

Perovskitne sončne celice

Barbara Repič, Tina Skalar, Marjan Marinšek

Življenje brez elektrike si danes skoraj ni mogoče predstavljati. Zaradi našega življenjskega sloga so potrebe po njej iz dneva v dan večje. Poznamo veliko načinov pridobivanja električne energije, a še zmeraj prevladuje konvencionalna tehnologija, ki temelji na notranjem izgorevanju fosilnih goriv. Njihove zaloge se zmanjšujejo in njihova proizvodnja je zaradi izpustov toplogrednih plinov in drugih škodljivih onesnaževalcev ekološko vprašljiva. Raziskovalci zato namenjajo veliko pozornost izrabam alternativnih virov energije in energijskim pretvorbam, ki so manj obremenilne za okolje.

Med obnovljive vire energije sodi tudi Sončeva energija. Sonce oddaja cel spekter svetlobe. Del Sončeve svetlobe se odbije od ozonske plasti, ozračja, oblakov in delcev v zraku, kljub temu pa Sonce k nam prenese ogromne količine energije. V eni sami uri Sonce prenese enako količino energije, kot ga celotno človeštvo porabi v enem letu - približno 5×1.020 joulov. Vsa energija, ki jo Zemlja od Sonca sprejme v enem letu, pa je kar dvakrat večja od vseh znanih zalog premoga, nafte, zemeljskega plina in urana skupaj. Ko to združimo z dejstvom, da je Sončeva energija v bistvu neizčrpna, na voljo po vsem svetu in okoljsko neoporečna, si je težko predstavljati, zakaj tega bolje ne izkoristimo (Morton, 2006).

Sončeva energija se lahko pretvori v električno energijo na dva načina:

- S sončnimi koncentratorskimi sistemi za proizvodnjo električne energije posredno s predhodno pretvorbo v toplotno energijo. Pri teh sistemih se Sončeva svetloba koncentrira na medije, ki proizvajajo paro. Ta poganja turbino, ki v povezavi z generatorjem proizvaja električno energijo.
- S fotovoltaičnimi napravami, ki energijo svetlobe zaradi fotovoltaičnega učinka neposredno pretvorijo v električno energijo.

Sončno energijo lahko izkoriščamo tudi s sončnimi kolektorji, s katerimi grejemo vodo - sanitarno vodo in vodo za ogrevanje (Pavlin, 1996).

Splošno o sončnih celicah

Fotovoltaika je veda, ki raziskuje pretvorbo energije fotonov v elektriko. Ime je sestavljeno iz grške besede *phos*, ki pomeni svetlobo, in besede *volt*. Sončna celica ali fotovoltaična celica je električna naprava, ki Sončevo sevanje pretvori neposredno v električno energijo. Pri tem sodelujeta tako neposredno sevanje - to je sevanje, ki neovirano prodre skozi ozračje - kot tudi difuzno Sončevo sevanje - to je Sončevo sevanje, ki se razprši oziroma absorbira zaradi prašnih delcev in molekul v ozračju in neusmerjeno prispe na Zemljino površino. Princip delovanja je pri vseh sončnih celicah podoben in temelji na fotovoltaičnem učinku. To pomeni, da materiali ob osvetlitvi zaradi absorpcije fotonov

svetlobe sproščajo nosilce električnega naboja. Če so ti prosti elektroni zajeti, dobimo enosmerni električni tok oziroma električno energijo (Blakers, Zin, McIntosh, Fong, 2013). Na prvi pogled se zdi, da je Sončeva energija popolna rešitev vseh energijskih in okoljskih težav.

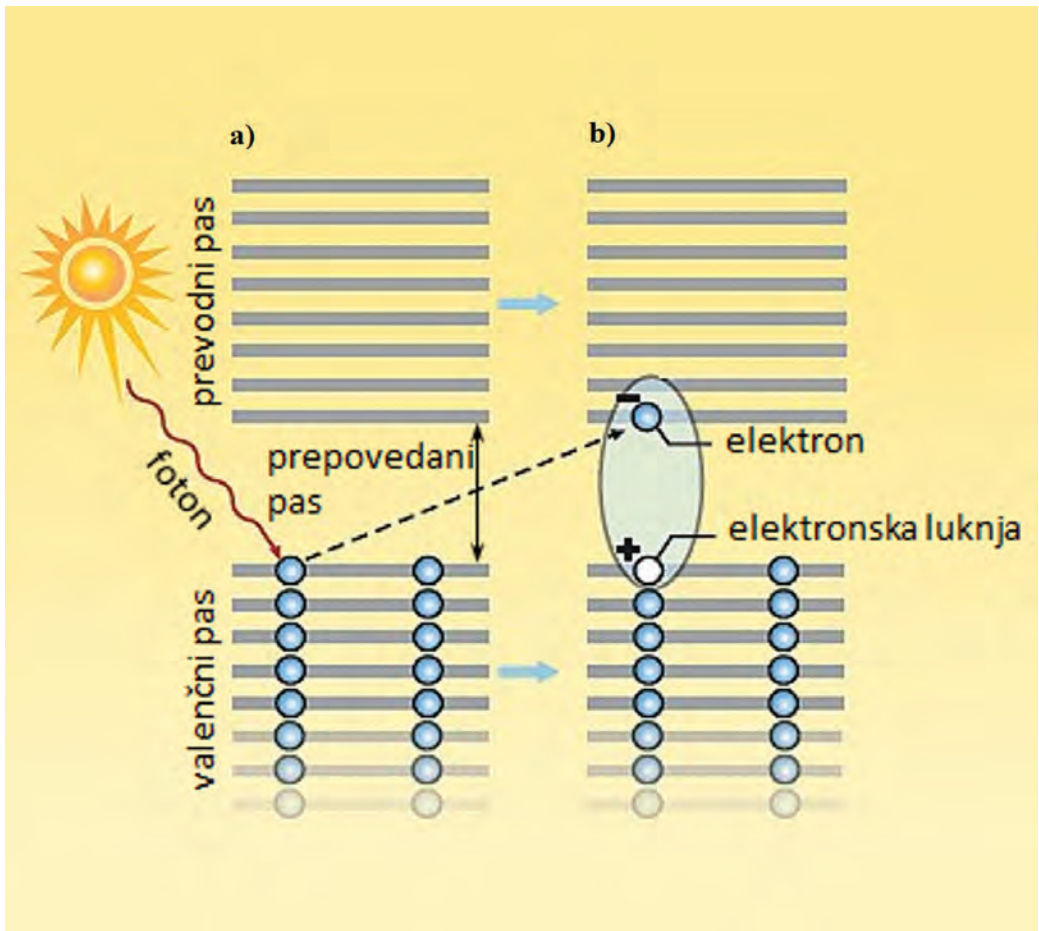
Ena od velikih prednosti uporabe sončnih celic je majhen vpliv na okolje. Edino onesnaženje, ki ga ustvarijo sončne celice, nastane med njihovo izdelavo. Druga velika prednost pa je sposobnost proizvodnje električne energije na mestih, ki niso povezana z električnim omrežjem - v manjših vaseh ali celo vesoljskih plovilih (Hasnain, Elani, Alawaji, Abaoud, Smiai, 1995). Poleg številnih prednosti pa imajo sončne celice tudi

