

Andrej Đuretić, dipl.el.ing.
Minel-Schreder, Beograd

SOLARNO NAPAJANJE U TEHNICI OSVETLJENJA

Obnovljivi izvori energije, uz racionalnu potrošnju postojećih energetske resursa, moraju obezbediti i do 50% svetskih potreba za energijom do 2050. Neki izveštaji [3] pokazuju da je ekonomski izvodljivo da se smanji globalna CO₂ emisija za skoro 50% u naredne 43 godine. U istim izveštajima se zaključuje da je masovna upotreba obnovljivih izvora energije tehnički ostvarljiva uz pravu podršku i strategiju. Međutim, vremena je sve manje, a u stručnim krugovima niko više ne poriče da se klimatske promene dešavaju i da su umnogome posledica ljudskih aktivnosti (kao npr. sagorevanje fosilnih goriva). Ukoliko se ne posveti dovoljno pažnje ovom narastajućem problemu, posledice mogu biti katastrofalne. Ovaj rad ima za cilj da predstavi fotonaponsku konverziju (PV tehnologiju) kao jedan od potencijalno značajnih obnovljivih izvora, kroz detaljan prikaz tehnologije i njenog potencijala u proizvodnji električne energije, pre svega za potrebe instalacija električnog osvetljenja.

OBNOVLJIVI IZVORI ENERGIJE

Pre nego što se nastavi dalje, važno je istaći da je obnovljiva energija, prema definiciji, “ona energija koja se eksploatiše manjom (ili istom) brzinom kojom se i prirodno obnavlja” [2]. Ti izvori su vetar, biomasa, solarna energija, energija okeana i hidroenergija. Zajedničko za sve obnovljive izvore je da proizvode veoma malo ili nimalo “greenhouse” gasova i oslanjaju se na praktično neiscrpane prirodne resurse. Neki od ovih izvora su već sad konkurentni na tržištu. Odnos cena-kvalitet kod obnovljivih izvora je sve bolji kako se oni tehnički unapređuju, dok za to vreme cena fosilnih goriva nastavlja da raste, naročito sada kada je potencijal jednog izvora da redukuje emisiju gasova monetarno vrednovan. U isto vreme postoji ogroman potencijal za smanjenje potrošnje energije, zadržavajući isti nivo “usluga” kojih energija pruža. Serija mera koje se tiču energetske efikasnosti mogu zajedno značajno da smanje potražnju u industriji, domaćinstvima, poslovnim i uslužnim delatnostima. Rešenje za energetske potrebe u budućnosti leži u većoj upotrebi obnovljivih izvora kako za grejanje tako i za proizvodnju električne energije.

Zajednička karakteristika većine obnovljivih i alternativnih tehnologija je relativno visok stepen početne investicije, ali i njihova kasnija niska operativna cena. Međutim, kako obnovljivi izvori energije imaju znatno nižu operativnu cenu u poređenju sa konvencionalnim izvorima energije, ukupna cena energije povoljnija je na osnovu analize tehnoloških ciklusa, a posebno sa ekološkog aspekta. U poređenju sa ostalim tehnologijama proizvodnje električne energije, industrije bazirane na obnovljivim izvorima energije beleže najveći privredni rast poslednjih godina. Tržišta fotonaponskih solarnih neprekidno rastu. Širom sveta izgrađeni su brojni multikilovatni fotonaponski sistemi instalisani na rezidencijalnim i poslovnim objektima, a takođe i brojne multimegavatne fotonaponske elektrane povezane u elektrodistributivne mreže.

Danas, obnovljivi izvori energije učestvuju sa 13% u globalnoj potrošnji primarne energije. Prema predviđanjima za 2010., obnovljivi izvori bi trebalo da učestvuju sa oko 35% u globalnoj proizvodnji električne energije.

FOTONAPONSKA KONVERZIJA

Materijal ili uređaj koji je u stanju da energiju sadržanu u fotonima (kvantima svetlosti) konvertuje u električnu energiju naziva se *fotovoltaikom*. Foton sa dovoljno malom talasnom dužinom i dovoljno velikom energijom može prouzrokovati oslobađanje elektrona iz atoma fotovoltaika. Ako se u blizini nalazi električno polje, ovi elektroni mogu biti delovanjem električnih sila „gurnuti“ ka metalnim kontaktima gde njihovim koncentrisanjem a zatim i usmerenim kretanjem nastaje električna struja. Ovo je zapravo *fotonaponski efekat*, tj. pojava da određeni materijali izloženi elektromagnetskom zračenju generišu električni napon a posledično i električnu struju. Iako je fotonaponski efekat direktno povezan sa *fotoelektričnim efektom*, ovo su dva različita procesa i ne treba ih mešati. Za razliku od fotonaponskog efekta kod kojeg se pobuđeni elektroni prenose sa jednog materijala na drugi stvarajući napon između dve elektrode, kod fotoelektričnog efekta elektroni se emituju sa površine obasjanog materijala usled apsorpcije energije elektromagnetskog zračenja male talasne dužine, kao npr. u vidljivom ili UV području spektra.

Sila koja pogoni fotonaponske materijale dolazi od sunca – interesantno je napomenuti da Zemljina površina prima 6000 puta (neka istraživanja kažu i do 10000 [2]) više solarne energije od ukupnih svetskih potreba za energijom! To znači da bi se korišćenjem samo 1% od dostupne energije Sunca zadovoljile sve energetske potrebe Zemlje u 21-om veku. Oko 37% svetske energetske potražnje zadovoljava se proizvodnjom električne energije (približno oko 16.000 TWh u 2001. godini). Ako bi se ova energija generisala fotonaponskim sistemima skromne godišnje izlazne snage od 100 kWh/m², neophodna bi bila površina od 150 x 150 km² za akumulaciju sunčeve energije. Veliki deo ove apsorpcione površine mogao bi se smestiti na krovovima i zidovima zgrada, pa ne bi zahtevao dodatne površine na zemlji.

Istorija fotonaponske konverzije počinje 1839. godine kada mladi francuski fizičar Edmon Bekerel uspeva da generiše električni napon osvetljavanjem metalne elektrode u slabom elektrolitskom rastvoru. 40 godina kasnije, Adams i Dej su bili prvi koji su ispitivali *fotonaponski efekat* u čvrstim telima (Adams and Day, 1876.) i bili u stanju da naprave selenijumske ćelije čija je efikasnost išla do 2%. Kao deo njegovog razvoja kvantne teorije, Albert Ajnštajn je 1904. objavio teorijsko objašnjenje fotonaponskog efekta, što je dovelo do dobijanja Nobelove nagrade 1923. godine. U isto vreme poljski naučnik Čohralski (Czochralski) počinje sa razvojem metode za dobijanje savršenog kristala silicijuma, za šta se ispostavlja da predstavlja kamen temeljac moderne elektronike. U 40-tim i 50-tim godinama 20.veka proceć Čohralskog se koristi u proizvodnji prvih fotovoltaika od monokristalnog silicijuma, a ova tehnika preovlađuje i danas u industriji fotonaponskih materijala.

OSNOVNI PRINCIPI

Fotonaponski uređaji (u daljem tekstu fotovoltaiaci) koriste poluprovodničke materijale za konverziju sunčeve energije u elektricitet. Ova tehnologija je blisko povezana sa „solid-state“ tehnologijama korišćenim u izradi tranzistora, dioda i svih drugih poluprovodničkih uređaja bez kojih se današnji život ne može ni zamisliti. Početna tačka za proizvodnju većine fotonaponskih

Periodic table of the elements

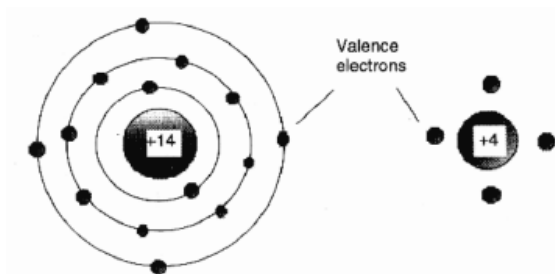
Legend:

- alkali metals
- alkaline earth metals
- transition metals
- other metals
- other nonmetals
- halogens
- noble gases
- rare earth elements (21, 39, 57-71)
- lanthanide elements (57-71 only)
- actinide elements

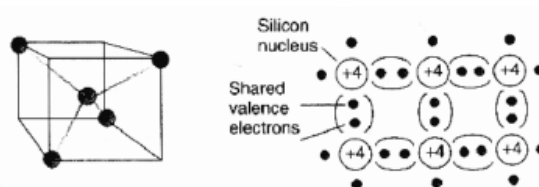
Tabela 1. Periodični sistem elemenata sa obležnim elementima koji su od značaja za izradu fotovoltaiaka [1]

naponskih uređaja (ali i gotovo svih poluprovodničkih materijala) je čisti kristalni silicijum. Silicijum se nalazi u IV grupi periodičnog sistema kao i germanijum koji se takođe često koristi u elektronici. Ovim elementima se dodaju bor (III grupa) i fosfor (V grupa) da bi se napravila većina fotovoltaiaka. I ostali elementi iz III i V grupe se koriste u ove svrhe (ponekad i iz II i VI grupe – Tabela 1), npr. galijum i arsen se koriste za izradu GaAs solarnih ćelija, dok se kadmijum i telur koriste za CdTe ćelije (postoje i CIS, InP...). Silicijum ima 14 protona u svom jezgru, što znači da ima i 14 elektrona raspoređenih u više orbita (slika 1).

Kao što je prikazano na slici 1, njegova spoljna orbita se sastoji od 4 elektrona, tj. on je tetravalentan. Ti valentni elektroni su jedini od značaja za elektroniku, pa je iz tog razloga uobičajeno da se silicijum predstavlja kao jezgro sa +4 naelektrisanjem (4 protona) oko koga kruže 4 valentna elektrona. U čistom kristalu silicijuma, svaki atom formira kovalentne veze sa 4 susedna atoma u trodimenzionalnoj strukturi prikazanoj na Slici 2 (desno je data dvodimenzionalna predstava).



