

Strujno-naponska karakterizacija solarnih ćelija

Čus, Petar

Master's thesis / Diplomski rad

2021

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Science / Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:217:424495>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-11-19**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Science - University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
FIZIČKI ODSJEK

Petar Čus

STRUJNO-NAPONSKA
KARAKTERIZACIJA SOLARNIH ČELIJA

Diplomski rad

Zagreb, 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
FIZIČKI ODSJEK

INTEGRIRANI PREDDIPLOMSKI I DIPLOMSKI SVEUČILIŠNI STUDIJ
FIZIKA I INFORMATIKA; SMJER: NASTAVNIČKI

Petar Čus

Diplomski rad

**Strujno-naponska karakterizacija
solarnih ćelija**

Voditelj diplomskog rada: dr. sc. Krunoslav Jurać

Suvoditelj diplomskog rada: doc. dr. sc. Damjan Pelc

Ocjena diplomskog rada: _____

Povjerenstvo: 1. _____

2. _____

3. _____

Datum polaganja: _____

Zagreb, 2021.

Zahvaljujem se mentoru dr. sc. Krunoslavu Juraiću na pomoći, pristupačnosti, savjetima i strpljenju prilikom izrade ovog diplomskog rada.

Nadalje, želim se zahvaliti sumentoru doc. dr. sc. Damjanu Pelcu na konstruktivnim komentarima te pred. dr. sc. Katarini Jeličić na pomoći u izradi metodičkog dijela rada.

Veliko hvala obitelji, prijateljima i mojoj Matei na podršci tijekom studija.

Sažetak

Među obnovljivim izvorima energije posljednjih godina sve veću popularnost imaju solarne ćelije (fotovoltaici) koji izravno pretvaraju sunčevu energiju u električnu energiju. Do sada su znanstvena istraživanja i razvoj bili uglavnom usmjereni prema povećanju efikasnosti pretvorbe sunčeve energije, poboljšanju stabilnosti te smanjenju troškova proizvodnje solarnih ćelija. Pored toga u posljednje vrijeme solarni moduli se sve više ugrađuju u fasade zgrada, te vrlo bitan postaje i estetski dojam čak i uz određeno smanjenje efikasnosti. To se može postići npr. bojanjem vanjskih dijelova solarnog modula (staklo, etilen-vinyl acetat folija), dizajnom sa skrivenim električnim kontaktima i sl.

U tu svrhu u ovom radu je ispitan utjecaj modifikacije etilen-vinyl acetat (EVA) folije organskim bojama na osnovne parametre solarne ćelije polikristalnog silicija. Uzorcima EVA folije modificiranim s dvije različite organske boje: crvenom i žutom su enkapsulirane solarne ćelije veličine 2x2 cm. Korištenjem solarnog simulatora izmjerene su I-V karakteristike i spektralni odziv solarnih ćelija s modificiranom EVA folijom. Kvantitativna analiza eksperimentalno dobivenih rezultata provedena je prilagodbom teorijskom modelu s jednom diodom. Dobiveni rezultati za solarne ćelije s modificiranom EVA folijom uspoređeni su sa solarnom ćelijom enkapsuliranom s ne modificiranom EVA folijom. Rezultati su pokazali da je korištenjem EVA folije modificirane organskim bojama postignut estetski dojam, ali uz 10-15% nižu efikasnost pretvorbe sunčeve energije. To je posljedica veće apsorpcije svjetla uzrokovane prisustvom organske boje u EVA foliji.

Ključne riječi: solarna ćelija, enkapsulacija, organske boje, EVA folija, I-V karakteristika

Current-voltage characterization of solar cells

Abstract

Among renewable energy sources, solar cells (photovoltaics), which directly convert solar energy into electricity, have become increasingly popular in recent years. Until now, scientific research and development has been mainly focused on increasing the efficiency of solar energy conversion, improving stability and reducing the cost of solar cell production. In addition, recently solar modules are increasingly being installed in the facades of buildings, and the aesthetic impression is becoming very important, even with a certain reduction in efficiency. This can be achieved, for example, by painting the outer parts of the solar module (glass, Ethylene-vinyl acetate foil), design with hidden electrical contacts, etc.

For this purpose, here we investigate the influence of the modification of Ethylene-vinyl acetate (EVA) foil with organic dyes on the basic parameters of a polycrystalline silicon solar cell. Samples of EVA foil modified with two different organic colors - red and yellow – were encapsulated solar cells measuring 2x2 cm. Using a solar simulator, the I-V characteristics and spectral response of solar cells with a modified EVA foil were measured. Quantitative analysis of the experimentally obtained results was performed by adaptation to a single-diode theoretical model. The obtained results for solar cells with modified EVA foil were compared with a solar cell encapsulated with non-modified EVA foil. The results showed that the use of EVA foil modified with organic dyes achieved an aesthetic impression, but with 10-15% lower efficiency of solar energy conversion. This is due to the higher light absorption caused by the presence of organic dye in the EVA foil.

Keywords: solar cell, encapsulation, organic dyes, EVA foil, I-V characteristics

Sadržaj

1.	Uvod	1
2.	Povijesni pregled razvoja solarnih ćelija	3
2.1.	Prva generacija	4
2.2.	Druga generacija	6
2.3.	Treća generacija i trenutni smjer razvoja	8
3.	Teorijski dio.....	11
3.1.	Spektar zračenja Sunca.....	11
3.2.	Fotoelektrični efekt	13
3.3.	Osnovni mehanizmi pretvorbe energije	14
3.4.	Generacija nositelja naboja svjetlom.....	16
3.5.	PN spoj	17
3.6.	Karakteristične krivulje solarne ćelije.....	18
3.7.	Struja kratkog spoja.....	21
3.8.	Napon otvorenog kruga.....	22
3.9.	Snaga	22
3.10.	Fill faktor (FF).....	23
3.11.	Efikasnost pretvorbe solarne ćelije	25
3.12.	Kvantna efikasnost (QE)	26
3.13.	Teorijski model	28
3.14.	Solarni modul	32
3.15.	Modificiranje spektralnog odziva korištenjem organskih boja	34
4.	Eksperimentalni postav i postupak mjerenja	37
4.1.	Uzorci mc-Si solarnih ćelija – priprema i modifikacija	37
4.2.	Mjerenje I-V karakteristike i spektralnog odziva.....	39
4.3.	Obrada rezultata i prilagodba teorijskom modelu	41
5.	Rezultati i rasprava	44
5.1.	Strujno-naponska karakteristika	44
5.2.	Vanjska kvantna efikasnost (EQE)	47
6.	Zaključak	49
7.	Metodički dio.....	50
7.1.	Uvod: Interaktivna nastava fizike	50

7.2. Priprema za sat	52
Dodaci.....	61
A Skripta za prilagodbu rezultata teorijskom modelu.....	61
B Radni list 1: Mjerenje struje prije i poslije žaruljice	63
C Radni list 2. Mjerenje struje u serijskom strujnom krugu	64
Literatura	65

1. Uvod

Trenutno dominantni oblik dobivanja električne energije u svijetu je korištenjem fosilnih goriva (ugljen, nafta, plin) koja u procesu gorenja u atmosferu ispuštaju velike količine stakleničkih plinova, prvenstveno ugljikovih, dušikovih i sumporovih oksida. Navedeni plinovi se ispuštaju u atmosferu i prirodnim procesima kao npr. šumskim požarima ili erupcijama vulkana. Male promjene tih prirodnih procesa vode do malih ili zanemarivih promjena u prirodnoj ravnoteži. Međutim, trenutna brzina ispuštanja kojoj je uzrok čovjekovo djelovanje se ne može okarakterizirati kao mala. Njihova povećana koncentracija uzrokuje globalni porast temperature i klimatske promjene. Problem je prepoznat, a Pariškim sporazumom zemlje potpisnice su se obvezale na smanjenje emisija s krajnjim ciljem ugljične neutralnosti. Kako bi se taj cilj postigao, potrebno je izvršiti energetska tranziciju s neobnovljivih na obnovljive izvore energije. Najznačajniji obnovljivi izvori energije su:

- kinetička energija vjetra,
- Sunčeva energija,
- biomasa,
- toplinska energija Zemljine unutrašnjosti i vrući izvori (geotermalna energija),
- potencijalna energija vodotoka (hidroenergija),
- potencijalna energija plime i oseke i morskih valova,
- toplinska energija mora.

Većina navedenih obnovljivih izvora energije na direktan ili indirektan način ovisi o Suncu, a pretvorba u električnu energiju često zahtjeva izgradnju velikih postrojenja, koja prikupljenu energiju pretvaraju u mehaničku, pa nakon toga u električnu. Energija Sunca se može izravno prikupljati na dva načina. Prvi je kolektorima vode, gdje se dio sunčeve energije predaje kao toplina mediju (vodi). Drugi, izravnom pretvorbom u električnu energiju pomoću solarnih ćelija čiju ćemo strujno-naponsku (I-V) karakteristiku mjeriti i analizirati u ovom radu.

Najveća prednost solarnih ćelija je njihova modularnost, što znači da za karbonsku neutralnost nije potrebno izgraditi jedno veliko postrojenje, već decentralizirati proizvodnju na manje jedinice, pri čemu svaki objekt svojim neiskorištenim površinama krova ili fasadom prekrivenim solarnim panelima, doprinosi proizvodnji električne energije i postiže veću karbonsku neutralnost. Efikasnost pretvorbe komercijalnih modula sastavljenih od silicijskih ćelija je dosegla 20%, a novi materijali i tehnologije (perovskiti, kvantne točke i

tandem ćelije) imaju potencijala značajno nadmašiti tu vrijednost [1][21]. Osim fokusa na efikasnost, široka primjena se postiže izradom estetski privlačnih modula, koji se mogu lako uklopiti u postojeću arhitekturu vanjskih ovojnica objekata.

Same ćelije su enkapsulirane EVA folijom koja je tipično prozirna u vidljivom dijelu sunčevog spektra i štiti ćelije od okolišnih utjecaja. Kako bi se solarni modul učinio estetski prihvatljivijim, EVA folija se može modificirati dodavanjem organskih boja. Krajnjem korisniku solarnih ćelija može biti na raspolaganju više različitih boja modula koje po svojoj želji može uklopiti u trenutnu vizuru okoliša/objekta. Primjenom otopine organske boje na EVA foliju pored estetskog učinka (promjene boje) postiže se i modifikacija spektra zračenja Sunca koje upada na aktivni sloj solarne ćelije. Tako se može npr. smanjiti (filtrirati) intenzitet sunčevog zračenja u UV dijelu spektra, za koje se pokazalo da ima značajan utjecaj na degradaciju optičkih karakteristika EVA folije tijekom izlaganja Sunčevom svjetlu a samim time i na efikasnost solarne ćelije kao cjeline.

U ovom radu će biti ispitan utjecaj organske boje dodane u EVA foliju na strujno-naponsku karakteristiku i spektralni odziv solarne ćelije polikristalnog silicija. U tu svrhu EVA folija će biti modificirana s dvije različite organske boje: crvenom (Lumogen Red) i žutom (Lumogen Yellow). Tako modificirani uzorci EVA folije bit će integrirani u mini-module polikristalnog silicija za koje će biti izmjerena I-V karakteristika i spektralni odziv i uspoređen sa standardnim mini-modulom s nemodificiranom EVA folijom.

Rad je organiziran na sljedeći način:

U 2. poglavlju ukratko je izložen povijesni pregled razvoja solarnih ćelija od otkrića pojave fotoelektričnog efekta, preko solarnih ćelija prve generacije baziranih na kristalnom siliciju, tankoslojnih solarnih ćelija amorfnog silicija (2. generacija) do solarnih ćelija nove generacija (perovskitne solarne ćelije, solarne ćelije bazirane na kvantnim točkama, itd.).

U teorijskom dijelu (3. poglavlje) opisan je osnovni princip rada solarne ćelije, objašnjeni osnovni pojmovi (terminologija) koji se koriste pri karakterizaciji kvalitete solarnih ćelija (strujno-naponska karakteristika, spektralni odziv solarne ćelije). Također je predstavljen i jedan od načina modifikacije solarnih ćelija organskim luminiscentnim bojama koje ima dvojaku ulogu: estetsku i povećanje efikasnosti u iskorištavanju UV dijela spektra.

U 4. poglavlju (eksperimentalni dio) bit će opisan eksperimentalni postav za mjerenje strujno-naponske karakteristike solarnih ćelija, te spektralnog odziva. Također će ukratko biti opisana i priprema uzoraka solarnih ćelija s modificiranom EVA folijom.

U 5. poglavlju bit će predstavljeni rezultati mjerenja te diskutiran utjecaj dodavanja organske boje na kvalitetu solarnih modula. Također će biti diskutirani i rezultati prilagodbe eksperimentalnih rezultata teorijskom modelu (1-diodni model)

Na kraju će u zaključnom dijelu (6. poglavlje) biti navedeni svi najvažniji rezultati i zaključci koji iz njih proizlaze.

U 7. poglavlju je obrađen metodički dio rada koji obuhvaća metodički uvodi i pripremu za sat iz nastavne jedinice „Mjerenje električne struje u serijski spojenom strujnom krugu“.