nekaj slabosti. Glavni argument nasprotnikov sončnih celic je, da se za njihovo izdelavo porabi preveč energije. Druga slabost pa so visoki proizvodni stroški. Električna energija, proizvedena s sončnimi celicami, je namreč dražja od električne energije, pridobljene s pomočjo vetra ali iz zemeljskega plina. Poleg visokih proizvodnih stroškov je slabost sončnih celic tudi razmeroma nizka učinkovitost. Učinkovitost silicijevih sončnih celic, ki so najbolj razširjene na trgu, je od deset- do dvajsetodstotna (Alharbi, Kais, 2015; Blakers, Green, 1986).

Princip delovanja sončnih celic

Sončne celice so narejene iz polprevodniških materialov, ki imajo ločena valenčni in prevodni energijski pas. Pasova označujeta, kakšno energijo ima lahko nosilec naboja. Med obema pasovima se nahaja tako imenovani prepovedani pas, kjer ne najdemo nosilcev naboja (slika 1).

Za čiste (imenovane tudi intrinzične) polprevodnike je značilno, da imajo v osnovnem stanju (pri zelo nizki temperaturi) popolnoma zaseden valenčni in popolnoma prazen prevodni pas, zato ne prevajajo elek-



*Slika 1: Energijski diagram polprevodnika:
a) v osnovnem stanju in b) v vzbujenem stanju
(McEvoy, A., Markvart, T., Castañer, L., 2013).*

tričnega toka (McEvoy, Markvart, Castañer, 2013). Če je energija vpadnih fotonov svetlobe enaka ali večja od širine prepovedanega pasu, lahko atomi kristala absorbirajo fotone, s čimer lahko nekateri elektroni atomov polprevodnika zapustijo svoje mesto v valenčnem pasu (VB) in se preselijo v prevodni pas (CB), za seboj pa pustijo elektronske vrzeli v kristalni strukturi polprevodnika. V mnogih pogledih se te vrzeli obnašajo kot delci, podobno kot prevodniški elektroni, toda s pozitivnim nabojem. Ustvari se torej par prostih nosilcev električnega naboja elektron-vrzel. V takšnem paru so elektroni nosilci negativnega naboja, elektronske vrzeli pa pozitivnega. Ti nosilci naboja niso vezani na kristalno strukturo polprevodnika in imajo dovolj energije, da se prosto gibljejo po kristalni rešetki z Brownovim gibanjem in s tem ustvarijo električni tok (McEvoy, Markvart, Castañer, 2013). Poznamo dva glavna mehanizma, ki uravnata smer potovanja para elektron-vrzel. Prvi deluje s pomočjo uporabe električnega polja, ki zagotavlja silo za poganjanje elektronov in vrzeli v nasprotnih smereh. To ustvarja električni tok v polprevodniku, ki se lahko nadaljuje skozi zunanji tokokrog. Ta mehanizem prevladuje v večini sončnih celic, ki so osnovane na tako imenovanem p - n spoju. Drugi mehanizem pa je difuzija. Prevladuje le v materialih, kjer ni električnega polja.

