

Sunčevo zračenje i sunčeva ćelija

Bajić, Mario

Undergraduate thesis / Završni rad

2022

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Split, Faculty of Maritime Studies / Sveučilište u Splitu, Pomorski fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:164:018743>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-15**

Repository / Repozitorij:

[Repository - Faculty of Maritime Studies - Split -
Repository - Faculty of Maritime Studies Split for
permanent storage and preservation of digital
resources of the institution](#)



UNIVERSITY OF SPLIT



**SVEUČILIŠTE U SPLITU
POMORSKI FAKULTET**

MARIO BAJIĆ

SUNČEVO ZRAČENJE I SUNČEVA ČELIJA

ZAVRŠNI RAD

SPLIT, 2022.

**SVEUČILIŠTE U SPLITU
POMORSKI FAKULTET**

**STUDIJ: POMORSKE ELEKTROTEHNIČKE I INFORMATIČKE
TEHNOLOGIJE**

SUNČEVO ZRAČENJE I SUNČEVA ČELIJA

ZAVRŠNI RAD

MENTOR:

Ivica Kuzmanić, mr. sc.

STUDENT:

Mario Bajić

(MB: 0171277889)

SPLIT, 2022.

SAŽETAK

Kada govorimo o obnovljivim izvorima energije, mislimo na one energije koje dolaze iz prirodnih i gotovo neiscrpnih izvora. Jedna od tih energija je i solarna energija koja dolazi od Sunca, najvećeg izvora energije. U ovom radu analizirano je kako se iskorištava Sunčev potencijal za izradu solarnih ćelija te na koje sve uvjete i parametre treba obratiti pažnju. Nažalost, iako je solarna energija sama po sebi besplatna, visoki troškovi njezinog prikupljanja, pretvorbe i skladištenja još uvijek ograničavaju njezino iskorištavanje na mnogim mjestima. Solarne tehnologije su široko karakterizirane ili kao pasivne solarne ili aktivne solarne, ovisno o načinu sakupljanja, pretvaranja i distribuiranja sunčevog svjetla.

Ključne riječi: *Sunce, obnovljivi izvori, solarna energija, sunčevo svjetlo*

ABSTRACT

When we talk about renewable energy sources, we mean those energies that come from natural and almost inexhaustible sources. One of these energies is solar energy, which comes from the Sun, the largest source of energy. In this paper, it was analyzed how the sun's potential is exploited for the production of solar cells and what conditions and parameters should be paid attention to. Unfortunately, although solar energy itself is free, the high costs of its collection, conversion and storage still limit its utilization in many places. Solar technologies are broadly characterized as either passive solar or active solar, depending on the way sunlight is collected, converted and distributed.

Keywords: *Sun, renewable sources, solar energy, sunlight*

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. SUNČEVO ZRAČENJE.....	2
2.1. UVOD U SUNČEVO ZRAČENJE	2
2.2. PRIVIDNO GIBANJE SUNCA	3
2.3. SOLARNA KONSTANTA	5
2.4. OZRAČENJE U ATMOSFERI	5
2.5. MJERENJE SUNČEVA ZRAČENJA	6
2.6. KUT UPADA SUNČEVIH ZRAKA.....	8
3. SUNČANA ĆELIJA.....	9
3.1. FOTONAPONSKA KONVERZIJA	9
3.2. PARAMETRI SUNČANE ĆELIJE	11
3.3. SNAGA SUNČANE ĆELIJE	13
3.4. OVISNOST PARAMETARA SUNČANE ĆELIJE O TEMPERATURI	14
3.5. OVISNOST DJELOTVORNOSTI ĆELIJE O ŠIRINI ZABRANJENE VRPCE	16
3.6. SPEKTRALNI ODZIV SUNČANE ĆELIJE	18
3.7. ANTIREFLEKSIJSKI SLOJEVI.....	19
4. VRSTE ĆELIJA.....	21
4.1. ĆELIJE OD MONOKRISTALIČNOG I POLIKRISTALIČNOG SILICIJA.....	21
4.2. ĆELIJE OD AMORFNOG SILICIJA	23
4.3. DRUGI MATERIJALI ZA IZRADU ĆELIJA	28
4. ZAKLJUČAK.....	30
LITERATURA	31
POPIS SLIKA.....	32
POPIS TABLICA.....	33

1. UVOD

Konvencionalni izvori energije nisu u potpunosti klimatski održivi. Trenutno inženjeri i znanstvenici traže rješenja za održivu energiju pod utjecajem klimatskih promjena. Dostupan je veliki izbor održivih prirodnih izvora energije, ali oni zahtijevaju tehnička rješenja za njihovu implementaciju. Opći trend u istraživanju energije temelji se na obnovljivim izvorima, među kojima se ističe solarna energija koja je široko prihvaćena. U ovom radu analizirana su svojstva i potencijal sunčeve energije te način na koji se najbolje mogu iskoristiti.

Završni rad je podijeljen na četiri poglavlja od kojih je prvo poglavlje uvodno, glavnog dijela, i zaključka.

U prvom poglavlju govori se općenito o Suncu i sunčevom zračenju, njegovom gibanju i ozračenju Zemljine površine te mjerenju tih parametara. Također se spominje i kako kut upada sunčevih zraka utječe na određene parametre.

Drugo poglavlje odnosi se na sunčevu ćeliju. U njemu se opisuju svi procesi koji se odvijaju u ćelijama, od fotonaponske konverzije do sila koje djeluju u ćeliji i sklopova koji se koriste. Bitna stvar koja je navedena je kako jakost Sunca može utjecati na struju i napon ćelije.

Treće poglavlje bavi se vrstama solarnih ćelija. Upoznati smo sa silicijskim ćelijama koje su danas dosta korištene, a jedan od razloga tomu je i što je silicij drugi najrasprostranjeniji materijal na zemlji poslije kisika. Također se spominju i neke nove vrste i materijali solarnih ćelija koji su u procesu istraživanja i testiranja.

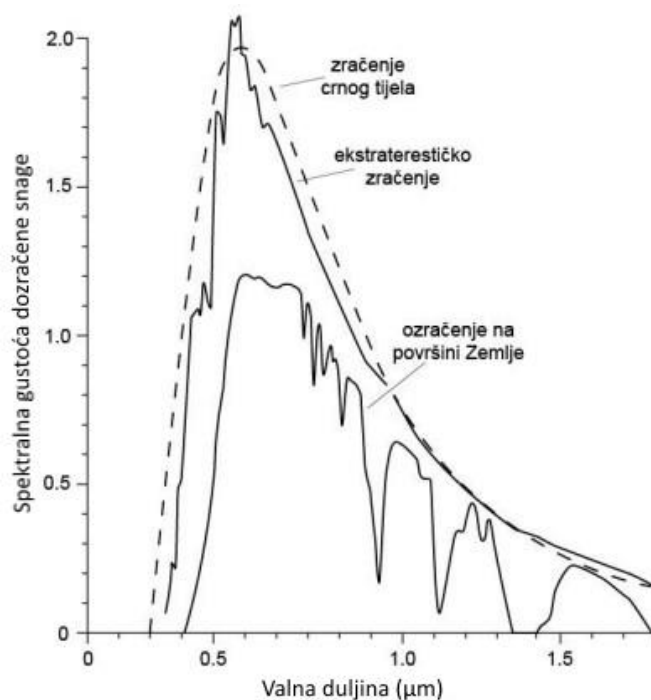
U četvrtom poglavlju koje je ujedno i završno donosi se zaključak o obrađenom sadržaju.

2. SUNČEVO ZRAČENJE

2.1. UVOD U SUNČEVO ZRAČENJE

Pri proračunavanju i projektiranju sunčanih uređaja potrebno je poznavati energiju Sunčeva zračenja koje upada na plohu kolektora. Sunčevo zračenje različito je na različitim mjestima, ovisi o klimatskim uvjetima područja i mijenja se tijekom dana, mjeseca i godine. U meteorologiji se mjeri zračenje na horizontalnu plohu i za mnogo mjesta postoje takvi podaci o ukupnom, globalnom Sunčevu zračenju. Za mjesta za koja takvi podaci nisu dobiveni mjerenjem mogu se proračunati iz ostalih klimatoloških podataka, trajanja sijanja Sunca, tj. insolacije, oblačnosti i dr. Međutim, Sunčevo zračenje na kosu plohu još se uvijek ne mjeri sustavno, te se pri proračunu rada sunčanih uređaja takvi podaci moraju izračunavati.

Sunčevo zračenje sastoji se od izravne (direktne) i raspršene (difuzne) komponente. Izravno Sunčevo zračenje jest ono koje dopire do uređaja izravno iz prividnog smjera Sunca. Raspršeno zračenje nastaje raspršenjem Sunčevih zraka u atmosferi i dolazi na uređaj iz svih smjerova neba. [1]



Slika 1. Spektar Sunca [1]

Nagnuta ploha (npr. kolektor) osim izravnog i raspršenog zračenja prima i zračenje reflektirano (odbijeno) od okolnih površina. Ukupno zračenje koje upada na uređaj sastoji se, dakle, od tri dijela: *izravnog*, *raspršenog* i *odbijenog* zračenja. Snaga zračenja koju Sunce odašilje iznosi $3,8 \cdot 10^{23}$ kW, odnosno godišnje oko $3,3 \cdot 10^{27}$ kW. Od toga dopire do Zemlje oko $1,7 \cdot 10^{14}$ kW ili tek milijarditi dio odaslane energije, odnosno $1,5 \cdot 10^{18}$ kW godišnje.