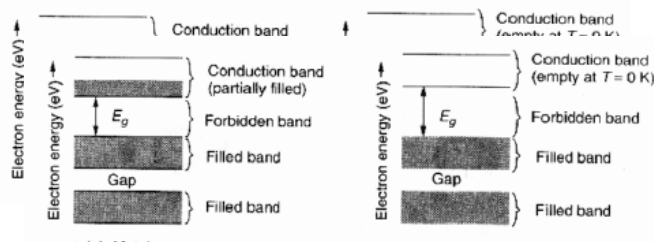
Slika 1. Atom silicijuma i uprošćen model (desno) [1]



Slika 2. Trodimenzionalna kristalna struktura koju formiraju atomi silicijuma (dvodimenzionalna predstava desno) [1]

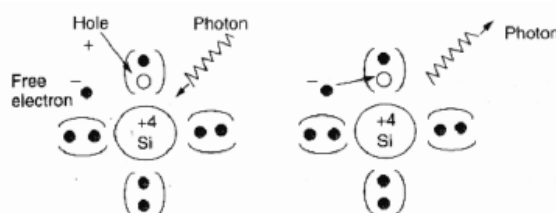
Na temperaturi jednakoj apsolutnoj nuli, silicijum se ponaša kao savršeni izolator, nema slobodnih elektrona koji lutaju unaokolo kao u slučaju metala. Kako temperatura raste, nekim elektronima biće dato dovoljno energije da se oslobode svojih privlačnih veza sa jezgrom, čineći ih pogodnim za kretanje (električna struja). Što je temperatura viša, više elektrona će biti deo strujnog toka, pa i provodnost raste sa temperaturom (kod metala obrnuto, provodnost pada sa porastom temperature). Provodnost silicijuma na normalnoj temperaturi je i dalje veoma mala što ga i svrstava u grupu poluprovodničkih elemenata. Kao što će se u daljem tekstu videti, dodavanjem malih količina nekih drugih materijala, provodnost čistog poluprovodničkog elementa može biti značajno povećana!

Kvantna teorija opisuje razliku između provodnika (metala) i poluprovodnika (npr. silicijum) koristeći dijagrame prikazane na slici 3. Elektroni imaju energiju koja mora da bude u određenim granicama dozvoljenim za taj energetska nivo (opseg). Najviši energetska nivo se naziva *provodni nivo* i elektroni sa energijom iz opsega ovog nivoa zaslužni su za provođenje električne struje. Provodni nivo kod metala je delimično popunjen, dok je kod poluprovodnika on na temperaturi apsolutne nule prazan (na sobnoj temperature samo jedan od 10^{10} elektrona silicijuma postoji u provodnom nivou). Procepi između dopuštenih energetskih nivoa zovu se *zabranjeni nivou* (forbidden bands), od kojih je najvažniji onaj koji razdvaja provodni nivo i



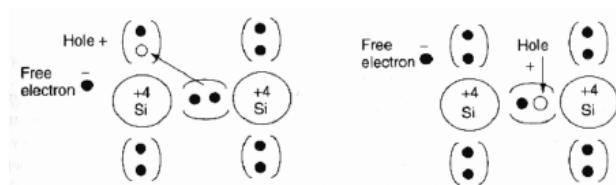
Slika 3. Energetski nivou za metale (levo) i poluprovodnike (desno) [1]

najviši *popunjeni nivo* (filled band) ispod njega. Energija koju elektron mora imati da bi skočio preko zabranjenog (valentnog) nivoa do provodnog nivoa, naziva se *energetski procep* E_g . Jedinica za energetski procep je eV (elektronvolt) a energetski procep za elektron silicijuma iznosi 1.12eV. Odakle elektroni obezbeđuju ovu energiju? U slučaju fotonaponskih materijala, izvor energije su fotoni koji dolaze od Sunca (njegovog elektromagnetnog zračenja). Kada foton sa energetskim nivoom od najmanje 1.12eV stigne do površine solarne ćelije, jedan elektron može dobiti energiju da pređe u provodni nivo. Kada se to desi, elektron ostavlja za sobom jezgro sa 4^+ naelektrisanjem koje sada ima samo 3 elektrona u orbitama – ostaje pozitivno naelektrisanje (“šupljina”) vezano sa jezgrom kako je prikazano na Slici 4a.



Slika 4. Elektron sa dovoljno energije može da kreira par “rupa-elektron” (a). Elektron može da se rekombinuje sa rupom, oslobadajući foton energije (b) [1]

Ukoliko ne postoji način da se elektroni zadrže dalje od šupljinaa, doći će do njihove rekombinacije kao na Slici 4b. Kada dođe do rekombinacije, energija koja se nalazila u elektronu u provodnom nivou se oslobađa kao foton, na čemu se zasniva princip rada LED (*light-emitting diodes*). Važno je napomenuti da ne mogu samo elektroni iz provodnog nivoa kretati u kristalnoj strukturi, već i pozitivno naelektrisane šupljine koje



Slika 5. Kada je rupa popunjena od strane susednog valentnog elektrona, izgleda kao da se kreće [1]

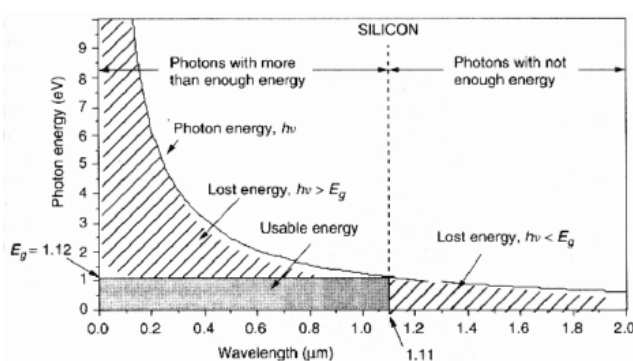
ostaju iza pokretnih elektrona. Valentni elektron u popunjenom nivou može lako da se premesti i popuni rupu u susednom atomu bez promene energetskog nivoa. Kada to uradi, šupljina se pomera ka jezgu od kog je elektron potekao (Slika 5). Važan zaključak je da električna struja u poluprovodniku može biti prenošena ne samo putem negativno naelektrisanih pokretnih elektrona, već i putem pozitivno naelektrisanih “šupljina” koje se takođe kreću. Stoga, fotoni sa dovoljno energije stvaraju parove šupljina-elektron u poluprovodniku. Fotone karakteriše njihova talasna dužina ili frekvencija, kao i njihova energija.

$$c = \lambda \nu$$

Gde je c brzina svetlosti (m/s), ν frekvencija (Hz), λ talasna dužina (m) i

$$E = h \nu = \frac{hc}{\lambda}$$

gde je E energija fotona (J), a h Plankova konstanta (6.626×10^{-34} Js).



Slika 6. Energetski bilans fotona sa talasnim dužinama iznad i ispod $1.12 \mu\text{m}$ [1]

Za silicijumsku fotonaponsku ćeliju, fotoni sa talasnom dužinom većom od $1.11 \mu\text{m}$ imaju energiju $h\nu$ manju od 1.12 eV koliko je potrebno da se pobudi elektron. Nijedan od ovih fotona nije u stanju da provodi struju, pa je njihova energija izgubljena (samo greje ćelije). Na drugu

stranu, fotoni sa talasnim dužinama manjim od $1.11\mu\text{m}$ imaju i više nego dovoljno energije da pobude elektron. Pošto jedan foton može pobuditi samo jedan elektron, svaki višak energije preko 1.12 eV se takođe oslobađa kao toplota u ćelijama. Slika 6 ilustruje ovaj važan koncept. Energetski procepi za ostale fotonaponske materijale date su u tabeli 2 [1].

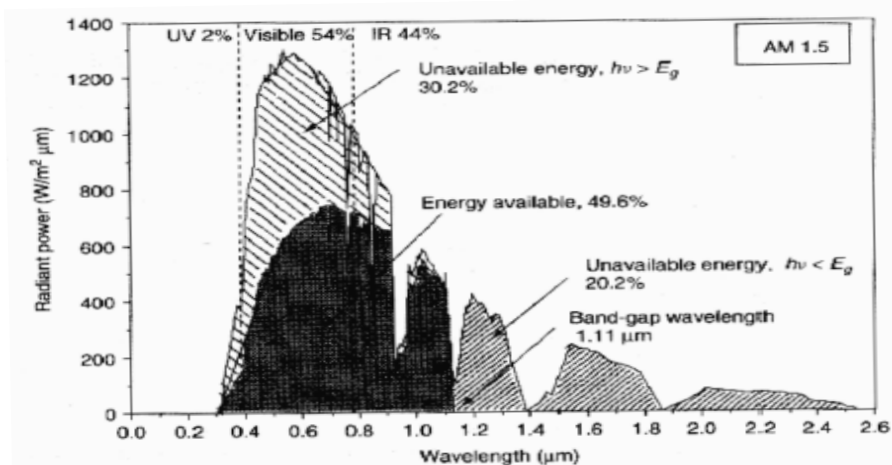
Quantity	Si	GaAs	CdTe	InP
Band gap (eV)	1.12	1.42	1.5	1.35
Cut-off wavelength (μm)	1.11	0.87	0.83	0.92

Tabela 2. Energetski procepi i granične talasne dužine iznad kojih se elektron ne može pobuditi [1]

Ova dva fenomena vezana za fotone sa energijama iznad i ispod energije energetskog procepa ustanovljavaju maksimalnu teoretsku efikasnost solarnih ćelija. Da bi se ovo ograničenje objasnilo, neophodno je poznavati sunčev spektar.