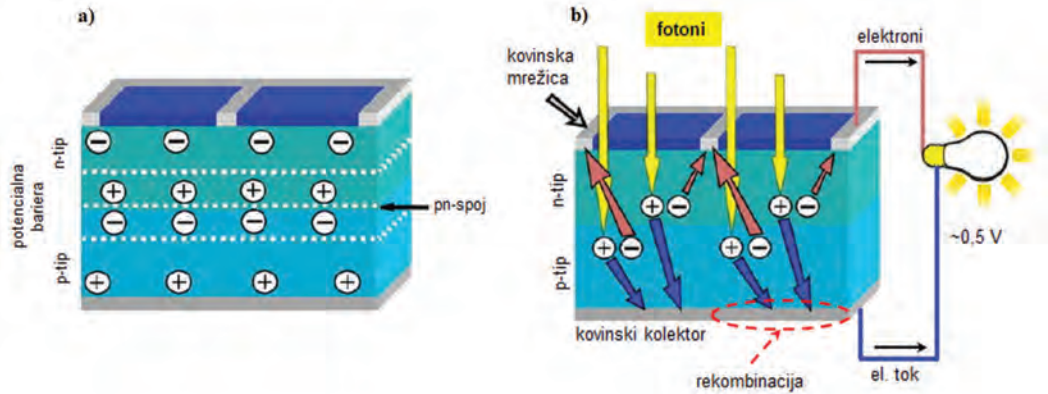
Intrinzični polprevodniški materiali imajo v termičnem ravnovesju enako količino negativnih in pozitivnih nosilcev naboja. Z raztapljanjem majhne količine različnih primesi oziroma z »dopiranjem« pa lahko v tak material vnesemo dodaten naboj. Tako tako imenovani polprevodnik tipa n dobimo, če polprevodniški kristal (na primer silicij, Si) dopiramo s petvalentnim elementom (na primer arzenom, As, ali fosforjem, P). V navedenem primeru atomom arzena ali fosforja pravimo donorski atomi, saj imajo en zunanji elektron več kot atomi čistega polprevodnika. Ta elektron ne sodeluje pri tvorbi vezi s sosednjimi atomi silicija ter postane

last celotnega kristala in lahko sodeluje pri prevajanju elektrike. Pri polprevodnikih tipa n so torej večinski nosilci naboja elektroni (Dittrich, 2015). Podobno lahko polprevodnik tipa p pripravimo, če čisti polprevodniški kristal (na primer silicij) dopiramo s trivalentnim elementom (na primer galijem, Ga, ali borom, B). Atomom galija ali bora v tem primeru pravimo akceptorski atomi, saj imajo en zunanji elektron manj kot atomi silicija. Manjkajoči zunanji elektron v atomu trivalentne primesi opišemo v kristalu polprevodnika kot vrzel. Elektronske vrzeli so last vsega kristala in se po njem lahko gibljejo. Pri polprevodnikih tipa p so torej večinski nosilci naboja vrzeli.

Sončne celice s p - n spojem

Dopirani silicij je najpogostejši polprevodniški material, ki se uporablja v sončnih celicah. Ko n - in p -tip polprevodnika staknemo skupaj (slika 2a), pride do difuzije nabojev preko stične površine p - n spoja. Elektroni iz polprevodnika tipa n pričnejo difundirati v polprevodnik tipa p . Pri tem za sabo pustijo pozitivno nabito območje. Vrzeli pa prodirajo iz polprevodnika tipa p v polprevodnik tip n . Ozek pas ob meji je na strani p negativen, na strani n pa pozitiven. Ustvarjeni naboj povzroči električno polje, ki zavira nadaljnjo difuzijo elektronov in elektronskih lukenj.

Pri osvetljeni sončni celici pride zaradi absorpcije vpadnih fotonov, ki dosežejo notranjost celice, do izbijanja elektronov iz valenčnega pasu v prevodni pas ter nastanka para elektron-vrzel. Električno polje loči in povleče elektrone iz prehodnega območja v polprevodnik tipa n in vrzeli v polprevodnik tipa p . Elektroni in vrzeli se nato z difuzijo premikajo proti kovinskima elektrodama (slika 2b) na zunanjih ploskvah obeh polprevodniških plasti. Kljub naravni težnji, da elektroni zapustijo plast in se rekombinirajo z vrzelmi, zaradi električnega polja ne morejo na drugo stran. Zato med obema polprevodniškima območjema nastane nerav-



Slika 2:

- a) *p-n spoj in območje električnega polja na sredini ter*
 b) *princip delovanja sončne celice s p-n spojem*
 (Dittrich, 2015).

notežje naboja. Del kristala, kjer se kopičijo elektroni, je negativno nabit, kjer se nabirajo vrzeli, pa pozitivno nabit. Ločitev elektronov in vrzeli povzroči napetostno razliko na zunanjih elektrodah. Z zagotavljanjem zunanjšega tokokroga (s porabnikom), s katerim lahko elektroni pridejo na drugo stran, se proizvaja električni tok, ki nastaja, vse dokler svetloba pada na sončne celice. V takih razmerah celica deluje kot generator napetosti, ki Sončevo svetlobo neposredno spremeni v električno energijo. Ravno to je razlog, da so sončne celice tako zanimive (Aberle, 2000; Birkmire, Eser, 1997).

Delitev in vrste sončnih celic

Sončne celice so običajno poimenovane po polprevodniškem materialu, iz katerega so izdelane. Cilj razvoja sončnih celic je ustvariti celice z visoko učinkovitostjo, nizko ceno, uporabo okolju prijaznih materialov in možnostjo recikliranja. Učinkovitost sončne celice je razmerje med količino proizvedene električne energije in energijo vpadne svetlobe na površino celice. Leta 1961 sta

fizika William Shockley (ki je leta 1956 dobil Nobelovo nagrado za fiziko za izum tranzistorja) in Hans Queisser izračunala, da lahko najpreprostejši tip sončne celice doseže največ 31-odstotno učinkovitost pri 1,3 elektronvolta širokem prepovedanem pasu (tako imenovana Shockley-Queisserjeva meja). Danes se tehnologije sončnih celic tradicionalno delijo na tri generacije (Green, 2002).

