

# Fotoelektrični efekt

---

**Tomas, Filip**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2020**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Rijeka, Faculty of Civil Engineering / Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:157:252843>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-15**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Civil Engineering - FCERI Repository](#)



image not found or type unknown

**SVEUČILIŠTE U RIJECI  
GRAĐEVINSKI FAKULTET U RIJECI**

**Filip Tomas**

**Fotoelektrični efekt**

**Završni rad**

**Rijeka, 2020.**

**SVEUČILIŠTE U RIJECI  
GRAĐEVINSKI FAKULTET RIJEKA**

**Preddiplomski sveučilišni studij  
FIZIKA**

**Filip Tomas  
JMBAG: 0114030079**

**Fotoelektrični efekt**

**Završni rad**

**Rijeka, rujan 2020.**

Naziv studija: Preddiplomski sveučilišni studij  
Znanstveno područje/područja: Prirodne znanosti  
Znanstveno polje/polja: Fizika  
Znanstvena grana/grane: Fizika

Tema završnog rada  
**Fotoelektrični efekt**

Kandidat: **FILIP TOMAS**  
Kolegij: **Fizika**  
Završni rad broj: **20-P-67**

**Zadatak:**

Od studenta se očekuje da objasni u osnovnim crtama fotoelektrični efekt, način nastajanja kao i princip rada fotonaponskih elemenata. Morao bi i objasniti u čemu je genijalnost ovog procesa koji je objasnio dualnu prirodu svjetlosti. Također će se okarakterizirati materijal koji su najčešće zastupljeni u fotonaponskim ćelijama.

Tema rada je uručena: 24.veljače 2020.

Mentor: prof.dr.sc. Boris Podobnik

## **IZJAVA**

Završni rad izradio sam samostalno, u suradnji s mentorom uz poštivanje pozitivnih građevinskih propisa i znanstvenih dostignuća iz područja građevinarstva. Građevinski fakultet u Rijeci je nositelj prava intelektualnog vlasništva u odnosu na ovaj rad.

---

Filip Tomas

U Rijeci, rujan 2020.

## **SAŽETAK:**

Predmet ovog završnog rada je pojasniti fotoelektronski efekt, način nastajanja, kao i sam princip rada fotonaponskih elektrana. Utjecaj električne energije proizvedene iz fotonaponskih ćelija na životnu sredinu kao i sastavne segmente i procese koji će se detaljnije razjasniti u radu. Također će se okarakterizirati materijali koji su zastupljeni u fotonaponskim ćelijama.

**KLJUČNE RIJEČI:** fotoelektrični učinak, obnovljivi izvori energije, fotonaponske ćelije, fermijev nivo, fotonaponske elektrane

## SADRŽAJ:

<b>1.Uvod</b> .....	<b>1</b>
<b>2. OBNOVLJIVI IZVORI ENERGIJE</b> .....	<b>2</b>
2.1 Prognoza potrošnje energije u svijetu.....	2
2.2 Metode korištenja obnovljivih izvora energije .....	3
<b>3. Fotonaponske elektrane</b> .....	<b>5</b>
3.1 P-n spoj.....	8
3.1.1 Fermijev nivo .....	10
3.2 Fotonaponske ćelije .....	13
3.3 Princip rada fotonaponske ćelije.....	13
<b>4. Zabranjene zone</b> .....	<b>15</b>
4.1. Apsorpcija Sunčeve energije .....	16
<b>5. Materijali za izradu fotonaponske ćelije</b> .....	<b>18</b>
5.1 Silicij u obliku traka (ribbon) .....	18
5.2 Tankoslojne ćelije .....	19
5.3 Proizvodnja sunčanih ćelija od amorfnog silicija .....	20
5.4 Nedostaci silicijskih ćelija .....	22
<b>6. Solarne ćelije u domaćinstvu</b> .....	<b>24</b>
<b>7. ZAKLJUČAK</b> .....	<b>26</b>
<b>8. LITERATURA</b> .....	<b>27</b>







## 1.Uvod

Klimatske promjene pogodovale su opstajanju života na Zemlji od povijesti. Promatranje klime kao obnovljivi resurs kojemu je energetska komponenta energija sunca, a materijalna komponenta su oceani kao rezervoari za vodu. Vizija izlaska iz te krize klimatske promjene je vrlo jasna i to je povratak na manje štetne izvore energije. Neodgovoran pristup prema klimatskim promjenama mogao bi u budućnosti znatno promijeniti klimu, što bi život osjetljivih biljaka i životinja učinio ugroženim. Budući da sve vrste žive u prirodnoj ravnoteži to bi utjecalo na cijeli biološki sustav Zemlje. Da bi se izbjegla negativna budućnost, neke države počele su poticati programe štednje energije i prelazak na, utjecajno gledano, povoljnije izvore energije. Generalno za sada nema velikog napretka u tome jer je količina energije dobivena na taj način zanemariva prema energiji dobivenoj od fosilnih goriva i nuklearnih elektrana, od kojih su fosilna goriva trenutno najveći zagađivači Zemlje. Moderno društvo jednostavno je nezamislivo bez benzina, nafte i ugljena, a to su izvori energije koji pokreću moderni industrijski svijet. Vlade industrijski utjecajnih država još se uvijek ne odlučuju na ozbiljnije investicije u čišće izvore energije poput energije vjetra, energije Sunca, energije vode itd., nego su još fokusirane na fosilna goriva kao glavne industrijske energente.

Fasciniran pri pomisli da lako dostupna energija sunca i vjetra mogu lako biti transformirani u električnu energiju besplatnu za cijelo čovječanstvo, odlučio sam se za ovu temu. Cilj ovog rada je objasniti principe rada solarnih elektrana te njihov utjecaj na okolinu u odnosu na fosilna goriva.

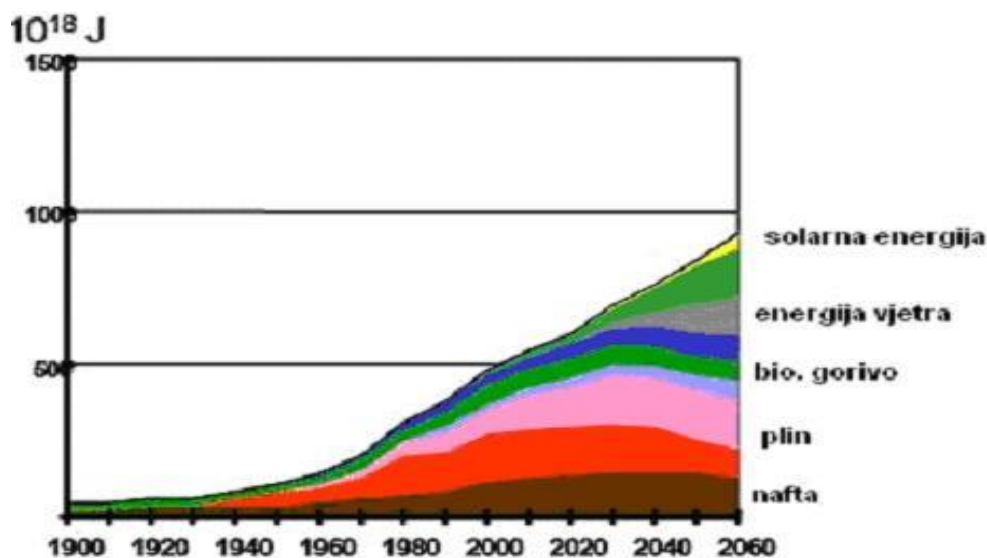
Pri izradi rada koristio sam internet i literaturu o obnovljivim izvorima energije.

Također, pomogli su mi razgovori s ljudima koji su bili prisiljeni, zbog udaljenosti nekretnine koristiti alternativne izvore električne energije.

## 2. OBNOVLJIVI IZVORI ENERGIJE

### 2.1 Prognoza potrošnje energije u svijetu

Prognoza potrošnje, prema današnjem znanju, zalihe različitih izvora energije i to u slučaju da se potrošnja energije povećava za 3% godišnje – što odgovara porastu potrošnje energije proteklih godina prikazana je na slici 2.1 Za fosilna goriva se smatra da će biti dostupna još nekih 35–55 godina i da će njihova cijena na tržištu znatno porasti. Postoje ogromne količine zaliha fosilnih goriva ispod oceana, ali čak i kada bi tehnologija bila dovoljno napredna za njihovo crpljenje, cijena na tržištu bi premašila današnju više desetina puta.



Slika 2.1. Prognoza potrošnje energije u svijetu

Pored ovoga problema sa fosilnim gorivima, zabrinjavajući je i problem oslobađanja ugljični dioksid  $\text{CO}_2$ , dušični spojevi, sumporni oksidi i dr. izgaranjem fosilnih goriva. ( $\text{CO}_2$  je također poznat kao staklenički plin.) Ovi plinovi doprinose globalnom zagrijavanju i stvaranju efekta staklenika. Svakodnevno Sunčevo zračenje pada na Zemlju. Ono što dopre na zemljinu površinu zagrijava je. Ta se toplina djelomice, u obliku infracrvenog zračenja, oslobađa u atmosferu. Proces zagrijavanja i hlađenja je uravnotežen i ovisi o sastavu atmosfere. Ugljični dioksid (uz druge plinove) apsorbira

oslobođeno infracrveno zračenje i zadržava dovoljno visoku temperaturu na Zemlji (učinak staklenika). Porast koncentracije CO<sub>2</sub> u atmosferi može izazvati usporavanje oslobađanja topline u svemir i izazvati njezino povećano zagrijanje. Porast koncentracije CO<sub>2</sub> u atmosferi godišnje se povećava za 0,4 %, što je dvostruko veće u odnosu na period od prije 100 godina. Danas gotovo i da nema sumnje da je porast prosječne temperature na Zemlji vezan sa povišenom koncentracijom CO<sub>2</sub> u atmosferi. Samo male promjene temperature mogu dovesti do promjene klime i prirodnih katastrofa koje ugrožavaju život na Zemlji.