SUNČEV SPEKTAR

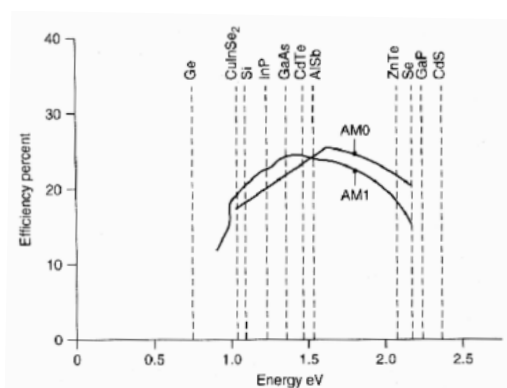
Površina sunca emituje energiju sa spektralnim karakteristikama bliskim onim koje ima crno telo na temperaturi od 5800K . Neposredno pred ulazak u Zemljinu atmosferu, prosečan izračeni fluks je 1.377 kW/m^2 , veličina poznatija kao *solarna konstanta*. Kako sunčevi zraci prolaze kroz atmosferu, jedan deo biva apsorbovan od strane različitih čestica u atmosferi, što za posledicu ima značajno izobličen sunčev spektar koji stiže do površine zemlje. Količina i spektralna raspodela sunčeve energije koja dospe do površine zemlje umnogome zavise od toga kroz koliko atmosfere su morali da prođu da bi tamo stigli. Odnos pređenog puta sunčevih zraka do određene tačke na zemlji i pređenog puta koji bi se imao za sunce direktno iznad naziva se *odnos vazdušne mase* (air mass ratio – AM). Stoga AM1 znači da se sunce nalazi direktno iznad, a po konvenciji AM0 znači da nema atmosfere, tj. da je to sunčev spektar u bezvazдушnom prostoru. Za većinu fotonaponskih materijala odnos vazdušne mase je AM 1.5, uzimajući da standardan položaj sunca 42° iznad horizonta. Za AM 1.5, 2% dolazeće sunčeve energije su UV zraci, 54% je u vidljivom a 44% u infracrvenom delu spektra. Slika 7 pokazuje rezultate analiza koje se tiču dva fundamentalna ograničenja – gubitak energije fotona u slučaju nedovoljne i prekomerne pobude elektrona (većih ili manjih talasnih dužina od $1.11\mu\text{m}$), uz



Slika 7. Sunčev spektar za AM 1.5. [1]

uvažavanje sunčevog spektra pri AM 1.5. Kako se može videti, 20.2% energije spektra je izgubljeno usled nedostatka energije fotona da pobude elektrone ($h\nu < E_g$), a 30.2% energije je izgubljeno usled postojanja fotona sa energijom većom od potrebne ($h\nu > E_g$) da se pobude elektroni. **Preostalih 49.6% predstavljaju maksimalan mogući deo solarne energije koja može biti "sakupljena" silicijumskim solarnim ćelijama.** Može se zaključiti da veličina energetskeg procepa kod silicijuma određuje i ograničava efikasnost silicijuma na ispod 50%! Analize vezane za izbor fotonaponskog materijala u zavisnosti od veličine njegovog energetskeg procepa dovele su do zaključka da niže vrednosti energetskeg procepa obezbeđuju više struje sa nižim naponom, dok veći energetskegi procepi rezultuju manjom strujom i višim naponom. Pošto je snaga proizvod struje i napona, mora postojati neka srednja vrednost energetskeg procepa (obično između 1.2 eV i 1.8 eV) za koju će se imati maksimalna snaga i efikasnost. Na slici 8 se može videti da se efikasnost kreće u granicama 20-25%, što je mnogo ispod 49.6%.

Drugi faktori koji utiču na pad teoretske efikasnosti su:



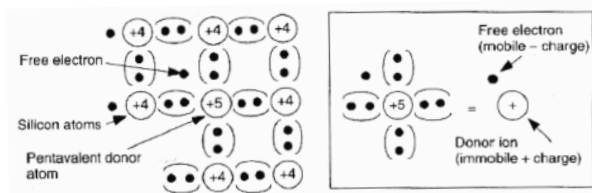
Slika 8. Maksimalna efikasnost fotonaponskih materijala kao funkcija veličine energetskeg procepa [1]

1. Samo 50-67% ukupnog napona energetskeg procepa dolazi na priključke solarnih ćelija
2. Rekombinacija rupa i elektrona pre nego što doprinesu protoku električne struje
3. Fotoni nisu apsorbovani u ćeliji jer su reflektovani sa lica ćelije
4. Fotoni nisu apsorbovani u ćeliji zato što prolaze tačno kroz ćeliju
5. Fotoni nisu apsorbovani u ćeliji zato što su blokirani od strane metalnih provodnika koji skupljaju struju sa vrha ćelije
6. Unutrašnja otpornost ćelije – dolazi do disipacije

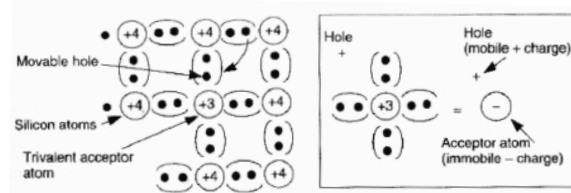
PN SPOJ

Sve dok je solarna ćelija izložena fotonima čije energije su iznad energije energetskeg procepa, biće formirani parovi šupljina-elektron. Problem predstavlja činjenica da se neki od tih elektrona mogu vratiti u šupljinu, poništavajući tako oba nosioca naelektrisanja. Da bi se izbegla rekombinacija, elektroni u provodnom nivou moraju neprestano biti odvlačeni od šupljina. Kod fotonaponskih materijala ovo je postignuto stvaranjem unutrašnjeg električnog

polja u kome poluprovodnik sam gura elektrone u jednom a šupljine u drugom pravcu. Da bi se stvorilo električno polje, formirane su dve zone u kristalu. Na jednoj strani linije koja deli te dve zone, čisti silicijum je dopiran sa veoma malom količinom trovalentnog elementa iz III grupe periodičnog sistema elemenata; na drugoj strani linije, dodata je mala količina petovalentnog elementa iz V grupe periodičnog sistema elemenata. U zavisnosti od toga kojim elementima je dopiran silicijum, poluprovodnički materijali se dele na poluprovodnike n-tipa (slobodni elektroni – Slika 9) i p-tipa (slobodne šupljine – Slika 10).

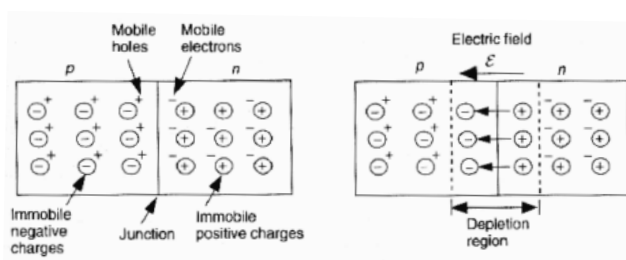


Slika 9. Poluprovodnik n-tipa [1]



Slika 10. Poluprovodnik p-tipa [1]

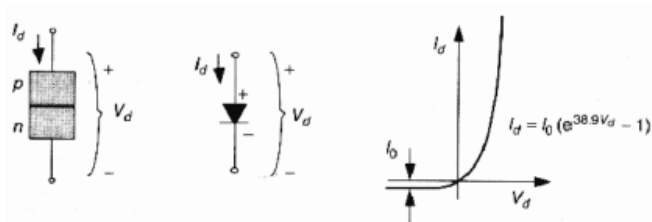
Ako se spoje materijal n-tipa i materijal p-tipa, u materijalu n-tipa će kroz pn spoj prolaziti pokretni elektroni privučeni difuzijom, dok će se u materijalu p-tipa pokretne šupljine privučene difuzijom kretati kroz pn spoj u suprotnom smeru. Kako je prikazano na Slici 11, kada elektron prođe kroz spoj on popunjava pozitivnu šupljinu ostavljajući nepokretno pozitivno



Slika 11. PN spoj i zona prostornog naelektrisanja [1]

naelektrisanje iza sebe u n-zoni, a istovremeno stvara nepokretno negativno naelektrisanje u p-zoni. Ovi nepokretni naelektrisani atomi u p-zoni i n-zoni stvaraju električno polje koje deluje nasuprot kretanju elektrona i šupljina kroz spoj. Kako se proces difuzije nastavlja, električno polje koje se suprotstavlja kretanju raste dok svako dalje kretanje naelektrisanih nosilaca kroz pn spoj ne stane. Ova nepokretna naelektrisanja koje su zaslužna za postojanje električnog polja u okolini pn spoja, formiraju tzv. *zonu prostornog naelektrisanja* (u literaturi se koristi i termin *zona prostornog tovara*), što znači da je ova zona ispražnjena (“depletion” region) od pokretnih naelektrisanja. Širina zone prostornog naelektrisanja je oko $1\mu\text{m}$ a napon u njoj iznosi oko 1V, što znači da je jačina električnog polja oko 10000V/cm ! Strelica koja označava električno polje na slici 11 pokazuje u kom će smeru polje “gurati” pozitivna naelektrisanja (po konvenciji smer od pozitivnih ka negativnim naelektrisanjima), što znači da zadržava pokretne pozitivne šupljine u p-zoni (dok elektrone odbija nazad u n-zonu).

Prethodni opis praktično se odnosi na princip rada konvencionalne p-n diode, čije su karakteristike prikazane na slici 12. Ako se napon V_d dovede na priključke diode, struja



Slika 12. PN dioda (a), simbol realne diode (b), U-I karakteristika diode (c) [1]

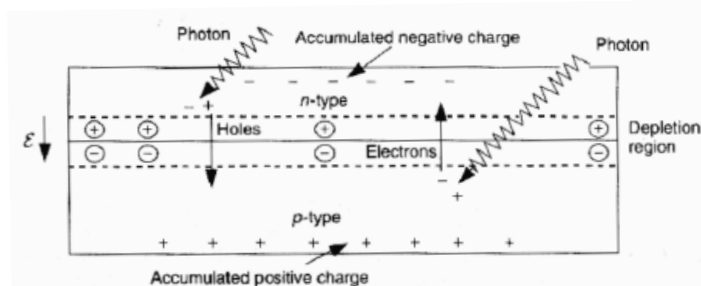
(*forward current*) može lako da prođe kroz diodu od p-sloja ka n-sloju. Međutim, ako se struja pošalje u inverznom smeru, samo mala struja zasićenja I_0 će proteći ($\approx 10^{-12}$ A/cm²). Ova inverzna struja je posledica termički generisanih nosilaca naelektrisanja kada šupljine bivaju uvučene u p-sloj, a elektroni u n-sloj. U direktnom smeru, pad napona na diodi iznosi svega nekoliko desetih delova volta (kod idealnih dioda ne postoji pad napona u direktnom smeru, kao ni proticanje struje u inverznom smeru). U-I karakteristika diode (Slika 12c) data je Šoklijevom jednačinom i jednačinom modifikovanom za temperaturu PN spoja od 25°C:

$$I_d = I_0 \left(e^{qV/kT} - 1 \right) = I_0 \left(e^{38.9V_d} - 1 \right) \quad (\text{na } 25^\circ\text{C})$$

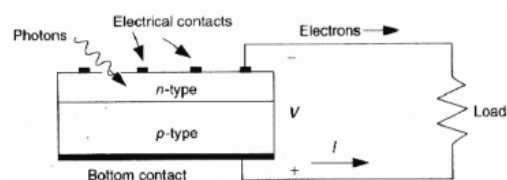
Gde je I_d struja diode u smeru strelice, V_d je napon na priključcima diode od p-sloja ka n-sloju, I_0 je inverzna struja zasićenja, q naelektrisanje, k Bolcmanova konstanta, a T temperatura PN spoja. U uobičajenim analizama elektronskih kola uzima se da je nominalni pad napona na diodi kada provodi struju 0.6V.