Prva generacija sončnih celic

Sončne celice prve generacije (oziroma konvencionalne celice) temeljijo na rezinah kristalnega silicija (tako monokristalnega kot tudi polikristalnega silicija) in galijevega arzenida (GaAs). Te celice temeljijo na enem *p-n* spoju, kjer iz enega absorbiranega fotona nastane en par elektron-vrzel. Med različnimi enospojnimi tehnologijami sončnih celic celice iz galijevega arzenida kažejo največjo učinkovitost, sledijo pa ji celice iz monokristalnega silicija – s približno 15- do 20-odstotno učinkovitostjo. Na današnjem tržišču prevladujejo kristalne silicijeve sončne celice. Gre predvsem za tiste celice, ki jih navadno vidimo na strehah hiš. Poleg dobre učinkovitosti je prednost te tehnologije sončnih celic tudi visoka obstojnost. Po drugi strani pa so toge in za proizvodnjo

zahtevajo veliko energije zaradi vakuumskih procesov obdelave in potrebe po zelo čistih materialih (Bruton, Luthardt, Rasch, Roy, Dorrity, Garrard, Teale, Alonso, Ugalde, Declerq, Nigs, Szlufcik, Rauber, Wettling, Vallera, 1997).

Druga generacija sončnih celic

Sončne celice druge generacije (oziroma konvencionalne tankoplastne sončne celice) temeljijo na tankih plasteh amorfne silicija (a-Si) in drugih spojin oziroma polprevodnikov, kot sta kadmijev telurid (CdTe) in baker-indij-galijev-diselenid (CIGS). Tanka plast je nanešena na stekleno podlago, kjer delujejo kot ostale *p-n* celice. Ta vrsta sončnih celic se večinoma uporablja v kalkulatorjih in urah, kjer je potreba po energiji manjša. Tankoplastne celice običajno absorbirajo svetlobo deset- do stokrat bolj učinkovito kot rezine silicija, kar omogoča uporabo samo nekaj mikrometrov debelih plasti namesto 160 do 240 mikrometrov debelih rezin. Prednost te generacije sončnih celic je ravno zmanjšanje proizvodnih stroškov, saj se za tanke plasti porabi manj aktivnega materiala kot za rezine. Ker proizvodnja druge generacije sončnih celic še vedno vključuje vakuumске procese in visoke temperature obdelave, je z njihovo proizvodnjo še vedno povezana velika poraba energije. Čeprav so solarne naprave druge generacije veliko cenejše od monokristalnih silicijevih celic, je njihova učinkovitost manjša od učinkovitosti njihovih monokristalnih dvojnikov (duplikatov) (Luque, 2018).

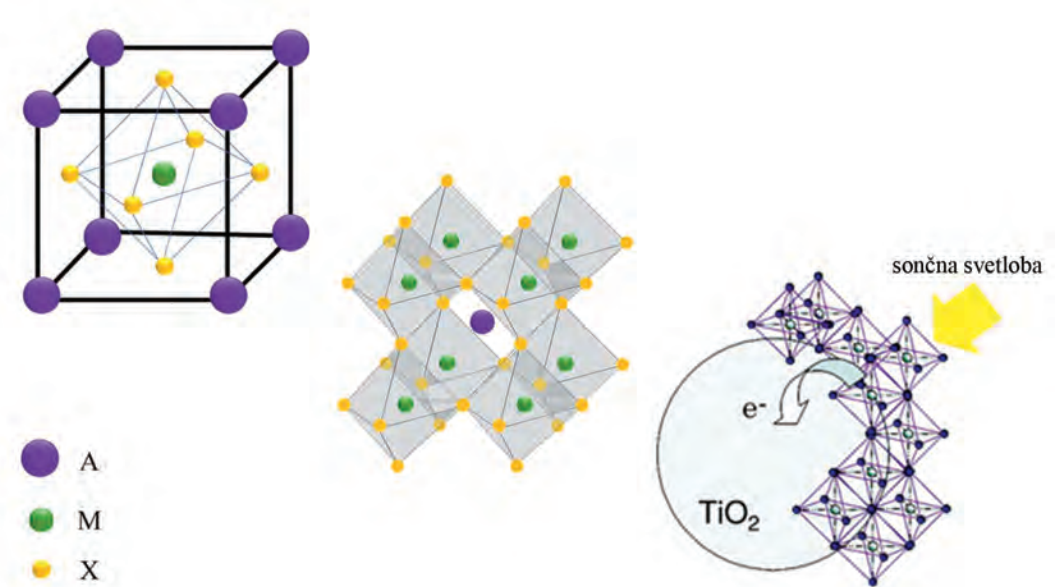
Tretja generacija sončnih celic

Sončne celice tretje generacije (oziroma tankoplastne sončne celice v razvoju) temeljijo na uporabi številnih tankoplastnih tehnologij, ki imajo potencial za preseiganje Shockley-Queisserjeve meje učinkovitosti, ali pa temeljijo na novih polprevodnih materialih. Ker večina teh tehnologij še ni komercialno uporabljena in je še vedno v fazi raziskav ali razvoja, lahko govorimo tudi o nastajajoči

fotovoltaiki. Cilj te generacije sončnih celic je še dalje znižati proizvodnje stroške, ob tem pa povečati učinkovitost. V tretjo generacijo sončnih celic vključujemo barvno občutljive sončne celice (DSSC), sončne celice na osnovi kvantnih pik (QDSC), organske sončne celice (OPV) in perovskitne sončne celice (PVSC) (Green, 2001). Tretja generacija zajema tudi visoko učinkovite večspojne sončne celice, ki držijo svetovni rekord v učinkovitosti sončnih celic (ta je več kot 40-odstotna). Sestavljene so iz več tankoplastnih celic iz polprevodnikov različnih širin prepovedanega pasu, ki so zložene druga vrh druge. Ta ureditev omogoča absorpcijo svetlobe veliko širšega spektra valovnih dolžin kot pri enospojnih sončnih celicah. Čeprav sta učinkovitost in obstojnost tretje generacije sončnih celic še vedno omejena v primerjavi s prvo in drugo generacijo sončnih celic, imajo velik potencial za komercializacijo.