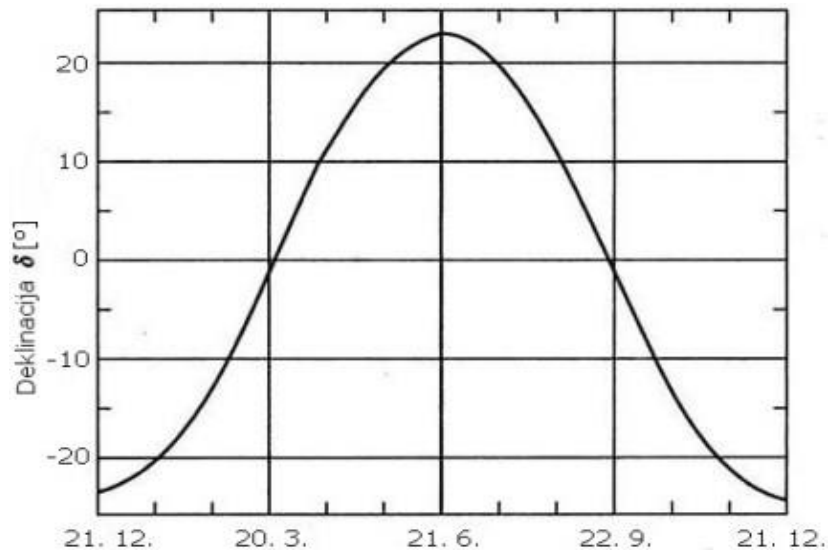
Spektar Sunca približno odgovara spektru crnog tijela ugrijanog na temperaturu 5 760 K. Naravno, ne smijemo zaboraviti da se temperatura Sunca mijenja od unutrašnjosti (gdje je oko 10^7 K) prema površini, ali i u slojevima same površine. Temperaturu 5 760 K možemo odrediti kao efektivnu temperaturu Sunčeve površine s pomoću koje primjenom Stefan-Boltzmannova, Wienova i Planckova zakona možemo proračunati energijski spektar Sunčeva zračenja. [1]

2.2. PRIVIDNO GIBANJE SUNCA

Iako se Zemlja giba oko Sunca, za razmatranje mogućnosti energetskog iskorištavanja Sunčeva zračenja pogodnije je promatrati prividno gibanje Sunca u odnosu na nepomičnu površinu Zemlje. Deklinacija Sunca (δ) jest kut između spojnice središta Zemlje i središta Sunca te ravnine u kojoj leži ekvator. Ravnina ekvatora zatvara kut od $23,45^\circ$ s ravninom Zemljine putanje. Deklinacija Sunca ovisi o danu u godini i mijenja se od $-23,45^\circ$ (21. prosinca) do $+23,45^\circ$ (21. lipnja), Vrijednosti deklinacije mogu se izračunati pomoću aproksimacijskog izraza gdje je n redni broj dana u godini počevši od 1. siječnja.

$$\delta = 23,45^\circ \sin\left(\frac{284 + n}{365} \cdot 360^\circ\right)$$

U tablici 1. navedene su deklinacije Sunca za prvi i petnaesti dan u svakom mjesecu i srednja mjesečna deklinacija S. Godišnji hod deklinacije prikazan je i na slici 2. [1]



Slika 2. Godišnji hod deklinacije Sunca

Tablica 1. Deklinacija Sunca [1]

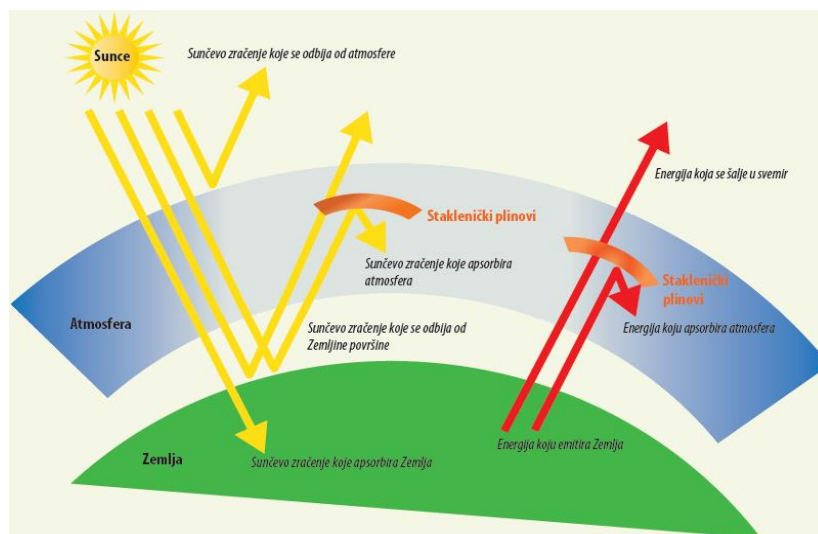
Dan	Deklinacija	δ	Dan	Deklinacija	δ
1.I.	-23.1°	-20.9°	1.VII.	23.1°	21.1°
15.I.	-21.2°		15.VII.	21.5°	
1.II.	-17.3°	-13.3°	1.VIII.	17.9°	13.3°
15.II.	-12.9°		15.VIII.	13.9°	
1.III.	-7.4°	-2.4°	1.IX.	8.1°	2.0°
15.III.	-2.3°		15.IX.	2.9°	
1.IV.	4.7°	9.5°	1.X.	-3.4°	-9.8°
15.IV.	9.6°		15.X.	-8.7°	
1.V.	15.2°	18.8°	1.XI.	-14.6°	-19.1°
15.V.	18.9°		15.XI.	-18.5°	
1.VI.	22.1°	23.1°	1.XII.	-21.8°	-23.1°
15.VI.	23.3°		15.XII.	-23.3°	

2.3. SOLARNA KONSTANTA

Ekstraterestričko zračenje predstavlja zrake Sunca koje dopiru do Zemlje i ono predstavlja maleni dio sunčeve energije koje Sunce zrači prema Zemlji. Udaljenost Sunca od Zemlje mijenja se kroz godinu pa postoje i promjene u ekstraterestričkom zračenju koje iznose od 1307 W/m² pa sve do 1399 W/m² okomito na površinu koju zrači. Kako se udaljenost Sunca mijenja tijekom godine postoji srednja udaljenost koja iznosi 149,68 miliona km i ona se naziva solarna ili sunčeva konstanta. U 20. stoljeću utvrđeno je da sunčeva konstanta nije konstanta satelitskim mjerenjima zbog promjene aktivnosti Sunca. 1981. godine specificirana je sunčeva konstanta pri njenoj srednjoj udaljenosti i iznosi $G = 1367,7$ W/m². Solarna konstanta je vrlo točna iako je utvrđena još prije 30 godina. [2]

2.4. OZRAČENJE U ATMOSFERI

Intenzitet i značajke Sunčevog ozračenja mijenjaju se prolaskom kroz atmosferu, zbog čega na površinu Zemlje dolazi umanjena količina ozračenja. Slabljenje intenziteta ozračenja ovisi o optičkom putu koji zrake prođu do površine Zemlje, a on ovisi o nadmorskoj visini i kutnoj visini Sunca na nebu. Apsorpcija, difuzija i refleksija procesi su koji mijenjaju intenzitet Sunčevog ozračenja, a uslijed njih ozračenje u atmosferi slabi, mijenja smjer i spektralni sastav, te se njegova vrijednost više ne može točno izračunati, već ga je potrebno mjeriti. [3]



Slika 3. Ozračenje u slojevima atmosfere [4]

Apsorpcija se uglavnom odvija u višim slojevima atmosfere, gdje dolazi do ionizacije atoma i molekula energijom najkraćih valnih duljina i zagrijavanja toga sloja atmosfere. U nižem sloju ozon i kisik u ozonosferi apsorbiraju ultraljubičasto zračenje i zagrijavaju stratosferu. Troposfera se ne grije izravno od Sunca, već se najvećim dijelom zagrijava od Zemljine površine, apsorpcijom Zemljinog dugovalnog zračenja, te turbulentnim dotokom senzitivne i latentne topline sa Zemljine površine [5].

2.5. MJERENJE SUNČEVA ZRAČENJA

Podaci o Sunčevu zračenju dobivaju se mjerenjem. Time se bavi posebna grana meteorologije, aktinometrija. Za praktično iskorištavanje sunčane energije važni su podaci o insolaciji (osunčanju), ukupnom ozračenju (dozračenoj snazi) horizontalne plohe i difuznom ozračenju horizontalne plohe.

Insolacija, tj. vrijeme kroz koje izravno Sunčevo zračenje dopire do Zemljine površine, odnosno do horizontalne plohe mjernog uređaja, mjeri se pomoću *heliografa*. Iako heliograf daje samo podatke o tome da li ima ili nema izravnog zračenja, a ne daje podatke o ozračenosti, ipak se, ako nema drugih podataka, iz podataka o insolaciji može procijeniti ozračenost.

Piranometar je instrument koji mjeri ukupno ozračenje Sunčeva zračenja koje upada iz prostornog kuta 2π na njegovu ravnu plohu za primanje zračenja. Obično se postavlja tako da mu je ta ploha primanja horizontalna. Ako se zasjeni Sunčev disk tako da do plohe piranometra za primanje zračenja ne može doprijeti izravno Sunčevo zračenje, piranometar će registrirati raspršeno zračenje neba. [1]

Izvorno su se piranometri kalibrirali pomoću simulatora Sunca, no istraživači su otkrili da se mogu kalibrirati i pomoću vedrog plavog neba. Kalibracija je važna jer omogućuje piranometru da daje točna očitavanja. [6]



Slika 4: Piranometar [6]

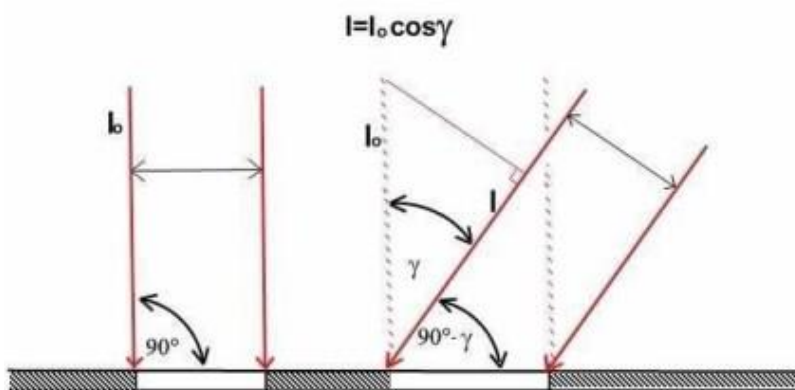
U tablici 2. Prikazane su srednje dnevne ozračenosti horizontalne plohe u Splitu i Zagrebu dobivene aktinometrijskim mjerenjima tijekom više godina.