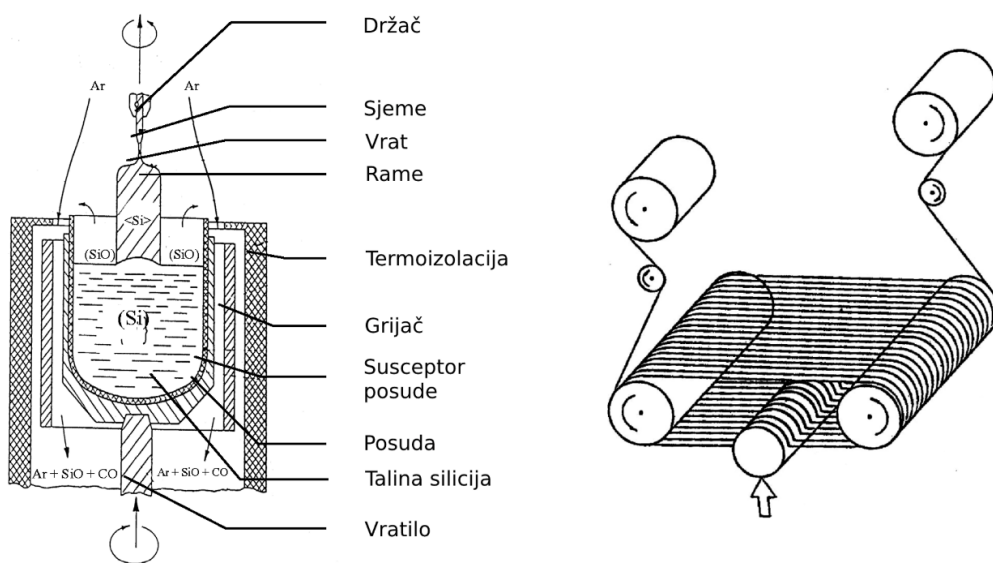
2. Povijesni pregled razvoja solarnih ćelija

Razvoj tehnologije solarne ćelije započinje tijekom prve industrijske revolucije kada 1839. godine francuski fizičar Edmond Becquerel otkriva mogućnost pretvorbe sunčeve energije u električnu energiju, tzv. fotoelektrični efekt. U svom eksperimentu je koristio elektrode od platine (Pt) uronjene u elektrolit, koje bi kada bi ih osvijetlio generirale napon [2]. Gotovo četiri desetljeća kasnije, američki izumitelj Charles Fritts 1883. godine izrađuje prvu solarnu ćeliju deponirajući na poluvodički selen (Se) tanki sloj zlata (Au), čime je ostvarena potencijalna barijera na kontaktu metal-poluvodič [13]. Tako dobivena solarna ćelija je imala efikasnost pretvorbe od oko 1%. Heinrich Hertz je 1887. godine tijekom pokusa sa slanjem i primanjem elektromagnetskih valova primijetio da je iskrenje prijemnika (Hertzov emiter) jače kada je iskrište osvijetljeno. Daljnjim eksperimentiranjem pomoću prizme je dokazao da električna iskra lakše izbija iz metalnog kraja iskrišta ako je obasjano ultraljubičastom (UV) svjetlošću. Iduće godine, 1888. Hertzov pomoćnik Wilhelm Hallwachs svojim pokusom s nabijenim elektroskopom i pločicom od cinka pokazuje da se obasjavanjem UV svjetlom gubi naboj na elektroskopu [15], a 1904. otkriva da kombinacija bakra (Cu) i bakar oksida obasjana UV svjetlom generira napon (smatra se prvom poluvodičkom solarnom ćelijom) [14].

Iako su tadašnji fizičari bili upoznati s fotoelektričnim efektom, sam proces pretvorbe svjetlosne energije u električnu energiju nije bilo moguće objasniti klasičnom fizikom. Godine 1905. Albert Einstein primjenom Planckove hipoteze o kvantima energije postavlja hipotezu o kvantima elektromagnetskog polja i time objašnjava fotoelektrični efekt. Za objašnjenje fotoelektričnog efekta Einstein 1921. dobiva Nobelovu nagradu za fiziku [11].

2.1. Prva generacija

Prve funkcionalne solarne ćelije su izrađene od *monokristala silicija (c-Si)* dobivenog procesom Czochralskog rasta kristala (Slika 1) kojeg je 1918. osmislio poljski znanstvenik Jan Czochralski [16]. Proces započinje taljenjem fragmenata čistog polikristalnog silicija na temperaturi od oko 1425 °C koji se nalazi u posudi od kvarca (SiO_2) i inertnoj atmosferi jer rastaljeni silicij u velikoj mjeri reagira s materijalima u okolini. Talinu se najčešće dopira borom (B) ili fosforom (P).

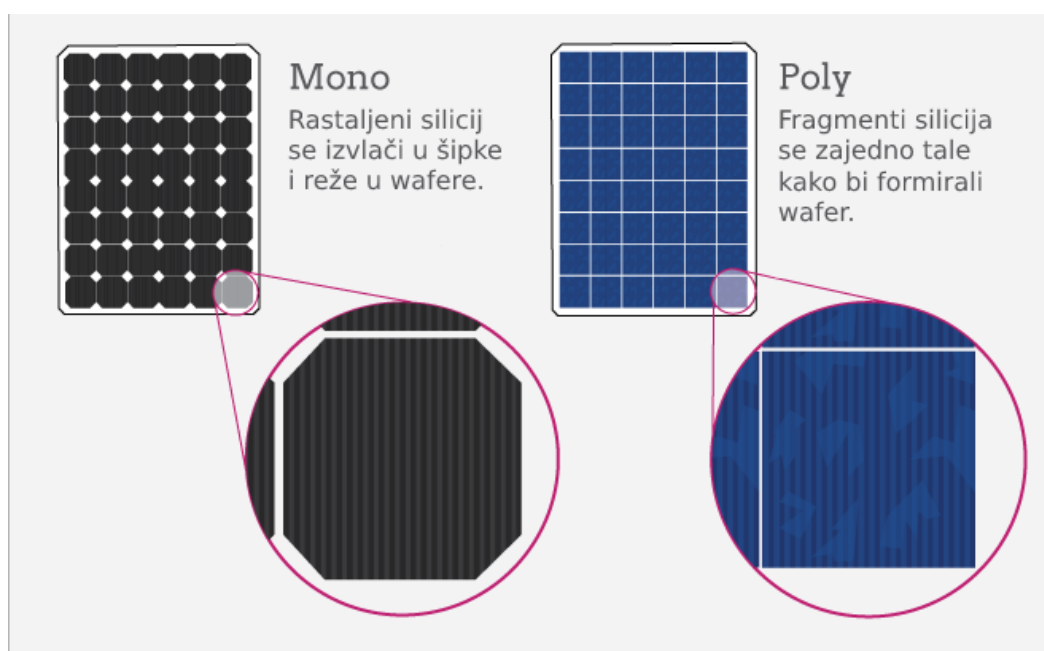


Slika 1: Shematski prikaz Czochralski metode rasta kristala (lijevo) i proces rezanja kristala multi-wire pilom (desno). Silicij ima visoko talište i veliku tvrdoću zbog čega je proces dobivanja c-Si vafera energetski skup [1]

Sjeme kristala (eng. seed crystal) se umoči u rastaljeni silicij i polako izvlači uz konstantnu rotaciju čime se dobiva kristal promjera većeg od 30 cm. Alternativna i skuplja tehnika kojom se dobiva još veća čistoća kristala je tehnologija zonskog taljenja (eng. float zone technique), kod koje se pomoću prstenastog grijača tali samo dio materijala. Primjese

se zbog veće topljivosti nakupljaju u zoni i zajedno s grijačem putuju na kraj šipke koji se kasnije odreže.

Primjena fotoelektričnog efekta i razvoj solarnih ćelija se ubrzava izumom tranzistora i objašnjenjem fizike p-n spoja što je označilo početak poluvodičke ere. Prvu modernu solarnu ćeliju baziranu na kristalnom siliciju 1954. razvijaju Daryl Chapin, Calvin Fuller i Gerald Pearson u Bell Laboratories. Ćelija je imala efikasnost pretvorbe oko 6% i u sljedećih nekoliko godina je poboljšana na 10%. Zbog svoje pouzdanosti i gotovo nikakve potrebe za održavanjem, prepoznata je potencijalna primjena za napajanje satelitske opreme. Vanguard I lansiran 1958. godine bio je prvi satelit koji je koristio solarne ćelije za napajanje svojih instrumenata. Ukupna instalirana snaga solarnih ćelija bila je manja od 1 W. Ugrađene ćelije su nadmašile početne ciljeve i očekivani vijek trajanja. Problem brze degradacije efikasnosti zbog utjecaja kozmičkih zraka je do danas većinom riješen. Ostatak 1960-tih obilježava uporaba solarnih ćelija u svemirskom programu [14].



Slika 2: Prikaz Mono i Poli Si solarnih modula [9]

Naftna kriza 1973. godine povećala je ulaganja u alternativne izvore energije i približila solarne ćelije komercijalnoj upotrebi. Niža proizvodna cijena pokušavala se postići korištenjem otpada iz poluvodičke industrije i industrije integriranih krugova.

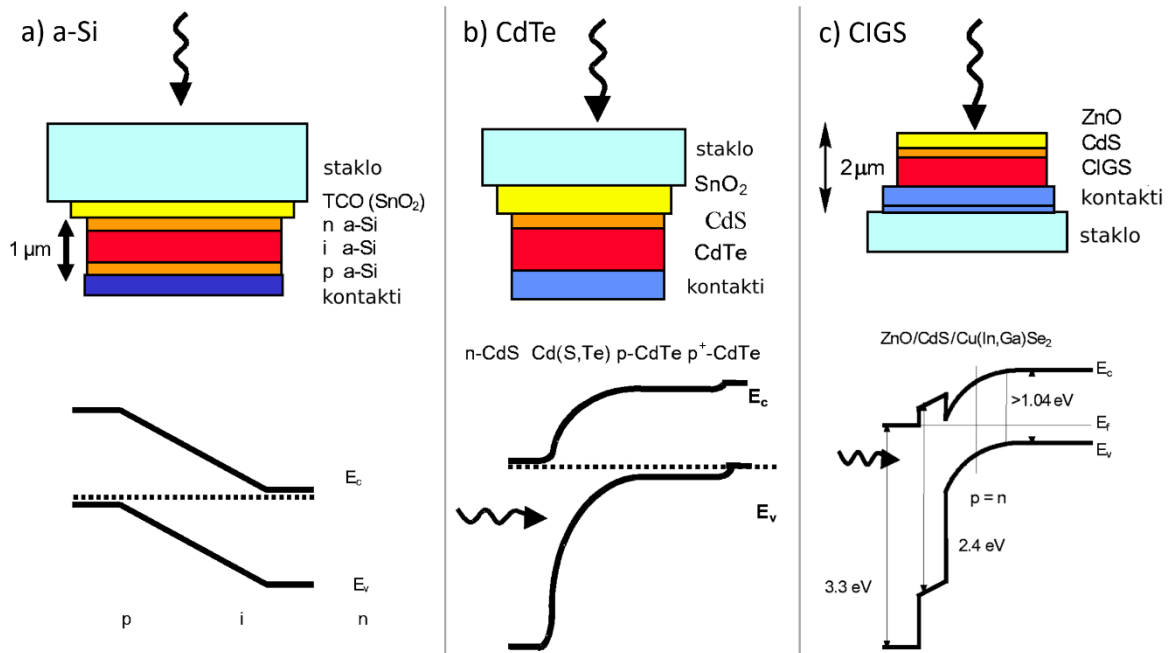
Sedamdesetih godina prošlog stoljeća razvila se energetske i ekonomski povoljnija metoda proizvodnje polikristalnog silicija ulijevanjem rastaljenog silicija u kvadratne

grafitne kalupe. Kontroliranim hlađenjem se dobiva blok *polikristalnog silicija (mc-Si)* s veličinom zrna od nekoliko milimetara do nekoliko centimetara. Blokovi se kao i u prethodnom slučaju režu multi-wire metodom, ali je postignuta ušteda jer se nije trebao koristiti silicij visoke čistoće. Veća koncentracija nečistoća je za posljedicu imala manju efikasnost pretvorbe i trajnost ćelije, ali je postignuta niža cijena proizvodnje. Prednost je i kvadratni oblik ćelije čime se štedi prostor na modulu, za razliku od monokristalnih koje se režu u osmerokute (Slika 2).

Tvornice u Kini su 2011. pomaknule proizvodnu cijenu silicijskih solarnih modula na oko 1,25 američkih dolara po W, a 2013. je ukupna instalirana snaga solarnih modula u svijetu premašila 100 GW [14]. Unatoč znatnom napretku tehnologije i otkriću novih materijala za primjenu u solarnim ćelijama, silicij je do danas ostao dominantna sirovina za izradu solarnih ćelija [13].