Perovskitne sončne celice

Nova vrsta tankoplastnih sončnih celic, ki je trenutno predmet velikega števila raziskav, so tako imenovane perovskitne sončne celice. So zelo obetavne in kažejo zelo dobro učinkovitost – več kot 20-odstotno. Perovskitne sončne celice so prava osvežitev med nastajajočimi fotovoltaičnimi tehnologijami. Presenetile so z neverjetno hitrim izboljšanjem učinkovitosti, ki je z 2 odstotkov v letu 2006 zrastle na več kot 22,1 odstotka v letu 2018 (Salhi, Wudil, Hossain, Al-Ahmed, Al-Sulaiman, 2018). Perovskitne sončne celice so precej podobne barvno občutljivim sončnim celicam in organskim sončnim celicam. Prevladujoč absorpcijski material perovskitnih sončnih celic temelji na anorgansko-organskem perovskitu s splošno kemijsko formulo AMX_3 (slika 3). Na sliki 3 pomeni A organski kation, ki je običajno $CH_3NH_3^+$ (MA), $C_2H_5NH_3^+$ (EA) ali $HC(NH_2)_2^+$ (FA). Nahaja se na robovih kubične perovskitne osnovne celice. M predstavlja divalentno kovino (Pb^{2+} ,



Slika 3: Perovskitna kristalna struktura AMX_3 (levo in sredina) in shematski prikaz delovanja perovskitnega absorberja svetlobe (desno) (Li, Liao, Shai, Huang, Liu, Li, Shen, Wang, 2016).

Sn^{2+}) in je v središču strukture. X predstavlja halogen anion (Cl^- , Br^- , I^-), ki je v središču vsake posamezne ploskve kubične strukture.

Perovskitna struktura AMX_3 (A in M sta dva različna kationa, medtem ko je X anion) je lastna mnogim materialom. Tako velika družina perovskitnih materialov združuje tudi mnogo različnih funkcionalnih lastnosti, zato med perovskitnimi materiali najdemo tako izolatorje, antiferomagnetne materiale, piezoelektrike, termoelektrike, polprevodnike, prevodnike in celo superprevodnike. Nekateri perovskitni materiali s polprevodniškimi lastnostmi so zanimivi za uporabo v električnih aplikacijah, pripravljenih s tehnologijo tiskanja. V začetku devetdesetih let so se na primer začele intenzivne raziskave optično–elektronskih lastnosti organsko–anorganskih perovskitnih materialov. Te raziskave so se sčasoma osredotočile na organsko–anorganske

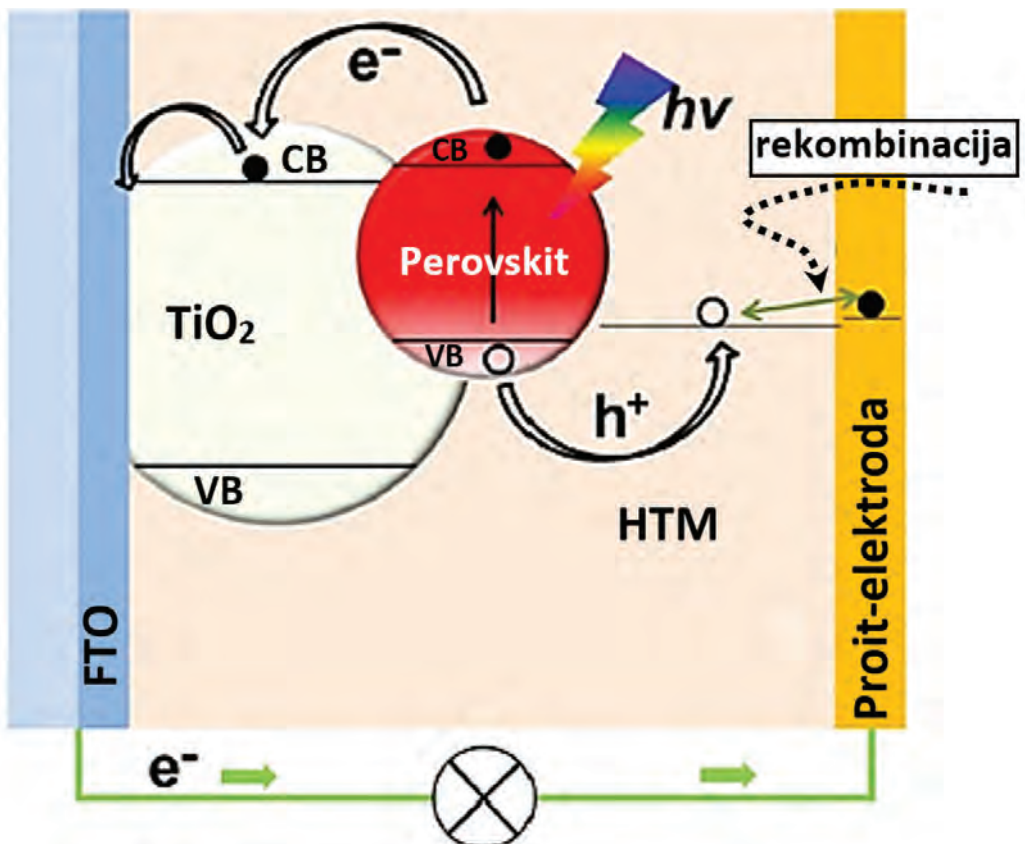
perovskitne materiale, ki so učinkoviti absorberji svetlobe oziroma jih s svetlobo razmeroma enostavno vzbujamo. Takšni materiali so na primer amonijevi-trihalogen-plumbati. Amonijevi-trihalogen-plumbati lahko imajo tridimenzionalno strukturo ($R-NH_3PbI_3$) ali pa plastovito strukturo ($(R-NH_3)_2PbI_4$) (Kojima, Teshima, Shirai, Miyasaka, 2009).