Tablica 2. Godišnji hod srednje dnevne sunčane ozračenosti horizontalne plohe [1]

Mjesec	Ozračenost	
	Split	Zagreb
Siječanj	6,5	3,7
Veljača	9,8	6,5
Ožujak	14,3	9,7
Travanj	18,6	14,8
Svibanj	23,3	19,3
Lipanj	25,9	20,6
Srpanj	25,4	21,3
Kolovoz	22,4	18,7
Rujan	17,4	14,0
Listopad	12,7	8,3
Studeni	7,4	3,6
Prosinac	5,7	2,7
Godišnja srednja dnevna ozračenost / (MJ m^{-2})	15,8	11,9

2.6. KUT UPADA SUNČEVIH ZRAKA

Zemljina putanja oko Sunca je elipsa maloga ekscentriciteta. Početkom siječnja Zemlja se nalazi u perihelu i prima 6,9 % sunčeve energije više nego u srpnju kada se nalazi u afelu, zato što gustoća toka energije opada s kvadratom udaljenosti od izvora. Međutim, ovaj utjecaj nije primaran za sezonsku varijaciju dozračene energije. Važniji je nagib Zemljine osi prema okomici ravnine ekliptike, koji u aktualnoj fazi Zemljine povijesti približno iznosi $23,45^\circ$ i glavni je uzrok pojave godišnjih doba. Sunčeve zrake padaju okomito na Zemljinu površinu samo između obratnica ($23,5^\circ$ N i $23,5^\circ$ S) i to dva puta godišnje, a na samim obratnicama jednom godišnje. Tada Zemljina površina prima najviše energije, jer okomit upad Sunčevih zraka uzrokuje najjače zagrijavanje. Ako zrake dolaze na Zemljinu površinu pod većim kutom (u odnosu na okomicu), ista se količina ozračenja raspodjeljuje na veću površinu i zagrijavanje slabi. Matematički se smanjenje intenziteta ozračenja opisuje trigonometrijski gdje I_0 predstavlja maksimalni intenzitet ozračenja pri okomitom upadu Sunčevih zraka. Kako se kut upada γ povećava, intenzitet ozračenja i smanjuje se za kosinus promatranog kuta upada γ . [7]



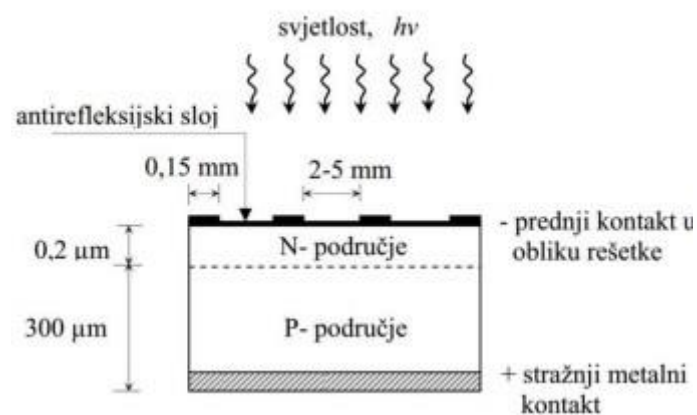
Slika 5. Prikaz smanjenja inteziteta zračenja [5]

Zimi se Sunce prividno spušta prema južnoj obratnici, pa u našim krajevima sunčeve zrake upadaju na Zemljinu površinu pod većim kutom, te se energija raspoređuje na veću površinu. Zrake također prolaze kroz deblji sloj atmosfere u kojemu je intenzitet ozračenja oslabljen apsorpcijom, refleksijom i raspršenjem na atmosferskim česticama i plinovima. Intenzitet ozračenja opada u odnosu na maksimum ozračenja koji Zemlja prima ljeti, kada sunčeve zrake padaju pod manjim kutom (bliže okomici) na njenu površinu. [3]

3. SUNČANA ČELIJA

3.1 FOTONAPONSKA KONVERZIJA

Pomoću fotonaponskog efekta može se sunčana energija izravno pretvoriti u električnu u sunčanim ćelijama. Kada sunčana ćelija apsorbira Sunčevo zračenje, fotonaponskim efektom se njezinim krajevima proizvede elektromotorna sila i tako sunčana ćelija postaje izvor električne energije.



Slika 6. Silicijska sunčana ćelija [1]

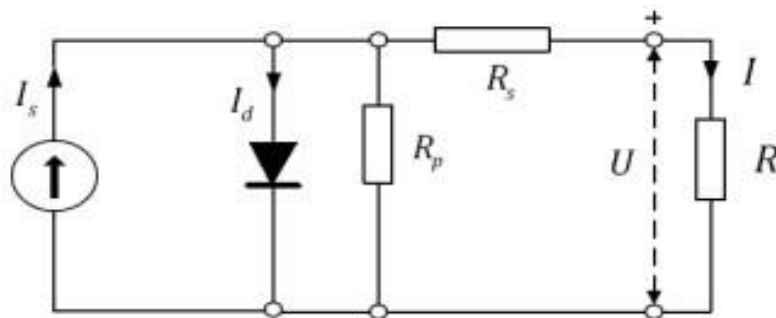
Sunčana ćelija (sl. 6) je PN-spoj (dioda). U silicijskoj sunčanoj ćeliji na površini pločice P-tipa silicija difundirane su primjese, npr. fosfor, tako da na tankom površinskom sloju nastane područje N-tipa poluvodiča. Da bi se skupili naboji nastali apsorpcijom fotona iz Sunčeva zračenja, na prednjoj površini nalazi se metalna rešetka, a zadnja je strana prekrivena metalnim kontaktom. Rešetkasti kontakt na prednjoj strani načinjen je tako da ne prekrije više od 5% površine te on gotovo i ne utječe na apsorpciju sunčeva zračenja. Prednja površina ćelija može biti prekrivena i prozirnim antirefleksijskim slojem koji smanjuje refleksiju sunčeve svjetlosti i tako povećava djelotvornost ćelije.

Sunčane ćelije proizvode napon oko 0,5V uz gustoću struje oko $20\text{mA}/\text{cm}^2$. Da bi se dobio odgovarajući napon odnosno snaga, ćelije se mogu spajati serijski i paralelno. Tako se

dobivaju moduli sunčanih ćelija u obliku ploče (panela) na kojoj su ćelije učvršćene i zaštićene od atmosferskih i drugih utjecaja.

Sunčana ćelija načinjena je tako da se, kada je osvijetljena, na njezinim krajevima javlja elektromotorna sila (napon). Kada se sunčana ćelija (PN-spoj) osvijetli, apsorbirani fotoni proizvode parove elektron-šupljina. Ako apsorpcija nastane daleko od PN-spoja, nastali par ubrzo se rekombinira. Međutim, nastane li apsorpcija unutar ili u blizini PN-spoja, unutrašnje električno polje, koje postoji u osiromašenom području, odvaja nastali elektron i šupljinu – elektron se giba prema N-strani, a šupljina P-strani. Takvo skupljanje elektrona i šupljina na odgovarajućim stranama PN spoja uzrokuje elektromotornu silu na krajevima ćelije. [1]

Osvijetljena sunčana ćelija ponaša se dakle kao izvor stalne struje. Njezin ekvivalentni (nadomjesni) sklop prikazan je na slici 7. Izvor stalne struje paralelno je spojen s diodom. Serijski otpor R_s ovisi o materijalu i izradi sunčane ćelije i poželjno je da bude što manji.



Slika 7. Ekvivalentni sklop sunčane ćelije [1]

Paralelni otpor (shunt) R_p ovisi o osobinama ćelije i većinom je dovoljno velik da ga možemo zanemariti. Uz te pretpostavke struja kroz vanjski otpor (trošilo) R dana je relacijom:

$$I = I_d - I_s = I_0 \left(\exp\left(\frac{eU}{kT}\right) - 1 \right) - I_s$$

3.2. PARAMETRI SUNČANE ĆELIJE

Ključno je ispitati ovisnost fotoelektričnih parametara solarnih ćelija o kutu upada svjetlosti. Razvijena su dva modela solarnih ćelija pomoću programskog paketa Sentaurus Technology Computer-Aided Design. Svjetlosni spektar AM1.5 usmjeren je na prednju površinu solarnih ćelija pod različitim kutovima. Utvrđeno je da je kutni koeficijent fotoelektričnih parametara solarne ćelije s uključenim nanočesticama dva puta veći nego kod jednostavne solarne ćelije. Osim toga, utvrđeno je da je učinkovitost solarnih ćelija induciranih nanočesticama platine 2,15 puta veća od učinkovitosti jednostavnih solarnih ćelija. Kada se kut upada svjetlosti mijenjao od 0 do 60 stupnjeva, struja kratkog spoja promijenila se za 11% za jednostavne solarne ćelije i za 10% za solarne ćelije s nanočesticama. Nadalje, uočeno je da je varijacija snage za jednostavne solarne ćelije 12,5%, dok je 10,5% za solarne ćelije s nanočesticama. Osim toga, utvrđeno je da je struja kratkog spoja solarnih ćelija s nanočesticama linearna unutar kuta upada svjetlosti u rasponu od 0 do 60 stupnjeva. [7]

Jedan od najvažnijih parametara sunčane ćelije je njezina elektromotorna sila, tj. napon na njezinim stezaljkama u slučaju otvorenog strujnog kruga ($I = 0$). Nakon uvrštavanja u početne jednažbe, dobivamo da je napon otvorenog kruga:

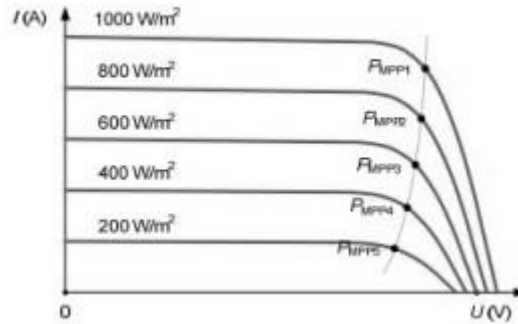
$$U_{ok} = \frac{kT}{e} \ln\left(\frac{I_s}{I_o} + 1\right)$$

Elektromotorna sila sunčane ćelije ovisi o fotostruji I_s (koja raste s porastom ozračenja) i o struji zasićenja I_s diode za koju je poželjno da je što manja. Važan podatak za ćeliju je i struja kratkog spoja, tj. jakost struje u slučaju kada je na stezaljkama ćelije napon nula. Uvrsti li se u formulu da je $U=0$, dobivamo da je struja kratkog spoja jednaka fotogeneriranoj struji I_s :

$$I_{ks} = I_s$$

Na $I-U$ karakteristici sunčane ćelije (sl. 8) označeni su uz ostalo napon otvorenog kruga U_{ok} i struja kratkog spoja I_{ks} . Karakteristični otpor sunčane ćelije može se definirati omjerom: [1]

$$R_k = \frac{U_{ok}}{I_{ks}}$$



Slika 8. Utjecaj jakosti sunčeva ozračenja na I-U karakteristiku ćelije [1]

Ako se ozračenje smanji dva puta (npr. od 1000 W/m^2 na 500 W/m^2) struja kratkog spoja smanji se dva puta, a napon otvorenog kruga oko 5%. Svaka ćelija ima određeni serijski i paralelni otpor koji se često ne smije zanemariti. Serijski otpor ćelije R_s je omski otpor na koji nailazi struja koja teče kroz ćeliju te kroz površinu ćelije prema omskim kontaktima do spoja s priključkom na vanjski krug. Njemu pridonosi otpor materijala, otpor kontakta i sl. Produkt serijskog otpora i površine ćelije $R_s A$ reda je veličine $0,0025 \Omega \text{m}^2$ za tipične sunčane ćelije.