2.2. Druga generacija

David Carlson 1976. godine izrađuju prvu solarnu ćeliju od amorfnog silicija (a-Si), a 1978. izrađen je prvi komercijalni kalkulator (Teal Photon) koji se napaja energijom dobivenom iz a-Si solarne ćelije [14]. Drugu generaciju solarnih ćelija obilježava tehnologija tankog filma i korištenje različitih direktnih poluvodičkih slitina kao npr. CdTe, CIGS, GaAs. Proces izrade se zasniva na taloženju tankih slojeva materijala na podlogu (supstrat) od stakla, plastike ili metala (Slika 3), pri čemu se najveća efikasnost pretvorbe postiže s ćelijama na staklu. Kontakt na strani okrenutoj izvoru svjetlosti je ostvaren korištenjem vodljivih transparentnih oksida (eng. Transparent Conducting Oxide, TCO), koji propuštaju vidljivi dio spektra, kao što su kositrov dioksid (SnO_2) ili cinkov oksid (ZnO). Neke od prednosti tehnologije tankog filma su ušteda materijala zbog male debljine aktivnog sloja, moguća fleksibilnost ćelija zbog čega imaju široku primjenu, te mogućnost izrade tandem ćelija. Ostavljaju i bolji estetski dojam jer se kontakti ne ističu kao na c-Si solarnim ćelijama. Glavni nedostaci su niža učinkovitost pretvorbe, brža degradacija performansi, manja zastupljenost korištenih sirovina i negativan utjecaj na okoliš (npr. kadmij je toksičan).



Slika 3: Prikaz strukture predstavnika druge generacije solarnih ćelija s pripadajućim energetskim procjepima a) a-Si, b) CdTe, c) CIGS [1]

Struktura tankoslojne solarne ćelije *amornog silicija* se bazira na p-i-n spoju, koji između dva dopirana sloja (p tip i n tip) ima intrinzični sloj preko kojeg se prostire električno polje dopiranih dijelova. Svjetlo koje upada na takvu sendvič strukturu generira parove slobodnih nosioca naboja (elektroni i šupljine) u intrinzičnom sloju. Širina energetskog procjepa je veća nego kod kristalnog silicija i iznosi oko 1,7 eV. Efikasnost pretvorbe je oko 10%, a veliki problem predstavlja degradacija efikasnosti tijekom izlaganja sunčevoj svjetlosti, tzv. Staebler-Wronski efekt. Efekt fizikalno do danas nije u potpunosti razjašnjen, ali najvjerojatnije objašnjenje je da rekombinacija fotogeneriranih nosioca naboja uzrokuje pucanje slabih Si-H veza u amornom materijalu čime se stvaraju dodatni defekti koji povećavaju serijski otpor i smanjuju ukupnu efikasnost. Nakon početnog smanjenja efikasnosti za 10-20%, efikasnost a-Si solarne ćelije se stabilizira [1]. Problem se može ublažiti povećanjem radne temperature ćelije. Dominanti način korištenja a-Si solarne ćelije je slaganjem u tandem.

Kadmij telurid (CdTe) je kristalna slitina kadmija (Cd) i telurija (Te). Zbog širine energijskog procjepa od 1,45 eV gotovo je idealan materijal za tankoslojne solarne ćelije. Postignuta efikasnost pretvorbe je iznad 20%. CdTe je najperspektivniji materijal druge

generacije i trenutno s 5% tržišnog udjela predstavlja komercijalnu alternativu silicijskim ćelijama [18].

Bakar-indij-galij-selenid (CIGS) je zajednički naziv za skupinu poluvodičkih materijala koji se sastoje od smjese bakra (Cu), indija (In), galija (Ga) i selena (Se). Širina energetske procjepa CIGS ćelija varira od 1,0 do 1,7 eV, a efikasnost pretvorbe iznosi oko 20% [5]. CIGS i CdTe ćelije prikazane na Slika 3 imaju sloj kadmijevog sulfida (CdS) n-tipa s kojim tvore višeslojni (eng. heterojunction) p-n spoj.

2.3. Treća generacija i trenutni smjer razvoja

Treća generacija solarnih ćelija obuhvaća tehnologije koje još nisu komercijalno prihvaćene i trebale bi nadmašiti efikasnost postavljenu Shockley-Queisser limitom (ili eng. Detailed Balance Limit). Limit se odnosi na maksimalnu teorijsku efikasnost ćelije s jednim p-n spojem koji za standardni AM1.5G spektar iznosi oko 30% [8]. U računu limita se koriste dvije pretpostavke: da je mobilnost nosioca naboja beskonačna te da se apsorbiraju svi fotoni s energijom većom od energetske procjepa [22]. Osim visokoeffikasnih ćelija, treća generacija sadrži organske i bojom senzibilizirane solarne ćelije (DSSC) čiji je cilj što jeftinija proizvodnja i što brži povrat investicije.

Prvu *bojom senzibiliziranu solarnu ćeliju* (DSSC, eng. Dye Sensitised Solar Cells) je 1991. godine napravio M. Grätzel. Razlikuje se od tradicionalnih poluvodičkih ćelija po tome što poluvodič ima funkciju prijenosa naboja, a organska boja ima ulogu apsorpcije sunčevog zračenja, tj. oponaša prirodni proces fotosinteze gdje klorofil apsorbira fotone. Prirodna bojila koji služe kao apsorberi se mogu izolirati iz voća, povrća, bakterija i slično. Prednosti DSSC ćelija su jednostavan i jeftin proces proizvodnje, a najveći problem predstavlja temperaturna stabilnost jer je prostor ćelije između kontakata ispunjen tekućim elektrolitom [5]. Za razliku od hibridnih DSSC ćelija, *organske solarne ćelije (OSC)* ili plastične solarne ćelije koriste vodljive organske polimere za apsorpciju fotona i transport električne energije. Odlikuje ih visoki apsorpcijski koeficijent, mala masa, ali imaju malu efikasnost i stabilnost u usporedbi s anorganskim ćelijama.

Kvantne točke (eng. Quantum dots, QDs) su nanokristali poluvodičkog materijala. Najčešće su kombinacija elemenata 2. i 4. skupine periodnog sustava elemenata (npr. CdSe,

ZnO, CdS) ili nešto rjeđe kombinacija elemenata 3. i 5. skupine (npr. InAs, GaAs, InSb) ili 4. i 6. skupine. Za razliku od energetske procjepa u tipičnim poluvodičima, zbog efekta kvantnog zatočenja, dva energetske nivoa su toliko blizu da ih možemo smatrati kontinuiranim. Zbog malih dimenzija kvantnih točaka, nivoi su kvantizirani tako da se modifikacijom dimenzija kvantne točke utječe na širinu energetske procjepa, a time i apsorpcijski spektar. Kvantne točke se primjenjuju s ostalim tehnologijama (DSSC i perovskitne ćelije)[5].

U posljednje vrijeme veliku pozornost zbog moguće primjene u solarnim ćelijama privlače materijali pod nazivom perovskiti. *Perovskiti* su skupina spojeva koji imaju kristalnu strukturu sličnu mineralu perovskitu (CaTiO_3). U relativno kratko vrijeme postignuta efikasnost pretvorbe ovih solarnih ćelija je narasla sa 3,8% u 2009. godini do preko 25% u 2020. za izvedbu s jednim p-n spojem, čime je nadmašena efikasnost svih ćelija iz druge generacije [21]. Najčešće proučavani perovskitni materijal je $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbX}_3$, gdje je X halogeni ion joda, broma ili klora s energetske procjepom u rasponu od 1,55 do 2,3 eV. Solarne ćelije na bazi perovskita se proizvode jednostavnim tehnikama taloženja na supstratu bez potrebe za korištenjem visokih temperatura, što je negativna karakteristika u procesu dobivanja ćelija iz prve generacije. Velika brzina degradacije performansi pri izlaganju sunčevom svjetlu, toplini i vlazi, te mogući negativni utjecaj na okoliš zbog korištenja olova su prepreke široj primjeni ovih ćelija [5].

Efikasnost solarne ćelije se može značajno povećati slaganjem više ćelija s različitim širinom energetske procjepa jedne na drugu u tzv. *tandem* solarne ćelije (dvostruke ili višestruke) čime se postiže šira pokrivenost spektra. Uvjet je da se ćelije slažu prema širini energetske procjepa tako da gornja ćelija bude najefikasnija na manjim valnim duljinama spektra, a propušta svjetlo veće valne duljine u sljedeću solarnu ćeliju u nizu ispod. Dvije ćelije u tandemu mogu premašiti maksimalnu teorijsku efikasnost ograničenu Shockley-Queisser limitom, a s većim brojem ćelija moguće je premašiti efikasnost od 50% [21]. Za tandem s dvije ćelije, optimalna apsorpcija sunčevog zračenja se postiže ukoliko je gornja ćelija (bliže izvoru svjetla) napravljena od materijala s energetske procjepom 1,9 eV, a donja 1,2 eV [2]. Tada je ukupna efikasnost aproksimirana sumom efikasnosti individualnih ćelija. Nedostatak ove konfiguracije je što najmanja struja određuje ukupnu struju, a time i efikasnost. Moguće rješenje je odvajanje kontakata, što predstavlja dodatni trošak i

komplicira izvedbu. U ovakvim sustavima se kao pomoć koriste koncentratori, koji smanjuju cijenu kompletnog rješenja povećavajući intenzitet zračenja koji pada na tandem ćeliju.

Četvrtu generaciju čine ćelije bazirane na polimerima u kombinaciji s nanomaterijalima kao što su metalne nanočestice, ugljikove nanocjevčice, grafen i slično [5]. Daljnji razvoj solarnih ćelija nije samo okrenut otkrivanju novih materijala za povećanje efikasnost apsorpcije, već i poboljšanju estetike konačnog proizvoda i integriranju solarnih ćelija/panela u građevinske materijale koji se koriste na vanjskoj ovojnici građevina (BIPV, eng. Building-integrated photovoltaics) kao što su staklo, fasadni paneli ili crijep koji se mogu koristiti u izgradnji pasivnih i niskoenergetskih objekata.

3. Teorijski dio

3.1. Spektar zračenja Sunca

Sunce je žuta zvijezda spektralnog razreda G2. Zrači snagom od $\sim 3,38 \times 10^{26}$ W i ima efektivnu temperaturu fotosfere (vanjski sloj atmosfere) od ~ 5778 K. Promjer mu je $1,39 \times 10^9$ m. Prosječna udaljenost Zemlje od Sunca iznosi 1 AU¹ (astronomska jedinica). Sunčeva energija potječe od procesa nuklearne fuzije jezgara vodika iz kojeg nastaju jezgre helija. Energija se iz središta prema površini prvo prenosi zračenjem (radijativna zona), a zatim miješanjem (konvektivna zona) [4].

Sunce možemo aproksimirati idealnim crnim tijelom. Tada koristeći Planckov zakon zračenja dobivamo očekivane gustoće zračenja crnog tijela:

$$u_T(\lambda) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda k_B T}} - 1} \quad (3.1)$$

gdje je λ valna duljina zračenja, T temperatura crnog tijela u Kelvinima, h Planckova konstanta, k_B Boltzmannova konstanta i c brzina svjetlosti [11]. Gustoće zračenja po valnim duljinama su prikazane na Slici 4. Integriranjem (3.1) za sve valne duljine dobivamo da je energija po jedinici vremena (snaga zračenja) koje izrači crno tijelo proporcionalna s četvrtom potencijom apsolutne temperature tijela:

$$P = \sigma \cdot A \cdot T^4 \quad (3.2)$$

što je Stefan-Boltzmannov zakon. U našem slučaju, A je površina Sunca. Koeficijent proporcionalnosti σ je Stefan-Boltzmannova konstanta koja iznosi:

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$$

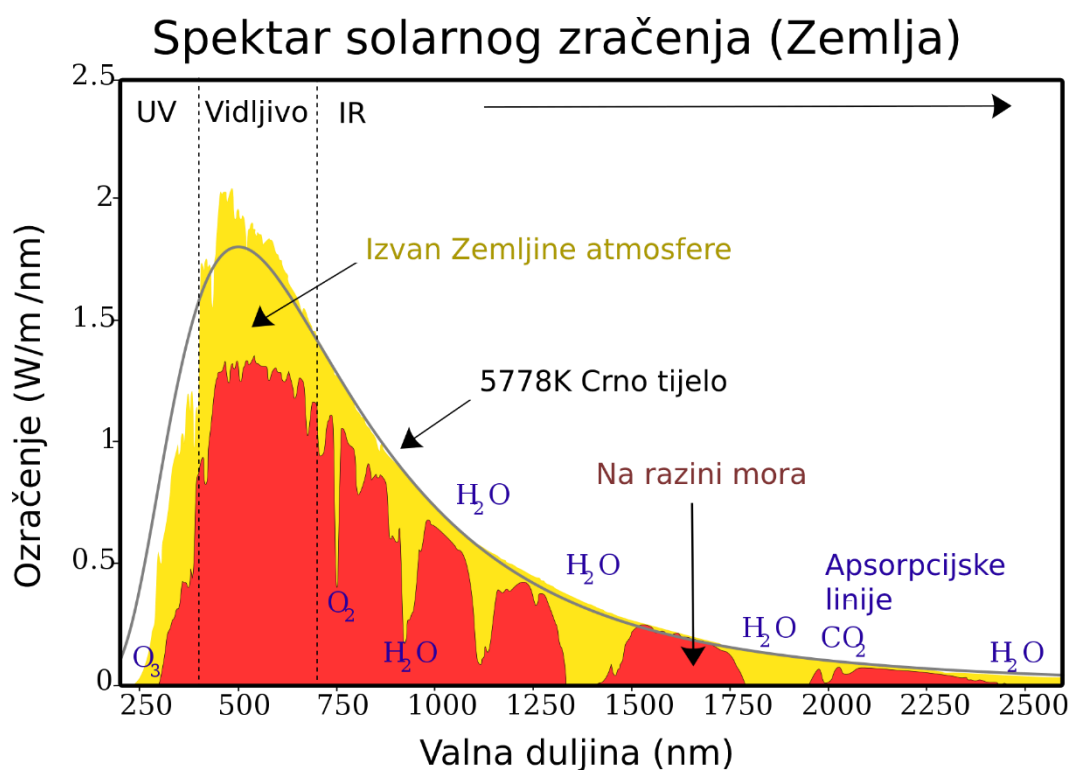
Deriviranjem (3.1) i izjednačavanjem s nulom dobivamo Wienov zakon pomaka za koji λ_{\max} iznosi:

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T} \quad (3.3)$$

¹ 1 AU = 149 597 870 700 m

gdje je b Wienova konstanta koja iznosi $b = 2,898 \times 10^{-3} \text{ m K}$. Uvrštavanjem poznate temperature površine Sunca u (3.3) dobivamo približnu valnu duljinu od 500 nm na kojoj je zračenje Sunca najintenzivnije. Snaga zračenja pada s kvadratom udaljenosti, pa se dijeljenjem jed. (3.2) sa $4\pi \cdot d^2$ može izračunati približna vrijednost intenziteta sunčevog zračenja pri vrhu Zemljine atmosfere. Dobivena vrijednost gustoće toka naziva se *solarna konstanta* G_{SC} koja iznosi 1366 W/m^2 . Iako se naziva konstantom, vrijednost gustoće toka varira kroz godinu, prvenstveno zbog promjene udaljenosti Zemlje od Sunca tijekom godina, ali i zbog 11-godišnjih sunčevih ciklusa koji su povezani s pojavom sunčevih pjega.