Zbog ograničenih zaliha fosilnih goriva i problema za CO<sub>2</sub> sve su veći izazovi i naponi da pronalaskom i usavršavanjem novih izvora energije. Iskoristivost snage vode je danas skoro dostigla svoje granice, dok se porast, iskorištavanja snage vjetra i sunčevog zračenja za proizvodnju energije, očekuje (naročito u primorskim područjima).

## **2.2 Metode korištenja obnovljivih izvora energije**

### ***Geotermalna energija***

Kad bismo od površine Zemlje kopali rupu prema njenoj užarenoj jezgri, čija se temperatura procjenjuje na 4 000 °C, temperatura bi na svakih 1 000 metara dubine porasla u prosjeku za 30 °C. Onima koji žive u blizini termalnih izvora ili pukotina nastalih uslijed vulkanske aktivnosti ta je toplina iz unutrašnjosti Zemlje dostupnija. Vruću vodu i paru koja nastaje na takvim mjestima danas se u 58 zemalja koristi za grijanje domova i proizvodnju električne energije. Neke druge zemlje, kao što je Australija, razmatraju mogućnost korištenja toplinske energije pohranjene u kamenim naslagama svega nekoliko kilometara ispod površine Zemlje. Časopis Australian Geographic navodi: "Neki istraživači vjeruju da bi se desetljećima, pa čak i stoljećima, moglo proizvoditi električnu energiju kad bi se na takva mjesta ispod Zemljine površine ubacivalo vodu i potom tu istu vodu, zagrijanu na visokoj temperaturi, koristilo za pokretanje turbina dok se pod velikim pritiskom vraća na površinu."

### ***Gorive ćelije***

Prvu gorivu ćeliju izradio je 1839. britanski odvjetnik i fizičar Sir William Grove. Međutim, kako je izrada tih uređaja bila skupa, a gorivo i druge komponente bilo je teško

nabaviti, ta je tehnologija ostala neiskorištena sve do sredine 20. stoljeća, kad su Amerikanci počeli koristiti gorive ćelije kao izvor energije za svemirske letjelice. Današnje svemirske letjelice još uvijek koriste taj izvor energije, a sada se već istražuju mogućnosti primjene gorivih ćelija za čovjekove potrebe na Zemlji.

Radi se na razvoju gorivih ćelija koje bi zamijenile motore s unutarnjim izgaranjem u motornim vozilima, proizvodili električnu struju za poslovne zgrade i kućanstva te napajali strujom uređaje kao što su mobiteli i kompjuteri. Nažalost, energija koja se dobiva iz postojećih elektrana koje rade na principu gorivih ćelija trenutno je više nego četverostruko skuplja od one koja se dobiva iz fosilnih goriva. Stoga se u razvoj ove još uvijek nove i neistražene tehnologije i dalje ulaže stotine milijuna dolara.

Pozitivni utjecaji iskorištavanja ekološki čišćih izvora energije na okoliš više su nego očiti. Međutim, troškovi povezani sa širokom primjenom tih novih metoda proizvodnje energije vjerojatno će i dalje biti previsoki. Predviđa se da će u budućnosti i dalje najviše rasti potražnja za fosilnim gorivima (nafta, zemni plin i ugljen) jer se očekuje da će njihove cijene ostati relativno niske, dok će cijene energije dobivene iz drugih energenata biti daleko više.

### *Sunce*

Insolacija sunčevog zračenja na vanjski rub atmosfere iznosi prosječno 1,37 kWh/m<sup>2</sup>, dok na zemlji ona iznosi oko 1 kWh/m.

Osim što zagrijava površinu našeg planeta, uzrokuje i gibanje zraka oko Zemlje stvarajući još jedan izvor energije - snaga vjetra. Vjetar pokreće more i stvara snažne valove koji se opet mogu koristiti – snaga valova. Sunčeva energija omogućuje i kružni tok vode – snaga tekuće vode. I na kraju direktno prikupljanje solarne energije, koja je neiscrpnna, ne zagađuje, bezopasna je, tiha, čista i besplatna, za razliku od fosilnih goriva.

### 3. Fotonaponske elektrane

Obećavajuća je tehnologija solarnih ćelija ili fotonaponskih ćelija. Dva su načina na koji se može koristiti Sunčeva energija je, za grijanje vode (klasični solarni kolektori) te za stvaranje električne energije (fotonaponske ćelije – fotovoltaići). Pridjev »solarne« označava činjenicu da je naprava podešena tako da najefikasnije radi za spektar Sunca. Sistemi za grijanje vode imaju mnogo bolju iskoristivost, međutim njihova primjena je ograničena na proizvodnju tople vode i grijanje prostora, dok se električna energije dobivena iz fotonaponskih ćelija može upotrijebiti za bilo koji električni aparat.



*Slika 3.1 Direktno pretvaranje sunčevog zračenja u električnu energiju*

Upotreba fotonaponske ćelije u stalnom je porastu od prosječno 30 % godišnje. Za sada najkvalitetniji sustavi imaju iskoristivost od 25 % u laboratorijskim uvjetima, dok komercijalne solarne ćelije, zbog zahtjevnog procesa proizvodnje i primjene najnovijih tehnoloških dostignuća, imaju iskoristivost oko 13 %. Cijena solarnih ćelija zavisi od njenog tipa i od njene površine, odnosno količine materijala koji se utroši za njenu izradu. Da bi se uštedio materijal nastoje se proizvesti što tanje ćelije. Posljednjih godina njihova debljina se dvostruko smanjila što ima za posljedicu mnogo lakše oštećenje. Dodatni problem je što ta iskoristivost pada sa vremenom te se kroz 10 godina prepolovljava, a imaju vijek trajanja preko 25 godina. Većina proizvođača solarnih modula daje garanciju preko 20 godina na svoje proizvode. (Moduli su sistemi solarnih ćelije koje su međusobno povezane).

Električna energija proizvedena iz fotonaponskih ćelija ima daleko manji utjecaj na životnu sredinu nego tradicionalne metode kojima se ona proizvodi (termo elektrane, nuklearne elektrane). Za vrijeme funkcioniranja, solarne ćelije ne koriste nijedno drugo gorivo izuzev sunčeve svjetlosti, ne ispuštaju nijedan zagađivač atmosfere ili vode, i ne zahtjevaju hlađenje vodom. Za razliku od fosilnih goriva (uglja, nafte, prirodnog plina) koja opskrbljuju elektrane, solarne ćelije ne doprinose globalnom zagrijavanju ili kiselim kišama. Također, njihovo prisustvo ne izaziva nikakav rizik od radioaktivnosti. Jedini negativan uticaj na sredinu koji solarne ćelije mogu imati, jeste u procesu njihove proizvodnje kada se koriste neki otrovni elementi i količina zemljišta koja se koristi za njihovo masovnije instaliranje. Ove činjenice ukazuju na svijetlu budućnost kada je u pitanju njihova primena a jedina prepreka bi mogla biti njihova cijena. Njihova ugradnja sa ekonomskog aspekta nije opravdana, ali sa ekološke strane ona to itekako jeste. Zbog toga proizvodnja električne energije fotonaponskom pretvorbom pomoću sunčanih ćelija je jedan od najatraktivnijih načina proizvodnje električne energije. Na taj se način električna energija proizvodi bez buke i pokretnih dijelova koristeći izvor koji je praktički neiscrpan. Iako se interes za fotonaponsku pretvorbu sunčane energije stalno povećava, a proizvodnja i prodaja sunčanih ćelija i fotonaponskih modula u stalnom su porastu, udio fotonaponski proizvedene električne energije u ukupno proizvedenoj električnoj energiji i dalje je zanemariv. Naime, sve pozitivne strane koje nudi fotonaponska pretvorba zasjenjene su njenim najvećim nedostatkom – visokom cijenom. U usporedbi s konvencionalnim izvorima energije fotonaponska pretvorba još je uvijek skup izbor, a razlozi za to su skup postupak proizvodnje sunčanih ćelija i njihova još uvijek mala djelotvornost.

Na tržištu je i dalje dominantna tehnologija temeljena na kristaliničnom siliciju na koju otpada oko 94 % ukupne proizvodnje sunčanih ćelija. Razlog tome u velikoj mjeri krije se u činjenici da je razvoj fotonaponske industrije bio značajno oslonjen na razvoj mikroelektroničke industrije. Sazrijevanjem ove tehnologije, u ukupnim troškovima sve veći udio zauzima cijena samog materijala. Upravo se to događa s kristaliničnim silicijem. Unatoč stalnim usavršavanjima i mnogobrojnim istraživanjima usmjerenima prema uštedi materijala i utrošene energije, s današnjeg gledišta teško se može očekivati značajniji pomak koristeći postojeće tehnologije.

Jedan od načina uštede moguće je postići ako se umjesto kristaliničnog silicija koristi neki od tankoslojnih materijala (amorfni silicij, kadmij-telurid, bakar-indij-diselenid i dr.). Za razliku od kristaliničnog silicija koji ima indirektni zabranjeni pojas i relativno mali apsorpcijski koeficijent, tankoslojni materijali redom su poluvodiči s direktnim zabranjenim pojasom i mnogo većim apsorpcijskim koeficijentom. Tankoslojni materijali i tehnologije pripadaju drugoj generaciji sunčanih ćelija. Iako se često nailazi na mišljenje da tankoslojne tehnologije nikad nisu ispunile očekivanja, daljnjim istraživanjima pojedinih materijala i njihovih primjena kao primjerice u višespojnim sunčanim ćelijama, moguće je povećati sadašnje djelotvornosti. Udio tankoslojnih sunčanih ćelija na tržištu zadnjih se godina značajno povećava.