Paralelni otpor ćelije R_p uzrokovan je lokalnim defektima u PN-spoju. Za idealnu ćeliju on bi bio beskonačan, međutim, u svakoj stvarnoj ćeliji struje gubitaka proporcionalne su naponu na ćeliji. U nadomjesnom sklopu ćelije struje gubitaka se prikazuju paralelnim otporom R_p . Serijski R_s i paralelni R_p otpor utječu na I-U karakteristiku ćelije i njezinu snagu. Taj je utjecaj zanemariv ako je serijski otpor mnogo puta manji od karakterističnog otpora ćelije $R_s \ll R_k$, odnosno ako je paralelni otpor mnogo puta veći od karakterističnog otpora $R_p \gg R_k$. [1]

U modelu stvarne sunčane ćelije potrebno je uzeti u obzir serijski i paralelni otpor R_s i R_p (sl.7). Jednažba stvarne ćelije jest

$$I = I_s - I_o \left(\exp \left(\frac{e(U + IR_s)}{mkT} \right) - 1 \right) - \frac{U}{R_p}$$

Odnosno, ako uvrstimo izraz za I_0

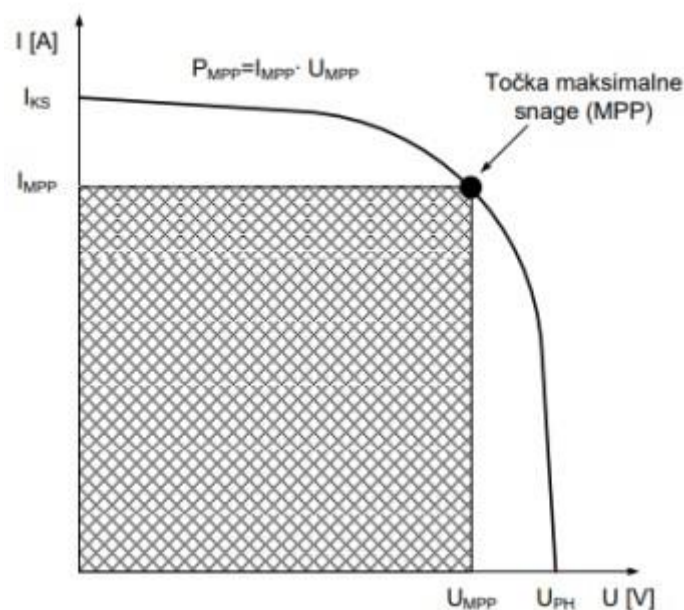
$$I = I_s - AT^y \left(\exp \left(\frac{e(U + IR_s)}{mkT} \right) - 1 \right) - \frac{U}{R_p}$$

gdje je U napon ćelije, I struja kroz ćeliju, a parametri m i y obično imaju vrijednost oko $m = 1$ i $y = 3$.

3.3. SNAGA SUNČANE ĆELIJE

Snaga koju može dati sunčana ćelija dobiva se množenjem napona i struje:

$$P = UI = U \left(I_s - I_0 \exp \left(\frac{eU}{kT} \right) + I_0 \right).$$



Slika 9. Prikaz točke maksimalne snage Sunčane ćelije [8]

Maksimalna snaga koju idealna ćelija može dati $P_m = U_m I_m$ označena je na slici 9. I odgovara površini iscrtkanog pravokutnika. Računski se može odrediti traženjem ekstrema funkcije, odnosno pravokutnika na slici 9. Koji ima maksimalnu površinu. Za napone manje od U_m struja je jača od I_m , ali je produkt UI , zbog manjeg napona U , manji od $U_m I_m$. Za

napone veće od U_m struja opada prema nuli i zbog toga snaga UI opada. Maksimalna snaga sunčane ćelije može se prikazati i pomoću elektromotorne sile i struje kratkog spoja.

$$P_m = I_m U_m = U_{ok} I_{ks} F$$

gdje je

$$F = \frac{U_m I_m}{U_{ok} I_{ks}}$$

tzv. faktor punjenja. To je omjer površine pravokutnika sa stranicama U_m i I_m i pravokutnika sa stranicama U_{ok} i I_{ks} (sl. 9). On pokazuje koliko se stvarna ćelija približuje idealnoj, odnosno koliki je utjecaj serijskog otpora ćelije. Obično je $0,7 < F < 0,9$. Faktor punjenja F opada linearno s omjerom R_s/R_k i R_k/R_p gdje je R_s serijski, R_p paralelni i R_k karakteristični otpor sunčane ćelije. [1]

3.4. OVISNOST PARAMETARA SUNČANE ĆELIJE O TEMPERATURI

Promjenom temperature mijenjaju se karakteristike sunčane ćelije. Pogledajmo kako temperatura ćelije utječe na njezine parametre: struju kratkog spoja I_{ks} , struju zasićenja (zapornu, tamnu struju) I_0 , struju ćelije I , napon otvorenog kruga U_{ok} , maksimalnu snagu P_m , faktor punjenja F i djelotvornost ćelije η . [1]

Promjena fotostruje I_s , odnosno struje kratkog spoja (sjetimo se da je za $U = 0, I_s = I_{ks}$) s temperaturom je mala i često se može zanemariti. Kao primjer navedimo da je maksimalna teorijska vrijednost gustoće fotostruje u silicijevoj ćeliji oko 40 mA cm^2 , stvarne vrijednosti su oko 30 mA cm^2 , a promjena s temperaturom je $dJ / dT \approx 0,025 \text{ mA cm}^{-2} \text{ K}^{-1}$ odnosno relativna promjena

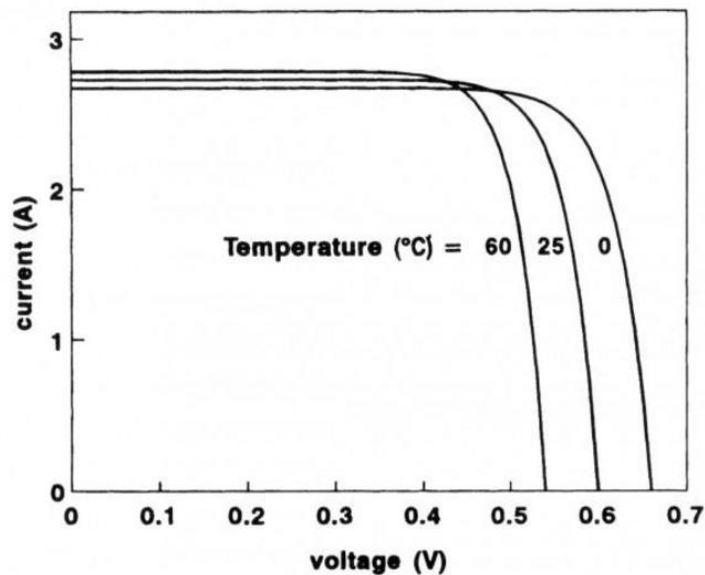
$$\frac{dJ/dT}{J} \approx 8 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}.$$

Utjecaj temperature na zapornu struju I_0 vidi se iz jednažbe

$$I_0 = AT^3 \exp\left(-\frac{E_g}{kT}\right)$$

Ovisnost je eksponencijalna i I_0 bitno ovisi o temperaturi.

Na slici 10. prikazana je I-U-karakteristika ćelije za različite temperature. Za silicijsku ćeliju možemo ukratko reći: promjenom temperature mijenjaju se karakteristike ćelije: napon opada za oko 0,41% /°C (2,2mV/°C), struja kratkog spoja raste za oko 0,06%/°C, snaga opada za 0,44%/°C, djelotvornost opada za oko 0,08%/°C (tabl. 3). [1]



Slika 10. Utjecaj radne temperature ćelije na njezinu karakteristiku [9]

Tablica 3. Ovisnost karakteristika sunčane ćelije o temperaturi [1]

Temperatura $t/^{\circ}\text{C}$	Napon otvorenog kruga U_{ok}/V	Gustoća struje kratkog spoja $J_{ks}/(\text{mA cm}^{-2})$	Maksimalna snaga $P_m/(\text{mW cm}^{-2})$
0	0,598	23,28	10,4
25	0,543	23,64	9,4
60	0,465	24,1	7,9

Radna temperatura sunčane ćelije. Temperatura sunčane ćelije obično je veća od temperature okoline jer je proizvedena električna energija uvijek manja nego apsorbirana sunčana energija. Kada se postigne stacionarno stanje, apsorbirana snaga jednaka je zbroju

snage predane trošilu (električne snage) i toplinske energije predane okolini. Toplina iz ćelije prelazi u okolinu konvekcijom i zračenjem. [1]

3.5. OVISNOST DJELOTVORNOSTI ĆELIJE O ŠIRINI ZABRANJENE VRPCE

Foton koji upadne u sunčanu ćeliju može doživjeti različitu sudbinu: može se refleksirati, može proći kroz spoj bez interakcije, ako mu je energija manja od širine zabranjene vrpce može se apsorbirati stvarajući par elektron-šupljina. Ako stvori par elektron-šupljina, taj se par može skupiti i pridonijeti struji ćelije ili može međusobno rekombinirati ne pridonoseći struji. Djelotvornost skupljanja parova elektron-šupljina ovisi o ćeliji i za monokristalni silicij reda je veličine 90%. Zbog ograničene debljine ćelije ne apsorbira se cijelo updano zračenje. Da bi ti gubici bili mali, debljina ćelije treba biti veća od 300 μm . Nanošenjem sloja optičkog reflektora na stražnju stranu ćelije ti se gubici mogu smanjiti.