Spektar zračenja Sunca prikazan je na Slika 4. Spektrom prevladava zračenje iz vidljivog i infracrvenog spektra. Žuto predstavlja izmjerene vrijednosti gustoće zračenja po valnim duljinama. Crna linija predstavlja aproksimaciju crnim tijelom, a crvena gustoće zračenja koje dolaze do Zemljine površine.



Slika 4: Ozračenje po valnoj duljini sa Sunca kao funkcija valnih duljina izvan Zemljine atmosfere u usporedbi s crnim tijelom na temperaturi od 5778 K (crna linija). Žuto je prikaz zračenja na rubu Zemljine atmosfere, a crveno prikaz na razini mora [10]

Prolaskom kroz Zemljinu atmosferu, zračenje sa Sunca se djelomično apsorbira. Apsorpciju u infracrvenom spektru uzrokuju vodena para (H₂O), ugljični dioksid (CO₂), metan (CH₄) i razni dušični oksidi (NO_x), a u ultraljubičastom dijelu spektra kisik (O₂) i ozon (O₃). Apsorpcija je veća što je putanja zrake kroz atmosferu dulja tj. što je veća masa zraka kroz koje zračenje prolazi. Za debljinu atmosfere na zenitu l_0 i duljinu puta l kroz atmosferu pod kutom θ u odnosu zenit sa Zemljinom površinom vrijedi:

$$AM = \frac{l}{l_0} \approx \frac{1}{\cos \theta} \quad (3.4)$$

Omjer l / l_0 se naziva *koeficijent mase zraka* (eng. air-mass coefficient, AM). Standardni solarni spektar izvan Zemljine atmosfere je označen kao AM0 (bez atmosfere, eng. zero atmospheres) i ima intenzitet zračenja jednak solarnoj konstanti G_{SC} . Kada je Sunce točno iznad površine, zraka svjetlosti putuje kroz jednu atmosferu, pa je koeficijent mase zraka označen kao AM1 (tipično za područje ekvatora). Na površini Zemlje tipičan spektar je označen sa AM1.5, što odgovara kutu upada Sunčevih zraka od 48° i predstavlja prosječni godišnji intenzitet zračenja na srednjim zemljopisnim širinama [3]. Intenzitet zračenja oznake AM1.5G (G za global, označava direktno i difuzno zračenje) daje približno 1000 W/m² [2].

3.2. Fotoelektrični efekt

Fotoelektrični efekt je fizikalna pojava kod koje pod djelovanjem elektromagnetskog zračenja dolazi do izbijanja elektrona iz materijala. Sam efekt ima četiri karakteristike: [15]

1. Kada fotoelektrični efekt postoji, struja izbijenih elektrona je proporcionalna intenzitetu izvora svjetlosti.
2. Za svaki metal postoji određena frekvencija svjetlosti (naziva se *granična frekvencija*, ν_{prag}) ispod koje elektroni ne mogu biti izbijeni iz tog metala.
3. Energija izbijenih elektrona je neovisna o intenzitetu svjetlosti, ali ovisna o frekvenciji. E_{max} o frekvenciji ovisi linearno:

$$E_{max} = h\nu - \Phi = h\nu - h\nu_{prag} \quad (3.5)$$

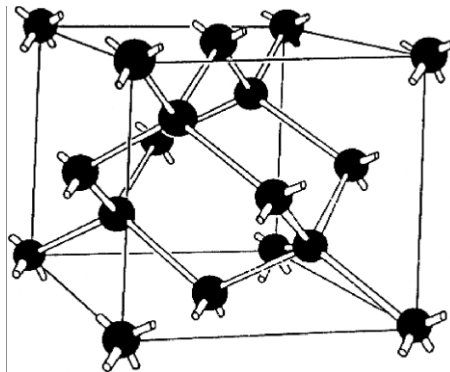
gdje je h Planckova konstanta, ν frekvencija upadne svjetlosti i Φ izlazni rad. Izlazni rad je različit za svaki metal.

4. Zaostajanje od trenutka kada svjetlost padne na metal do trenutka emisije elektrona je vrlo kratko, reda veličine 10^{-9} sekundi ili manje.

3.3. Osnovni mehanizmi pretvorbe energije

Za pretvorbu solarne energije u električnu, najčešće se koriste uređaji bazirani na poluvodičima. Vodljivost poluvodiča je tipično u rasponu od $10^4 > \sigma > 10^{-8} (\Omega\text{cm})^{-1}$. Poluvodiči su pogodni zbog svoje ovisnosti vodljivosti o temperaturi. Što je temperatura veća, vodljivost poluvodiča je također veća. Možemo ih podijeliti na dvije kategorije, amorfne i kristalne poluvodiče. Kristalni poluvodiči su oni kod kojih individualni atomi i molekule pokazuju određenu pravilnost i periodičnost u atomskoj strukturi materijala, dok ta pravilnost kod amornih poluvodiča ne postoji na većim prostornim skalama.

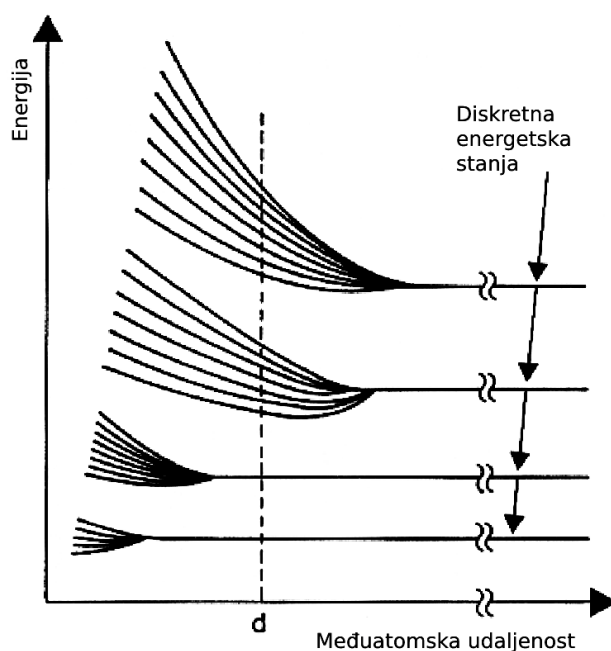
Atomi u kristalnom siliciju su posloženi tako da je svaki atom na jednakoj udaljenosti od svoja četiri povezana susjedna atoma i međusobno su vezani kovalentnom vezom. Ova vrsta rešetke je poznata kao dijamantna rešetka (Slika 5). Rezultat takve rešetke je velika tvrdoća dobivenog materijala.



Slika 5: Prikaz dijamantne rešetke [1]

Čisti silicij je intrinzični poluvodič, tj. broj slobodnih elektrona u vodljivom pojasu je jednak broju šupljina u valentnom pojasu. Prema Bohr-ovom modelu atoma, elektroni u izoliranom atomu mogu zauzeti samo dobro definirane energetske nivoe [11]. Ako u imaginarnom eksperimentu približimo dva atoma jedan drugome, prilikom spajanja će doći do cijepanja energetskih nivooa. Ako sada istu analogiju primijenimo na veći broj atoma ili cijelu kristalnu rešetku silicija, dolazi do cijepanja diskretnih energetskih stanja (Slika 6). Na određenoj udaljenosti između atoma d , jasno je da postoji energetski procjep E_g između

dvije gornje vrpce, vodljive na višoj energiji E_C i valentne na nižoj energiji E_V . Prema Paulijevom principu slijedi da pri apsolutnoj temperaturi $T = 0$ K, zato što niti jedna kovalentna veza nije prekinuta, vanjska (vodljiva) vrpca neće biti popunjena elektronima, dok su u valentnoj vrpce svi energetske nivoi popunjeni. Pri toj temperaturi kristalni silicij je izolator. Povećanjem temperature kristala, termalna energija koju primaju elektroni na vrhu valentne vrpce može biti dovoljna da neke od njih prebaci u vodljivu vrpce. Dolazi do povećanje intrinzične koncentracije nosioca naboja. Pri tome se kidaju neke valentne veze i stvara par elektron-šupljina, tj. dolazi do generacije nosioca naboja i kristal postaje vodljiv. Prelazak elektrona ovisi o debljini energetskog procjepa koji za kristalni silicij na sobnoj temperaturi ($T = 300$ K) iznosi 1,14 eV.



Slika 6: Cijepanje energetskih nivoa kristalne rešetke [1]

Suprotnim procesom od generacije, rekombinacijom, slobodni elektron može popuniti šupljinu. U stanju ravnoteže, u kojem na poluvodič ne djeluje vanjska sila, procesi generacije i rekombinacije su uravnoteženi. Otpornost čistog silicija pri temperaturi $T = 300$ K iznosi relativno visokih $300.000 \Omega\text{cm}$ i značajno varira s promjenom temperature. Kako bi se podesila specifična vodljivost poluvodiča, u kristalnu strukturu se dodaju primjese. Primjese mogu biti peterovalentne (donori) ili trovalentne (akceptori). Primjese se vežu u kristalnu rešetku sa silicijem, gdje u slučaju donora otpuštaju elektron viška i ostavljaju u kristalnoj rešetki pozitivni ion. Najčešći donor su atomi fosfora (P). Tako dopirani poluvodič

je n-tipa i kod njega su većinski nositelji naboja elektroni. Kod akceptora, u kristalnoj rešetci jedna veza s atomom silicija ostaje nepopunjena. Primanjem slobodnog elektrona, akceptorski atom se ionizira i postaje negativno nabijen. Najčešće korišteni akceptori su atomi bora (B). Tako dopirani poluvodič je p-tipa kod kojeg su većinski nositelji naboja šupljine. Spajanjem ova dva tipa poluvodiča dobivamo p-n spoj na kojem je zasnovana poluvodička dioda.

3.4. Generacija nositelja naboja svjetlom

Za razliku od metala, poluvodiči pokazuju karakteristična apsorpcijska ponašanja, od kojih je najznačajnije postojanje tzv. apsorpcijskog ruba (eng. absorption edge). Za valne duljine na kojima je energija fotona ($E = hc/\lambda$) veća od zabranjenog područja E_g , svjetlost je ovisno o debljini materijala, gotovo u potpunosti apsorbirana. Za veće valne duljine gotovo da i ne dolazi do apsorpcije zbog premale energije fotona (poluvodič kao da je proziran). Apsorpcijski rub silicija je unutar infracrvenog područja na $\lambda = 1,11 \mu\text{m}$.

Intenzitet svjetla koji ulazi u kristal se zbog apsorpcije smanjuje. Brzina apsorpcije je proporcionalna preostalom intenzitetu. Eksponencijalno smanjenje intenziteta može se matematički opisati formulom:

$$F_x = F_{x,0} e^{(-\alpha_\lambda (x - x_0))} \quad (3.6)$$

gdje je F_x broj fotona u točki x , $F_{x,0}$ broj fotona na površini $x = 0$ i α_λ koeficijent apsorpcije koji ovisi o valnoj duljini i određuje dubinu prodiranja svjetlosti, a time i potrebnu debljinu kristala [2].

