

ANALIZA RAZVOJA SEKTORA FOTONAPONSKIH TEHNOLOGIJA U SVETU ANALYZING THE DEVELOPMENT OF THE PHOTOVOLTAIC TECHNOLOGIES IN THE WORLD

Rastko Aćimović, Branka Nakomčić-Smaragdakis, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad*

Oblast – ENERGETSKE TEHNOLOGIJE

Kratak sadržaj - U radu su dati opis i podela fotonaponskih tehnologija prema generacijama solarnih ćelija. Takođe, analiziran je istorijski razvoj fotonaponskih tehnologija sa aspekta korišćenih materijala, efikasnosti i cene. Na kraju, dat je prikaz zastupljenosti ovih tehnologija na maloj i velikoj skali.

Ključne reči: *Obnovljivi izvori energije, fotonaponske tehnologije, električna energija, životna sredina.*

Abstract – *The article gives the description and partition of photovoltaic technologies by solar cell generations. Furthermore, the historical development of these technologies is analysed from three aspects: used materials, efficiency and price. Ultimately, a review of how photovoltaics is widespread on large and small scale is given.*

Keywords: *Renewable energy sources, photovoltaic technologies, electricity, environment.*

1. UVOD

U potrošačkom društvu, gde se akcenat stavlja na komfor koji zahteva sve veće količine energije, nekonvencionalni izvori energije više ne predstavljaju održivo rešenje za podmirivanje energetske potrebe. Kao jedini smislen korak u daljoj energetskej revoluciji nameće se prelazak na obnovljive izvore energije, prvenstveno na fotonaponske tehnologije koje koriste fotonaponske ćelije i princip fotonaponskog efekta za generisanje električne energije iz svetlosti.

2. GENERACIJE FOTONAPONSKIH ĆELIJA

Fotonaponske ćelije moguće je podeliti u 4 generacije:

Fotonaponske ćelije prve generacije (Slika 1) predstavljaju ćelije sačinjene od najrasprostranjenijeg poluprovodničkog materijala- silicijuma, i to u jednom od dva oblika: monokristalnog silicijuma, gde su ćelije sačinjene od jedinstvenog kristala i polikristalnog silicijuma, gde su ćelije sačinjene od više kristala [1].

Fotonaponske ćelije druge generacije (Slika 2) čine poluprovodnički materijali koji se nanose u tankom filmu [1] što ove ćelije čini tanjima u odnosu na ćelije prve generacije. Zahvaljujući tome, za proizvodnju ćelija druge generacije koristi se manje sirovina nego kod monokristalnih i polikristalnih fotonaponskih ćelija.

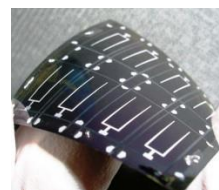
NAPOMENA:

Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je bila prof. dr Branka Nakomčić-Smaragdakis.

U fotonaponske ćelije druge generacije spadaju: amorfno-silicijumske, galijum-arsenid, kadmijum-sulfid/bakar-sulfid, kadmijum-telurid i bakar-indijum-diselenid/bakar-indijum-galijum-diselenid fotonaponske ćelije.



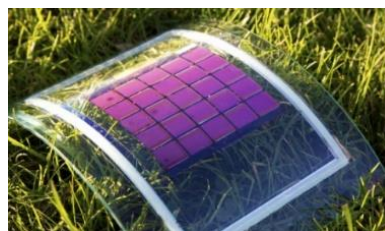
Slika 1: *Primer fotonaponske ćelije prve generacije - polikristalna ćelija [2]*



Slika 2: *Primer fotonaponske ćelije druge generacije - CIS/CIGS ćelija [3]*

Fotonaponske ćelije treće generacije (Slika 3) proizvode se kombinovanjem polimera, organskih fotonaponskih ćelija i nanokristala. Prag efikasnosti kojim teže ove solarne ćelije naziva se SQ (*Shockley-Queisser*) granica, iznosi 33% i predstavlja maksimalnu teorijsku efikasnost koju solarna ćelija sa jednim p-n slojem može da dostigne [4].

Fotonaponske ćelije sa koncentradorima, na bazi polimera, na bazi nanokristala i fotosenzitivne pigmentne fotonaponske ćelije spadaju u ćelije treće generacije.



Slika 3: *Primer fotonaponske ćelije treće generacije - polimerna ćelija [5]*

Fotonaponske ćelije četvrte generacije još uvek ne postoje, ali se prognozira da će biti fokusirane na izazove kao što su povećanje faktora apsorpcije Sunčeve svetlosti, poboljšanje transporta elektrona, iskorišćenje toplotne energije koja dospeva na površinu fotonaponskih ćelija i povećanje efikasnosti korišćenjem višestrukih slojeva sa kvantnim tačkama.