Pri apsorpciji fotona unutar poluvodičke sunčane ćelije nastaje par elektron-šupljina kojega je energija ovisna o energiji (frekvenciji) upadnog fotona. Pritom mora biti ispunjen uvjet $h\nu \geq E_g$ odnosno $\lambda \leq \frac{hc}{E_g}$ gdje je ν frekvencija upadnog fotona, c brzina svjetlosti, h Planckova konstanta, a E_g širina zabranjene vrpce u poluvodiču. Fotoni valnih duljina većih od granične $\lambda_g = hc/E_g$ ne mogu proizvesti parove elektron-šupljina i ne pridonose struji ćelije.[1]

Struja zasićenja diode I_0 linearno ovisi o kvadratu intrinzičke koncentracije naboja n_i^2 koja je eksponencijalna funkcija E_g . Budući da se gustoća struje zasićenja može prikazati izrazom

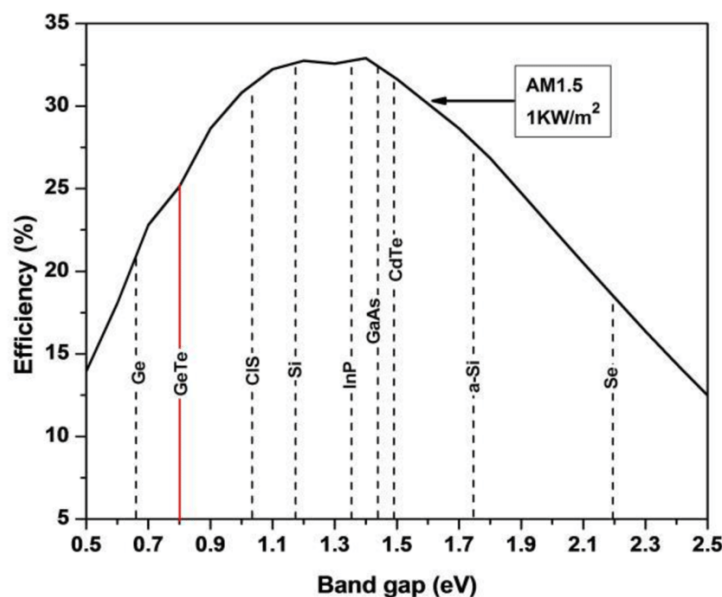
$$J_o = AT^3 \exp\left(-\frac{E_g}{kT}\right)$$

Vidimo da se povećanjem E_g , gustoća struje J_0 eksponencijalno opada. Elektromotorna sila ćelije prikazana je izrazom:

$$U_{ok} = \frac{kT}{e} \ln\left(\frac{I_{ks}}{I_0} + 1\right).$$

Porastom E_g smanjuje se inverzna struja zasićenja I_0 mnogo brže nego struja kratkog spoja, te porastom E_g , raste i napon U_{ok} .

Moglo bi se zaključiti da je poluvodič prikladniji što mu je širina zabranjene vrpce E_g manja, jer poluvodič s manjim E_g može apsorbirati veći opseg valnih duljina iz Sunčeva spektra. Međutim, elektromotorna sila U_{ok} sunčane ćelije također ovisi o E_g : za veći E_g manja je inverzna struja zasićenja kroz diodu, a veća elektromotorna sila. Poluvodiči malog E_g nisu, dakle, prikladni jer su dobiveni naponi preniski; poluvodiči velikog E_g nisu prikladni jer je struja kratkog spoja manja. Djelotvornost sunčane ćelije proporcionalna je produktu $U_{ok}I_{ks}$. Na slici 11. prikazana je maksimalna teorijska djelotvornost sunčane ćelije kao funkcija širine zabranjene vrpce E_g . Na slici su također označeni neki od poluvodiča koji mogu poslužiti za izradu sunčanih ćelija. Djelotvornost u početku raste s E_g , postiže maksimum, a zatim opada. Teorijski, maksimum djelotvornosti jest oko 30% na oko $E_g = 1,4 eV$ (što odgovara maksimalnoj valnoj duljini $0,88\mu m$). Energijski procjep E_g ovisi o poluvodiču i iznosi za silicij $1,2 eV$, za Ge $0,7 eV$, GaAs $1,4 eV$, CuO $2,0 eV$, CdS $2,6 eV$ itd. Energijski procjep zabranjenog područja poluvodiča E_g ovisi o temperaturi. Tako npr. za silicij $E_g = 1,118 eV$ na 273 K, $1,10 eV$ na 340 K, dok je u blizini apsolutne nule $1,156 eV$. [1]

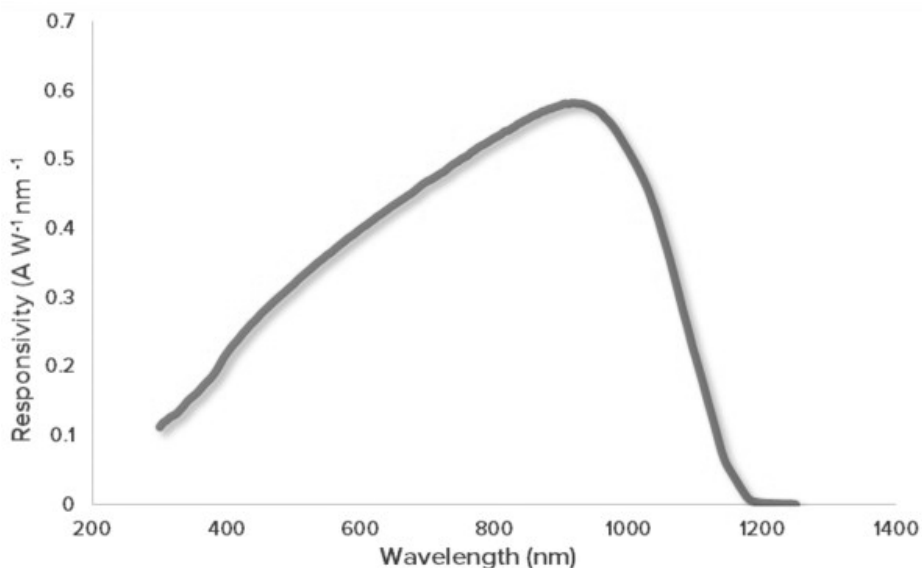


Slika 11. Maksimalna teorijska djelotvornost ćelije u ovisnosti o širini zabranjene vrpce

[10]

3.6. SPEKTRALNI ODZIV SUNČANE ČELIJE

Sunčana ćelija različito je osjetljiva na zračenje različitih valnih duljina sunčeva spektra. Na slici 12. prikazana je spektralna ovisnost gustoće struje silicijske sunčane ćelije. Takve se krivulje dobivaju mjerenjem struje ćelije ovisno o zračenju monokromatskim svjetlom koje upada na ćeliju za razne valne duljine. Ordinata krivulje izražava se, dakle, u amperima po watu, a apcisa u metrima ili nanometrima. Monokromatska svjetlost može se dobiti iz bijele svjetlosti upotrebom monokromatora s optičkim filterima koji propuštaju usko područje valnih duljina zračenja. Slična je krivulja za ovisnost spektralne djelotvornosti o valnoj duljini. Krivulja spektralne osjetljivosti ima maksimum za valnu duljinu λ_{maks} koja je za silicijsku ćeliju oko $0,8 \mu m$, jer se većina fotona oko te valne duljine zračenja apsorbira blizu ili u osiromašenom području (PN-spoju), gdje je stvaranje i skupljanje parova elektron-šupljina najizraženije. Fotoni koji pripadaju zračenju kratkih valnih duljina apsorbiraju se odmah pri ulasku u ćeliju, dakle, daleko od PN-spoja, a tu je skupljanje naboja slabije te i struja odnosno djelotvornost ćelije manja. Fotoni zračenja velikih valnih duljina (infracrveno zračenje) prolaze kroz spoj uz slabu apsorpciju pri dnu ćelije i zbog toga manje pridonosi struji ćelije. Kada valna duljina zračenja prijeđe vrijednost λ_g , struja padne na nulu, jer takvi fotoni nemaju dovoljnu energiju ($h \nu = h c / \lambda$) da bi proizveli par elektron-šupljina.



Slika 12. Spektralna osjetljivost sunčane ćelije [12]

3.7. ANTIREFLEKSIJSKI SLOJEVI

Postoje dva načina da se smanji refleksija upadnog Sunčeva zračenja na površini sunčane ćelije: nanošenje posebnog antirefleksijskog sloja i obrada površine tako da joj se poveća hrapavost. Kada elektromagnetski val upada na granicu između dvaju optičkih sredstava jedan se dio reflektira, a drugi prolazi. Faktor refleksije ρ (omjer reflektirane i upadne energije) i faktor transmisije τ (omjer transmitirane i upadne energije) ovise o polarizaciji vala, kutu upada i indeksima loma tih dvaju sredstava. Ako val upada okomito proračuni i rezultati za te faktore dosta su jednostavni te ćemo te izraze ovdje navesti. Izraze za te koeficijente pronašao je francuski fizičar Fresnel i poznati su pod nazivom Fresnelove jednažbe. Ako je kut upada blizak nuli (okomiti upad) i val prelazi iz sredstva indeksa loma n_1 u sredstvo indeksa loma n_2 , faktor refleksije za energiju vala jest:

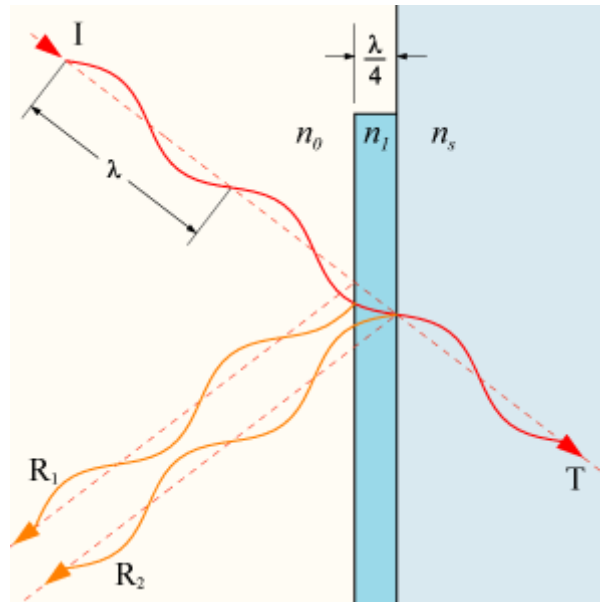
$$\rho = \left(\frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} \right)^2$$