FOTONAPONSKA ČELIJA

Sada treba razmotriti šta se dešava u neposrednoj okolini PN spoja kada je izložen sunčevim zracima. Kako se fotoni apsorbuju, tako se formiraju parovi šupljina-elektron. Ako pokretni nosioci naelektrisanja dođu u blizinu PN spoja, električno polje u zoni prostornog naelektrisanja će gurnuti šupljine u p-sloj i elektrone u n-sloj, kako je prikazano na Slici 13. P-sloj akumulira šupljine a n-sloj elektrone, što stvara napon koji je uslov za proticanje struje ka nekom opterećenju. Ako su električni kontakti vezani za gornji i donji deo ćelije, elektroni će proteći iz n-sloja u žicu, kroz opterećenje i nazad do p-sloja kako je prikazano na slici 14. Pošto kroz žicu ne mogu prolaziti šupljine, zapravo se samo elektroni kreću kroz električno kolo. Kada dođu do p-sloja oni se rekombinuju sa šupljinama zatvarajući kolo.



Slika 13. Kada fotoni kreiraju parove šupljina-elektron u blizini spoja, električno polje u zoni prostornog naelektrisanja uvlači šupljine u p-sloj i elektrone u n-sloj [1]



Slika 14. Konvencionalni i pravi tok struje [1]

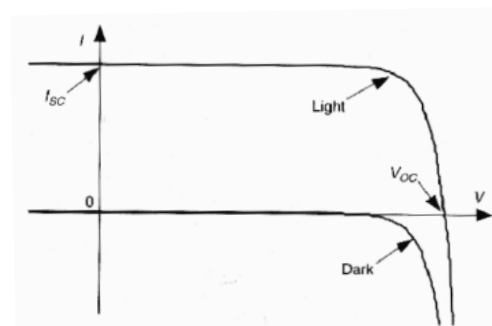
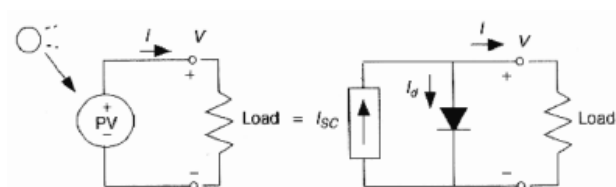
EKVIVALENTNO KOLO ZA FOTONAPONSKU ČELIJU

Jednostavan model ekvivalentnog kola sastoji se od realne diode u paraleli sa idealnim strujnim izvorom (Slika 15). Idealni strujni izvor daje onoliko struje proporcionalno tome koliko količini sunčevog zračenja je bio izložen. Postoje dva parametra koja su od posebnog značaja za fotonaponski materijal i ekvivalentno kolo – struja kratkog spoja I_{sc} i napon otvorene veze V_{oc} . Jednačine za ekvivalentno kolo PV-a su:

$$I = I_{sc} - I_d, \quad \text{iz čega zamenom sledi:} \quad I = I_{sc} - I_0 \left(e^{qV/kT} - 1 \right)$$

dok je, za $I = 0$:

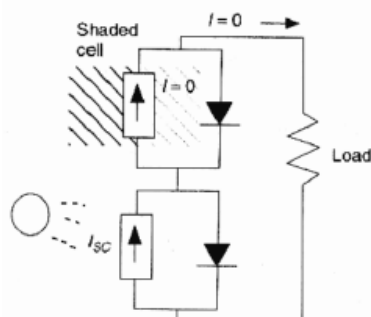
$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I_{sc}}{I_0} + 1 \right)$$



Slika 15. Jednostavno ekvivalentno kolo za fotonaponsku ćeliju [1] Slika 16. U-I kriva za uslove mraka i svetlosti kod PV-a [1]

Na slici 16 može se videti da je karakteristika fotonaponske ćelije zapravo obrnuta karakteristika diode (karakteristika diode sa negativnim predznakom) koja je podignuta za vrednost I_{sc} . Iz obe gornje jednačine može se videti da je struja kratkog spoja I_{sc} direktno proporcionalna sa *osunčanošću* (*solar insolation*), što znači da se za različite količine sunčevog zračenja mogu lako odrediti U-I karakteristike fotonaponskih materijala.

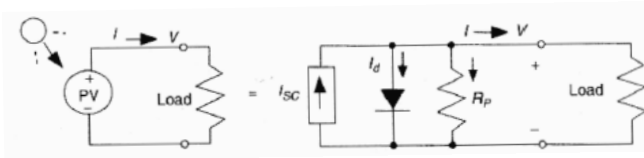
Ponekad jednostavno ekvivalentno kolo nije dovoljno, a najbolji primer za to je jedna zasenjena ćelija (u mraku) u nizu redno vezanih ćelija. Ako se to desi, prema ekvivalentnom modelu bi struja bila nula u celom lancu iako je samo jedna ćelija u mraku (struja kroz zasenjenu ćeliju je nula, a dioda je inverzno polarisana i takođe ne provodi struju, sem male inverzne struje zasićenja – Slika 17).



Slika 17. Ekvivalentno kolo sa zasenjenom ćelijom [1]

To znači da se na osnovu ekvivalentnog modela snaga ne daje opterećenju, što nije potpuno tačno (iako su fotonaponski veoma osetljivi na zasenjenost). Slika 18 pokazuje ekvivalentno kolo u koje je dodata paralelna rasipna otpornost R_p . U tom slučaju, idealni strujni izvor daje struju diodi, paralelnoj otpornosti i opterećenju:

$$I = (I_{sc} - I_d) - \frac{V}{R_p}$$

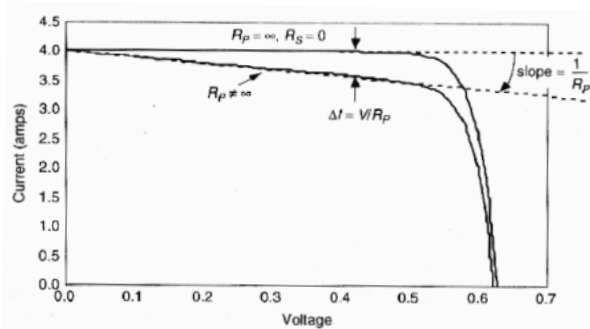


Slika 18. Ekvivalentno kolo sa zasjenjenom ćelijom [1]

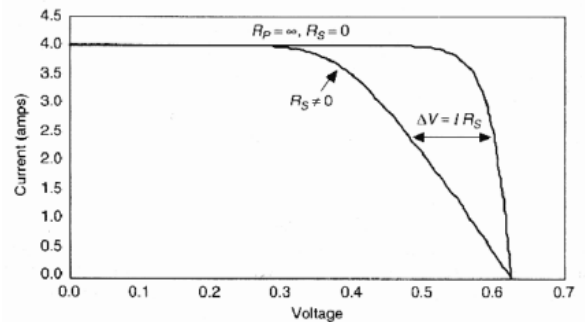
Prethodna jednačina govori da je, za bilo koji napon, struja opterećenja kroz idealni model smanjena za V/R_p , kako je prikazano na Slici 19. Da bi ćelije imale gubitke manje od 1% usled dodavanja paralelne

otpornosti, potrebno je da:

$$R_p > \frac{100V_{oc}}{I_{sc}} \quad (\text{obično do } 10\Omega)$$



Slika 19. Modifikovan ekvivalentni model dodavanjem R_p , što uzrokuje pad struje V/R_p za bilo koji napon [1]

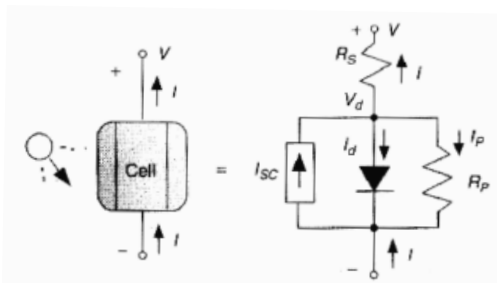


Slika 20. Modifikovane ekvivalentni model dodavanjem R_s , što uzrokuje pad napona $\Delta V = I R_s$, za bilo koju struju [1]

Još preciznije ekvivalentno kolo uključuje i rednu otpornost R_s pored paralelne R_p (u realnoj situaciji, ovo može biti posledica otpornosti na kontaktima veze ćelija i žice, kao i unutrašnje otpornosti samog poluprovodnika). Za ćelije koje imaju gubitke manje od 1% usled redne otpornosti, R_s mora da bude:

$$R_s < \frac{0.01V_{oc}}{I_{sc}} \quad (\text{obično oko } 0.05\Omega)$$

Finalno, za ekvivalentno kolo koje tretira paralelnu i rednu otpornost, jednačina glasi:

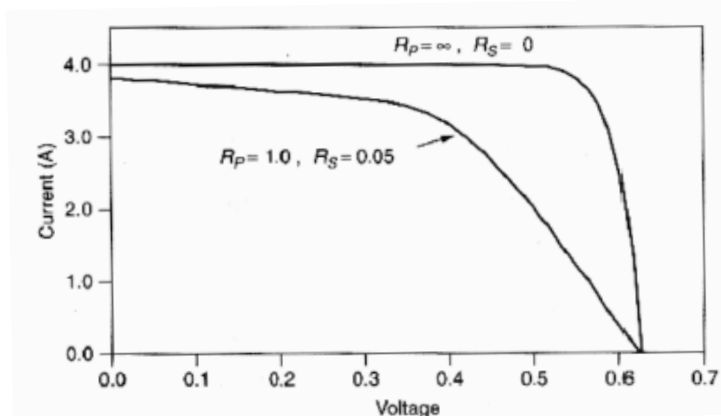


Slika 21. Kompleksan ekvivalentni model PV kola [1]

$$I = I_{sc} - I_0 \left(e^{\frac{q(V+I \cdot R_s)}{kT}} - 1 \right) - \left(\frac{V + I \cdot R_s}{R_p} \right)$$

Nažalost, ovo je kompleksna jednačina koja ne daje eksplicitna rešenja za napon U i struju I . Međutim, određivanje ovih vrednosti je olakšano korišćenjem tabela koje se zasnivaju na principu inkrementiranja napona diode V_d , a za svaku novu vrednost V_d mogu biti nađene odgovarajuće vrednosti V i I . Na Slici 21 dat je kompleksan ekvivalentan model PV kola, na Slici 22 data je realna $I-U$ karakteristika PV kola, a na

Slici 23 primer tabele za određivanje parova U-I. Na osnovu maksimalne snage iz tabele na Slici 23 (55.02W), može se reći da je u pitanju 55-W modul.