3. ISTORIJSKI RAZVOJ FOTONAPONSKIH TEHNOLOGIJA

Istorijski razvoj fotonaponskih tehnologija posmatran je sa tri različita aspekta: materijala korišćenih prilikom proizvodnje fotonaponskih ćelija, efikasnosti fotonaponskih ćelija i cene.

Silicijum je poluprovodnički materijal koji se najviše koristi u fotonaponskim tehnologijama. Razlozi za to su što je jeftin i široko rasprostranjen, nije toksičan, ima povoljna optička, termička i elektronska svojstva, visok stepen apsorpcije svetlosti i otporan je na fizička opterećenja.

Galijum - arsenid (GaAs) je siv materijal čije čestice formiraju kubnu kristalnu rešetku. Osim visoke otpornosti na toplotu i velike pokretljivosti elektrona, GaAs karakteriše visok koeficijent apsorpcije, otpornost na degradaciju usled radijacije kao i činjenica da je njegovu već visoku efikasnost moguće poboljšati uz pomoć specifičnih antirefleksivnih slojeva [6].

Kadmijum sulfid/ bakar sulfid (CdS/Cu₂S) CdS i Cu₂S su poluprovodnički materijali kristalne strukture. Ono što CdS/Cu₂S čini adekvatnim za proizvodnju solarnih ćelija jeste pogodna širina zabranjene zone CdS od 2,42 eV i povećanje provodljivosti pri izlaganju zračenju.

Kadmijum- telurid (CdTe) je materijal koji je pogodan za proizvodnju fotonaponskih ćelija zbog širine zabranjene zone koja iznosi 1,4 eV i to je u teoriji optimalna vrednost za iskorišćenje spektra Sunčevih zraka [7], a pored toga karakterišu ga i visoka stopa optičke apsorpcije i hemijska stabilnost. Međutim, i pored navedenih povoljnih karakteristika, CdTe fotonaponske ćelije imaju i loših strana među kojima se najviše ističe niska efikasnost. Ovaj nedostatak moguće je rešiti formiranjem tzv. "tandem ćelija" čime se iskorištava širi spektar Sunčevog zračenja što se postiže korišćenjem materijala različite zabranjene zone koje se „nadovezuju“ jedna na drugu čime se ukupna zabranjena zona solarne ćelije proširuje.

Bakar-indijum-diselenid/bakar-indijum-galijum-diselenid (CIS/CIGS). CIS je materijal koji nije naročito pogodan za proizvodnju fotonaponskih ćelija zbog male zabranjene zone od tek 1 eV, ali se dodavanjem galijuma širina zabranjene zone povećava na oko 1,7 eV čime se dobija CIGS koji je znatno povoljniji [8]. Dobijeni CIGS ima visok koeficijent apsorpcije i sposoban je da efikasno apsorbuje Sunčeve zrake pri debljini filma od 1 μm što je 100 puta tanje od klasičnih silicijumskih solarnih ćelija. Zahvaljujući tankoj debljini u kojoj se materijal nanosi na površinu, CIS/CIGS omogućava produkciju fleksibilnih solarnih ćelija.

Organski nanomaterijali jesu materijali čije su čestice nanometarskih dimenzija a koji sadrže ugljenik u formi fulerena. Fuleren predstavlja treću alotropsku modifikaciju ugljenika gde atomi formiraju zatvoren kavez [9]. Struktura fulerena može imati različit broj atoma ali najčešće je kavez sačinjen od 60 atoma i formira strukturu po imenu bakminsterfuleren (C₆₀). Zahvaljujući niskoj energiji reorganizacije, širini zabranjene zone od 2,3 eV i visokoj pokretljivosti elektrona fulereni predstavljaju gotovo idealan materijal za primenu u sektoru fotonaponskih tehnologija [10].

Energetska efikasnost fotonaponskih ćelija se drastično menjala od pojave prve fotonaponske ćelije pa do danas, što je i prikazano Tabelama 1 i 2.