V tehnologiji perovskitnih sončnih celic se organsko-anorganski perovskitni material v obliki tanke plasti nanese na polprevodniški material (največkrat titanov dioksid, TiO_2). Med obsevanjem takšnega para pride do fotogeneracije elektronov in vrzeli običajno v plasteh perovskita. Ti kot odlični absorberji svetlobe absorbirajo svetlobo tudi v vidnem območju. Nosilne plasti titanovega dioksida pa omogočajo veliko gibljivost (mobilnost) elektronov, imajo širok prepovedani pas in visoko elektronsko afiniteto. Fotogenerirani elektroni in elektronske vrzeli se ločijo na fazni meji med perovskitno plastjo in nosilno plastjo titanovega dioksida. Elektroni (e^-) se prenesejo v prevodni pas titanovega dioksida, vrzeli (h^+) pa na okoliški medij.

Na sliki 4 je shematsko prikazano delovanje perovskitne sončne celice. Plast perovskitnih nanodelcev, ki deluje kot zbiralec svetlobe, je nanešena na površino plasti oksidnega polprevodnika, titanovega dioksida. Med obsevanjem s svetlobo nastane v perovskitu par elektron-vrzel. Ker je energetska raven prevodnega pasu perovskita energetske višja od energetske ravni prevodnega pasu titanovega dioksida, se vzbujeni elektron injicira v prevodni pas titanovega dioksida, nato pa preko omrežja nanodelcev titanovega dioksida potuje do anode, ki je običajno steklo - s fluorom dopirani kositrov dioksid (FTO). Elektron nato potuje skozi zunanji tokokrog do nasprotno elektrode (katode). Istočasno pa se vrzel iz valenčnega pasu perovskita prenese v tako imenovani prevodnik vrzeli (hole-transport material, HTM). Prevodnik vrzeli služi za regeneracijo perovskita in transport vrzeli na katodo, kjer se te rekombinirajo z elektroni (Kung, Li, Lin, Chiang, Chan, Guo, Chen, 2018). Prevodniki vrzeli so običajno organski polprevodni materiali tipa p , zato se sončne celice z občutljivim trdnim polprevodnikom v mnogih primerih imenujejo tudi hibridne sončne celice. Na opisani način se sončna svetloba v perovskitnih sončnih celicah pretvori v električno energijo brez kemijske reakcije v trdnih fotovoltaičnih sistemih.

(hole-transport material, HTM). Prevodnik vrzeli služi za regeneracijo perovskita in transport vrzeli na katodo, kjer se te rekombinirajo z elektroni (Kung, Li, Lin, Chiang, Chan, Guo, Chen, 2018). Prevodniki vrzeli so običajno organski polprevodni materiali tipa p , zato se sončne celice z občutljivim trdnim polprevodnikom v mnogih primerih imenujejo tudi hibridne sončne celice. Na opisani način se sončna svetloba v perovskitnih sončnih celicah pretvori v električno energijo brez kemijske reakcije v trdnih fotovoltaičnih sistemih.

Slika 4: Princip delovanja sončnih celic s fotoobčutljivim trdnim perovskitom (Gong, Liang, Sumathy, 2012).