Slika 22. Realna karakteristika solarne ćelije [1]

Number of cells, $n = 36$
 Parallel resistance/cell R_p (ohms) = 6.6
 Series resistance/cell R_s (ohms) = 0.005
 Reverse saturation current I_0 (A) = $6.00E-10$
 Short-circuit current at 1-sun (A) = 3.4

$$I = I_{SC} - I_0 (e^{38.9V_d} - 1) - \frac{V_d}{R_p}$$

$$V_{module} = n(V_d - IR_s)$$

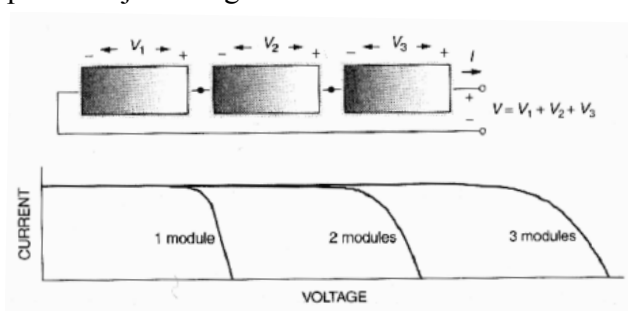
$$P \text{ (watts)} = V_{module} I$$

V_d	$I_{SC} - I_0 (e^{38.9V_d} - 1) - \frac{V_d}{R_p}$	$V_{module} = n(V_d - IR_s)$	$P \text{ (watts)} = V_{module} I$
0.49	3.21	17.06	54.80
0.50	3.16	17.43	55.02
0.51	3.07	17.81	54.75
0.52	2.96	18.19	53.76
0.53	2.78	18.58	51.65
0.54	2.52	18.99	47.89
0.55	2.14	19.41	41.59

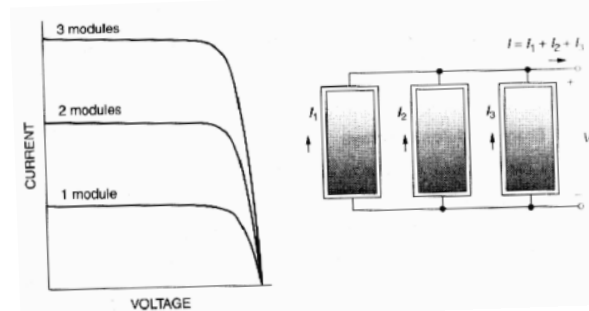
Slika 23. Tabela za rešavanje kompleksne jednačine i određivanje V-I parova rešenja [1]

MODULARNI PRISTUP

Pošto je izlazna snaga jedne solarne ćelije relativno mala (a napon negde oko 0.5V), u cilju povećanja izlaznog napona, struje i snage, solarne ćelije se grupišu u module, tako da moduli postaju osnovni sastavni delovi fotonaponskih sistema. Moduli sadrže određen broj redno (Slika 24) ili paralelno (Slika 25) povezanih fotonaponskih ćelija kako bi se dobili željeni napon, odnosno struja, a enkapsulirani su kako bi se zaštitili od neželjenih uticaja sredine i u cilju produženja radnog veka.

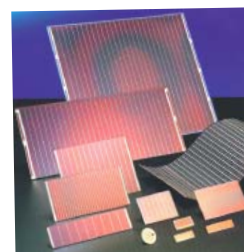


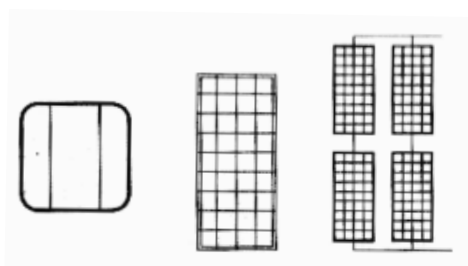
Slika 24. Redno vezane PV ćelije [1]



Slika 25. Paralelno vezane PV ćelije [1]

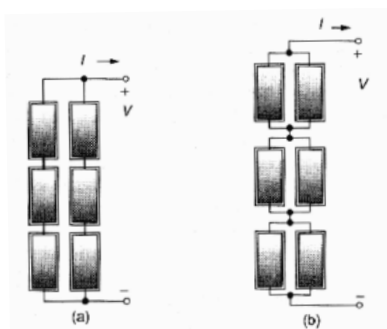
Moduli sa redno vezanim ćelijama povećavaju napon, a moduli sa paralelno vezanim ćelijama povećavaju struju sistema. Tipičan modul ima 36 redno vezanih ćelija i obično se naziva "12V modul", čak iako je u stanju da daje mnogo više napone od tog. U današnje vreme uobičajeni su moduli od 72 ćelije, a ukoliko se sve ćelije redno vezane nazivaju ih "24V modul". Ukoliko se 72 ćelije vežu u dva paralelna niza po 36 ćelija, i dalje će se imati 12V modul, ali sa dvostrukom većom strujom sistema. U tipičnom solarnom modulu ćelije su uronjene u laminat čiji je prednji sloj od temperovanog stakla, a zadnja strana je zatvorena mekanim i fleksibilnim plastičnim slojem ili





Slika 26. Čelija (a), modul (b), panel (c)

staklom. Fotonaponski paneli sadrže jedan ili više modula koji se mogu koristiti pojedinačno ili u grupama u cilju formiranja modularnih sistema, zajedno sa potpornim nosećim strukturama i drugim neophodnim pratećim komponentama... Sistemi se mogu fiksirati u određenom položaju prema suncu ili se mehaničkim putem njihov položaj kontinualno može prilagođavati pravcu sunčevih zraka (sistemi sa praćenjem sunca). Fotonaponski sistemi se klasifikuju ili po njihovoj predviđenoj upotrebi (zemaljski ili svemirski), ili po konstrukciji (ravni ili koncentratori), kao i po njihovoj konfiguraciji (fiksni ili pokretni).



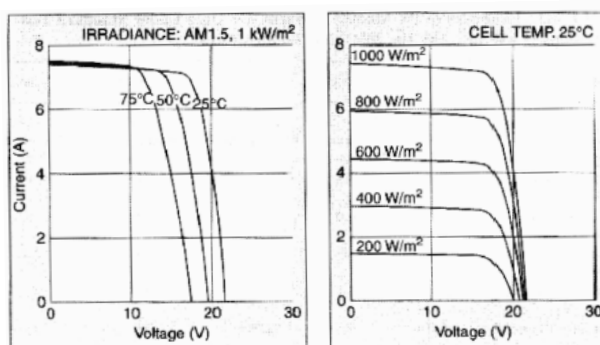
Slika 27. Vezivanje modula [1]

Solarni moduli se proizvode u širokom opsegu snaga od 1W do 170 W. Na primer, modul snage 170 W ima dimenzije od 790 x 1600 mm. Na Slici 26 može se videti pojedinačna fotonaponska ćelija (a), modul (b) i panel (c) kao sistem više redno ili paralelno povezanih modula u cilju povećanja snage sistema (*uticaj zasjenjenosti na I-U krive nije detaljnije obrađen, dovoljno je samo napomenuti da se u kolo fotonaponskog panela dodaje dioda paralelno vezana sa modulom da bi se ovaj uticaj ublažio*). Kada je potrebna veća snaga, panel se obično sastoji od kombinacije rednih i paralelnih modula za koje je I-U kriva suma pojedinačnih I-U krivih. Postoje dva načina da se moduli vežu u redno-parallelnoj vezi: nizovi redno vezanih modula mogu biti povezani paralelno, ili prethodno paralelno vezani moduli biti vezani redno. Ipak se preporučuje paralelno vezivanje nizova (Slika 27a), jer se na taj način ispadom jednog od nizova (lanaca) napon i dalje isporučuje iako sa smanjenom strujom, dok je u drugom slučaju struja nula i nema napona na krajevima modula (Slika 27b).

UTICAJ TEMPERATURE I OSUNČANOSTI NA I-U KRIVE

Proizvođači fotonaponskih panela često prilažu I-U karakteristike koje pokazuju kako se kriva pomera sa promenama temperature i osunčanosti. Na slici 28 dat je primer za Kyocera 120W multikristalni sijlicijum – kako osunčanost pada, pada i struja kratkog spoja u direktnoj proporciji sa osunčanošću. Npr., smanjivanjem osunčanosti za polovinu vrednosti, i struja I_{SC}

pada za 50%. Smanjenje osunčanosti takođe smanjuje i napon otvorene veze V_{OC} , ali u skladu sa logaritamskom jednačinom što rezultuje veoma blagim promenama napona. Kao što se može



Slika 28. I-U krive za različite temperature ćelija i nivoe zračenja za fotonaponski modul Kyocera KC-120-1 [1]

videti na Slici 28, kako temperatura ćelije raste napon otvorene veze se značajno smanjuje, dok se struja kratkog spoja povećava neznatno. Može se zaključiti da fotonaponski materijali imaju bolje performanse za vreme hladnih vedrih dana nego toplih. Npr., za ćeliju od kristalnog silicijuma pad napona iznosi 0.37% za svaki stepen Celzijusa više, a struja se povećava za približno 0.05% i maksimalna snaga pada za 0.5%/°C.

Temperatura ćelija varira ne samo usled promena u temperaturi ambijenta, već i zbog promena u osunčanosti – pošto samo mali deo solarnog zračenja koje dolazi do ćelije biva pretvoren u elektricitet i iskorišćen, veći deo dolazne energije je apsorbovan i pretvoren u toplotu. Da bi se dizajnerima sistema pomoglo da prate promene u performansama ćelije u zavisnosti od temperaturnih promena, proizvođači često daju podatak o NOCT-u (*Nominal Operating Cell Temperature*) koji predstavlja temperaturu modula na temperaturi okoline od 20°C, pri snazi sunčevog zračenja od 0.8 kW/m² i pri brzini vetra od 1m/s.

$$T_{\text{ćelije}} = T_{\text{amb}} + \left(\frac{NOCT - 20^\circ}{0.8} \right) \cdot S$$

gde je $T_{\text{ćelije}}$ temperatura ćelije (°C), a S snaga solarnog zračenja (kW/m²).

Kada NOCT nije dat, procena temperature ćelije vrši se na osnovu sledeće jednačine:

$$T_{\text{ćelije}} = T_{\text{amb}} + \gamma \left(\frac{S}{1 \text{ kW} / \text{m}^2} \right)$$

gde je γ faktor proporcionalnosti koji zavisi od brzine vetra i kvaliteta ventilacionog sistema na tek postavljenim modulima. Tipične vrednosti za γ su između 25°C i 35°C, tj. za snagu zračenja sunca od 1 kW/m² ćelije će imati za 25-35°C višu temperaturu od njihovog okruženja.