Tabela 1: *Bitni pomaci u razvoju efikasnosti sektora fotonaponskih tehnologija u periodu 1954 - 2013 [11]*

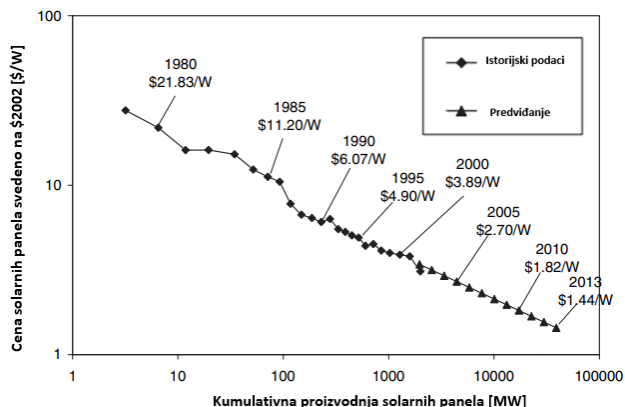
Godina	Događaj
1954.	„Bell Labs“ razvija prvu praktičnu silicijumsku solarnu ćeliju sa efikasnošću od 6%
1955.	„Hoffman electronics“ proizvodi i prodaje solarne ćelije sa efikasnošću od 2%
1957.	„Hoffman electronics“ podiže efikasnost na 8%
1958.	„Hoffman electronics“ nastavlja razvoj i realizuje solarne ćelije sa 9% efikasnosti
1959.	„Hoffman electronics“ postiže efikasnost od 10%
1960.	„Hoffman electronics“ postavlja novi rekord sa efikasnošću od 14%
1972.	„IBM“ postiže efikasnost od 18-20% koristeći AlGaAs/GaAs solarne ćelije
1976.	„RCA“ objavljuje otkriće amorfnog-silicijumskih solarnih ćelija sa stepenom efikasnosti od 1,1%
1978.	L. Fraas i R. Knechtli postavljaju teorijske osnove za solarne ćelije sa koncentrorima koje bi pri koncentraciji od 300 sunaca postigle efikasnost od 40%
1985.	„University of New South Wales (UNSW)“ u laboratoriji postiže efikasnost od 20% koristeći silicijumske solarne ćelije
1990.	L. Fraas, J. Gee i K. Emery postavljaju teorijske osnove za GaAs/GaSb solarne ćelije sa koncentrorima efikasnosti 35%
1992.	Kuryla, Fraas i Bigger su napravili solarnu ćeliju sa koncentrorima sa stopom efikasnosti od 25% koristeći GaAs/GaSb
1994.	„NREL“ razvija GaInP/GaAs koncentratorsku solarnu ćeliju koja je pri koncentraciji od 180 sunaca postala prva solarna ćelija koja je premašila efikasnost od 30%
2004.	K. Araki i dr. realizuju sopstvenu verziju koncentratorske solarne ćelije sa stopom efikasnosti od 28%
2004.	„SunPower“ počinje masovnu proizvodnju solarnih ćelija sa efikasnošću od 20%
2006.	L. Fraas i dr. demonstriraju visokokcentratorsku solarnu ćeliju sa efikasnošću od 33%
2013.	„Amonix“ demonstrira visokokcentratorsku solarnu ćeliju sa efikasnošću od 35,9%

Tabela 2: *Bitni pomaci u razvoju efikasnosti sektora fotonaponskih tehnologija u periodu 2016 - danas*

Godina	Događaj
2016.	„UNSW“ postiže efikasnost od 34,5% koristeći solarne ćelije bez koncentratora [12]
2016.	„First Solar“ postiže 22,1% efikasnosti koristeći CdTe solarne ćelije [13]
2018.	Postavljen novi rekord od 29,1% efikasnosti za GaAs solarne ćelije [14]
2019.	Postignuta je efikasnost od 47,1% koristeći solarne ćelije sa koncentrorima [15]
2020.	Korišćenjem tandem solarnih ćelija postignuta je efikasnost od 26% [16]
2021.	Postignuta je efikasnost od 26% korišćenjem dvostrano apsorpcionih solarnih ćelija [17]

Cene fotonaponskih tehnologija zavise od mnogih faktora: razvoj tehnologije i korišćenje novih materijala, niži troškovi proizvodnje, subvencije i zakonodavstvo a među njima najviše i porast potražnje. Prema Swanson-

ovom zakonu (slika 4) [18], svaki put kada se proizvodnja i prodaja solarnih panela udvostruči njihova cena padne za 20%. Svi prethodno navedeni uzroci uticali su na to da od sedamdesetih godina prošlog veka cene fotonaponskih panela padnu za oko 97%.