Za staklo je $n = 1,5$ te je pri prijelazu iz zraka u staklo $\rho = 0,04$. Ako svjetlo prelazi iz zraka u silicij ($n \approx 4$) faktor refleksije je 0,36, a pri prijelazu iz stakla u silicij $\rho = 0,21$. Veliki indeks loma silicija uzrokuje, dakle, visok faktor refleksije (veći od 30%). Indeks loma kompleksan je broj $n' = n + ik$. Imaginarni dio u svezi je s koeficijentom apsorpcije u materijalu. Realni dio indeksa loma silicija n opada s valnom duljinom i iznosi $n = 5,62$ za $0,4\mu\text{m}$, 4,28 za $0,5\mu\text{m}$, 3,93 za $0,6\mu\text{m}$ itd... Imaginarni dio k mijenja se također od 0,3 za $0,4\mu\text{m}$, 0,02 za $0,6\mu\text{m}$ itd.[1]

Smanjenje refleksije na površini ćelije može se postići nanošenjem antirefleksijskog sloja na površinu silicija od jednog ili više prozirnih dielektričnih materijala različitog indeksa loma. Najjednostavniji oblik antirefleksijskog sloja jest sloj debljine d materijala indeksa loma n_2 , tj. optičke debljine n_2d . Svjetlo upada iz sredstva indeksa loma n_1 , dolazi u antirefleksijski sloj indeksa loma n_2 i ulazi u silicij indeksa loma n_3 ($n_1 < n_2 < n_3$). Prvo sredstvo je ili zrak, ili staklo, ili neki plastični materijal kojim je ćelija prekrivena zbog zaštite od mehaničkih i atmosferskih utjecaja. Zraka (snop svjetlosti valne duljine λ) reflektirat će se na površini prvog sloja i na površini drugog sloja. Označimo s r_1 i r_2 odgovarajuće faktore refleksije amplitude upadnog elektromagnetskog vala. Izrazi za te faktore jesu:

$$r_1 = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2}, \quad r_2 = \frac{n_2 - n_3}{n_2 + n_3}$$

(Budući da je energija vala proporcionalna kvadratu amplitude, faktor refleksije za energiju vala je $\rho = r^2$). [1]



Slika 13. Antirefleksijski sloj [13]

Budući da je $n_1 < n_2 < n_3$, obje zrake zbog refleksije na optički gušćem sredstvu mijenjaju fazu za π što odgovara promjeni optičke razlike puta za $\lambda/2$. Budući da indeks loma i debljina sloja ovise o valnoj duljini, a u upadnoj svjetlosti ima mnogo valnih duljina, ukupna refleksija neće biti nula. Jednostruki antirefleksijski sloj smanjuje gubitke refleksijom ispod 10%, dok višestruki slojevi mogu smanjiti refleksiju na svega par postotaka. Obično se kao antirefleksijski sloj upotrebljava titan ili tantal-oksidi ($n = 2,1$). Refleksija upadne energije na površini ćelije može se smanjiti obradom površine tako da joj se poveća hrapavost. Posebnom tehnologijom jetkanja obradi se površina silicijeve ćelije tako da se na njoj formiraju mikroskopski male izbočine u obliku piramida visine oko $10 \mu\text{m}$. Svjetlost reflektirana na stranicama takvih piramida vraća se prema ćeliji i tako se povećava jakost svjetlosti koja ulazi u ćeliju. Takvo strukturiranje površine ćelije može bitno smanjiti refleksiju i povećati djelotvornost ćelije.[1]

4. VRSTE ČELIJA

4.1 ČELIJE OD MONOKRISTALIČNOG I POLIKRISTALIČNOG SILICIJA

Iako su u laboratorijima napravljene i ispitane sunčane ćelije od raznih poluvodičkih materijala, zasad se jedino silicijske sunčane ćelije mogu komercijalno nabavljati. Te se ćelije izrađuju od monokristala silicija, polikristaličnog i amorfno silicija. Pri izradi ćelija od monokristaličnog i polikristaličnog silicija režu se kriške u obliku kvadrata ili kruga, površine npr. $10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$, odnosno polumjera 10 cm . Debljina kriški je od 250 do $450\text{ }\mu\text{m}$. Obično se koristi P-tip silicija, dopiran borom.[1]



Slika 14. Prednja površina sunčane ćelije [14]

Prednja površina sunčane ćelije prekrivena je metalnom rešetkom (sl. 14) radi električnog kontakta, a kao drugi kontakt služi donja metalna zaštitna podloga. Za dobivanje mrežice koristi se tehnika metalne maske i fotolitografija. Električni kontakt uspostavlja se obično pomoću tri odvojena sloja metala. Tanki sloj titana upotrebljava se kao donji sloj za dobru adheziju sa silicijem. Gornji sloj je srebro zbog niskog otpora i pogodnog lemljenja. U sredini se nalazi sloj paladija da bi se izbjegla neželjena reakcija između titana i srebra zbog vlage. Debljina vodljivih traka mrežice je oko $0,2\text{ mm}$, a razmak među njima je oko 5 mm . Što su kontaktne trake bliže, gubitak snage na otporu ćelije je manji, ali i manje svjetla upada na ćeliju te je potrebno naći određeni kompromis. [1]

Na površinu ćelije nanosi se antirefleksijski omotač metodom vakuumskeg napanjanja. Na površini ćelije pri sakupljanju naboja na kontaktnoj mrežici nastaju struje paralelne površini ćelije i one su određene otpornošću materijala koja je dana izrazom

$$\rho = \frac{1}{e\mu_e n_D}$$

gdje je e naboj elektrona, μ_e pokretljivost elektrona u materijalu i n_D koncentracija donorskih primjesa. Otpornost silicija je reda veličine 1 Ω cm. Podijeli li se otpornost ρ s debljinom d , dobiva se slojna otpornost:

$$\rho_s = \frac{1}{e\mu_e n_D d}$$

Budući da je jedinica otpornosti ommetar (Ω m), jedinica slojne otpornosti ρ_s je om (Ω). Da bi se razlikovala od jedinice otpora često se simbolički označava sa Ω/\square . Razmak vodljivih traka u mrežici na površini ćelije ovisi o slojnoj otpornosti: što je slojna otpornost veća, razmak je manji. Površine monokristaličkih silicijskih ćelija ovise o površini monokristala koji se proizvode. Iznose od 5 do 10 cm^2 , a debljina im je oko 0,2 do 0,3 mm. Elektromotorna sila kreće se od 0,55 do 0,7 V, struja kratkog spoja je oko 150 mA, a djelotvornost od 10% do 15,5%. [1]

Zahtjevan tehnološki proces proizvodnje glavni je uzrok visoke cijene monokristaličnih sunčanih ćelija. Da bi se stekao uvid u složenost izrade evo pojednostavljenog opisa proizvodnje. Iz kupke rastaljenog čistog silicija (cijena oko 65 USD/kg), nakon ubacivanja malog monokristala koji služi kao klica kristalizacije polaganim se izvlačenjem (brzinom desetak cm po satu) dobiva monokristal silicija promjera oko 8 cm i duljine oko 50 cm. To je tzv. proces Czochralskog za dobivanje monokristala silicija. Iz tog komada monokristala režu se dijamantnom cirkularnom pilom tanke okrugle pločice silicija (debljine 0,2mm – 0,4mm). Pri tome postupku samo jedan dio kristala uspije se iskoristiti, ostalo (oko 70%) pri rezanju propadne, što bitno povećava troškove izrade. Da bi se od tankih silicijevih pločica dobila sunčana ćelija, potreban je još niz postupaka obrade. Nakon uklanjanja oštećenja (jetkanjem) nastalih rezanjem (što smanjuje gubitke zbog refleksije) pristupa se dodavanju N-primjese (obično se koristi fosfor). Na jednu stranu pločice difundira se fosfor do dubine od oko 0,5 μ m, što dovodi do formiranja PN-spoja. Ova difuzija fosfora u silicij odvija se pri temperaturi od 800 do 900 $^{\circ}$ C. Nakon otprilike 20 minuta nečistoće fosfora

dominirat će u području blizu površine pločice te će nastati područje N-tipa vodljivosti. Konačno se izrađuju električni kontakti s jedne i druge strane ćelije. Svi ti procesi zahtijevaju mnogo rada i vremena, što povećava troškove izrade. Jedan od načina smanjenja cijene jest pojednostavniti izradu. To se može postići i tako da se umjesto monokristala u obliku valjka iz kupke rastaljenog silicija izvlači neprekinuta tanka traka kristalnog silicija pomoću tzv. EFG postupka. Jednostavnim rezanjem trake izrađuju se ćelije, i budući da nema piljenja i poliranja otpad je puno manji. Proces je brži jer je brzina izvlačenja trake oko 1 m/h desetak puta veća nego u postupku Czochralskog. Međutim, ove ćelije su lošije kvalitete i manje djelotvornosti. Naime, proizvedeni silicij ima relativno slaba kristalografska svojstva u usporedbi s kristalima dobivenim procesom Czochralskog. Određene nečistoće unesene u rastaljeni silicij iz grafitnih kalupa, te nastali silicijski karbid, može ometati rast i degradirati svojstva nastalog silicija.[1]

Metodom dendritičkog umrežavanja (WEB) mogu se smanjiti nedostaci metode EFG. Kontroliranjem temperaturnog gradijenta moguće je pospješiti rast paralelnih dendrita u talini. Kako se oni izvlače iz taline, tako se tanki sloj kristaličnog silicija uhvati između njih. Ćelije od polikristaličnog silicija izrađuju se u obliku tankog filma kaotično poredanih kristalića silicija na jeftinoj podlozi, pa se tako uštedi materijal i izbjegava skupa tehnologija izrade pločica od monokristaličnog silicija. [1]