Sunčane ćelije treće generacije uključuju nove tehnologije i koncepte kojima se postižu iznimno visoke djelotvornosti i/ili vrlo jeftini uređaji. Cilj je ukloniti ili što je moguće više smanjiti postojeće poznate mehanizme gubitaka u sunčanim ćelijama. Koncepti sunčanih ćelija treće generacije uglavnom su usmjereni ka iskorištavanju čitavog spektra Sunčeva zračenja (koristeći višespojne ćelije) i ka uklanjanju gubitaka u sunčanoj ćeliji u obliku topline. Razvoj novih materijala temeljenih na nanotehnologiji (kvantni zdenci i kvantne točke, nanokristali, nanožice i dr.) otvaraju mogućnost za praktičnu realizaciju nekih od koncepata sunčanih ćelija treće generacije, ali i daju mogućnost korištenja poznatih materijala u novim strukturama.



### 3.1 P-n spoj

#### *Poluvodiči*

Prema stupnju električne vodljivosti kristala razlikujemo metale, poluvodiče i izolatore. Nasuprot metalima u savršenim izolatorima električni otpor na apsolutnoj nuli bio bi beskonačan. Poluvodiči su čvrste kristalne tvari kojima je električna vodljivost manja od električne vodljivosti metala, a veća od električne vodljivosti izolatora.

Različito ponašanje metala, poluvodiča i izolatora možemo objasniti pomoću koncepta dostupnih energijska stanja (slika 4.2).



*Slika 3.2 Energijske vrpce u čvrstim tijelima*

Naime, međudjelovanjem atoma u čvrstom tijelu stvaraju se energijske vrpce (energy bands). Dok su atomi dovoljno udaljeni, energija elektrona određena je nizom diskretnih nivoa. Smanjivanjem razmaka između atoma, međudjelovanje postaje sve jače. Od svakog energijskog nivoa izoliranog atoma nastat će mnoštvo bliskih nivoa grupiranih u energijsku vrpce. Širina vrpce raste s pojačanjem elektronskog međudjelovanja. Vrpce mogu biti razdvojene područjem energijskih stanja u kojima se elektroni ne mogu nalaziti, energijskim procjepom (energy gap), ili se mogu preklapati.

Kvantna teorija objasnila je različito ponašanje metala, poluvodiča i izolatora sa stupnjem popunjenosti energijskih vrpca. Kod izolatora i poluvodiča na apsolutnoj nuli valentni elektroni u potpunosti popunjavaju najvišu zauzetu vrpce, koju nazivamo valentna vrpca. Sljedeća viša vrpca, vodljiva vrpca, na apsolutnoj nuli je potpuno prazna, što znači da nema elektrona koji mogu sudjelovati u vođenju električne struje. Kod vodiča

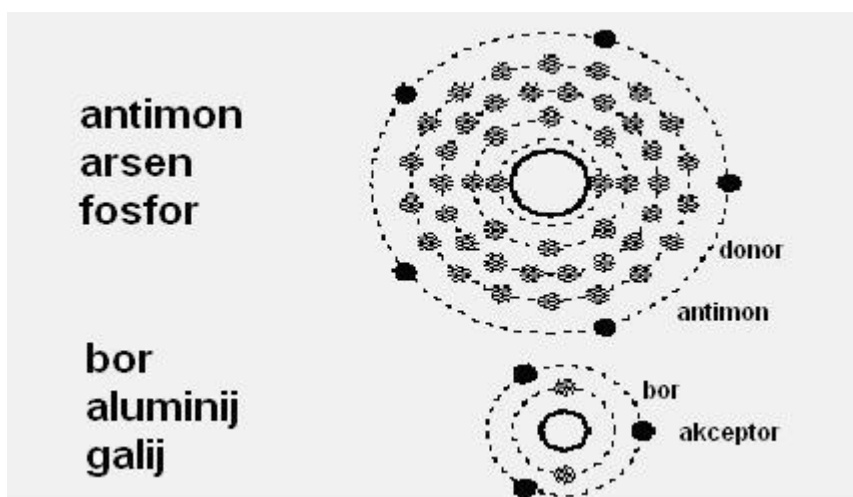
valentna i vodljiva vrpca se preklapaju pa dio elektrona može sudjelovati u vođenju električne struje i pri temperaturi apsolutne nule (slika 4.3). Energijski procjep između valentne i vodljive vrpce u tipičnim izolatorima iznosi približno 5eV do 10eV, a u poluvodičima oko 1eV. Energijski procjep izolatora je preširok da bi se na temperaturama manjima od tališta, termički mogao pobuditi veći broj elektrona.



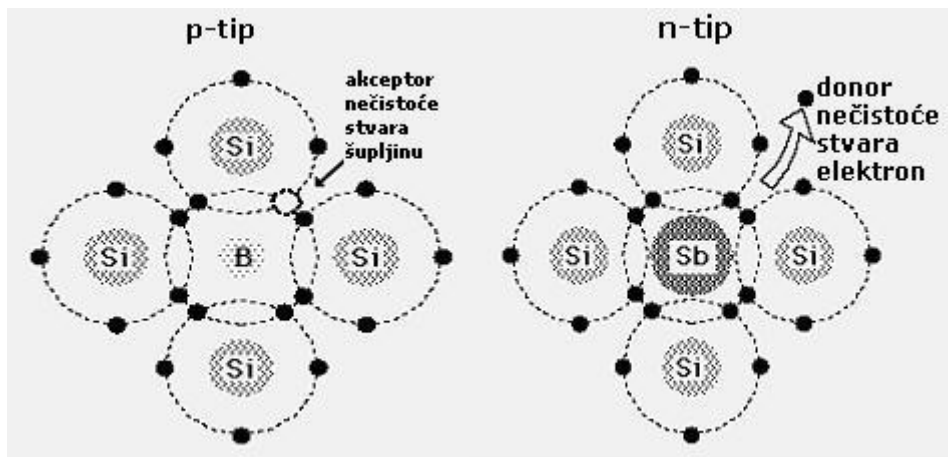
Slika 3.3 Vodljiva i valentna vrpca kod izolatora, poluvodiča i vodiča

### Poluvodiči s primjesama

Dodavanje malog broja primjesa u pravilnu kristalnu rešetku silicija ili germanija mijenju se njihova električna svojstva. Ako su primjese peterovalentne (donori) onda dobivene poluvodiče nazivamo n-poluvodičima, a ako su trovalentne (akceptori) onda ih nazivamo p-poluvodičima (slike 3.4 i 3.5).

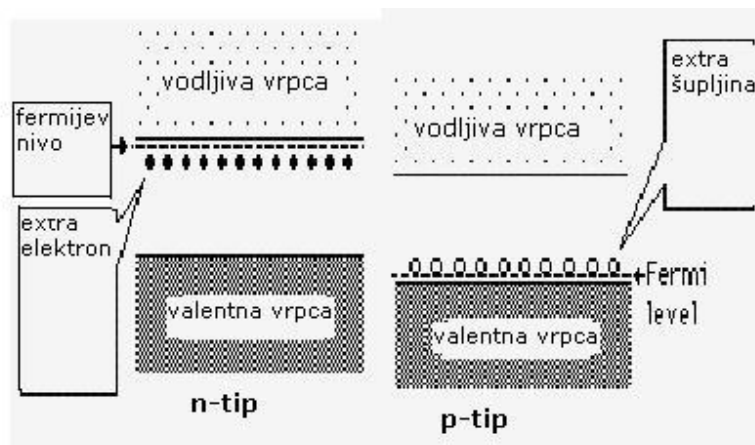


Slika 3.4 Donorske i akceptorske primjese



Slika 3.5 N- i p- tip poluvodiča

Primjena teorije vrpce pokazuje da su u slučaju n- i p- poluvodiča dobiveni dodatni energijski nivoi. Slabije vezani elektroni donorske primjese nalaze se u energijskim nivoima pri vrhu energijskog procjepa. Što znači da se ti elektroni mogu lako pobuditi u vodljivu vrpcu. Kod akceptorskih primjesa energijski nivoi šupljina u energijskom procjepu omogućavaju pobuđivanje elektrona iz valentne vrpce koji onda za sobom ostavljaju šupljine (slika 3.6).