Apsorpcijom fotona, pobuđeni elektron iz valentne vrpce prelazi u vodljivu. Foton posjeduje veliku količinu energije, ali prema De Broglie-voj relaciji:

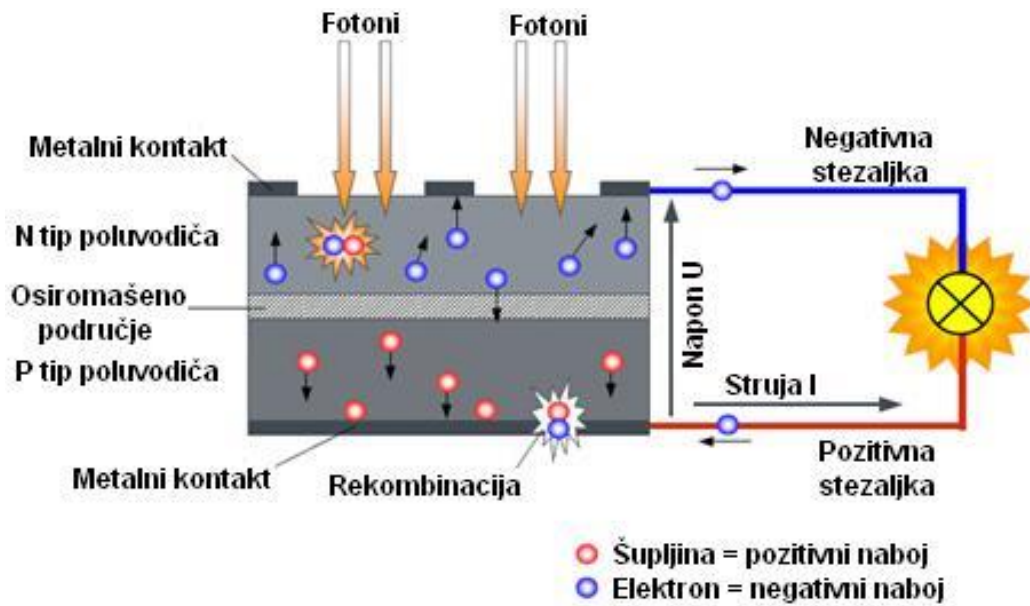
$$p = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda} \quad (3.7)$$

ima zanemarivo malu količinu gibanja p . Zakon očuvanja energije i količine gibanja zahtijeva da se tijekom procesa apsorpcije energija kristala poveća, a količina gibanja ostane gotovo nepromijenjena, što vodi do određenih pravila. U direktnom poluvodiču, minimum energije vodljive vrpce u ovisnosti o momentu kristala p , nalazi se točno iznad maksimuma

valentne vrpce. Kada je foton apsorbiran, energija $E = hv$ je energetska razlika između početne i konačne energije kristala. Situacija je drugačija u indirektnom poluvodiču, kod kojeg minimum vodljive vrpce i maksimum valentne vrpce leže na različitim momentima kristala. Međutim, elektron je moguće pobuditi u minimum vodljiv vrpce ako se pomoću termalnih vibracija inducira fonon, koji sam po sebi ima malu energiju u usporedbi s fotonom, ali veliki moment koji je potreban za zadovoljavanje zakona očuvanja količine gibanja. U indirektnom poluvodiču je zbog uključenosti dviju čestica, vjerojatnost apsorpcije znatno manja od direktnog slučaja. Silicij je indirektni poluvodič i ima mali koeficijent apsorpcije blizu ruba zabranjenog pojasa. To sa sobom nužno povlači potrebu za relativno velikom debljinom materijala kako bi apsorbirao veće valne duljine solarnog spektra zračenja [1].

3.5. *PN spoj*

Sama ćelija je u osnovi dioda velike površine i razumijevanje njenog rada polazi od razumijevanja procesa unutar p-n spoja. Gornja osvijetljena površina ćelije je poluvodič n-tipa (katoda), a donji dio poluvodič p-tipa (anoda). Spajanjem ova dva sloja dolazi do difuzije nosioca naboja zbog razlike u koncentracijama, tj. kretanje nosioca naboja iz područja visoke koncentracije u područje niže koncentracije (Slika 7). Šupljine prelaze s p strane na n stranu, a elektroni obrnuto. Rezultat procesa je pojava difuzne struje I_{Dp} i I_{Dn} . Šupljine i elektroni koji mijenjaju strane se rekombiniraju, a u okolini područja gdje se stapaju n i p sloj ostaju ionizirani atomi koji su nepokretni u kristalnoj rešetci. Rekombinacijom su na n-strani zaostali pozitivno nabijeni ioni donorskih primjesa, a na p-strani zaostali negativno nabijeni ioni akceptorskih primjesa. Zbog postojanja razlike potencijala uspostavlja se električno polje obrnutog smjera od smjera difuzije tj., od n prema p strani. Polje uzrokuje driftne struje suprotnog smjera od difuzijskih. Proces traje sve dok se ne uspostavi ravnoteža, tj. dok se ne izjednače difuzijska i driftna struja. Unutar p-n spoja ostaje (vrlo veliko) električno polje i područje osiromašenja koje razdvaja p i n dio.



Slika 7: Prikaz osnovnog principa rada c-Si solarne ćelije [17]

Kada se p-n spoj osvjetli, pri apsorpciji fotona generirat će se par elektron/šupljina. Jako električno polje u osiromašenom području djeluje na manjinske nosioce i poteče struja. U tom trenutku, poluvodič nije u termalnoj ravnoteži, što znači da se na krajevima javlja razlika potencijala. Za slabo apsorbirajući poluvodič poput silicija, većina nositelja je generirana blizu površine što utječe na tipičnu strukturu solarne ćelije.

Struja u propusnoj polarizaciji se može prikazati jednadžbom:

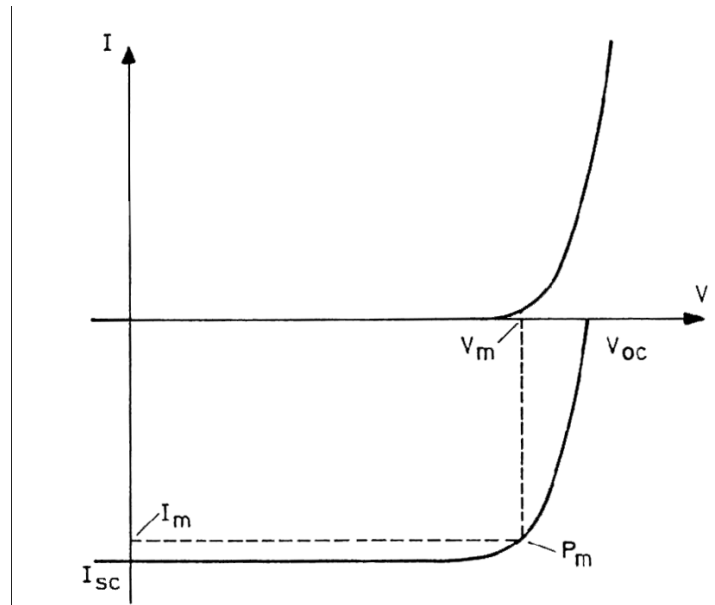
$$I = I_0 \left[e^{\frac{qV}{nkT}} - 1 \right] \quad (3.8)$$

gdje je I_0 struja zasićenja, V dovedeni napon u propusnoj polarizaciji, q je električni naboj, n faktor idealnosti, k je Boltzmannova konstanta, T apsolutna temperatura u Kelvinima.

3.6. Karakteristične krivulje solarne ćelije

U ovom poglavlju će biti objašnjene veličine potrebne za karakterizaciju solarnih ćelija koristeći ćelije od kristalnog silicija, ali koncept vrijedi i za ostale tipove solarnih ćelija. Poprečni presjek solarne ćelije kristalnog silicija (Slika 7) pokazuje da je ona u osnovi silicijska dioda velike površine. U stanju kada nije osvjetljena, karakteristična krivulja ove diode odgovara krivulji normalne silicijske diode (Slika 8). Osvjetljenje solarne ćelije stvara slobodne nositelje naboja, koji se mogu kretati kroz priključeno trošilo. Broj stvorenih

slobodnih nosioca naboja proporcionalan je intenzitetu upadnog zračenja, a time je i električna struja nastala fotoelektričnim efektom proporcionalna intenzitetu zračenja [1].



Slika 8: I-V karakteristika solarne ćelije bez (iznad) i s osvjetljenjem. V_{mp} , I_{mp} i P_{mp} su napon i struja u točki maksimalne snage te sama vrijednosti maksimalne snage [1]

I-V krivulja solarne ćelije je superpozicija I-V krivulje ne osvjetljene solarne ćelije (zapravo velike diode) i svjetlom fotogenerirane struje. Svjetlo ima efekt pomaka I-V krivulje u četvrti kvadrant. Za struju na izlaznim kontaktima solarne ćelije se dobiva:

$$I = I_0 \left[e^{\frac{qV}{nkT}} - 1 \right] - I_L \quad (3.9)$$

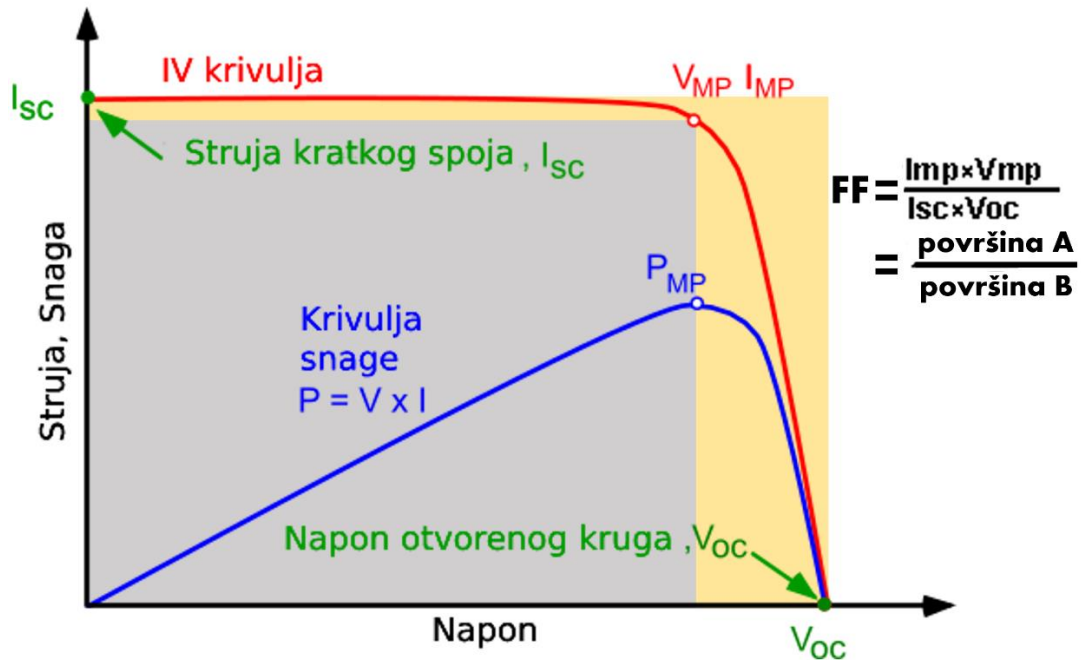
gdje je I_L struja generirana svjetlom. U slučaju kada solarna ćelija nije osvjetljena, član $I_L = 0$. Jednadžba za I-V krivulju (Slika 8) u prvom kvadrantu glasi:

$$I = I_L - I_0 \left[e^{\frac{qV}{nkT}} - 1 \right] \quad (3.10)$$

Konstantni član u zagradi -1 se može zanemariti zato što je eksponencijalni član uobičajeno mnogo veći od 1 osim za napone manje od 100 mV. Nadalje, za male napone, struja generirana svjetlom I_L dominira članom $I_0(\dots)$ tako da je član -1 zanemariv za slučaj osvjetljene solarne ćelije:

$$I = I_L - I_0 \left[e^{\frac{qV}{nkT}} \right] \quad (3.11)$$

Crtanjem gornje jednadžbe (3.11) na graf dobiva se I-V krivulja s karakterističnim točkama. Krivulja snage ima svoj maksimum označen kao P_{MP} u kojem solarna ćelija treba raditi kako bi se dobila maksimalna izlazna snaga. Označava se kao P_{MP} ili točka maksimalne snage (MPP) i javlja se pri naponu V_{MP} i struji I_{MP} .



Slika 9: Karakteristične krivulje (I-V i P-V) i parametri (I_{sc} , V_{oc} , I_{mp} , V_{mp} , P_{mp}) solarne ćelije s maksimalnim teoretskim FF (žuto) i ostvarenim FF (sivo) [22]

Transformacijom jednadžbe (3.11) dobivamo napon u ovisnosti o struji:

$$V = \frac{nkT}{q} \ln\left(\frac{I_L - I}{I_0}\right) \quad (3.12)$$

iz koje se može primijetiti da kada je $I > I_L$, izraz pod prirodnim logaritmom je negativan, te vrijednost logaritma nije definirana. U tom slučaju solarna ćelija je obrnuto polarizirana (eng. reverse bias) i protok struje je blokiran do određenog naponskog limita, napona proboja. Sama ćelija u tom trenutku ne proizvodi el. energiju već ju rasipa (troši). Na naponu proboja dioda postaje vodljiva, tj. dolazi do uništenja diode. Problem obrnute polarizacije kod solarnih ćelija se rješava uporabom premosnih dioda (eng. bypass diodes) [1].

3.7. Struja kratkog spoja

Struju kratkog spoja I_{sc} (eng. short circuit current) dobivamo kada je napon na solarnoj ćeliji jednak nuli tj. kada solarnu ćeliju kratko spojimo i predstavlja najveću struju koju solarna ćelija može dati. Struja kratkog spoja ovisi o nekoliko čimbenika: [22]

- broju upadnih fotona tj. intenzitetu upadnog zračenja
- površini solarne ćelije
- spektru upadnog zračenja (na površini zemlje, AM1.5G spektru)
- optičkim svojstvima ćelije (apsorpciji i refleksiji)
- vjerojatnosti prikupljanja (eng. the collection probability).