4.2 ĆELIJE OD AMORFNOG SILICIJA

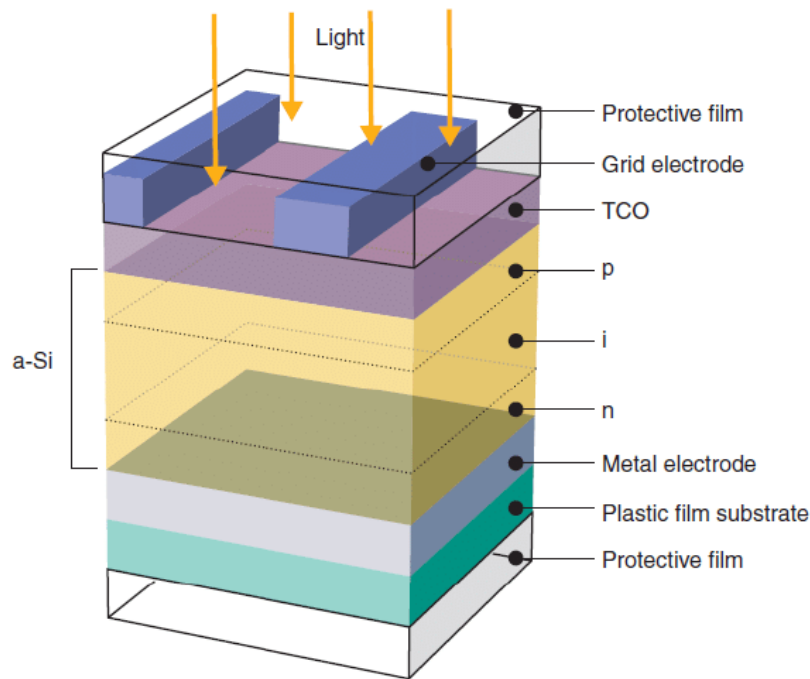
U novije vrijeme posebnu pažnju privlači tehnologija proizvodnje ćelija od amorfno silicija, a velik je napredak postignut od pojave prvih komercijalnih modula 1984. godine. Proizvodnja amorfni ćelija relativno je jednostavan i jeftin postupak u kome se na podlogu nanosi tanki film (debljine svega nekoliko mikrometara) silicija u amorfno stanju čime je utrošak materijala znatno manji nego npr. pri proizvodnji ćelija iz kristaličnog silicija. Prva ćelija od amorfno silicija proizvedena je 1974. (D.E. Carlson i C.R. Wronski), imala je $U_{ok} = 0,8 V$, $I_{ks} = 12 mA/cm^2$, površinu $A = 0,02 cm^2$ i djelotvornost $\eta = 5,5\%$. Intenzivna istraživanja u tom području rezultirala su proizvodnjom ćelija djelotvornosti do 8%, a očekuje se da će se postići djelotvornost 10-12%. Kristalični silicij ima kristalnu strukturu sličnu dijamantu. Međutim, amorfni silicij nema kristalnu strukturu i pravilni simetrični prostorni raspored atoma. I ovdje je, kao i u kristaličnom siliciju, pojedini atom povezan kovalentno s

atomima u susjedstvu, međutim nema pravilnosti kristalne rešetke, ni trodimenzionalne periodičnosti svojstvene kristalima. Širina zabranjene energetske vrpce E_g ne može se jednostavno definirati i odrediti za amorfni silicij. Za razliku od kristaličnog u zabranjenoj vrpci amornog silicija postoje „lokalizirana“ energijska stanja, dok u zabranjenoj vrpki kod kristaličnih tvari nema energijskih stanja. Zabranjeni energijski procjep E_g za amorfni silicij ipak se definira i određuje iz ovisnosti apsorpcijskog faktora o valnoj duljini upadnog zračenja (zbog toga se često naziva i optičkim). Vrijednost za optički energijski procjep E_g ovisi o načinu proizvodnje amornog silicija i iznosi od 1,65 do 1,8 eV. [1]

Amorfni silicij ima izuzetnu sposobnost apsorpcije svjetlosti u opsegu od 350 do 710 nm (što odgovara energiji fotona od 3,6 do 1,7 eV). Njegov apsorpcijski faktor u vidljivom dijelu sunčeva spektra veći je nego kristaličnog. Za valnu duljinu 550 nm (maksimum sunčeva spektra) faktor apsorpcije za amorfni silicij je gotovo 10 puta veći nego za kristalični. Za sve fotone energije manje od 1,7 eV (cijelo područje crvenog i infracrvenog sunčeva spektra) amorfni je silicij providan i ne apsorbira ih za razliku od kristaličnog kod kojeg je u tom području apsorpcija velika. Za fotonaponsku konverziju dovoljni su vrlo tanki slojevi amornog silicija. Veća apsorpcija postiže se debljim slojem materijala, no ona raste i s unutrašnjim električnim poljem koje je obrnuto proporcionalno s debljinom. [1]

Stoga optimalna debljina sloja amornog silicija iznosi 0,3 μm do 0,6 μm što je samo 0,002 debljine sloja kristaličnog silicija potrebnog za jednaki faktor apsorpcije. Potrebna količina materijala je mnogo manja nego za kristalični silicij. Za proizvodnju sunčanih ćelija snage 1 MW potrebno je oko stotinjak kilograma amornog silicija, a mnogo više kristaličnog. Energija potrebna pri proizvodnji amornih ćelija manja je nego za monokristalične i vrati se već nakon godinu dana upotrebe, dok za monokristalične za 3 do 5 puta dulje.

Poznato je više metoda proizvodnje amornog silicija. Jedna od njih je razlaganje plina silana SiH_4 (sa ili bez dodatka vodika) visokofrekvencijskim električnim poljem. Električnim izbojem u tom plinu pri niskom tlaku taloži se amorfni silicij. [1]



Slika 15. Struktura uređaja solarne ćelije od amornog silicija [15]

Amorfni silicij može se nanositi kao tanki film na bilo koju podlogu – staklo, metal, plastiku, foliju itd. Staklo se npr. može upotrijebiti i kao pokrov i kao podloga. Sve to čini proizvodnju modula jeftinijom i omogućava ekonomski opravdanu primjenu ćelija i s manjom djelotvornošću. Amorfni silicij lakše se nanosi i na tanke savitljive podloge tako da se može savijati kao folija, lako prenositi i instalirati na zakrivljenim podlogama. Amorfne ćelije imaju i niz mana. Najnepogodnija je mala djelotvornost (reda veličine 7%). Pouzdanost amornih ćelija manja je od monokristaliničnih. Proizvodnja fotonaponskog modula od amornog silicija odvija se na sljedeći način: nakon čišćenja staklene plohe nanosi se prvi sloj (sl. 15) koji ima funkciju prednje elektrode, a dobiva se nanošenjem kositrenog oksida postupkom kemijske depozicije pare u posebnoj peći. Na sloj kositrenog oksida nanose se tri sloja amornog silicija: P, I i N-sloj. Nanose se iz plinske mješavine P, I i N posebnom tehnikom zvanom tinjavi izboj ili plinska plazma. Proces električnog izboja izvora snage pri frekvenciji 13,56 MHz, stvaraju elektroni koji svojom energijom pobuđuju druge atome ili razdvajaju molekule smjese plinova koja dolazi u komoru. U tim uvjetima molekule silana, koji je glavni sastojak P, I i N plinova, rastavljaju se u manje polarizirane dijelove koji se privučeni filmom kositrenog oksida talože na staklenoj plohi. Tako formiraju film amornog silicija. [1]

Najprije se nanosi tanki P-sloj iz smjese plinova koji čine silan, metan i diboran. Tako se formira P-tip poluvodiča sastavljen od silicija, ugljika, bora i vodika. Zatim se nanosi I-sloj (intrinzični sloj) debljine 0,3 μm iz skupine mješavine I-plinova koju čine silan i vodik. N-sloj se nanosi kao tanki sloj iz mješavine N-plinova: silan i fosfin. Formirani N-tip poluvodiča sastoji se od silicija, fosfora i vodika. Proces nanošenja amorfno silicija u cijelosti je programiran i vođen računalom. Na sloj amorfno silicija tehnikom vakuumske uparivanja nanosi se tanki aluminijski film. U uvjetima visokog vakuuma rastaljeni aluminij prelazi u plinovito stanje i pod tlakom plina se kondenzira na cijeloj površini sloja amorfno silicija tvoreći tako stražnji kolektor u obliku tankog filma djeluje kao reflektirajući sloj povećavajući tako djelotvornost ćelije. Na aluminijski sloj nanosi se tanki sloj UV-smole (ultraljubičaste smole), a potom se na nju stavlja staklena ploha istih dimenzija kao i modul. Formirana struktura (staklo na staklo) propusti se između dva rotirajuća valjka i istodobno osvjetljava ultraljubičastim svjetlom pod čijim djelovanjem se smola brzo stvrdne. U tablici 4. uspoređeni su parametri monokristalinih i amorfno silicijevih ćelija. Vidi se da je širina zabranjene vrpce veća za amorfno silicij i varira od 1,6 eV do 1,8 eV, te se amorfno silicij ne može upotrijebiti za apsorpciju zračenja većih valnih duljina od 800nm. Debljina materijala za zadovoljavajuću apsorpciju sunčane energije je oko 1 μm za amorfno i oko 200 μm za monokristalini silicij. Struja kratkog spoja za amorfno ćeliju je oko 15 mA/cm^2 , a za monokristalini je oko 30 mA/cm^2 . Napon otvorenog kruga veći je za amorfno ćeliju. Inverzna (tamna) struja u amorfno siliciju manja je zbog većeg E_g . Različiti su i faktori punjenja F i manji su za amorfno silicij. Dva su osnovna problema vezana za amorfno silicij: mijenjanje karakteristika ćelije tijekom upotrebe i mala djelotvornost amorfno ćelija. Opaženo je da tijekom prvih mjeseci izlaganja sunčevoj svjetlosti snaga opadne za 15% do 30% od vrijednosti početne snage da bi se kasnije ćelije stabilizirale. Najveće pogoršanje svojstava ćelije je u prvim satima upotrebe. Struja kratkog spoja smanjuje se za oko 5%, toliko i napon otvorenog kruga, faktor punjenja smanji se za oko 15%, djelotvornost i snaga od 15% do 30%, serijski otpor se smanji, a paralelni poveća za oko 50%. Daljnjim usavršavanjem proizvodnje ta su se pogoršanja smanjila i danas su svedena na 10 do 15 % smanjenja djelotvornosti što se stabilizira već nakon stotinjak sati rada ćelija. Zato se pri navođenju djelotvornosti obično misli na djelotvornost nakon perioda stabilizacije. [1]

Tablica 4. Usporedba monokristaličnih i amorfnih ćelija [1]