Slika 4: Swanson zakon korišćen za prikaz istorijskih podataka i predviđanje budućeg stanja [18]

4. ZASTUPLJENOST FOTONAPONSKIH TEHNOLOGIJA NA VELIKOJ I MALOJ SKALI

Fotonaponske tehnologije na velikoj skali postaju sve više zastupljene zbog povećanja efikasnosti, te pada cene materijala i investicionih troškova. Danas fotonaponske elektrane instalisane snage više hiljada MW nisu neuobičajena pojava a trenutno najveća postrojenja ovog tipa data su tabelom 3:

Tabela 3: Najveće fotonaponske elektrane, zaključno sa prvom polovinom 2021. godine [19]

Ime	Lokacija	Snaga [MW]
Bhadla Solar Park	Indija	2.245
Huanghe Hainan Solar Park	Kina	2.200
Pavagada Solar Park	Indija	2.050
Benban Solar Park	Egipat	1.650
Tengger Desert Solar Park	Kina	1.547
Noor Abu Dhabi	UAE	1.177
Mohammed bin Rashid Al Maktoum Solar Park	UAE	1.013
Kurnool Ultra Mega Solar Park	Indija	1.000
Datong Solar Power Top Runner Base	Kina	1.000
NP Kunta	Indija	978
Longyangxia Dam Solar Park	Kina	850
Villanueva Solar Park	Meksiko	828
Copper Mountain Solar Facility	SAD	802
Mount Signal Solar	SAD	794
Rewa Ultra Mega Solar	Indija	750

Fotonaponske tehnologije na maloj skali su, zahvaljujući kombinaciji porasta cene električne energije i gore navedenih razloga koji su imali uticaja i na širenje ovih tehnologija na velikoj skali, postale svakodnevica kako u velikom delu razvijenih država, tako i u državama koje su trenutno u razvoju.

Generalno govoreći, fotonaponske elektrane na maloj skali moguće je podeliti na 3 grupe i to: elektrane na zemlji (Slika 5), elektrane montirane na objekat (Slika 6) i integrisane elektrane (Slika 7).

Fotonaponske elektrane na zemlji su najmanje zastupljene od svih elektrana na maloj skali što predstavlja suštu suprotnost elektranama na velikoj skali koje su u najvećem delu slučajeva upravo na zemlji. Razlog tome je potreba da se što više uštedi na prostoru.



Slika 5: Fotonaponska elektrana na zemlji

Fotonaponske elektrane montirane na objekat su najprisutniji oblik elektrana na maloj skali, bilo da su u pitanju domaćinstva, poslovni objekti ili industrijski objekti. Najviše ih ima u zemljama sa visokim životnim standardom gde ovakvi projekti ne predstavljaju veliku investiciju a izuzetno su isplativi zbog visoke cene električne energije, konkretno u SAD, Japanu i Nemačkoj.



Slika 6: Fotonaponska elektrana montirana na objekat
Integrisane fotonaponske elektrane su najsavremeniji način korišćenja fotonaponskih panela na maloj skali. Za razliku od elektrana koje se pomoću konstrukcije montiraju na tlo, ravan krov i kosi krov, integrisane elektrane su sastavni deo objekta i kao takve se instaliraju u toku izgradnje ili prilikom rekonstrukcije objekta. Date tehnologije su trenutno najmanje razvijene te su samim tim i najmanje zastupljen tip fotonaponskih elektrana.



Slika 7: Integrisana fotonaponska elektrana [20]

5. ZAKLJUČAK

Od pojave prve solarne ćelije pa do danas, fotonaponske tehnologije su unapređene na brojne načine: efikasnost je povećana višestruko, polje primenljivosti je prošireno,

pronađeni su mnogi novi materijali a investicioni troškovi nastavljaju da opadaju. Mogućnosti korišćenja na velikoj skali u neplodnim pustarama i kamenitim područjima kao i na maloj skali u urbanim delovima naselja čine ove tehnologije jednim od najsvestranijih obnovljivih izvora. Svi gore navedeni razlozi jasno pokazuju da su fotonaponske tehnologije jedan od glavnih alata koji će, ukoliko se pravilno budu koristili, doprineti održivijoj i zelenijoj budućnosti kojom sve više težimo.

6. LITERATURA

[1]Dragana Štrbac. 2020/2021. Savremeni materijali u energetici.

[2]<https://www.tindosolar.com.au/learn-more/poly-vs-mono-crystalline/> pristupljeno 17.5.2022.

[3]S. Ishizuka, A. Yamada, K. Matsubara, P. Fons, K. Sakurai, S. Niki. 2010. Development of high-efficiency flexible Cu(In,Ga)Se₂ solar cells: A study of alkali doping effects on CIS, CIGS, and CGS using alkali-silicate glass thin layers. *Current applied physics* (10): 154-156.

[4]S. Ruhle, 2016. Tabulated values of the Shockley-Queisser limit for single junction solar cells. *Solar Energy* 130 (2016): 139-147

[5]<https://www.pv-magazine.com/2018/02/23/unique-properties-of-organic-polymer-solar-cells-expected-to-open-niche-market-opportunities/> pristupljeno 16.3.2022.