Slika 3.6 Energijske vrpce u dopiranim poluvodičima

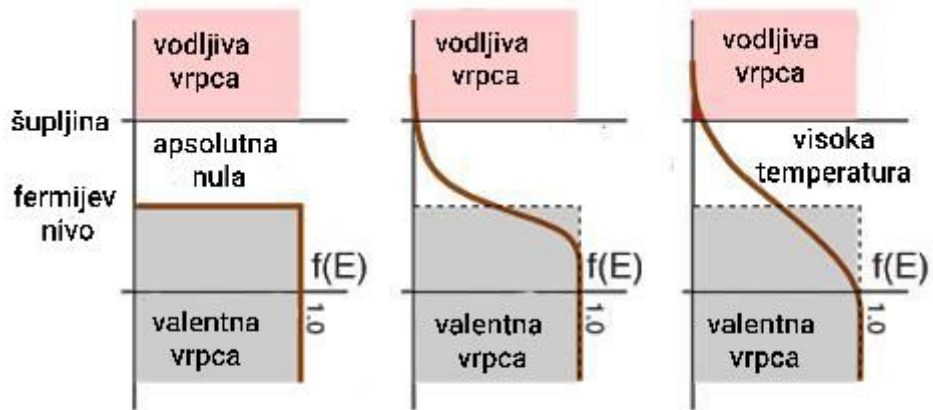
### 3.1.1 Fermijev nivo

Fermijev nivo je pojam koji se koristi za opisivanje razine energije elektrona pri

apsolutnoj nultoj temperaturi. Elektroni su fermioni i prema Paulijevom principu isključenja ne mogu postojati u identičnim energetske stanja. Dakle, na apsolutnoj nuli prelaze u najniža raspoloživa energetska stanja i grade "Fermijevo more" stanja elektronske energije. Fermijev nivo je površina tog prostora na apsolutnoj nuli gdje niti jedan elektron neće imati dovoljno energije da se uzdigne iznad površine. Fermijeva energija je presudno važan pojam za razumijevanje električnih i toplinskih svojstava krutih tvari. Obični električni i toplinski procesi uključuju energiju malog udjela volta elektrona, ali Fermijeve energije metala nalaze se u redoslijedu elektrona vol. To podrazumijeva da velika većina elektrona ne može primiti energiju iz tih procesa jer ne postoje raspoloživa energetska stanja za njih. U djeliću elektrona volta njihove sadašnje energije, ograničene na malenu dubinu energije, ove su interakcije ograničene na "gibanje po Fermijevom moru". Pri višim temperaturama, određeni udio, okarakteriziran funkcijom Fermi, postojat će iznad razine Fermija. Fermijeva razina igra važnu ulogu u teoriji o rasponu. U dopiranim poluvodičima, p-tipa i n-tipa, razina Fermija pomiče se nečistoćama, što ilustriraju njihove praznine u pojasu. Razina Fermija u drugim se kontekstima naziva elektronsko-kemijskim potencijalom.

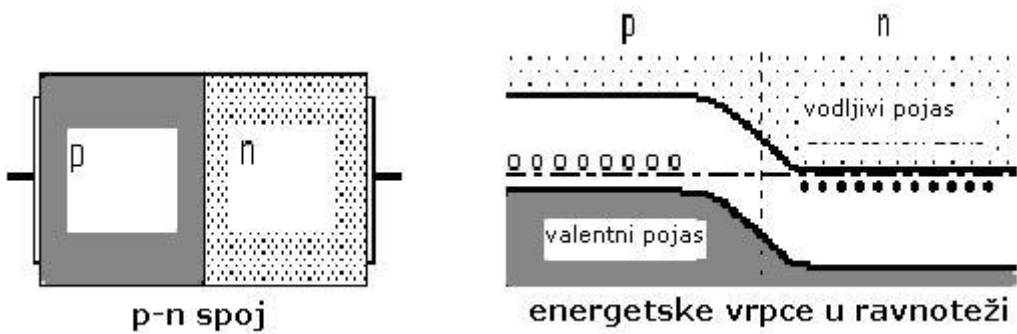
U metalima, Fermijeva energija daje nam podatke o brzinama elektrona koji sudjeluju u običnoj električnoj provodljivosti. Količina energije koja se može dati elektronu u takvim procesima provođenja je redoslijedu mikroelektronskih volti (primjer bakrene žice), tako da mogu sudjelovati samo oni elektroni vrlo bliski Fermijevoj energiji.

Fermijeva energija također igra važnu ulogu u razumijevanju misterije zašto elektroni ne doprinose značajno specifičnoj toplini krutih tvari pri običnim temperaturama, dok oni dominantno doprinose toplinskoj vodljivosti i električnoj vodljivosti. Budući da je samo mali dio elektrona u metalu unutar toplinske energije  $kT$  Fermijeve energije, oni su "zamrznuti" od toplinskog kapaciteta po Pauli principu. Pri vrlo niskim temperaturama, toplina specifična za elektrone postaje značajna.



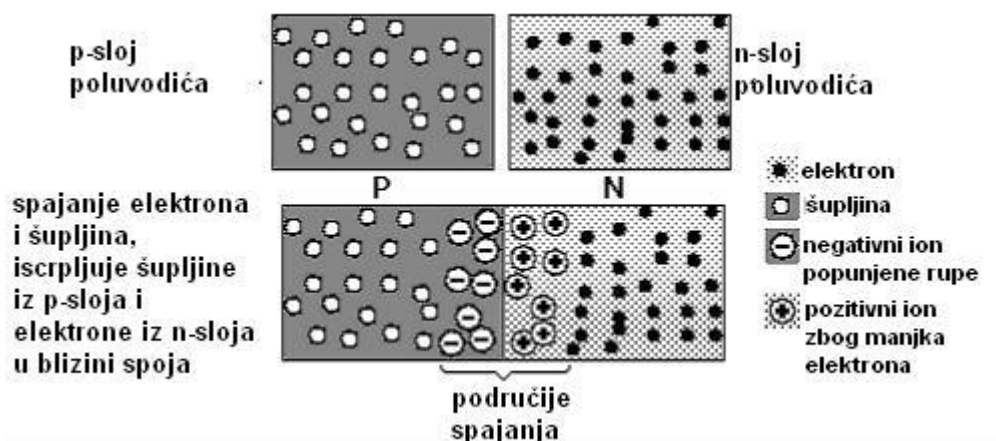
Slika 3.7 Fermijeva distribucija u ovisnosti temperature

Ravnoteža između difuzijske i driftne struje uspostavlja se kad su Fermijevi nivoi s obje strane p-n spoja jednaki (slika 4.11.).



Slika 3.8 p-n spoj

Slika 3.9 Energijski nivoi u ravnotežnom stanju



Slika 3.10 Rekombinacija elektrona i šupljina i nastajanje područja osiromašenja

Fotonima pobuđeni elektroni mogu na račun potencijalne razlike prelaziti u područje i šupljine u n-područje.

### 3.2 Fotonaponske ćelije

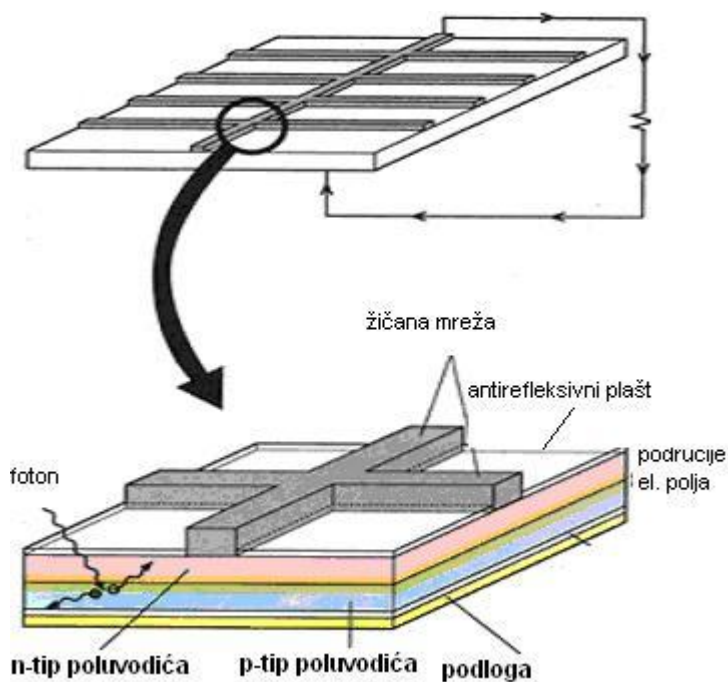
Solarni moduli su poluvodičke naprave kojima se energija elektromagnetskih valova sunca, pretvara u električnu energiju. Ova se pretvorba događa kada u poluvodiču izloženom elektromagnetskom zračenju (na primjer sunca), dolazi do apsorpcije fotona, uslijed koje na suprotnim površinama poluvodiča nastaje električni napon. Ta se pojava naziva fotoefekt. Radi toga se solarni elementi (moduli) kojima se dobiva električna energija nazivaju i fotonaponski elementi.

### 3.3 Princip rada fotonaponske ćelije

Fotonaponska ćelija pod utjecajem svjetlosti na krajevima javlja napon. U trenutku osvjetljenja, fotoni proizvode parove po principu elektron-praznina. Prilikom značajnije udaljenosti svjetlosti od PN spoja, novonastali par dovodi do rekombinacije. Nastane li apsorpcija u blizini PN spoja, dolazi do odvajanja elektrona i praznine zahvaljujući električnom polju. Putanja se odvija na način da se elektron giba prema N strani, dok se šupljina kreće prema P strani. Skupljanje na odgovarajućim stranama PN spoja dovodi do

elektromotorne sile na rubovima ćelije. Električna struja prema trošilu nastaje uslijed osvjetljenja na P strani (postaje pozitivan), kao i na N strani (postaje negativan).