TEHNOLOGIJA IZRADE FOTONAPONSKIH MATERIJALA

Postoji više načina da se kategorizuju fotonaponski materijali, a jedan od njih je debljina poluprovodničkog sloja – konvencionalne ćelije sa kristalnim silicijumom su relativno velike debljine, u opsegu 200-500 μm . Alternativni pristup proizvodnje fotonaponskih materijala zasniva se na tankim slojevima (filmovima) poluprovodnika, u opsegu 1-10 μm . Tankoslojne ćelije zahtevaju manje poluprovodničkog materijala pa su lakše za proizvodnju, a samim tim imaju potencijal da u bliskoj budućnosti budu jeftinije od konvencionalnih ćelija sa debljim poluprovodničkim slojem. Prva generacija tankoslojnih fotovoltaika je bila upola manje efikasna, manje pouzdana tokom vremena i skuplja od konvencionalnih silicijumskih ćelija. Greške su ispravljene i današnja generacija tankoslojnih fotonaponskih materijala postaje dostojan takmac, sa tendencijom da u bliskoj budućnosti preuzme primat na tržištu. Trenutno, preko 80% svih fotonaponskih materijala imaju deblje ćelije, dok se poluprovodnički filmovi uglavnom koriste u kalkulatorima, satovima i ostaloj potrošačkoj elektronici. Trenutno, preko 80% svih fotonaponskih materijala imaju deblje ćelije, dok se poluprovodnički filmovi uglavnom koriste u kalkulatorima, satovima i ostaloj potrošačkoj elektronici.

Tehnologije proizvodnje fotonaponskih ćelija i modula mogu se, na osnovu tipa silicijumskog materijala, klasifikovati kao *monokristalne*, *polikristalne* i *amorfne*. Osim tehnologija koje se baziraju na silicijumu postoje i druge tehnologije bazirane na CIS (Copper Indium diSelenide), CdTe (Cadmium Telluride), GaAs (Gallium Arsenide), InP (Indium Phosphide), itd. Svaki tip ima različitu efikasnost, reaguje na različite delove sunčevog spektra i pogodan je za različite primene. Efikasnost solarne ćelije određene površine data je kao procentualni deo energije generisane od date količine upadne svetlosti (fotona). Efikasnosti komercijalno raspoloživih fotonaponskih modula različitih tehnologija prikazane su u tabeli 3.

Monokristalni silicijum (c-Si) je najpopularniji osnovni materijal solarne tehnologije, a ćelije i moduli napravljeni od ovog materijala su tradicionalno najzastupljeniji. Ovaj tip ćelije može pretvoriti $1000\text{W}/\text{m}^2$ sunčevog zračenja u 140W električne snage sa površinom ćelije od 1m^2 [17]. Za proizvodnju monokristalnih silicijumskih ćelija potreban je apsolutno čisti poluprovodnički materijal. Monokristalni štapići se vade iz istanjenog silicijuma i režu na tanke pločice. Ćelije od monokristalnog silicijuma su veoma stabilne i pokazuju visoku efikasnost u konverziji energije.

Polikristalne Si ćelije predstavljaju jeftiniju alternativu monokristalnim ćelijama, ali imaju određene prednosti jer zahtevaju manje čistog materijala i mogu se prilagoditi automatizovanoj masovnoj proizvodnji zbog načina na koji se priprema polazni materijal. Ovaj tip ćelije može pretvoriti $1000\text{W}/\text{m}^2$ sunčevog zračenja u 130W električne snage sa površinom ćelije od 1m^2 [17]. Proizvodnja ovih ćelija je ekonomski efikasnija u odnosu na monokristalne. Tečni silicijum se uliva u blokove koji se zatim režu u ploče. Tokom kristalizacije stvaraju se kristalne strukture različitih veličina na čijim granicama se pojavljuju greške, zbog tog razloga solarne ćelije imaju manju efikasnost (Tabela 7).

Amorfni (tankoslojni) materijali (filmovi), čija je debljina svega nekoliko mikrona, usled uštede materijala smanjuju cenu dobijene električne energije iz sunca. Ovaj tip ćelije može pretvoriti $1000\text{W}/\text{m}^2$ sunčevog zračenja u 50W električne snage sa površinom ćelije od 1m^2 [17]. Tanki fotonaponski filmovi, koji iako imaju nešto nižu efikasnost, imaju sa druge strane i nižu cenu koja ima važnu ulogu u određivanju profitabilnosti fotonaponske tehnologije. Najpopularniji

materijal za izradu tankih filmova je amorfni silicijum, dok se danas koriste i polikristalni materijali kao CIS i CdTe.

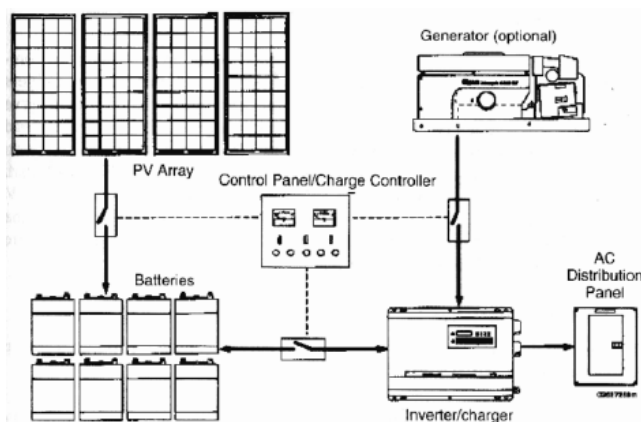
Tabela 3. Efikasnost solarnih fotonaponskih modula [2]

Tip solarne tehnologije	Tipična efikasnost fotonaponskih modula (%)	Maksimalna efikasnost modula (%)	Maksimalna efikasnost mod. u labor. uslovima (%)
Monokristalni silicijum (c-Si)	12 - 15	22.7	24.7
Polikristalni silicijum (m-Si)	11 - 14	15.3	19.8
Amorfni silicijum (a-Si)	5 - 7	10.1	12.7
Kadmium telurid (CdTe)	6 - 8	10.5	16.0
Bakar indium diselenid (CIS)	6 - 8	12.1	18.2

Još jedan način da se kategorizuju fotovoltaići bio bi prema tome da li su poluprovodnički slojevi izrađeni od istog ili različitih materijala. Ukoliko su od istog materijala (npr. dopirani silicijum), zovu ih *homospojnim (homojunction) fotovoltaićima*. Ako je pn sloj sastavljen od dva različita materijala, takvi fotovoltaići se zovu *heterospojni (heterojunction)*. Jedan od fotonaponskih materijala ovog tipa od kojeg se mnogo očekuje je onaj u kojem je n-sloj poluprovodnika izrađen od CdS (Cadmium Sulphide), a p-sloj od CIS (Copper Indium diSelenide).

FOTONAPONSKI SISTEMI

Fotonaponski sistemi interesantni za tehniku osvetljenja su autonomni (stand-alone) sistemi koji pune baterije (ponekad sa pomoćnim generatorom) (Slika 29) i sistemi povezani na distributivnu mrežu. Autonomni sistemi se upotrebljavaju samostalno, dakle nisu povezani na elektro-distributivnu mrežu i najčešće se koriste u udaljenim oblastima. Višak energije koji se generiše u autonomnim fotonaponskim sistemima u toku sunčanih perioda sakuplja se u akumulatorima. Drugi fotonaponski sistemi pretvaraju jednosmernu u naizmeničnu struju, a višak električne struje ubrizgavaju u distributivnu električnu mrežu. Fotonaponski sistemi povezani sa elektro-distributivnom mrežom predstavljaju jedan od načina da se izvrši decentralizacija električne mreže. Električna energija se ovim sistemima generiše bliže lokacijama na kojima postoji potražnja. Tokom vremena ovi sistemi će smanjiti potrebu za povećanjem kapaciteta novih elektrana, kao i prenosnih i distributivnih vodova.



Slika 29. Autonomni sistem sa pomoćnim generatorom [1]

Standardne komponente fotonaponskih sistema su fotonaponski moduli, kontroleri punjenja baterija, akumulatori, provodnici i noseći sistemi, a često se kod savremenih sistema koriste invertori koji omogućavaju fleksibilnost pretvaranja jednosmerne u naizmjeničnu struju, kao i mogućnost povezivanja sa elektro-distributivnom mrežom. Jednosmerna struja proizvedena u solarnoj ćeliji putem provodnika odvodi se do kontrolera punjenja. Osnovna funkcija kontrolera je da spreči prekomerno punjenje akumulatora, ali ima i neke druge uloge u zavisnosti od specifičnih primena. Ukoliko akumulator nije potpuno napunjen, postoji struja do akumulatora, gde se energija skladišti za kasniju upotrebu. Ako sistem treba da pokreće uređaje koji rade na naizmjeničnu struju, deo fotonaponskog sistema će biti i invertori koji pretvaraju jednosmernu u naizmjeničnu struju.

Fotonaponski sistemi su veoma raznovrsni: mogu biti manji od novčića i veći od fudbalskog igrališta i mogu da obezbeđuju energiju za bilo koji uređaj, od časovnika do čitavih naselja, i uz sve to jedini izvor energije koji koriste je sunčeva svetlost. Nedavni porast proizvodnje fotonaponskih ćelija uz smanjenje njihove cene, otvorio je veliki broj novih tržišta uz veliki broj različitih primena. Primene kao što su osvetljavanje, telekomunikacije, rashladni sistemi, pumpanje vode, kao i obezbeđivanje električne energije za čitava naselja (naročito u udaljenim oblastima), pokazale su se kao konkurentne i profitabilne u odnosu na već postojeće tehnologije. Solarna električna energija može da doprinese energetskej ponudi uz istovremenu pomoć u sprečavanju globalne promene klimatskih uslova. Upotreba fotonaponskih sistema može značajno da smanji potrošnju električne energije iz elektrana.