Prilikom usporedbe kvalitete različitih solarnih ćelija, češće se koristi gustoća struje kratkog spoja J_{sc} :

$$J_{sc} = \frac{I_{sc}}{A} \quad (3.13)$$

čime eliminiramo utjecaj površine i normiramo vrijednost struje na osvijetljenu površinu solarne ćelije. Silicijske solarne ćelije obasjane spektrom AM1.5G imaju maksimalnu moguću gustoću struje od 46 mA/cm². Solarne ćelije u komercijalnoj upotrebi postižu vrijednosti oko 28-35 mA/cm² [22]. Ako uspoređujemo solarne ćelije izrađene od istog materijala, bitan parametar materijala je difuzijska duljina i pasivizacija površine (eng. surface passivation). U ćeliji sa savršeno pasiviziranom površinom i uniformnom generacijom, jednačina za gustoću struje kratkog spoja se može aproksimirati kao:

$$J_{sc} = qG(L_n + L_p) \quad (3.14)$$

gdje je G brzina generacije, a L_n i L_p difuzijske duljine za elektrone i šupljine. Iako jednačina (3.14) sadrži nekoliko pretpostavki koje nisu točne za većinu solarnih ćelija, ona ukazuje da struja kratkog spoja ovisi o brzini generacije i duljini difuzije [22].

3.8. Napon otvorenog kruga

Napon otvorenog kruga se dobiva kada je struja kroz solarnu ćeliju jednaka 0. Uvrštavanje V_{OC} u jednadžbu (3.9) se dobiva:

$$V_{OC} = \frac{nkT}{q} \ln\left(\frac{I_L}{I_0} + 1\right) \quad (3.15)$$

Budući da čak i pri vrlo malim gustoćama struje možemo zanemariti vrijednost 1 u usporedbi sa I_L/I_0 i $I_L \approx I_{SC}$, možemo pisati:

$$V_{OC} \approx \frac{nkT}{q} \ln\left(\frac{I_L}{I_0}\right)$$

tj. napon otvorenog strujnog kruga je proporcionalan logaritmu omjera struje kratkog spoja i struje zasićenja I_0 [2]. Letimičnim pogledom može se zaključiti da V_{OC} raste linearno s temperaturom, no to se ne događa jer se I_0 brzo povećava s temperaturom primarno zbog promjene intrinzične koncentracije nositelja n_i . Utjecaj temperature na napon otvorenog kruga ovisi o tehnologiji izrade solarne ćelije. Ćelije kristalnog silicija dosežu tipično vrijednost 0,5-0,6 V, a solarne ćelije amorfne silicija 0,6-0,9 V [22].

Iako se može pretpostaviti da su napon otvorenog kruga i napon radne točke neovisni o vrijednosti intenziteta zračenja na otvorenom, u slabo osvijetljenim unutarnjim prostorima sa slabim intenzitetom zračenja (svega nekoliko W/m^2) ti naponi značajno padaju. Nadalje, napon otvorenog kruga, kao i napon radne točke, značajno ovise o temperaturi. To se mora uzeti u obzir jer solarne ćelije instalirane na otvorenom mogu doseći i do 40 K višu temperaturu od temperature okoline.

Jednadžba (3.15) pokazuje da V_{OC} ovisi o struji zasićenja i foto struji. Iako I_{SC} tipično ima male varijacije u vrijednosti, ključni efekt je struja zasićenja, koja može varirati u nekoliko redova veličina. Struja zasićenja, I_0 ovisi o rekombinaciji u solarnoj ćeliji. Napon otvorenog kruga tada je mjera rekombinacije u solarnoj ćeliji.

3.9. Snaga

Snaga koju isporučuje solarna ćelija je umnožak električne struje i napona.

$$P = I \cdot U \quad (3.16)$$

Ako se napravi multiplikacija u svim točkama krivulje, za sve vrijednosti napona od točke kratkog spoja do točke otvorenog kruga, krivulja snage će izgledati kao na Slika 9.

Iako struja ima svoj maksimum u točki kratkog spoja, napon je nula, pa je i snaga također nula. Za slučaj otvorenog kruga, situacija za struju i napon je obrnuta, pa je snaga opet nula. Između te dvije krajnje točke postoji posebna kombinacija vrijednosti struje i napona za koju snaga doseže svoj maksimum (grafički označeno područje pravokutnika). Ovo je točka maksimalne snage, P_{MP} (Slika 9). Povezane vrijednosti V_{MP} i I_{MP} mogu se procijeniti iz napona otvorenog kruga i struje kratkog spoja:

$$V_{MP} \sim (0,75-0,9) V_{OC}$$

$$I_{MP} \sim (0,85-0,95) I_{SC}$$

Budući da napon i struja solarne ćelije ovise o temperaturi, isporučena snaga također se mijenja s temperaturom. Snaga solarnih ćelija kristalnog silicija pada za oko 0,4-0,5% / K, a snaga solarnih ćelija amorfnog silicija opada za oko 0,2-0,25% / K. Nazivna snaga solarne ćelije ili solarnog modula mjeri se pod uvjetima ispitivanja određenim standardnim protokolom (eng. Standard Test Conditions). Nazivna snaga navedena je kao W_p (peak watts) i najčešće se koristi kod specifikacije komercijalno dostupnih solarnih ćelija i modula. No, pri tome treba imati na umu da pri nižoj temperaturi ćelije ili većem intenzitetu zračenja ta vrijednost snage može biti i premašena [22].

3.10. Fill faktor (FF)

Pojednostavljeni teorijski model (Slika 12) kojim se može opisati I-V karakteristika solarne ćelije uključuje dva otpornika. Otpornik R_s predstavlja serijski otpor solarne ćelije koji uključuje otpor kroz silicijsku pločicu, otpor kontakata stražnje površine i kontaktne rešetke na prednjoj površini te, otpor ostalih električnih kontakata u strujnom krugu. Paralelni (ili shunt) otpor R_p rezultat je gubitaka struje na rubovima solarne ćelije i površinske nehomogenosti.

Oba otpora čine karakterističnu krivulju manje pravokutnom i maksimalna izlazna snaga je smanjena. Mjera za kvalitetu ćelije je fill factor (FF), koji opisuje koliko se krivulja

I-V karakteristike približava idealnom obliku pravokutnika. Fill faktor je određen omjerom maksimalne izlazne snage solarne ćelije i umnoška parametara V_{OC} i I_{SC} :

$$FF = \frac{P_{MP}}{V_{OC}I_{SC}} = \frac{V_{MP} I_{MP}}{V_{OC} I_{SC}} \quad (3.17)$$

Grafički, FF je mjera „uglatosti“ I-V krivulje solarne ćelije i ujedno je područje najvećeg pravokutnika koji stane u I-V krivulju. Ćelija s većim naponom V_{OC} tipično ima veći maksimalni mogući FF zato što „zaobljeni“ dio I-V krivulje zauzima manju površinu. Karakteristični FF za c-Si ćelije iznosi oko 0,7 do 0,8, dok je za ćelije amorfne silicija nešto manji, tipično oko 0,5 do 0,7.

Maksimalni teoretski FF solarne ćelije može se odrediti deriviranjem izraza za snagu solarne ćelije po naponu te izjednačavanjem s nulom:

$$\frac{d(IV)}{dV} = 0$$

što daje:

$$V_{MP} = V_{OC} - \frac{nkT}{q} \ln \left(\frac{qV_{MP}}{nkT} + 1 \right)$$

To je implicitno zadana jednačba, te ju je potrebno riješiti numerički. Račun brzo konvergira. Počevši od $V_{MP} = 0.9 \times V_{OC}$ kao početni uvjet, postoji <1% pogreške nakon prve iteracije i zanemarivih (<0,01%) nakon treće iteracije. Zamjenom vrijednosti V_{MP} natrag u jednačbu za diodu dobivamo I_{MP} , a zatim i FF. Češći empirijski izraz za FF je:

$$FF = \frac{v_{OC} - \ln(v_{OC} + 0,72)}{v_{OC} + 1} \quad (3.18)$$

gdje je v_{oc} definirano kao „normalizirani V_{OC} “

$$v_{OC} = \frac{q}{nkT} V_{OC} \quad (3.19)$$

Gornja jednačba pokazuje da veći napon otvorenog kruga ima za posljedicu veću vrijednost FF [22].

3.11. Efikasnost pretvorbe solarne ćelije

Omjer snage električne energije i upadnog sunčevog zračenja definira se kao vrijednost učinkovitosti (ili efikasnosti). Izraz za izračun efikasnosti η je:

$$\eta = \frac{V_{OC} I_{SC} FF}{P_{in}} = \frac{P_{MP}}{P_{in}} \quad (3.20)$$

Za vrijednost učinkovitosti modula, izlazna snaga podijeljena je s ukupnim upadnim zračenjem na modul. Budući da cijelo područje modula nije prekriveno solarnim ćelijama (npr. okviri i razmak između pojedinačnih solarnih ćelija nisu aktivno područje), vrijednost učinkovitosti modula niži je od vrijednosti učinkovitosti svake pojedine solarne ćelije.[2]

Samo dio sunčevog zračenja koje osvjetljava solarnu ćeliju pretvara se u električnu energiju. Teorijski maksimalna efikasnost pretvorbe se može dobiti termodinamički usporedbom s Carnotovim toplinskim strojem i relacijom $\eta = 1 - (T_C / T_H)$, gdje je T_C apsolutna temperatura hladnijeg rezervoara (Zemlja), a T_H temperatura izvora (površina Sunca). Ako se u račun uzmu u obzir ograničenja zbog gubitaka u atmosferi, maksimalna procijenjena efikasnost iznosi 85% [1].

Druga metoda se naziva Shockley-Queisser limit i odnosi se na teorijski maksimalnu moguću efikasnost solarne ćelije koja se sastoji od jednog p-n spoja.[8] Za nekoncentrirani, AM 1.5 spektar maksimalna efikasnost pretvorbe iznosi oko 33% i taj maksimum je moguć pri širini zabranjenog područja od 1,34 eV [1]. Za usporedbu, ćelije bazirane na siliciju imaju širinu zabranjenog područja od 1,1 eV, što rezultira maksimumom efikasnosti od oko 30%.

Efikasnost solarnih ćelija monokristalnog silicija u laboratorijskim uvjetima iznosi oko 22-24%[21], dok se efikasnost komercijalno proizvedenih ćelija kreće između 16-18% [22]. Prostor za napredak postoji, jer oko 24% zračenja Sunca ima značajno veću valnu duljinu od širine zabranjenog područja te se samo dio njegove energije koji odgovara širini zabranjenog područja apsorbira. Oko 33% se disipira kao toplina, a 15-20% je izgubljeno zato što napon ćelije postiže samo 70% vrijednosti koja odgovara energijskom procjepu [2]. Veća efikasnost se može postići korištenjem tandem solarnih ćelija uz korištenje materijala s optimalnim širinama zabranjenog područja kako bi se efikasnije pokrio cijeli sunčev spektar [3].

3.12. Kvantna efikasnost (QE)

Kvantna efikasnost (QE) je omjer broja nosioca naboja prikupljenih solarnom ćelijom i broja fotona određene energije koji upadaju na solarnu ćeliju. QE može biti zadana kao funkcija valne duljine ili energije. Ako su svi fotoni određene valne duljine apsorbirani i manjinski nosioci prikupljeni, tada je kvantna efikasnost na toj valnoj duljini jednaka 1. Kvantna efikasnost za fotone s energijom manjom od energetske procjepa je nula [20].