Prilikom osvjetljenja te spajanja s vanjskim trošilom u ćeliji pod utjecajem fotonapona dolazi do fotostruje  $I_s$ , te u vanjskom trošilu struja  $I$ , proporcionalna razlici diode  $I_d$  i  $I_s$ .



slika 3.11 Građa fotonaponske ćelije

Pretvorba sunčevog svjetla u struju preko fotonaponske ćelije za koju je uobičajen naziv solarna ćelija naziva se fotonaponska pretvorba

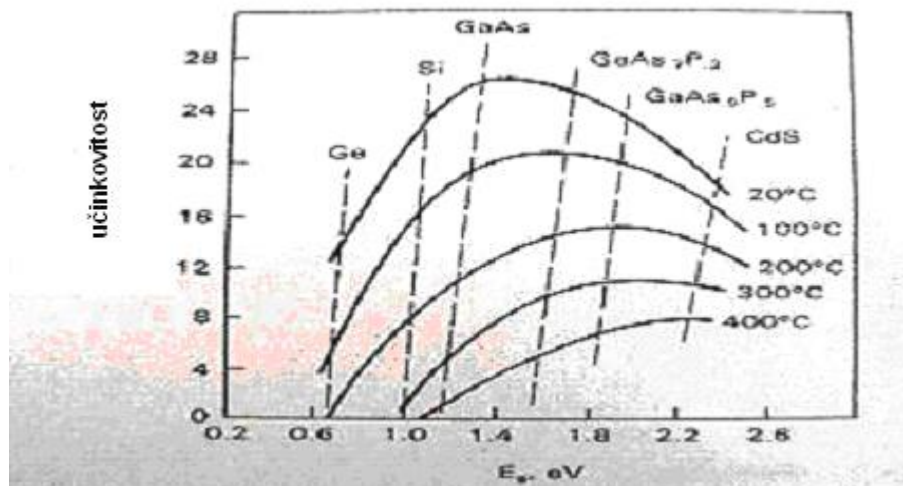
Da bi solarna ćelija mogla pretarati sunčevu energiju u električnu energiju mora ispunjavati nekoliko osnovnih zahtjeva koji utiču na njenu efikasnot. To su prije svega:

- Mogućnost apsorbcije svjetlosti
- Pri apsorbciji svjetlosti elektroni iz osnovnih energetskih stanja trebaju prelaziti u pobuđena stanja i pri tome iza sebe ostavljati šupljine
- Pobuđeni elektroni i šupljine moraju imati velike pokretljivosti
- Pobuđeni nosioci moraju dovoljno dugo vremena ostati u pobuđenom stanju
- Pokretljivi nosioci moraju potencijalnim poljem biti odvojeni

- Razdvojeni nosioci moraju biti izvedeni izvan ćelije

#### 4. Zabranjene zone

Konvencionalne solarne ćelije napravljene su od jednog poluvodičkog materijala, te imaju samo jednu vrijednost energije zabranjene zone. Kada se ćelija osvjetli, fotoni čija je energija manja od energije zabranjene zone neće izazvati rekombinaciju elektrona i šupljina u poluvodiču i samo će proći kroz ćeliju bez mogućnosti njihovog iskorištavanja. Fotoni čija je energija jednaka energiji zabranjene zone datog poluvodiča su najpovoljniji i maksimalno se iskorištavaju. Energija fotona koja je veća od širine zabranjene zone se oslobađa u vidu topline.



Slika 3.12 Efikasnost solarne ćelije u zavisnosti od širine zabranjene zone na različitim temperaturama

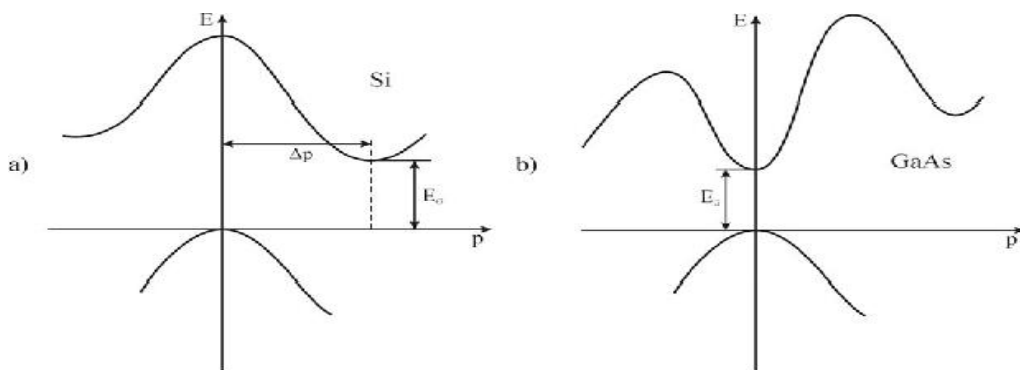
Dakle, da bi solarna ćelija dala snagu na izlazu potrebno je odabrati poluvodičnički materijal koji ima pogodnu vrijednost širine zabranjene zone, koja ne smije biti ni prevelika ni premala. Ako je ona prevelika onda se fotoni velikih valnih dužina ne apsorbiraju i ostaju neiskorišteni. Ako je ona mala, fotoni sa većim energijama će biti uzalud potrošeni. Na slici je prikazana zavisnost efikasnosti konverzije od širine zabranjene zone za različite temperature. Vidi se da najbolju efikasnost konverzije imaju solarne ćelije koje su napravljene od poluvodičkih materijala čija je širina zabranjene zone oko 1,4eV (Si, GaAs) i to na sobnoj temperaturi.



#### 4.1. Apsorpcija Sunčeve energije

Apsorpcijska svojstva poluvodičkog materijala u velikoj mjeri određuju djelotvornost pretvorbe svjetlosne energije u električnu. Apsorpciju svjetla (fotona) u poluvodiču karakterizira više procesa od kojih valja izdvojiti prijelaz elektrona iz valentnog u vodljivi pojas i prijelazi elektrona u vodljivom ili valentnom pojasu. Ovaj drugi prijelaz, dakle, događa se u jednom pojasu energije a nastaje kao posljedica apsorpcije slobodnih nosilaca i ne doprinosi fotoelektričnom efektu. Prijelaz elektrona iz valentnog u vodljivi pojas je ključan za fotonaponsku pretvorbu, a uzrokuju ga fotoni koji imaju energiju približno jednaku energiji zabranjenog pojasa  $E_g$ . U slučaju da fotoni imaju energiju veću od  $E_g$  također se generira jedan elektron-šupljina par, a višak energije se disipira u obliku topline. Međudjelovanje (interakcija) poluvodičkog materijala i svjetla izražava se apsorpcijskim koeficijentom  $\alpha_f$  koji je funkcija valne dužine  $\lambda$ , a praktički se odnosi na apsorpciju Sunčevog spektra u kojem se događaju elektronski prijelazi iz valentnog u vodljivi pojas. S obzirom na svjetlosni spektar koji sunčane ćelije pretvaraju u električnu energiju,  $\alpha_f$  je približno jednak ukupnom apsorpcijskom koeficijentu  $\alpha$ .

Veličina apsorpcijskog koeficijenta ovisi o tome da li je poluvodič kristaliničan ili amorfan, a u slučaju kristaliničnog materijala veličina apsorpcijskog koeficijenta ovisi o tipu zabranjenog pojasa (procjepa). Naime, zabranjeni pojas može biti direktan (maksimum energije valentnog pojasa odgovara minimumu energije vodljivog pojasa), slika 3.13b), ili indirektan (energijski minimum i maksimum su međusobno udaljeni za količinu gibanja  $\Delta p$ ), slika 3.13a).



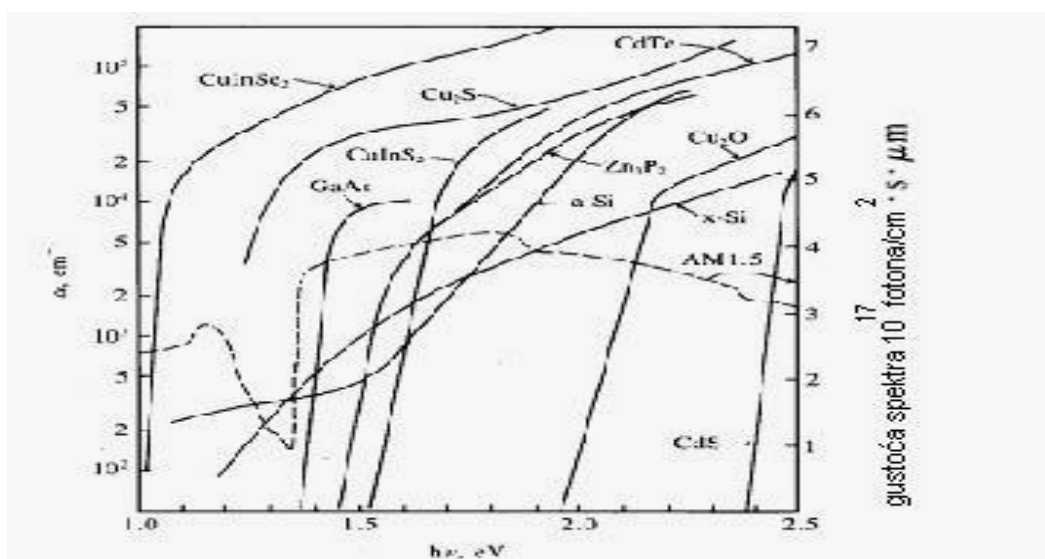
Slika 3.15 a) Poluvodič s indirektnim zabranjenim pojasom (Si);  
 b) Poluvodič s direktnim zabranjenim pojasom (GaAs)

Poluvodiče kao što je galijev arsenid (GaAs), koji imaju direktni procjep, karakterizira veliki iznos apsorpcijskog koeficijenta. Poluvodič kao što je kristalinični silicij (c-Si), s indirektnim procjepom, ima manji apsorpcijski koeficijent od GaAs.

Amorfni silicij (a-Si) kojeg karakterizira neuređenost velikog dosega, ima za red veličine veći apsorpcijski koeficijent nego kristalinični silicij. Zahtjeva se da po mogućnosti cijeli sunčev spektar bude apsorbiran. Debljina aporbcionog sloja treba biti takva da je u mogućnosti da apsorpira što više svjetlosti. Pošto koeficijent apsorpcije zavisi od valne dužine, pa pod tim uvjetima to nije skroz moguće postići u cijelom spektru.