PRIMER JEDNOG FOTONAPONSKOG SISTEMA

U prethodnom tekstu je pomenuto da se fotonaponski sistemi mogu koristiti i za osvetljavanje, pa su kao primeri predstavljena dva autonomna sistema za napajanje instalacije osvetljenja. Iako se ne može očekivati da glavna primena i korist fotonaponske tehnologije bude u svetlotehnici, u poslednje vreme dosta se govori i o solarnom napajanju svetiljki u udaljenim oblastima gde ne postoji električna mreža (postoje i gradske zone gde mreža ne postoji, npr. autobuske stanice), a gde su uslovi osunčanosti (insolacije) i temperature zadovoljavajući. Uobičajena je praksa da se u javnom osvetljenju koriste izvori snage i do 400W (uglavnom natrijumovi izvori visokog pritiska, sve ređe živini i metal halogeni izvori, najčešće izvori snaga 150, 250 i 400W), nije realno očekivati da za svaku pojedinačnu svetiljku treba obezbediti fotonaponski modul koji treba je snadbeva ovom snagom. Ovakav modul bi bio prevelikih dimenzija i teško uklopljiv u sistem stub-svetiljka, a obim investicije prevelik i neisplativ. Solarno napajanje svetiljki svoju primenu može naći pre svega u javnom osvetljenju saobraćajnica manjeg značaja (blaži fotometrijski kriterijumi za srednju sjajnost i ravnomernost sjajnosti koji se mogu postići i sa izvorima snage 70 i 100W), osvetljenju pešačkih staza i parkovskom osvetljenju (uglavnom se koriste metal-halogeni izvori snage 35,70 i 100W, kao i natrijumovi izvori snage 70 i 100W). Treba napomenuti da sve prisutnija tehnologija izrade svetiljki sa LED omogućava da se napajanje vrši bez prethodnih konverzija iz jednosmerne u naizmjeničnu struju (LE diode rade na jednosmernom naponu), tj. bez invertora u električnom kolu fotonaponskog sistema. Takođe, ovo su izvori manjih snaga (obično moduli od do 48 visokoeffikasnih dioda snage po 1.2W), pa je za njih lakše i jeftinije obezbediti fotovoltaič potrebnih performansi. Osnovne komponente

sistema biće predstavljene kroz prikaz autonomnog sistema tipa SCHREDER SOLAR, proizvod kompanije Schreder. Osnovne komponente sistema su [12]:

Fotonaponski panel

Modul sa ćelijama od monokristalnog ili polikristalnog silicijuma visoke efikasnosti i pouzdanosti. Da bi se maksimalno iskoristila snaga solarnog zračenja, orijentacija panela mora se poklapati sa geografskim jugom (jug- jugozapad). Nagib panela je funkcija geografske širine mesta na kojem će sistem biti instaliran (za ovo podneblje uzima se da je taj ugao 42° , u praksi se ide do 45°). Fotonaponski panel ima mogućnost pune rotacije.

Invertor

Visokoefikasan uređaj direktno povezan na bateriju, dimenzioniše se u skladu sa zahtevima sistema. On konvertuje 12V ili 24V jednosmernog napona u sinusoidalni naizmenični napon 230V, učestanosti 50 Hz. Ukoliko se koriste LED izvori, izbegava se upotreba invertora jer je za napajanje LED potreban jednosmeran napon (umesto invertora se koristi DC/DC pretvarač koji pretvara naponski izvor (izlazni napon baterije) u izvor konstantne struje, neophodan u radu sa LED izvorima).

Kontroler punjenja baterije

Kontroler punjenja i pražnjenja baterije omogućuje pravilno upravljanje napunjenošću baterije na taj način joj produžavajući životni vek. Kontrolni panel je opremljen sa ON/OFF prekidačem svetiljke koji inicira početak i kraj noćnog perioda u kojem solarni panel daje energiju, a obezbeđuje i predefinisani program koji sadrži informaciju o željenom broju sati rada instalacije.

Stub

Stubovi su metalni (čelični) i zaštićeni postupkom toplog cinkovanja. Ojačani su i predviđeni za montažu solarnih panela – u zavisnosti od dimenzija solarnog panela, stub se posebno dimenzioniše. Komponente sistema se mogu smeštati u stub (prošireni donji deo), šaht pored stuba ili zaseban orman uz stub).

Baterija (akumulator)

Baterija skladišti energiju tokom dana za rad u noćnim satima. Kapacitet baterije se određuje u skladu sa zahtevanim stepenom autonomije (broj sati koje će instalacija raditi u nepovoljnijim (zimskim) uslovima kada je dnevna akumulacija solarne energije svedena na minimum). U zavisnosti od očekivane dubine pražnjenja baterije najčešće se koriste baterije AGM ili GEL tipa koje omogućavaju veću efikasnost punjenja/pražnjenja baterije, kao i održavanje napunjenosti (napona) baterije tokom dužeg vremenskog perioda. Pored osnovnih, sistem može imati i ove komponente:

Solarni tragač (Tracker)

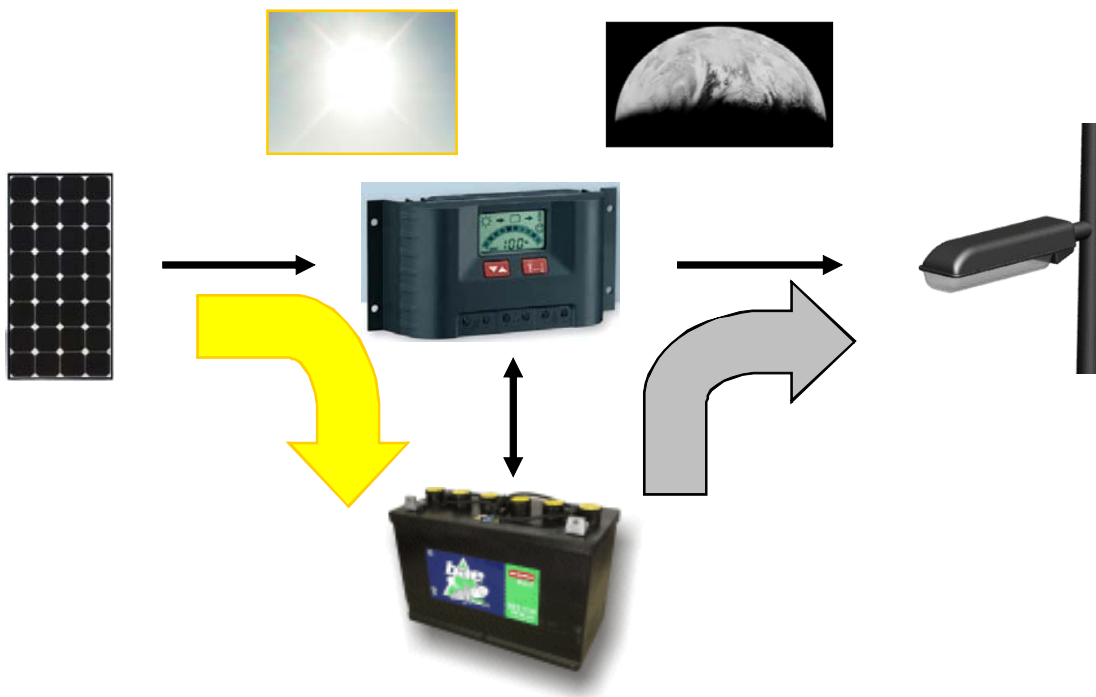
Rotacioni sistem kojim je omogućeno da se fotonaponski paneli kreću sa promenom položaja Sunca. Količina energije generisane u fotonaponskim panelima može biti značajno uvećana stalnom rotacijom panela u cilju njihovog postavljanja u najbolju poziciju za "hvatanje" sunčevih zraka, u svakom trenutku.

Svetlosni izvor

Sistem dozvoljava upotrebu različitih tipova svetlosnih izvora (natrijum visokog pritiska, metal-halogeni, LED, kompakt fluo, ...). Iako fizička ograničenja ne postoje, zbog dimenzionisanja sistema se preporučuje da se ne koriste izvori snaga većih od 70W!

Regulacija svetlosnog fluksa

Ukoliko za tim postoji potreba, naš solarni sistem može biti opremljen uređajima za regulaciju intenziteta svetlosti u noćnim satima prema zadatom (promenljivom) scenariju rada.



Slika 30. Elementi sistema SCHREDER SOLAR (panel, baterija, kontroler punjenja i svetiljka) [12]



Slika 31. Postavljanje uređaja sistema u kutiju u betoniran otvor u podnožju stuba [12]

OSVETLJENJE 2011.



Slika 32. Postavljanje uređaja u orman pored stuba ili u prošireno podnožje stuba [12]



Slika 33. Jedna instalacija solarnog osvetljenja u dnevnim i noćnim satima [12]

ZAKLJUČAK

Istraživanja sprovedena od strane “*The European Photovoltaic Technology Platform*” u avgustu 2009. godine pokazuju da tržište fotonaponskim materijalima ostaje jedan od najdinamičnijih globalnih sektora, gde je poslednjih godina prisutna stopa godišnjeg rasta od 35% [2,11]. Uprkos nestašici silicijuma na tržištu 2006.godine, narednih godina je instalirano više fotonaponskih sistema. Globalnim PV tržištem trenutno dominiraju Nemačka, SAD i Japan, a već se pojavljuju nova tržišta sa obećavajućim potencijalom (Italija, Španija, Grčka i Francuska su neke od zemalja koje će zabeležiti rast PV sektora). Tokom poslednje decenije fotonaponski sektor je postao važna industrija u mnogim zemljama. Glavni indikatori za razvoj fotonaponske industrije su industrijski rast i povećanje broja zaposlenih (2006. godine je 50000 ljudi bilo zaposleno u solarnoj PV industriji). Cene fotonaponskih sistema će se smanjivati 5% godišnje u narednih 20 godina [2,3]. Ovo će učiniti da se zadrži atraktivnost fotonaponske tehnologije i pospeši rast tržišta. Smanjenje troškova će takođe obezbediti da fotonaponska tehnologija postane još konkurentnija po ceni električne energije u narednoj deceniji.