Postoje dvije vrste kvantne efikasnosti:

- „Unutarnja“ kvantna efikasnost ne uzima u obzir gubitke svjetlosti zbog refleksije i transmisije (uzima u obzir samo fotone koji dovode do nastanka parova elektron-šupljina)
- „Vanjska“ kvantna efikasnost (EQE) uključuje i gubitke svjetlosti zbog refleksije i transmisije (uzimaju se u obzir svi upadni fotoni)

U ovom radu mjerit ćemo „vanjsku“ kvantnu efikasnost koju možemo definirati kao: [19]

$$QE(\lambda) = \frac{N_e(\lambda)}{N_{ph}(\lambda)} \quad (3.21)$$

Broj prikupljenih elektrona N_e definiramo kao:

$$N_e(\lambda) = \frac{I_{sc}(\lambda) \cdot t}{e} \quad (3.22)$$

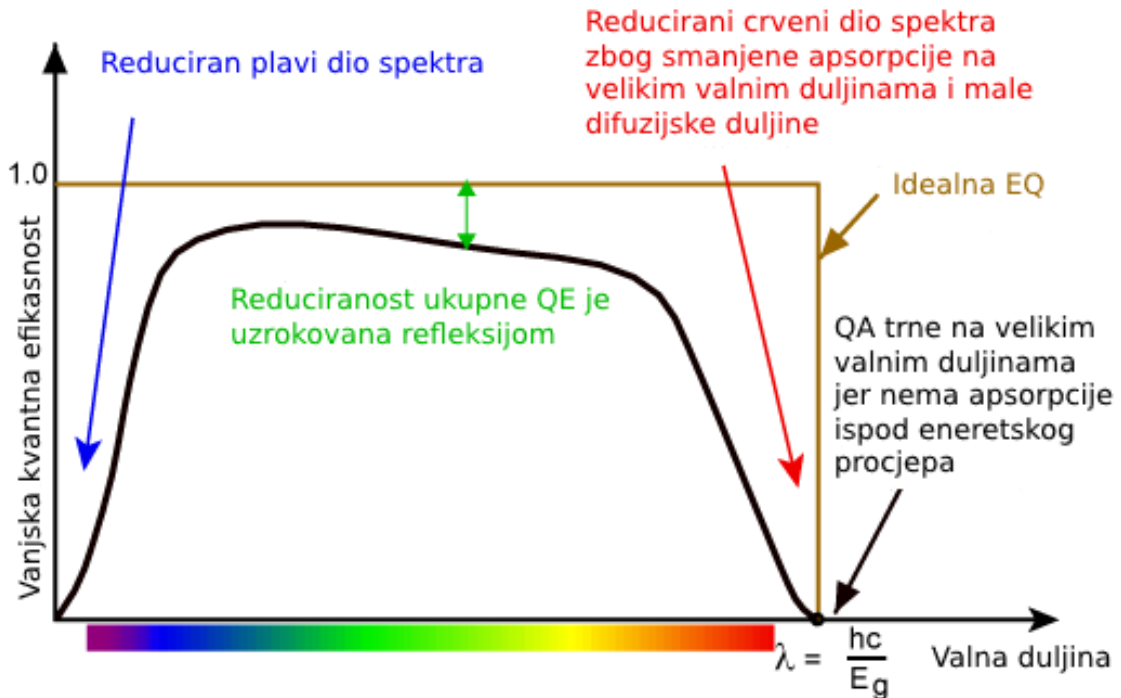
gdje je $I_{sc}(\lambda)$ struja generirana u solarnoj ćeliji, t je vrijeme, e je naboj elektrona. Broj fotona je:

$$N_{ph}(\lambda) = \frac{E(\lambda)}{E_{ph}(\lambda)} = \frac{P(\lambda) \cdot t}{\frac{hc}{\lambda}} \quad (3.23)$$

gdje je $E(\lambda)$ energija zračenja valne duljine λ koje upada na ćeliju, $E_{ph}(\lambda)$ je energija jednog fotona valne duljine λ , $P(\lambda)$ je snaga fotonskog snopa, c je brzina svjetlosti i h je Planckova konstanta. Uvrštavanjem (3.22) i (3.23) u izraz za kvantnu efikasnost (3.21) dobivamo:

$$QE(\lambda) = \frac{hc I_{sc}(\lambda)}{e\lambda P(\lambda)} \quad (3.24)$$

Iz jednadžbe (3.24) proizlazi da za određivanje kvantne efikasnosti moramo poznavati snagu zračenja $P(\lambda)$ upadnog snopa svjetlosti u ovisnosti o valnoj duljini λ i mjeriti struju $I_{sc}(\lambda)$ solarne ćelije.

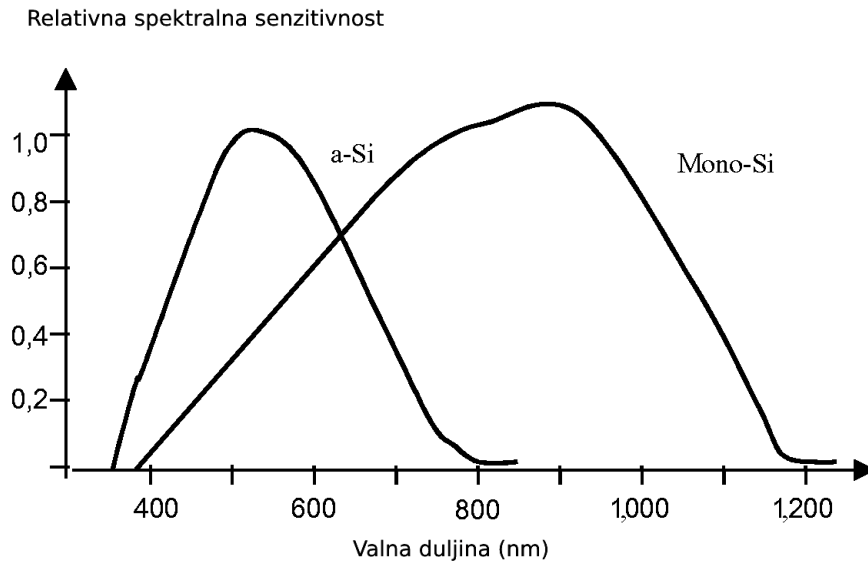


Slika 10: Tipična kvantna efikasnost silicijske solarne ćelije kristalnog silicija. Smeđi rub kvadrata predstavlja idealnu kvantnu efikasnost. Iznad energije eneretskog procjepa kvantna efikasnost brzo trne.[22]

Idealna krivulja kvantne efikasnosti (Slika 10) bi bila pravokutnog oblika duž cijelog spektra mjerenih valnih duljina, ali QE većine solarnih ćelija je nešto manja zbog efekata rekombinacije. Ako pogledamo plavi dio spektra svjetlosti on se apsorbira pri površini ćelije, a zbog jake površinske rekombinacije dolazi do smanjenja kvantne efikasnosti u plavom dijelu spektra. Slično tome, zeleni dio spektra je apsorbiran u masivnom materijalu solarne ćelije i zbog ograničene difuzijske duljine nosioca naboja imamo manju vjerojatnost razdvajanja nosioca naboja. Samim time se iznos kvantne efikasnosti u zelenom dijelu spektra reducira.

Omjer $I_{sc}(\lambda) / P(\lambda)$ u jednadžbi kvantne efikasnosti (3.24) predstavlja sličnu mjeru, spektralnu osjetljivost (u A/W). Spektralna osjetljivost (ili senzitivnost) nam govori koliko struje dobijemo iz uređaja po jedinici snage upadne svjetlosti:

$$SR(\lambda) = \frac{I_{sc}(\lambda)}{P(\lambda)} \quad (3.25)$$



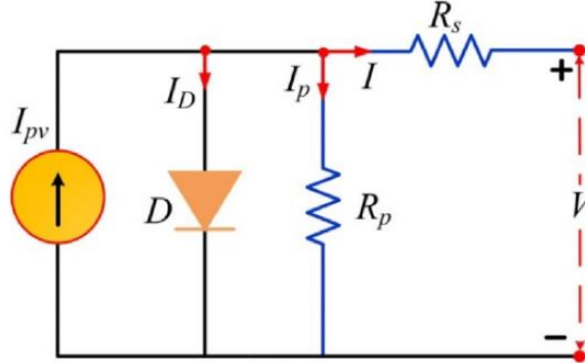
Slika 11: Relativna spektralna osjetljivost (normirana) amorfne i monokristalne silicijske ćelije [1]

Slika 11 prikazuje relativnu spektralnu osjetljivost (ili spektralni odziv) solarne ćelije amornog silicija i ćelije od kristaliziranog silicija. Vidljivo je da potonji ima veću osjetljivost u području većih valnih duljina, dok su amorfne silicijske ćelije osjetljivije na nižim valnim duljinama. Kao što je već spomenuto, apsorpcija različitih valnih duljina ovisi o širini osiromašenog područja materijala solarne ćelije. Energetski procijep ćelije amornog silicija je širi od ćelije kristalnog silicija.

3.13. Teorijski model

Kako bi se detaljnije kvantitativno analizirali parametri solarnih ćelija, pristupa se teorijskom modeliranju. Najjednostavniji matematički model za opis I-V karakteristike solarne ćelije uključuje ekvivalentni strujni krug s jednom diodom (eng. single-diode model, SDM). Složeniji modeli uključuju dvije ili tri diode: dvo-diodni model (eng. double-diode model, DDM) i model tri diode (eng. three diode model, TDM). Navedeni modeli se razlikuju po strukturi strujnog kruga, broju uključenih parametara i području primjene. Najjednostavniji, SDM ima jednostavnu strukturu i manji broj parametara (Slika 12). Nešto

kompleksniji, DDM sadrži jednu dodatnu diodu i uključuje gubitke uzrokovane rekombinacijom. Difuznu struju predstavlja prva dioda, dok druga struju rekombinacije. Najkompleksniju skupinu čine TDM i njegova primjena je u industriji [12].



Slika 12: Ekvivalentni strujni krug za jedno-diodni model [12]

Ekvivalentni strujni krug za SDM je shematski prikazan na Slika 12. Primjenom Kirchhoffovog zakona na ekvivalentni strujni krug izlazna struja I je iskazana jednadžbom:

$$I = I_L - I_D - \left(\frac{V + IR_S}{R_p} \right) \quad (3.26)$$

gdje je I_L fotonski generirana struja u amperima (A), I_D struja diode u amperima (A), R_S otpor serije u ohmima (Ω), R_p shunt ili paralelni otpor u ohmima (Ω). Struja I_L je povezana sa strujom diode I_D koja je dana Shockley-evom formulom:

$$I_D = I_0 \left[e^{\left(\frac{V + IR_S}{nV_t} \right)} - 1 \right] \quad (3.27)$$

gdje je n faktor idealnosti, V_t termalni napon u voltima (V), koji se računa prema izrazu:

$$V_t = \frac{k T}{q} \quad (3.28)$$

u kojem k predstavlja Boltzmannovu konstantu ($1,380649 \times 10^{-23}$ J/K), T temperaturu solarne ćelije u Kelvinima, q naboj elektrona ($1,602176634 \times 10^{-19}$ C). Uvrštavanjem izraza I_D iz (3.27) u (3.26), izlazna struja SDM-a se može računati kao:

$$I = I_L - I_0 \left[e^{\left(\frac{V + IR_S}{nV_t} \right)} - 1 \right] - \left(\frac{V + IR_S}{R_p} \right) \quad (3.29)$$

U ovom modelu postoji pet nepoznatih parametara koji mogu biti sažeti sljedećom jednažbom ξ (ksi):

$$\xi = [I_L, I_0, n, R_S, R_p] \quad (3.30)$$

Postoji više metoda za rješavanje jednažbe (3.29) aproksimativnim matematičkim algoritmima koji često uključuju informacije s tehničkog lista proizvođača. Pretpostavimo da otpor R_p ima beskonačnu vrijednost, tada zadnji član jednažbe (3.29) koji predstavlja struju paralelnog spoja trne u nulu, te ga možemo zanemariti. Nadalje, kako bi dodatno pojednostavili model, zanemarujemo otpor R_S te nam ostaje jednažba s tri nepoznata parametra (I_L, I_0, n):

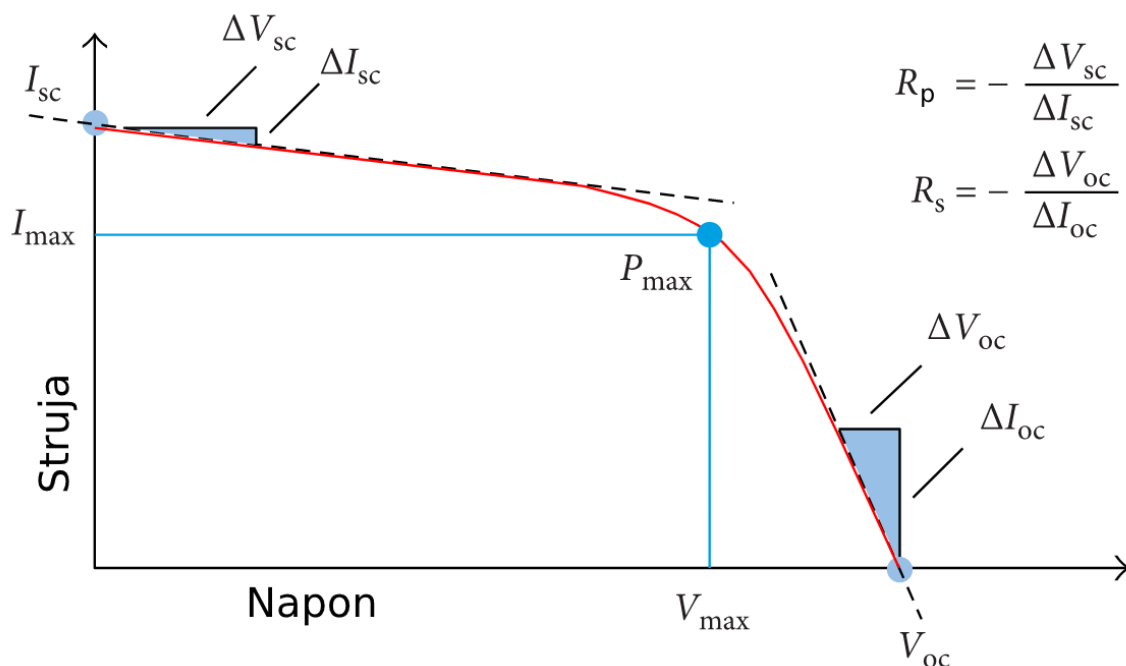
$$I = I_L - I_0 \left[e^{\left(\frac{V}{nV_t}\right)} - 1 \right] \quad (3.31)$$

Jednažba (3.31) nam može poslužiti kao model za prilagodbu eksperimentalno dobivene I-V krivulje. Faktor idealnosti za slučaj $n = 1$ predstavlja savršenu kristalnu strukturu bez defekata. Vrijednost $n > 2$ se povezuje s efektom tuneliranja ili smanjenjem pokretljivosti nosioca zbog defekta u kristalnoj strukturi materijala te s dominantnom rekombinacijom u zoni osiromašenja [23][24].