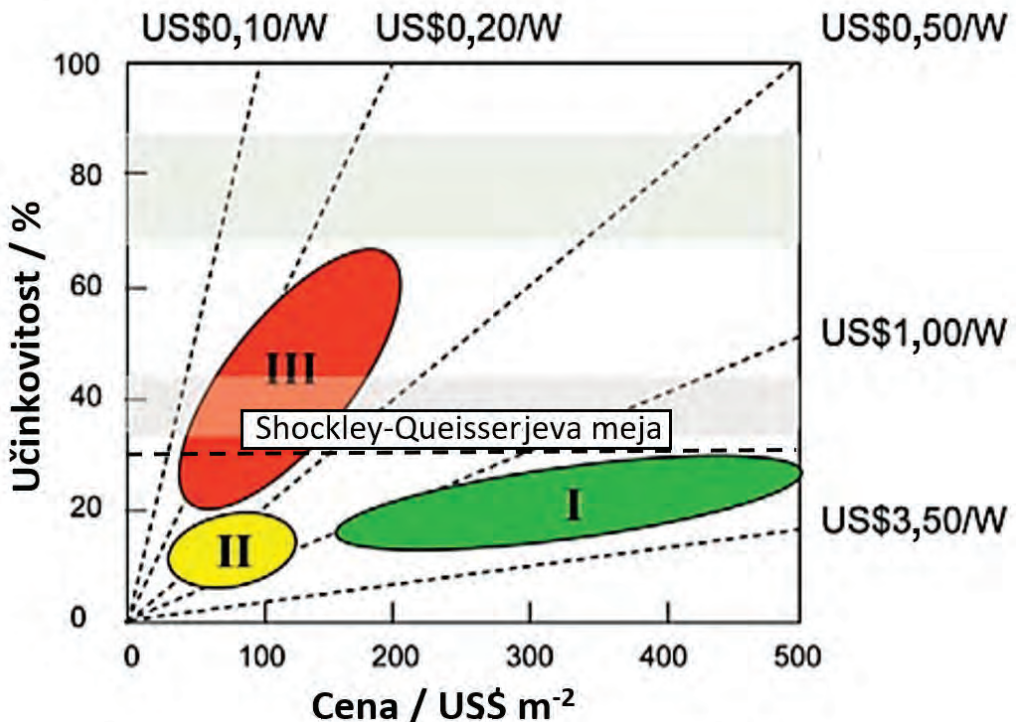


Sončne celice, ki uporabljajo perovskitne absorberje svetlobe, so zelo zanimive zaradi treh razlogov: 1) zaradi že omenjene razmera visoke učinkovitosti energijske izrabe vpadne svetlobe do vrednosti 15 odstotkov ter dejstva, da v tej smeri nikakor še nismo dosegli mejno visokih vrednosti, 2) razmera nizki stroški priprave sončnih celic tega tipa ter sprejemljivo nizka cena na enoto proizvedene energije in s tem povezana povrnitev investicijskih stroškov - takšen tip sončnih celic ne vsebuje žlahtnih kovin ali drugih dragih sestavin, ravno tako pa tudi njihova izdelava ne vsebuje sofisticiranih in dragih visokotemperaturnih procesov, 3) dobra obstojnost takšnih sončnih celic. Omeniti pa velja tudi prilagodljivost ter nizko maso perovskitnih sončnih celic.

Kljub številnim izboljšavam je tehnologija perovskitnih sončnih celic še vedno v

zgodnji fazi komercializacije v primerjavi z drugimi bolj zreli solarnimi tehnologijami. Ostajajo namreč številni pomisleki glede obstojnosti organsko-anorganskih perovskitnih materialov ob prisotnosti vlage ter toksičnosti svınca v najbolj raziskovanih perovskitnih materialih. Posledično gre nadaljnji razvoj perovskitnih sončnih celic v smeri nadomestitve svınca v perovskitnih materialih z drugimi kovinami, kot so na primer kositer, baker ali germanij. Podobno se zaradi zelo prilagodljive perovskitne strukture lahko zamenjujejo tudi kationi na mestih A. Dejstvo, da struktura na mestih A vključuje organski kation, pa daje številne

Slika 5: Razmerje med učinkovitostjo in ceno posameznih generacij sončnih celic.



možnosti nadaljnje manipulacije ter priprave vrste novih perovskitnih materialov, da bi našli tistega, ki bo najprimernejši za uporabo v perovskitnih sončnih celicah.

Zaključek

Razvoj sončnih celic napreduje izredno hitro. Te postajajo bolj učinkovite in hkrati cenejše (slika 5).

Sprva so za sončne celice uporabljali le anorganske polprevodnike. Te celice so v celoti temeljile na konceptu p - n spoja. Ko so se znanstveniki približali fizikalni meji učinkovitosti za posamezni p - n spoj (tako imenovani Shockley-Queisserjevi meji), samo izboljšave v materialih in strukturi celic niso bile več dovolj. Nove tehnologije so morale uporabiti drugačne metode za povečevanje učinkovitosti, kot na primer večspojne (tandem) celice (uporaba več p - n spojev), koncentriranje svetlobe na majhno površino sončne celice ali teksturiranje za povečevanje površine. Danes gre razvoj v različne smeri, zato poznamo različne primere novih sončnih celic, ki temeljijo na novih materialih. Ko razmišljamo o komercializaciji ene generacije sončnih celic, je v pripravi že naslednja generacija. Kljub temu, da se je razvoj perovskitnih sončnih celic šele dobro začel, spodbudni rezultati glede učinkovitosti energijske pretvorbe v perovskitnih sončnih celicah že kažejo njihovo potencialno komercializacijo. Seveda ostajajo nekateri nerešeni problemi v tehnologiji perovskitnih sončnih celic, povezani z obstojnostjo in morebitno toksičnostjo posameznih sestavin, vendar pa je na podlagi odličnih rezultatov energijske učinkovitosti in neskončne potrebe ljudi po električni energiji njihova prihodnost zelo svetla.