Koeficijent apsorpcije poluvodiča ne zavisi samo od širine zabranjene zone, već i od toga da li se radi o direktnom ili indirektnom poluvodiču. Kod direktnog poluvodiča maksimum valentne i minimum vodljive vrpce leže na istoj vrijednosti, što nije slučaj i kod indirektnog. Koeficijent apsorpcije je zbog toga u indirektnom poluvodiču manji. Direktni poluvodiči su GaAs, CuInSe<sub>2</sub>, CuInS<sub>2</sub>, CdTe, a indirektni je silicij. Amorfni poluvodiči apsorbiraju svjetlost kao direktni.

Na slici 3.16 je prikazan koeficijent apsorpcije relevantnih poluvodiča u zavisnosti od valne dužine. Tipične vrijednosti su 10<sup>4</sup> cm<sup>-1</sup> za direktne i 10<sup>3</sup> cm<sup>-1</sup> za indirektno poluvodiče.



*Slika 3.14 Zavisnost koeficijenta apsorpcije od valne dužine*

## **5. Materijali za izradu fotonaponske ćelije**

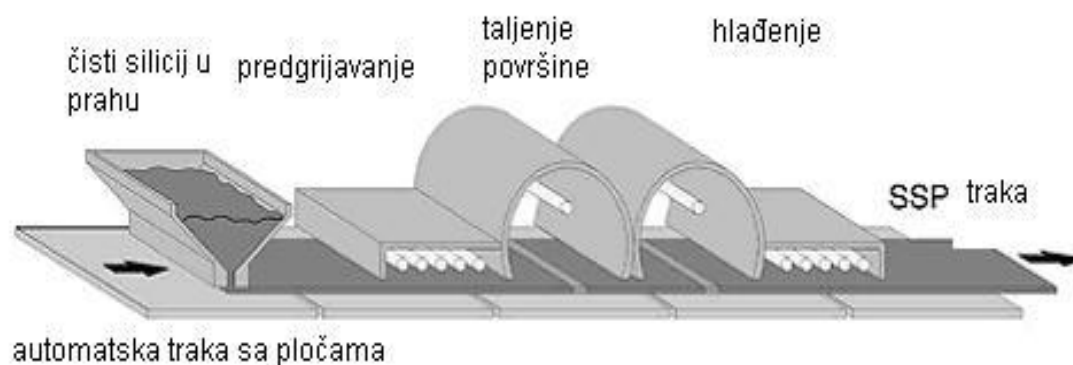
### **5.1 Silicij u obliku traka (ribbon)**

Zajednički nedostatak proizvodnje mono i polikristaliničnog silicija je potreba rezanja kristalne šipke na pločice pri čemu se gubi značajan dio sirovine. Razvijeno je više od 20 tehnika kristaličnog silicija bez rezanja, ali se najviše koristi njih pet: EFG (engl. Edge-defined film-fed growth), string ribbon, RGS (engl. Ribbon growth on substrate), SSP (engl. Silicon sheets from power) i dendritic web.

U EFG procesu, iz rastaljenog silicija izvlači se osmerostrana prizma pri čemu se koristi grafitna jezgra kojom se definiše oblik trake. Dobiveni se kristal reže u pločice čija je tipična debljina 250-300  $\mu\text{m}$ . Brzina proizvodnje kristala ovom tehnikom je najčešće 2-3 cm/min. [2]. Daljnja istraživanja posvećena su uglavnom pronalaženju veze između debljine trake, širine površine i brzine rasta te povećanju broja stranica poligona. Proizvedene silicijske pločice površine 10 cm x 10 cm imaju malo manju kvalitetu od monokristalnih te imaju okruglu površinu. Ovom su tehnikom proizvedene sunčane ćelije s djelotvornostima do 14,8 %. Dugoročni cilj ovog pristupa je razviti cijevi cilindričnog oblika s promjerom 1,2 m, i debljinom filma oko 100  $\mu\text{m}$ .

String ribbon postupkom se silicijske trake izvlače iz rastaljenog silicija pomoću dviju temperaturno otpornih niti, a odmah zatim se izrezuje na željenu dužinu dijamantnim alatom. Brzina izvlačenja kristala je do 25 mm/min, a debljina traka je manja od 100  $\mu\text{m}$ . U laboratorijskim uvjetima s ćelijom površine 1  $\text{cm}^2$  postignuta je djelotvornost od 15,1 %. [1] Osnovna razlika RGS postupka (rast silicijskih traka na podlozi) i svih ostalih tehnika je u tome što se kristalizacija silicijskih traka događa okomito na smjer izvlačenja. Kristalizaciju izaziva ohlađena podloga koja se povlači uzduž dna talioničkog lonca pa se duž okomite ravnine događa rast kristalnih zrna. Glavna prednost ove metode su velike brzine izvlačenja kristala, odnosno visok stupanj proizvodnje. Iako su postignute djelotvornosti do 11,1 %, ovaj materijal još nije korišten u komercijalnim modulima. [1]

SSP (engl. Silicon sheets from powder) se sastoji od dva koraka taljenja praškastog silicija koji se lijeva na privremene limene nosače, slika 3.21 nastaju zrna širine nekoliko milimetara i dužine nekoliko centimetara, a postignute djelotvornosti su do 13 %. U međuvremenu su ovako proizvedene ploče silicija umjesto upotrebe za aktivan sloj u sunčanoj ćeliji postale zanimljivije kao podloga za dodatno nanošenje tankog sloja silicija. Postupak se sastoji u površinskom taljenju tankog sloja silicijskog praha nakon kojeg slijedi ili izravan epitaksijalni rast aktivnog sloja silicija visoke čistoće ili izolirajućeg i zaštitnog međusloja  $\text{SiO}_2$ . Ovaj drugi pristup zahtijeva ponovnu kristalizaciju jer je aktivan sloj silicija na  $\text{SiO}_2$  podlozi nakon nanošenja vrlo fine zrnate strukture. Prednost ovog pristupa je to što se za podlogu može koristiti silicij vrlo slabe kvalitete, ali koji je također vrlo jeftin.



Slika 3.15 SSP proces razvijen na Fraunhofer ISE

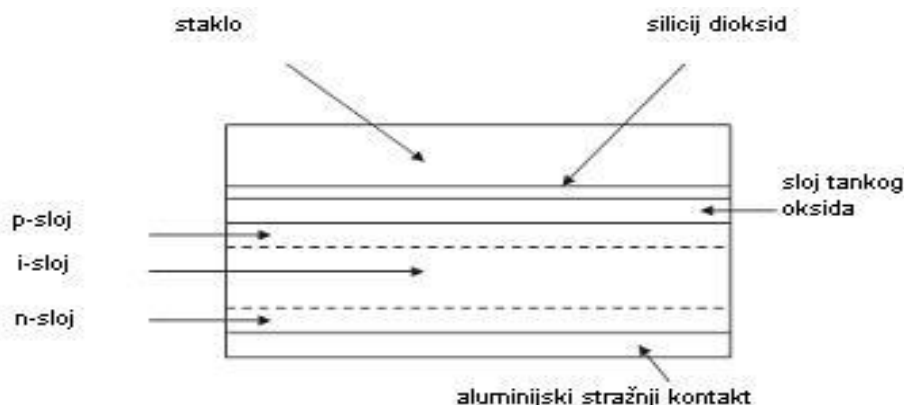
## 5.2 Tankoslojne ćelije

Tankoslojne tehnologije nude znatne uštede u materijalu i proizvodnom procesu u usporedbi s kristaliničnim silicijem. Redom su to materijali s direktnim zabranjenim pojasom i boljim apsorpcijskim faktorom od kristaliničnog silicija pa su za efikasnu apsorpciju Sunčeva zračenja dovoljne debljine materijala od svega nekoliko mikrona. Osim toga, postupci proizvodnje i obrade su znatno jednostavniji i mnogo manje zahtjevni te omogućuju jednostavniju proizvodnju modula većih površina. Mnogi od tih procesa omogućuju visok stupanj proizvodnje, kontinuirani su, obično ne zahtijevaju visoke temperature, a ponekad nije potrebna skuplja oprema za nanošenje slojeva u visokom vakuumu. Postupak izrade modula, uključujući spojeve među pojedinim

ćelijama obično se izvodi tijekom procesa nanošenja filmova. Obično se koriste razne metode urezivanja ili korištenja maski između nanošenja pojedinih slojeva (npr. korištenjem lasera, mehaničkih pisaa, fotorezista). Sadašnja i buduća istraživanja usmjerena su u znatnoj mjeri na višespojne tankoslojne sunčane ćelije kojima je moguće postići znatno veće djelotvornosti, zatim na prozirne vodljive okside i na tanke polikristalinične silicijske filmove.