	Monokristalične	Amorfne
Energijski procjep	1,12 eV	1,6 do 1,8 eV
Faktor apsorpcije($0,4\mu m < \lambda < 0,7\mu m$)	Malen	Velik
Faktor apsorpcije($\lambda > 0,7\mu m$)	Velik	Malen
Pokretljivost elektrona	Oko $1000V^{-1}cm^2s^{-1}$	Oko $1V^{-1}cm^2s^{-1}$
Debljina sloja	Oko 200 μm	Oko 1 μm
Napon otvorenog kruga	0,65 V	0,85 V
Gustoća struje kratkog spoja	30 $mA cm^2$	15 $mA cm^2$
Faktor punjenja	Oko 0,75	Oko 0,65
Djelotvornost	0,10 - 0,18	0,05 - 0,1

Uzrok nestabilnosti parametara ćelije su defekti uzrokovani sunčevim zračenjem. To je pojava tzv. njihajućih vrpca u intrinzičnom sloju koja smanjuje ugrađeno električno polje. Druga vrsta promjena vezana je uz formiranje metastabilnih stanja u energijskom procjepu (tzv. Staebler-Wronski efekt). One ovise o čistoći plazme, omjeru kisika i dušika, a mogu se kompenzirati dodavanjem primjesa bora u amorfni silicij. Drugi je problem relativno niska djelotvornost amorfnih ćelija, modula i sustava. Tipična vrijednost za djelotvornost sustava je oko 4%, za module oko 5% i to nakon perioda stabilizacije. Cilj je postizanje stabilizirane djelotvornosti do 10% i površine modula reda veličine četvornog metra. [1]

Povećanje djelotvornosti i masovna proizvodnja smanjila bi cijenu modula. Cijena proizvedene električne energije sa sadašnjom cijenom modula bila bi oko 0,4 USD/kWh. Da bi amorfni silicij postao ekonomski prihvatljivijim potrebno mu je povećati pouzdanost tijekom upotrebe, sniziti cijenu i postići veću stabiliziranost djelotvornost. Ulažu se napori u sva tri smjera i rezultati su optimistični. [1]

4.3 DRUGI MATERIJALI ZA IZRADU ČELIJA

Da bi se cijena solarnih ćelija bitno smanjila, potrebno je pojednostavniti izradu i upotrijebiti druge, jeftinije materijale. Već su postignuti određeni rezultati i može se očekivati da će se cijene sunčanih ćelija i u budućnosti smanjivati. Uz silicijeve najviše su istražene sunčane ćelije od kadmij-sulfida. Cu_2S/CdS sunčana ćelija sastoji se od tankog sloja CdS (oko 20 μm) kao N-područja na koji je nanesen P-sloj bakar-sulfida Cu_2S debljine oko 0,2 μm . Djelotvornost je takvih ćelija 5-9%, a vijek trajanja im je kraći nego silicijevim sunčanim ćelijama. Osjetljive su na vlagu i kisik iz zraka. [1]

Ćelije od galij-arsenida prave se u obliku tankog filma od jedne ($GaAs$) ili dvije komponente ($GaAs + Cu_2S$) na nekoj podlozi. Takva bi ćelija trebala, barem prema teorijskim predviđanjima, imati veliku djelotvornost, budući da galij-arsenid ima veći energijski procjep, $E_g = 1,4 eV$, nego silicij. Tehnologija tog spoja dobro je razvijena jer se $GaAs$ upotrebljava za izradu elektroničkih komponenti. Proizvedene su sunčane ćelije djelotvornosti oko 25%. Međutim to je rijedak, skupi, otrovni materijal što mu ograničava široku primjenu. Posljednjih godina svojstva sunčanih ćelija bitno su poboljšana. Ćelije visoke djelotvornosti proizvedene su u laboratorijima i očekuje se njihova proizvodnja za tržište. U tablici 5. su uspoređene silicijske i galij-arsenidske ćelije visoke djelotvornosti, a u tablici 6. su navedene orijentacijske vrijednosti za parametre ćelija od različitih materijala. [1]

Tablica 5. Usporedba silicijskih i galij-arsenidskih ćelija visoke djelotvornosti [1]

Ćelija	U_{ok}/V	$J_{ks}/(mA\ cm^{-2})$	F	η
Si	0,64	33	0,84	0,18
GaAs	1,05	27	0,85	0,24

Tablica 6. Tipični parametri raznih ćelija [1]

Ćelija	U_{ok}/V	$J_{ks}/(mA\ cm^{-2})$	η
m-Si	0,65	30	0,14
p-Si	0,60	26	0,13
a-Si	0,85	15	0,08
<i>CdS / Cu₂S</i>	0,5	20	0,09
<i>CdS / CdTe</i>	0,7	15	0,1
<i>GaAlAs / GaAs</i>	1	30	0,2
<i>GaAs</i>	1	20	0,2

6. ZAKLJUČAK

Korištenje obnovljivih izvora energije kao što je solarna energija za opskrbu električnom energijom se vrlo ozbiljno razmatra diljem svijeta zbog globalnih ekoloških problema povezanih s konvencionalnom proizvodnjom i potencijalnim nedostatkom energije zbog sve veće potražnje. Potencijal za solarnu energiju je ogroman, budući da Zemlja svaki dan prima oko 200 000 puta više od ukupnog svjetskog dnevnog kapaciteta za proizvodnju električne energije u obliku sunčeve energije. Štoviše, solarnu energiju možemo iskoristiti u mnoge svrhe. Može se proizvoditi električna energija kao i toplina. Ovu energiju koristimo u regijama gdje nam neće trebati električna mreža. Još jedna prednost je što je to čisto gorivo. Korištenje ove energije neće dovesti do onečišćenja i stoga neće naštetiti okolišu. Kao rezultat toga, onečišćenje zraka značajno će se smanjiti. Kada se spominje solarna energija, moraju se spomenuti i fotonaponski sustavi koji su izvanredni i vrlo korisni s ogromnim popisom prednosti. Razlog zbog kojeg su tako jedinstveni je što nemaju pomičnih dijelova (u klasičnom mehaničkom smislu) koji se mogu istrošiti. Ne postoje tekućine ili plinovi (osim u hibridnim sustavima) koji mogu iscuriti. Najbolji dio kod njih je to što im za rad nije potrebno gorivo. S brzim odgovorom, trenutačno postižu puni učinak. Ove ćelije mogu raditi na umjerenim temperaturama ne stvarajući zagađenje dok proizvode električnu energiju, iako otpadni proizvodi iz njihove proizvodnje i otrovni plinovi u slučaju katastrofalnog kvara i odlaganja mogu predstavljati problem. Solarne ćelije zahtijevaju malo održavanja ako su pravilno proizvedene i instalirane. Solarna energija je budućnost naše nadolazeće generacije. Sigurna je, zelenija i ekonomičnija alternativa. Štoviše, može se nadopunjavati tako da služi kao obnovljivi izvor energije. Kao rezultat toga, ne uzrokuje zagađenje. Stoga moramo pokušati sve više koristiti sunčevu energiju kako bismo očuvali naš okoliš.

LITERATURA

- [1] Kulišić, P.; Vuletin, J.; Zulim, I.: *Sunčane ćelije*, Školska knjiga, Zagreb, 1994.
- [2] <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=46034>, pristup stranici: 25.07.2022
- [3] <http://www.oikon.hr/>, pristup stranici: 25.07.2022
- [4] https://op.europa.eu/webpub/eca/lr-energy-and-climate/img/HR_Page11.jpg, pristup stranici: 25.07.2022
- [5] <http://jadran.gfz.hr/pojmovnik.html>, pristup stranici: 26.07.2022
- [6] <https://solartechadvisor.com/pyranometers/>, pristup stranici: 26.07.2022
- [7] <https://www.iea.org/fuels-and-technologies/solar>, pristup stranici: 26.07.2022
- [8] Šljivac, D.; Topić, D.: *Obnovljivi izvori energije*, Elektrotehnička škola Osijek, Osijek, 2013.
- [9] https://www.researchgate.net/figure/Temperature-effects-on-the-I-V-curve-of-a-PV-cell_fig1_301635237, pristup stranici 4.9.2022
- [10] https://www.researchgate.net/figure/The-Shockley-Queisser-limit-defines-the-maximum-theoretical-efficiency-of-a-solar-cell_fig1_324819847, pristup stranici 4.9.2022
- [11] <https://www.bentham.co.uk/knowledge/tools-resources/application-guides/spectral-characterisation-of-photovoltaic-devices-159/>, pristup stranici 4.9.2022
- [12] <https://www.bentham.co.uk/knowledge/tools-resources/application-guides/spectral-characterisation-of-photovoltaic-devices-159/>, pristup stranici 4.9.2022
- [13] https://www.nidek-intl.com/product/coating_technical/coating_type_1.html, pristup stranici 4.9.2022
- [14] <https://www.amp-solar.com/amm100/hr>, pristup stranici 4.9.2022
- [15] https://www.researchgate.net/figure/Amorphous-silicon-solar-cell-device-structure-9_fig1_276205737, pristup stranici 4.9.2022

POPIS SLIKA

Slika 1. Spektar Sunca [1]	2
Slika 2. Godišnji hod deklinacije Sunca [1]	4
Slika 3. Ozračenje u slojevima atmosfere [4].....	5
Slika 4. Piranometar [6]	7
Slika 5. Prikaz smanjenja intenziteta zračenja [4].....	8
Slika 6. Silicijska sunčana ćelija [1].....	9
Slika 7. Ekvivalentni sklop sunčane ćelije [1]	10
Slika 8. Utjecaj jakosti sunčeva ozračenja na I-U karakteristiku ćelije [1].....	12
Slika 9. Prikaz točke maksimalne snage sunčane ćelije [8]	13
Slika 10. Utjecaj radne temperature ćelije na njezinu karakteristiku [9]	15
Slika 11. Maksimalna teorijska djelotvornost ćelije u ovisnosti o širini zabranj. vrpce [10] ..	17
Slika 12. Spektralna osjetljivost sunčane ćelije [12].....	18
Slika 13. Antirefleksijski sloj [13]	20
Slika 14. Prednja površina sunčane ćelije [14]	22
Slika 15. Struktura uređaja solarne ćelije od amorfnog silicija [15]	25

POPIS TABLICA

Tablica 1. Deklinacija Sunca [1]	4
Tablica 2. Godišnji hod srednje dnevne sunčane ozračenosti horizontalne plohe [1]	7
Tablica 3. Ovisnost karakteristika sunčane ćelije o temperaturi [1]	7
Tablica 4. Usporedba monokristaličnih i amorfnih ćelija [1]	27
Tablica 5. Usporedba silicijskih i galij-arsenidskih ćelija visoke djelotvornosti [1]	28
Tablica 6. Tipični parametri raznih ćelija [1].....	29