iznimno tanki sloj molibdenog trioksida i zlata [2].



*Slika 2. Slika (ljubaznošću istraživačkog tima dr. S. Gradečak) ilustrira slojevitú strukturu solarne ćelije. Počevši od vrha, na slici su prikazani: gornji zaštitni sloj, fleksibilni sloj grafena (gornja elektroda), sloj polimera, sloj nanožica cinkovog oksida s kvantnim točkama olovo(II)-sulfida (čija je nanostruktura prikazana uvećano), sloj molibdenovog trioksida, te zlatna elektroda na dnu.*

Znanstvenici su pokazali da uređaji temeljeni na grafenu imaju učinkovitost usporedivu s uređajima temeljenim na ITO-u. U slučaju upotrebe PbS kvantnih točaka na grafenskim solarnim ćelijama, ukupna učinkovitost pretvorbe snage je 4.2%. To je manje od učinkovitosti silicijevih ćelija opće namjene (oko 14%), ali još uvijek konkurentno za specijalizirane aplikacije. Prednost grafenskih solarnih ćelija je to što se, za razliku od visokih temperatura koje zahtijeva rast ostalih poluvodiča te obrada silicijevih ćelija, proces pri kojem se cinkov oksid taloži na grafenskoj elektrodi može obaviti u cijelosti na temperaturama ispod 175 °C.

Prema riječima autora, za proizvodni proces grafenskih solarnih ćelija koji je demonstriran u njihovom radu, veličina nije ograničavajući čimbenik, a grafen se sintezom kroz proces kemijske depozicije para može nanijeti na razne površine kao što su staklo ili plastika. To omogućava postavljanje grafenskih solarnih ćelija, ne samo na krovove objekata, nego i na površine kao što su prozori. Na modernim poslovnim strukturama koje se obično oblažu staklenim panelima, većina vanjske površine objekta bi tako bila prenamijenjena u funkciju proizvodnje električne energije, a da pri tom ne bi izgubili ništa od prvotne funkcionalnosti.

László Forró, profesor na École Polytechnique Fédérale de Lausanne, u Švicarskoj, koji nije bio uključen u ovo istraživanje, rekao je kako je ideja o korištenju grafena kao prozirne elektrode u solarnim ćelijama već “bila u zraku”, no još nije bila realizirana. “Ovo djelo je pravi proboj. Odličan rad u svakom pogledu,” ističe Forró. On i upozorava da “je još dug put do realnih aplikacija i da postoje mnogi problemi koji trebaju biti riješeni”, ali dodaje da “kvaliteta istraživačkog tima oko ovog projekta... garantira uspjeh”.

## Literatura

---

- [1] CHUN-CHAO CHEN, LETIAN DOU, RUI ZHU, CHOONG-HEUI CHUNG, TZE-BIN SONG, YUE BING ZHENG, STEVE HAWKS, GANG LI, PAUL S. WEISS, AND YANG YANG, *Visibly Transparent Polymer Solar Cells Produced by Solution Processing*, ACS Nano 6, 7185-7190 (2012).
- [2] HYESUNG PARK, SEHOON CHANG, JOEL JEAN, JAYCE J. CHENG, PAULO T. ARAUJO, MINGSHENG WANG, MOUNGI G. BAWENDI, MILDRED S. DRESSSELHAUS, VLADIMIR BULOVIĆ, JING KONG, SILVIJA GRADEČAK, *Graphene Cathode-Based ZnO Nanowire Hybrid Solar Cells*, Nano Lett. 13, 233–239 (2013).