### ***5.3 Proizvodnja sunčanih ćelija od amorfnog silicija***

Tanki filmovi od amorfnog silicija proizvode se korištenjem CVD tehnike (engl. Chemical vapour deposition) s plinovima koji sadrže silan ( $\text{SiH}_4$ ). Najčešće se koriste PECVD (engl. Plasma enhanced CVD) ili hot wire CVD tehnika. Slojevi se mogu nanositi na čvrste podloge kao što su primjerice staklo ili čelik, ali i na savitljive podloge kao što su tanki metalni listovi ili plastika. Materijal koji se koristi za izradu sunčanih ćelija zapravo je legura silicija i vodika ( $\alpha\text{-Si:H}$ ) (udio vodika je između 5% i 20%). Vodik je od iznimne važnosti za određivanje kvalitete materijala jer pasivizira tzv. "viseće veze" koje nastaju od neuređenog rasporeda atoma silicija. Materijal ima direktni zabranjeni pojas iznosa 1,7 eV, a koeficijent apsorpcije  $\alpha > 10^5 \text{ cm}^{-1}$  za fotone energija većih od širine zabranjenog pojasa. To znači da je za efikasnu apsorpciju potrebna debljina materijala od svega nekoliko mikrona što omogućuje značajne uštede u materijalu i cijeni. Dodavanjem nečistoća značajno se smanjuju pokretljivost i vrijeme života manjinskih nosilaca u amorfnom siliciju. Pronađeno je da se taj problem može smanjiti korištenjem p-i-n strukture, slika 3.16

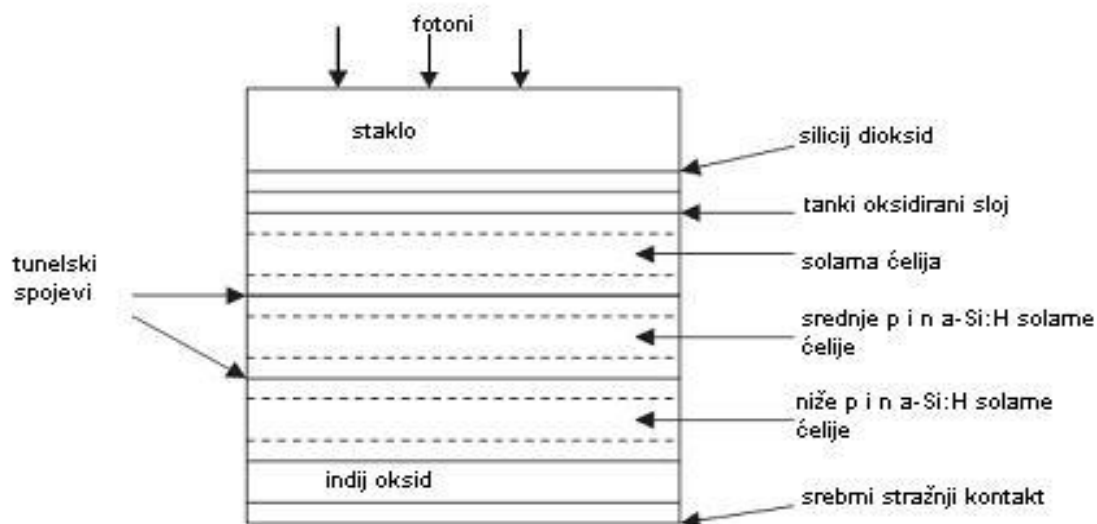


Slika 3.16 Poprečni presjek p-i-n strukture sunčane ćelije od a-Si:H

Svjetlo se apsorbira u intrinzičnom sloju, a generirani parovi nosilaca razdvajaju se pod djelovanjem električnog polja. Iako su u laboratoriju postignute početne vrijednosti djelotvornosti iznad 12 %, komercijalni fotonaponski moduli nakon nekoliko mjeseci izlaganja suncu degradiraju na stabiliziranu vrijednost od oko 4-5 %. [3] Ta pojava degradacije nakon početnog izlaganja suncu poznata je pod nazivom Staebler-Wronski efekt i uslijed njega djelotvornost sunčane ćelije od amornog silicija opada 15-25 % u odnosu na početnu vrijednost. Problem Staebler-Wronski efekta do danas nije sasvim riješen. Ipak upravljanjem debljinom pojedinih slojeva (u prvom redu intrinzičnog sloja) i korištenjem višespojnih struktura moguće je smanjiti nestabilnost i izraditi ćelije s degradacijom manjom od 10 %.

Zbog velikog broja defekata koji su posljedica amorfne strukture, pokretljivost nosilaca naboja je u amornom siliciju općenito prilično mala. Stoga je za efikasno sakupljanje svjetlom generiranih nosilaca potrebno jako unutrašnje električno polje. Da bi se to postiglo, debljina p-i-n strukture mora biti mala, reda veličine nekoliko stotina nanometara. Veća stabilnost i djelotvornost a-Si:H sunčanih ćelija može se postići slaganjem dviju ili čak tri ćelija jedne iznad druge. Takvom se višespojnom strukturom omogućuje korištenje tanjih slojeva pojedine ćelije čime se povećava unutrašnje električno polje i sakupljanje nosilaca generiranih svjetlom. Relativno mala temperatura podloge omogućuje relativno jednostavno nanošenje bez utjecaja na prethodno nanosene slojeve pa je ovakve strukture moguće proizvesti bez značajnog povećanja troškova u odnosu na troškove izrade pojedine ćelije. Heterospojna struktura sastavljena od ćelija s različitim vrijednostima zabranjenog pojasa omogućuje bolje korištenje Sunčeva spektra,

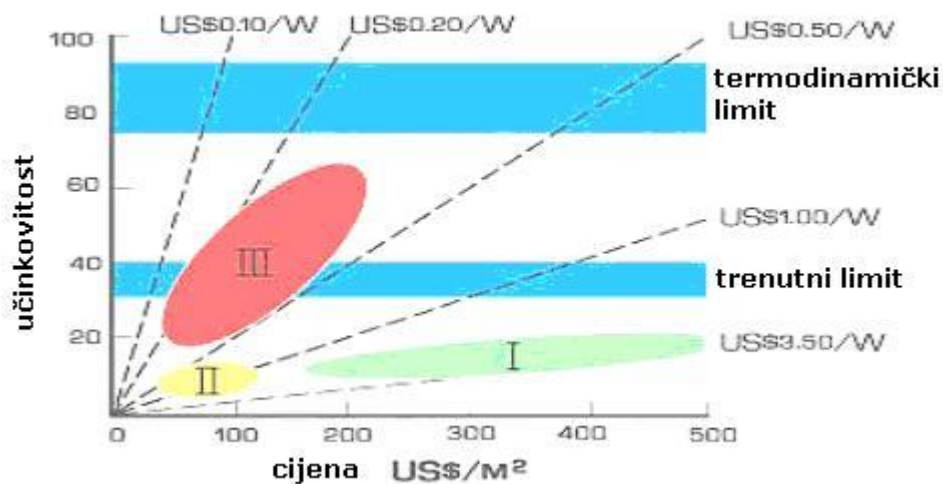
a ujedno povećava stabiliziranu djelotvornost uređaja. Donji slojevi heterospojne strukture imaju manje vrijednosti zabranjenog pojasa koje se mogu postići legiranjem silicija s ugljikom. Najveće postignute stabilizirane djelotvornosti su veće od 9,5 % za dvospojne, odnosno iznad 10 % za troslojne module. Shemasti prikaz poprečnog presjeka troslojne sunčane ćelije od amornog silicija prikazan je na slici 3.17.



Slika 3.17 Poprečni presjek troslojne sunčane ćelije od amornog silicija

#### 5.4 Nedostaci silicijskih ćelija

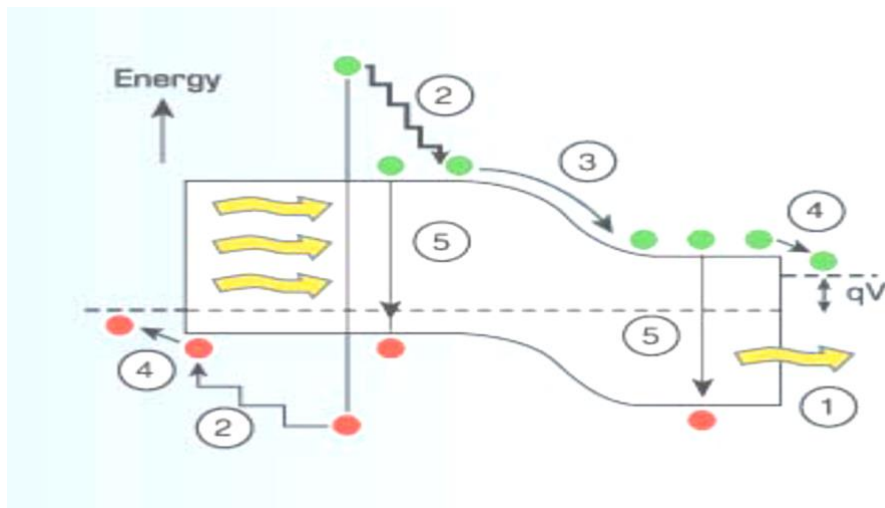
Sunčane ćelije od kristaliničnog silicija, koje danas čine veliku većinu na svjetskom tržištu, pripadaju tehnologiji tzv. prve generacije. Ta je tehnologija danas dosegla visoki stupanj zrelosti pa sve veći udio u proizvodnim troškovima pripada troškovima sirovina: silicijske pločice, kvalitetnog stakla s niskom koncentracijom željeza, materijal za enkapsulaciju. Iako su sunčane ćelije prve generacije od najkvalitetnijeg materijala s najmanjom koncentracijom defekata, njihova cijena vjerojatno neće pasti ispod US\$ 1/W [13]. Druga generacija sunčanih ćelija odnosi se na tankoslojne tehnologije kojima je moguće postići značajne uštede u materijalu, ali je djelotvornost ovih sunčanih ćelija znatno manja pa se predviđa da im cijena može pasti malo ispod 0.50 US\$1/W, slika 3.18.



Slika 3.18 omjer cijena/učinkovitost solarnih ćelija

Treću generaciju sunčanih ćelija čine uređaji i koncepti koji nadilaze maksimalne teorijski proračunate djelotvornosti za jednospojnu sunčanu ćeliju. Shockley i Queisser su 1961 proračunali da za materijal s optimalnim zabranjenim pojasom od 1,3 eV teorijski najveća djelotvornost 31% pod normalnim ozračenjem, odnosno 40,8% pod maksimalnom mogućom koncentracijom svjetlosti (46200 puta).