[6]Yu P, Chang C.H, Chiu C.H, Yang C.S, Yu J.C, Kuo H.C, Hsu S.H, Chang Y.C, 2009. Efficiency Enhancement of GaAs Photovoltaics Employing Antireflective Indium Tin Oxide Nanocolumns. *Advanced Materials* 21 (16): 1618-1621.

[7]Bayod-Rujula A.A. 2009. Photovoltaic systems. Prensas de la Universidad de Zaragoza, Saragosa, Španija.

[8]Frydrychowicz–Jastrzębska G, Bugala A. 2016. CIS, CIGS and CIBS thin film solar cells and possibilities of their application in BIPV. *Computer Applications in Electrical Engineering* 14 (): 364-377.

[9]Erhenfreund P, Cox N, Foing B, 2006. FULLERENES AND RELATED CARBON COMPOUNDS IN INTERSTELLAR ENVIRONMENTS. In: *Natural fullerenes and related structures of elemental carbon*, ed. Rietmeijer F.J.M, ch 4, 53-69. Springer, Dordeht, Holandija.

[10]<https://www.sigmaaldrich.com/RS/en/technical-documents/technical-article/materials-science-and-engineering/microelectronics-and-nanoelectronics/fullerenes> pristupljeno 17.9.2021.

[11] [89]Fraas L.M. 2014. *Low-Cost Solar Electric Power*. Springer International Publishing, Bazel, Švajcarska.

[12]Moinudeen G. K, Ahmad F, Kumar D, Al-Douri Y, Ahmad S, 2017. *IoT Applications in Future Foreseen Guided by Engineered Nanomaterials and Printed*

Intelligence Technologies a Technology Review. International Journal of Internet of Things 6 (3): 106-148.

[13]Ojo A.A, Cranton W.M, Dharmadasa I.M, 2018. *Photovoltaic Solar Cells: Materials, Concepts and Devices*. In: *Next Generation Multilayer Graded Bandgap Solar Cells*, ed. Ojo A.A, Cranton W.M, Dharmadasa I.M, ch 2, 17-40. Springer, Dordeht, Holandija.

[14]Shubbak M.H, 2019. *Advances in solar photovoltaics: Technology review and patent trends*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 115

[15]Yamaguchi M, Dimroth F, Geisz J.F, Ekins-Daukes N.J, 2021. Multi-junction solar cells paving the way for super high-efficiency. *Journal of Applied Physics* 129 (24): 137-152.

[16]Lamanna E, Matteocci F, Calabro E, Serenelli L, Salza E, Martini L, Menchini F, Izzi M, Agresti A, Pescetelli S, Bellani S, del Rio Castillo A. E, Bonaccorso F, Tucci M, di Carlo A, 2020. Mechanically Stacked, Two-Terminal Graphene-Based Perovskite/Silicon Tandem Solar Cell with Efficiency over 26%. *Joule* 4 (1): 865-881.

[17]Richter A, Muller R, Benick J, Feldmann F, Steinhäuser B, Reichel C, Fell A, Bivour M, Hermle M, Glunz S.W, 2021. Design rules for high-efficiency both-sidescontacted silicon solar cells with balanced charge carrier transport and recombination losses. *Nature energy* 6 (4): 429-438.

[18]Swanson R.M. 2006. *A Vision for Crystalline Silicon Photovoltaics*. *Progress in Photovoltaics: Research and Application* 14 (5): 443-453.

[19]<https://www.ygsolar.com/blog/15-largest-solar-farms-world-2021-ygs-solar> pristupljeno 26.9.2021.

[20] <https://pressoffice.sunroof.se/99367-the-first-house-in-poland-with-a-completely-solar-roof-has-recently-been-completed-making-it-the-most-ecological-roof-in-the-country> pristupljeno 29.9.2021.

Kratka biografija:



Rastko Aćimović rođen je u Somboru 1997. godine. Master rad na Fakultetu tehničkih nauka iz oblasti Energetskih tehnologija je odbranio 2022. godine.

Kontakt: rastkoacimovic@gmail.com



Branka Nakomčić-Smaragdakis rođena je u Zrenjaninu. Diplomirala je na FTN-u na Mašinskom odseku, smer Termoenetika i procesna tehnika, magistrirala je na Interdisciplinarnim studijama iz Inženjerstva zaštite životne sredine. Doktorirala je na Fakultetu tehničkih nauka iz oblasti Toplotne tehnike. Oblast istraživanja i naučnog rada: Modelovanje i simulacija termoprocesnih sistema, Obnovljivi izvori energije i Upravljanje rizicima.