Literatura:

- Aberle, A. G., 2000: *Surface passivation of crystalline silicon solar cells: a review. Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 8: 473-487.
- Alharbi, F. H., Kais, S., 2015: *Theoretical limits of photovoltaics efficiency and possible improvements by intuitive approaches learned from photosynthesis and quantum coherence. Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 43: 1073-1089.
- Alonso, J., Ugalde, U., Declercq, K., Nigs, J., Szlufcik, J., Rauber, A., Wettling, W., Valleria, A., 1997: *A study of the manufacture at 500 MWp p.a. of crystalline silicon photovoltaic modules, Conference Record, 14th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Barcelona*, 11-16.
- Birkmire, R. W., Eser, E., 1997: *Polycrystalline thin film solar cells: present status and future potential. Annual Review of Materials Research*, 27: 625-653.
- Blakers, A. W., Green, M. A., 1986: *20% efficiency silicon solar cells. Applied Physics Letters*, 48: 215-217.
- Blakers, A., Zin, N., McIntosh, K. R., Fong, K., 2013: *High Efficiency Silicon Solar Cells. Energy Procedia*, 33: 1-10.
- Bruton, T. M., Luthardt, G., Rasch, K-D., Roy, K., Dorrity, I. A., Garrard, B., Teale, L., Luque, S., 2018: *Introduction to Photovoltaic Effect, In Solar Panels and Photovoltaic Materials. London: IntechOpen*, 1-8.
- Conibeer, G., 2007: *Third-generation photovoltaics. Materials Today*, 10: 42-50.
- Dittrich, T., 2015: *Materials concepts for solar cells. London: Imperial College Press*, 3-78.
- Green, M. A., 2001: *Third generation photovoltaics: Ultra-high conversion efficiency at low cost. Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 9: 123-135.
- Green, M. A., 2002: *Third generation photovoltaics: solar cells for 2020 and beyond, Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 14: 65-70.
- Gong, J., Liang, J., Sumathy, K., 2012: *Review on dye-sensitized solar cells (DSSCs): Fundamental concepts and novel materials. Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16: 5848-5860.
- Hasnain, S. M., Elani, U. A., Alarwaji, S. H., Abaoud, H. A., Smiai, M. S., 1995: *Prospects and proposals for solar energy education programs. Applied Energy*, 52: 307-314.
- Kojima, A., Teshima, K., Shirai, Y., Miyasaka, T., 2009: *Organometal halide perovskites as visible-light sensitizers for photovoltaic cells. Journal of the American Chemical Society*, 131 (17): 6050-6051.
- Kung, P. K., Li, M. H., Lin, P. Y., Chiang, Y. H., Chan, C. R., Guo, T. F., Chen, P., 2018: *A Review of Inorganic Hole Transport Materials for Perovskite Solar Cells. Advanced Materials Interfaces*, 5: 1-35.

Li, D., Liao, P., Shai, X., Huang, W., Liu, S., Li, H., Shen, Y., Wang, M., 2016: *Recent progress on stability issues of organic – inorganic hybrid lead perovskite-based solar cells. RSC Advances*, 6: 89356–89366.

McEvoy, A., Markvart, T., Castañer, L., 2013: *Solar cells: materials, manufacture and operation. 2nd Ed. Amsterdam: Elsevier*, 3–52.

Morton, O., 2006: *Solar Energy: A New Day Dawning? Silicon Valley Sunrise. Nature*, 443 (7), 19–22.

Pavlin, M., 1996: *Sončne celice v debeloplastni tehnologiji, Vakuunist*, 16: 4–8.

Salbi, B., Wudil, Y. S., Hossain, M. K., Al-Ahmed,

A., Al-Sulaiman, F. A., 2018: *Review of recent developments and persistent challenges in stability of perovskite solar cells. Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 90: 210–222.

Solangib, K. H., Islamb, M. R., Saidura, R., Rahimb, N. A., Fayaz, H., 2011: *A review on global solar energy policy. Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15: 2149–2163.

Veliki popularizatorji astronomije • Camille Flammarion

Nenadkriljivi popularizator astronomije – Camille Flammarion

Marijan Prosen

Vsak strokovno napisani članek še ni nujno poljuden. V poljudni spis je treba poleg trdnega znanja in strokovnosti vtakati veliko več energije, predvsem pa čustveni pristop do podajanja snovi. Če je v njem premalo čustvenega naboja, poleg tega pa še ne dovolj ljubezni, ljubeznivosti, prijaznosti, odgovornosti in sploh neke nevidne pozitivnosti do posredovanja snovi, in če avtorica ali avtor ne nakloni bralcu posebne pozornosti, se pripoved lahko včasih slabo napiše, celo izjalovi. Tudi ni dobro, da je v spisu preveč naštevanja. Tako lahko v podatkovnem morju bistvena informacija izpuhti. Lahko se celo zgodi, da članek ne prinese ustrezno napisane zamišljene vsebine. To pa je najslabše, kar se prispevku lahko zgodi. Takšnih člankov najdemo veliko.

Glede razumljivosti mora prispevek zadovoljiti tako strokovnjake različnih strok kot tudi bralce različnih izobrazbenih struktur – od osnovne šole navzgor. Članek naj bo

zanimiv tudi navadnemu človeku, delavcu v tovarni ali podjetju, gospodinji in vedoželjnemu kmetu. Članek mora pritegniti. Napisan mora biti strokovno neoporečno, a preprosto in splošno razumljivo v dobri ali celo najboljši slovenščini. Za to pa je treba večkrat kar močno zavihati rokave.

V svetovnem merilu je pravkar opisane zahteve (in še veliko več) zagotovo upošteval in povsem izpolnil francoski astronom, ki je bil sam tudi strastni popularizator astronomije in sploh naravoslovja. To je bil svetovno slavni Camille Flammarion. O tem nedvomno neprekosljivem pisnem posredovalcu številnih in najrazličnejše zahtevnih astronomskih vsebin je na Slovenskem zelo malo ali skoraj nič znanega. Zato tu posredujemo nekaj več besed o njem.

Camille Flammarion se je rodil leta 1842 v kraju Montigny-le-Roi en Haute-Marne in umrl leta 1925 v kraju Juvisy-sur-Orge.