U toku 21-og veka Srbija će morati da primeni mudru energetska strategiju koja će obuhvatati nekoliko inovativnih mera efikasnog korišćenja energije, brz porast korišćenja obnovljivih energetskih kapaciteta i korišćenje fosilnih goriva uz pridržavanje visokih ekoloških normi u cilju očuvanja prirodne sredine i klimatskih uslova. Ukupna instalisana električna snaga Srbije iznosi oko 8 GW. Na zemljinu površinu dnevno stigne oko $1000\text{W}/\text{m}^2$ sunčeve snage u Evropi, a površina Srbije iznosi približno $89\,000\text{km}^2$. Na osnovu prethodno rečenog može se zaključiti da je desetihiljaditi deo Sunčeve energije dovoljan da podmiri potrebe Srbije za električnom energijom. Uprkos velikog dugoročnog potencijala, fotonaponska tehnologija će u početku igrati sporednu ulogu, ali će njen doprinos konstantno rasti kako u urbanim tako i najudaljenijim mestima u Srbiji. Procena ukazuje da instalacioni potencijali za fotonaponske sisteme do 2010 godine iznose oko **20 MW** [2]. Brz porast fotonaponske industrije u svetu uz porast proizvodnih



Slika 34. SANYO fotonaponska centrala od 630 kW

kapaciteta i pozitivnu političku klimu u zemljama kao što su Japan, Nemačka i Španija, obećavaju dobru perspektivu fotonaponskim tehnologijama i u Srbiji. Uzimajući u obzir današnji značaj fotonaponske tehnologije, njihove dugoročne potencijale i vreme potrebno da se ovakve tehnologije razvijaju, razvoj i primene ovih tehnologija potpuno opravdavaju i ohrabruju

OSVETLJENJE 2011.

državnu podršku i subvencije. Pritom treba dodati da fotonaponska industrija može znatno da doprinese privredi zemlje otvaranjem novih radnih mesta, kao i malih i srednjih preduzeća.

U junu 2010. su se cene fotonaponskih modula kretale od oko 3 do 5 €/W, a kompletni sistemi se instaliraju po ceni od 4-8 €/W, u zavisnosti od tipa i veličine sistema. Uz tipičnu godišnju proizvedenu električnu energiju između 750 kWh i 1500 kWh po instaliranom kW, dobija se cena od 20-40 eurocenti/kWh. Očekuje se da cena fotonaponskih sistema padne na oko 1 €/W, što bi značilo da je cena fotonaponski generisane struje manja od 10 eurocenti/kWh (pretpostavljajući da će svetski kapaciteti biti oko 2000 GW in 2050. godini, može se očekivati da cena električne energije iz solarnih ćelija od približno 5-9 eurocenti/kWh bude realna do 2030. godine [2].).

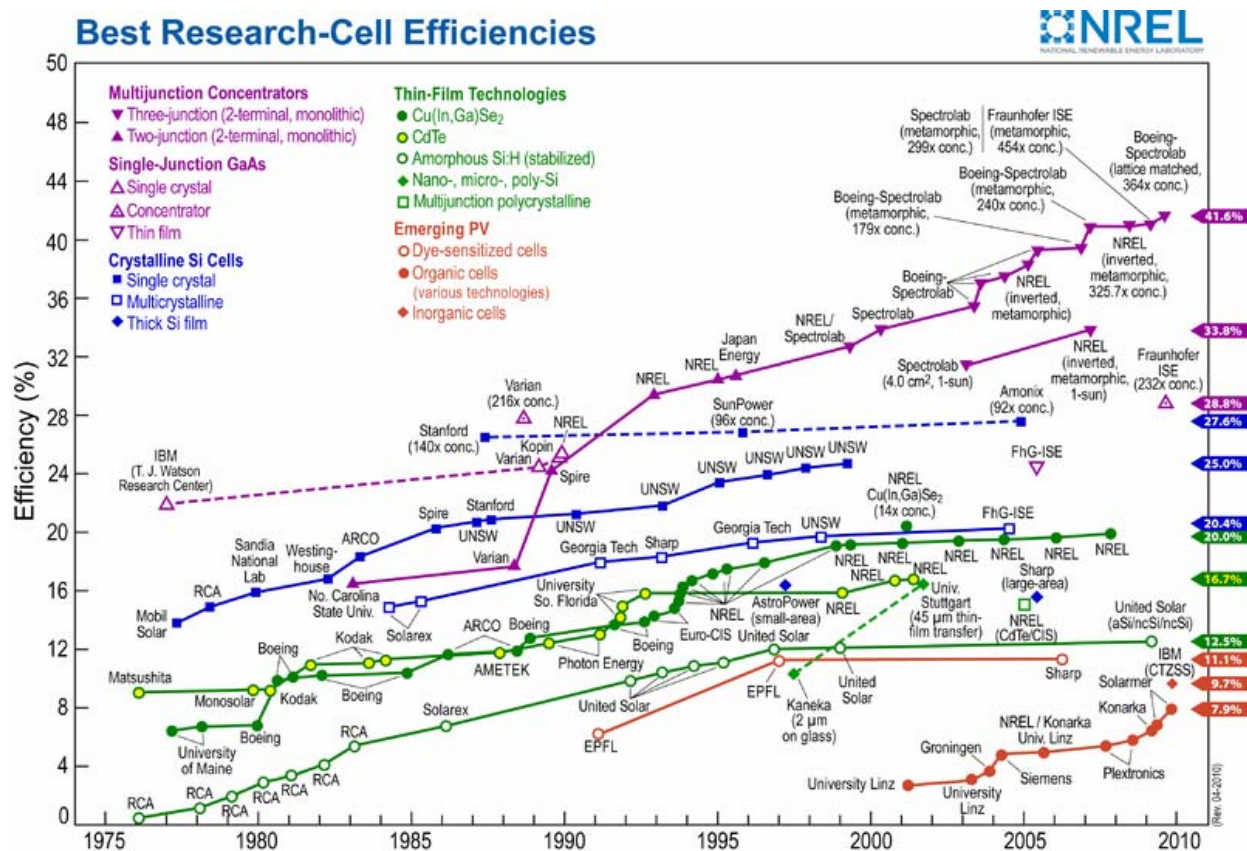


Slika 35. 11 MW solarno postrojenje u Serpi (Portugalija) sa Sun-Power centralnim tragačem [11]

Iako je globalno PV tržište u konstantnom porastu od preko 40% godišnje u prethodnim godinama, doprinos koji daje tržištu električne energije je još uvek veoma mali. Razvoj je usmeren na poboljšanje postojećih modula i komponenti sistema, kao i razvijanju novih tipova ćelija u sektoru tankoslojnih fotovoltaika i novih materijala za solarne ćelije. Očekuje se da efikasnost komercijalnih ćelija (data u Tabeli 7) bude povećana za 15-20% u narednih nekoliko godina, kao i to da će tankoslojni materijali biti komercijalno dostupniji.

Iako su najveći svetski proizvođači (SunPower) postigli efikasnost od 22% još 2005., očekuje se da se ona krajem 2010. bude 27.4% i da se tako još više približi teoretskom maksimumu od 29% za silicijumske ćelije [17]. Ovaj stepen efikasnosti omogućuje da se period otplate investicije smanji na 1-2 godine [17]. Na slici 36 dat je pregled efikasnosti fotonaponskih modula renomiranih svetskih proizvođača, uz napomenu da efikasnost modula pada (1-2)% godišnje. Prosečan garantovani životni vek koji proizvođači daju iznosi do 20 godina u slučaju održanja 90% inicijalne nominalne snage ili 25 godina u slučaju održanja 80% inicijalne nominalne (maksimalne) snage [17,18].

Ukupni instalirani kapaciteti svih solarnih fotonaponskih (PV) sistema u svetu su na kraju 2008. dostizali vrednost od 15,2 GW [11], a očekuje se da 2020. kapaciteti pređu granicu od 200 GW [2]. Iako globalno tržište fotonaponskih materijala raste sa godišnjom stopom od 40% od 1986. (poslednjih godina 35%), doprinos proizvodnji električne energije je još uvek vrlo mali.



Slika 36. Pregled efikasnosti PV modula renomiranih proizvođača [18]

U poređenju sa drugim obnovljivim izvorima energije, fotonaponska konverzija se iz gore navedenih razloga može smatrati dugoročnim rešenjem. Njen značaj polazi pre svega od velike fleksibilnosti i ogromnih tehničkih potencijala ove tehnologije za ruralnu elektrifikaciju za 2 milijarde ljudi koji žive u oblastima u kojima nije moguć pristup električnoj mreži. I na kraju, poredeći veličine sa Slike 3 (str.7), može se zaključiti da je fotonaponska konverzija možda i najčistiji obnovljivi izvor energije posle pasivnog solarnog kolektora, jer su ekološki efekti koji se imaju prilikom korišćenja ove tehnologije (kisela zagađenja NO₂, SO_x; globalno zagrevanje CO₂, CH₄; zdravlje i bezbednost ljudi, procenat teških metala, mogućnost katastrofe, ostaci, vizuelni uticaj, buka i zauzetost zemljišta) neznatni ili neznatno uočljivi.

Literatura

1. Gilbert M. Masters (Stanford University), „Renewable and efficient electric power systems“, Wiley-Interscience 2004.
2. Grupa autora, „Liber Perpetuum – knjiga o obnovljivim izvorima energije u Srbiji i Crnoj Gori“, OEBS misija u Srbiji i Crnoj Gori 2004.
3. Sven Teske, Arthouros Zervos, Oliver Schäfer, “Energy (R)evolution - sustainable world energy outlook”, Greenpeace International, EREC, 2007.
4. D.Mikičić, Ž.Đurišić, B.Radičević, A.Kunosić, “Atlas energetskeg potencijala sunca i vetra Srbije”, Izveštaj za Projekat TD-7042B, 2008.
5. “PV implementation plan”, radna grupa European Photovoltaic Technology Platform, publikacija 513548, ‘PV SEC’, 2009.
6. B.Radičević, D.Mikičić, “Komparacija metoda za procenu energetskeg potencijala vetra i pretvaranje energije vetra u električnu energiju”
7. Ž.Đurišić, M.Bubnjević, D.Mikičić, N.Rajaković, “Wind atlas of Vojvodina, Serbia”, Proc. of European Wind Energy Conference (EWEC 2007), Milano, Italy, May 2007.
8. The Electric Power Research Institute (EPRI), “Solar Photovoltaics Expanding Electric Generation Options”, EPRI 2007.
9. <http://en.wikipedia.org/wiki/Watt-peak>
10. <http://en.wikipedia.org/wiki/Semiconductor>
11. <http://en.wikipedia.org/wiki/Photovoltaics>
12. Tehnički opis sa fotografijama i specifikacija za sistem GiraSol, Schreder 2009.
13. http://en.wikipedia.org/wiki/Solar_tracking
14. http://hr.wikipedia.org/wiki/Solarna_energija
15. <http://www.futureenergyevolution.com/SEA/vetar.php> - Atlas vetrova APV, 2008.
16. Tamara Popović, "Fotonaponska konverzija Sunčeve energije", diplomski rad 2008.
17. [http://en.wikipedia.org/wiki/File:PVeff\(rev100414\).png](http://en.wikipedia.org/wiki/File:PVeff(rev100414).png)
18. <http://www.telefon-inzenjering.co.rs/>