Najvažniji gubici u standardnim sunčanim ćelijama prikazani su na slici 3.19.



Slika 3.19 Gubici u standardnoj sunčanoj ćeliji:

- 1-ne apsorbiraju se fotoni energija manjih od zabranjenog pojasa,
- 2-gubici zbog termalizacije,
- 3-pad napona na pn spoju,
- 4-pad napona na kontaktima,
- 5-rekombinacija



Najvažniji gubitak događa se prilikom apsorpcije fotona čija je energija veća od širine zabranjenog pojasa sunčane ćelije (gubitak označen s 2 na predhodnoj slici). Foton tada može generirati par nosilaca čija je energija veća od dna vodljive (za elektrone), odnosno vrha valentne vrpce (za šupljine). Razlika energije gubi se vrlo brzo u obliku topline. Drugi bitni gubitak je neosjetljivost sunčane ćelije na fotone čija je energija manja od širine zabranjenog pojasa (gubitak označen brojem 1 na slici 4.26), pa oni jednostavno prolaze kroz sunčanu ćeliju. Ukoliko se uzmu u obzir samo ova dva spomenuta gubitka, maksimalna je djelotvornost silicijske sunčane ćelije ograničena na oko 44%.

Također je bitan gubitak uslijed rekombinacije fotogeneriranih parova nosilaca. Taj se gubitak može smanjiti korištenjem materijala s većim vremenima života fotogeneriranih nosilaca za što je potrebno ukloniti sve nepotrebne defekte.

Za nadmašivanje maksimalnih teorijskih vrijednosti treća generacija temelji se na konceptima koji uklanjaju dva bitna gubitka u standardnim sunčanim ćelijama:

- 1) fotoni energija manjih od širine zabranjenog pojasa se ne apsorbiraju,
- 2) fotoni energija većih od širine zabranjenog pojasa generiraju par nosioca, a višak energije gubi se u vidu topline.

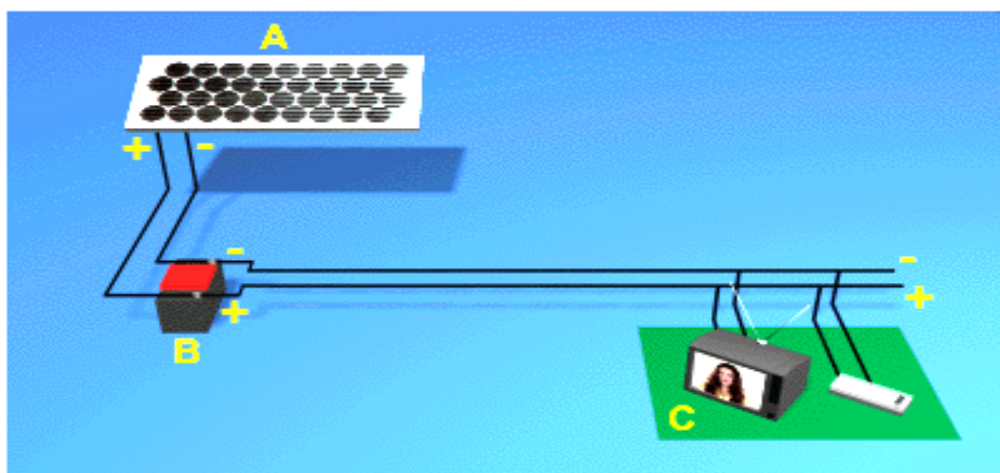
Tri su osnovna pristupa u rješavanju spomenutih problema:

- uređaji s višestrukim energetske razinama
- promjena spektra upadnog sunčevog zračenja
- korištenje energije izgubljene u vidu topline za povećanje napona ili sakupljanje nosilaca

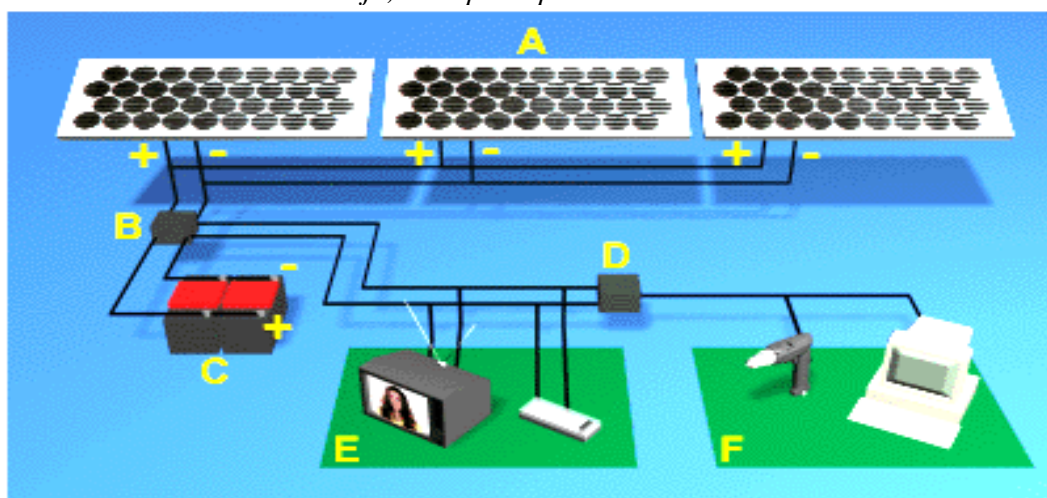
## **6. Solarne ćelije u domaćinstvu**

U samom modulu koji se sastoji od niza međusobno povezanih pločica, paralelno serijskom kombinacijom spajanja dobiva se napon i struja pogodna za punjenje standardnih baterija (6, 12 ili 24 V). Time je osigurano da modul proizvodi električnu energiju pogodnog napona i inteziteta za direktno punjenje baterija ili pogon istosmjernih potrošača. Veličina struje u principu je proporcionalna površini modula i

insolaciji (intezitet sunčevog zračenja). Kod monokristalnih i polikristalnih modula ta je površina 2 do 3 puta manja nego kod amorfnih modula.



*Slika 3.20 Tipična shema solarnog sustava na 12 V DC sa prikazom glavnih komponenti: A. Solarni modul: pretvara sunčevo zračenje u električnu energiju, B. Baterija, C. Tipični potrošači na 12 V DC.*



*Slika 3.21 Složeniji sustav sa prikazom glavnih komponenti i pretvaračem za potrošače na 220 V, 50 Hz:*  
A. Jedan ili više solarnih modula. B. Regulator punjenja akumulatora: sprječava prepunjavanje i pražnjenje baterije. C. Baterijski sustav. D. Pretvarač: napon 12V DC iz baterija pretvara u 220V, 50Hz. E. Tipični potrošači na 12 V DC. F. Tipični potrošači na 220 V, 50 Hz.

## **7. ZAKLJUČAK**

Vjetar, voda i Sunce prirodni su izvori čija je raspoloživost u budućnosti neupitna. Korištenje energije vjetra i Sunca utječe na ekonomsku stabilnost budući da se time smanjuje potreba za uvozom struje iz susjednih zemalja. Jedna od bitnih stavki proizvodnje struje iz energije Sunca je onečišćavanje okoliša, usporavajući već dovoljno nestabilne klimatske promjene za razliku od masivne potrošnje nafte i krutih goriva koji već sada bitno zauzimaju utjecaj na kvalitetu života idućih naraštaja. Budući da je gotovo polovica energije vjetra dostupna tijekom nesunčanih dana, ostavlja se prostor za nadopunjavanje potreba sa solarnim elektranama čija se produktivnost bitno smanjuje tijekom zimskih mjeseci. Zahvaljujući napretku tehnologije, troškovi održavanja i proizvodnje bitno se smanjuju daljnjim razvojem što pozitivno utječe na mišljenje javnosti prema obnovljivim izvorima energije, otvarajući priliku novim radnim mjestima u građevinskom sektoru.

## 8. LITERATURA

- [1] A. Goetzberger, C. Hebling, H-W. Schock, „Photovoltaic materials, history, status and outlook“, *Materials Science and Engineering R* 40 (2003), 1-46
- [2] T. Surek, „Crystal growth and materials research in photovoltaics: progress and challenges“, *Journal of Crystal Growth* 275 (2005), 292-304
- [3] R.W. Miles, K.M. Hynes, I. Forbes, „Photovoltaic solar cells: An overview of state-of-the-art cell development and environmental issues“, *Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials* 51 (2005), 1-42
- [4] M.A. Green, „Third generation photovoltaics: solar cells for 2020 and beyond“, *Physica E* 14 (2002), 65-70
- [5] A.J. Nozik, „Quantum dot solar cells“, *Physica E* 14 (2002), 115-120
- [6] A. Luque i dr., „FULLSPECTRUM: a new PV wave making more efficient use of the solar spectrum“, *Solar Energy Materials & Solar Cells* 87 (2005), 467-479
- [7] Freris, L., *Wind energy conversion systems*, Prentice Hall, 1990
- [8] Heier, S., *Grid integration of wind energy conversion systems*, John Wiley & Sons, 1998
- [9] CIGRE, "Modelling new forms of generation and storage", WG 38.01, Nov. 2000
- [10] Knudsen, H., "Induction generator models in dynamic simulation tool", *Proc. Intl. Conference on Power System Transients IPST'99*, Budapest, Hungary, June 20-24, 1999, pp. 253-259
- [11] Novak, P., "Modeling and control of variable speed wind-turbine drive-system dynamics", *IEEE Control Systems*, Aug. 1995, pp. 28-38