Približne vrijednosti otpora R_p i R_S možemo dobiti iz nagiba I-V karakteristične krivulje oko njenih krajnjih točaka (točka kratkog spoja i napona otvorenog kruga) kao što je prikazano na Slika 13. R_p se iz nagib I-V krivulje u blizini točke I_{sc} , a R_S kao nagib I-V krivulje u blizini točke V_{oc} .

$$R_p = -\frac{1}{\text{nagib kod točke } I_{sc}} = -\frac{\Delta V_{sc}}{\Delta I_{sc}} \quad (3.32)$$

$$R_s = -\frac{1}{\text{nagib kod točke } V_{oc}} = -\frac{\Delta V_{oc}}{\Delta I_{oc}} \quad (3.33)$$



Slika 13: Prikaz dobivanja aproksimativnih vrijednosti otpora R_p i R_s kao nagiba I-V karakteristike oko točki I_{sc} i V_{oc} [23]

Korišteni jedno-diodni model za dobivanje nepoznatih parametara iz jed. (3.30) i izmjerene I-V karakteristike se sastoji od sljedećih koraka. Počinjemo s jednadžbom (3.29) u kojoj parametar -1 možemo odbaciti jer ima zanemariv utjecaj na oblik I-V krivulje. Paralelni (shunt) otpor R_p zamijenimo s izrazom za shunt vodljivosti $G_p = 1/R_p$. Uvrštavanjem i transformacijom (3.29) dobivamo:

$$I \approx \frac{I_L}{1 + G_p R_s} - \frac{G_p V}{1 + G_p R_s} - \frac{I_0}{1 + G_p R_s} \left[e^{\left(\frac{V + IR_s}{nV_t}\right)} \right] \quad (3.34)$$

Jednadžba (3.34) se može podijeliti na linearni i eksponencijalni dio. Linearnost I-V krivulje vrijedi za manje vrijednosti V , do graničnih $V_L = V_{oc}/3$.

$$I \approx \frac{I_L}{1 + G_p R_s} - \frac{G_p V}{1 + G_p R_s} = \beta_0 + \beta_1 V \quad (3.35)$$

Desna strana jednadžbe (3.25) se uvrštava u jednadžbu (3.34):

$$\log(\beta_0 - \beta_1 V - I) = \log \left[\frac{I_0}{1 + G_p R_s} \right] + \frac{1}{\alpha} V + \frac{R_s}{\alpha} I = \beta_2 + \beta_3 V + \beta_4 I \quad (3.36)$$

Za $I > 0,1 I_{sc}$ vrijednosti $\beta_2, \beta_3, \beta_4$ se dobivaju metodom najmanjih kvadrata kod linearne regresije, a četiri parametra SDM modela se računaju iz koeficijenata regresije:

$$R_s = \frac{\beta_4}{\beta_3}, G_p = \frac{\beta_1}{1 - R_s \beta_1}, R_p = \frac{1}{G_p}, I_L = (1 + G_p R_s) \beta_0$$

Na kraju, četiri dobivena parametra se koriste u jed. (3.34) u točki (V_{MP}, I_{MP}) za računanje vrijednost $I_{0,MP}$ i u točki ($V_{OC}, 0$) kako bi se dobili $I_{0,OC}$ i I_0 iz sljedećih pravila:

- 1) ako je $I_{0,MP} > 0$ i $I_{0,OC} > 0$ tada je $I_0 = \frac{I_{0,MP} + I_{0,OC}}{2}$
- 2) ako je $I_{0,MP} > 0$ i $I_{0,OC} \leq 0$ tada je $I_0 = I_{0,MP}$
- 3) ako je $I_{0,MP} \leq 0$ i $I_{0,OC} > 0$ tada je $I_0 = I_{0,MP}$
- 4) inače, I_0 je nedefiniran i prilagodba krivulje je neuspješna.

Ovom metodom se parametri dobivaju bez potrebe iterativne numeričke optimizacije [27].

Kako bi se iz parametara (3.30) rekonstruirala I-V krivulja koristimo Lambertovu W funkciju [28]. Ovom metodom iz implicitne jednadžbe (3.29) dobivamo eksplicitne funkcije $V = f(I)$ i $I = f(V)$. Lambertova W funkcija je rješenje $W(x)$ jednadžbe oblika $x = W(x) e^{W(x)}$, pa je za $I = I(V)$ u kompaktnom obliku:

$$I = \frac{R_p}{R_p + R_s} (I_L + I_0) - \frac{V}{R_p + R_s} - \frac{n V_t}{R_s} W(\theta) \quad (3.37)$$

u kojoj je varijabla θ definirana kao

$$\theta = \frac{R_s I_0}{n V_t} \frac{R_p}{R_p + R_s} e^{\left(\frac{R_p}{R_p + R_s} \frac{R_s (I_L + I_0) + V}{n V_t} \right)}$$

Istom metodom dobivamo $V = V(I)$:

$$V = (I_L + I_0 - I) R_p - I R_s - n V_t W(\psi) \quad (3.38)$$

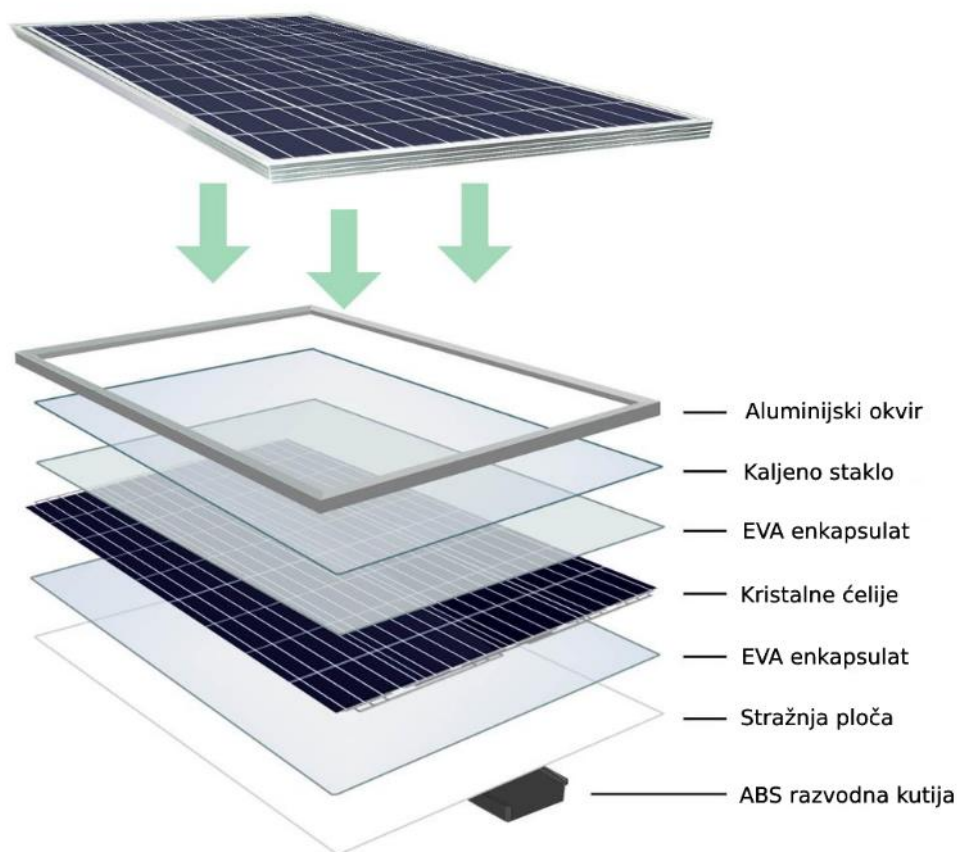
u kojoj je varijabla ψ

$$\psi = \frac{I_0 R_p}{n V_t} e^{\left(\frac{(I_L + I_0 - I) R_p}{n V_t} \right)}$$

3.14. Solarni modul

Solarne ćelije se u komercijalnoj primjeni slažu u module različitih veličina i spajaju serijski. Problem zasjenjenja i neželjena pojava zagrijavanja se rješava primjenom premosnih (eng. bypass) dioda. Idealno bi bilo svakoj solarnoj ćeliji spojiti premosnu diodu, ali to se u praksi ne radi. Prednja strana solarnog modula kroz koju sunčeva svjetlost pada

na aktivni dio solarne ćelije treba imati veliku transmisiju svjetlosti u području valnih duljina od 350 nm do 1200 nm, uz malu reflektivnost. Smanjenje reflektivnosti se postiže posebnim dizajnom prednje strane solarne ćelije. Jedan od načina je upotrebom teksturirane površine solarne ćelije (mikroskopske neravnine piramidalnog oblika), a drugi primjena raznih anti-reflektivnih premaza.



Slika 14: Osnovni dijelovi tipičnog c-Si solarnog modula [26]

Efikasnost solarne ćelije se smanjuje tijekom vremena (degradira) zbog vanjskih atmosferskih utjecaja. Stoga ju je potrebno zaštititi enkapsulacijom (Slika 14). Enkapsulacija mora osigurati:

- zaštitu ćelije od mehaničkih oštećenja i nagrivanja električnih spojeva uzrokovanih padalinama i vlagom u zraku,
- prozirnost sloja okrenutog prema izvoru svjetla,
- zaštitu ćelije od UV zračenja i
- dobru odvodnju topline.

Najčešće je izvedena od transparentne plastične folije tzv. *EVA folije* (eng. ethyl vinyl acetate) kojom se oblaže cijela ćelija. Na prednju stranu solarnog modula se najčešće postavlja kaljeno staklo jer je jeftino, transparentno, čvrsto i ima dobra svojstva samo-čišćenja. Stražnja ploča (često Tedlar, polimerni materijal) modula služi za pružanje mehaničke zaštite i mora biti malog toplinskog otpora. Okvir modula je najčešće aluminijski.

Dizajnom enkapsulacijskog dijela solarni moduli se prilagođavaju za različite primjene. Tako npr. mogu biti dijelom BIPV (eng. Building-integrated photovoltaics) materijala koji imitiraju i zamjenjuju postojeće materijale korištene na vanjskoj ovojnici objekata (crijep, prozori, fasadni paneli). U BIPV primjeni estetika modula je ključni faktor. Najčešće takve prilagodbe enkapsulacije idu na štetu ukupne efikasnosti solarnog modula.

3.15. Modificiranje spektralnog odziva korištenjem organskih boja

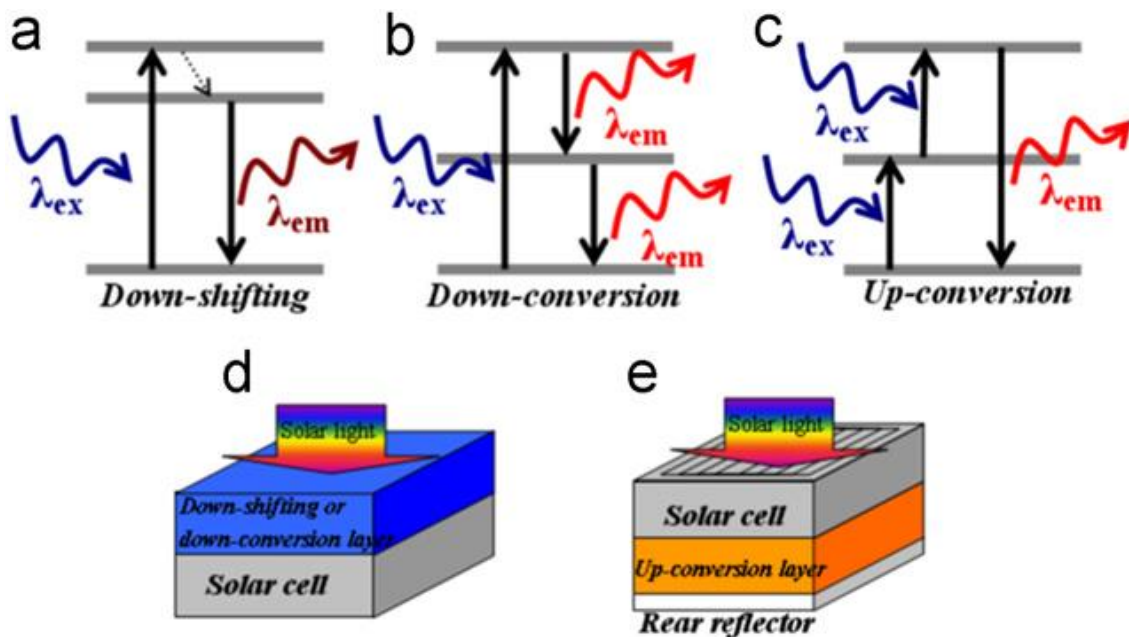
Kao što je već objašnjeno, efikasnost solarne ćelije ovisi o širini energetskog procijepa p-n spoja koji određuje valnu duljinu dolaznih fotona koje ćelija može apsorbirati. Apsorpcija zračenja je najveća u vidljivom dijelu spektra, ali značajan dio spektra se nalazi u IR i UV dijelu (Slika 4). Korištenjem luminiscencije možemo napraviti „pomak“ valne duljine iz UV dijela spektra u vidljivi dio, na kojem sama ćelija postiže veću efikasnost pretvorbe.

Spektralni odziv se može modificirati procesom fotonske pretvorbe tj. konverzijom fotona jedne valne duljine u fotone valne duljine u vidljivom dijelu spektra. Proces fotonske pretvorbe može biti: [6]

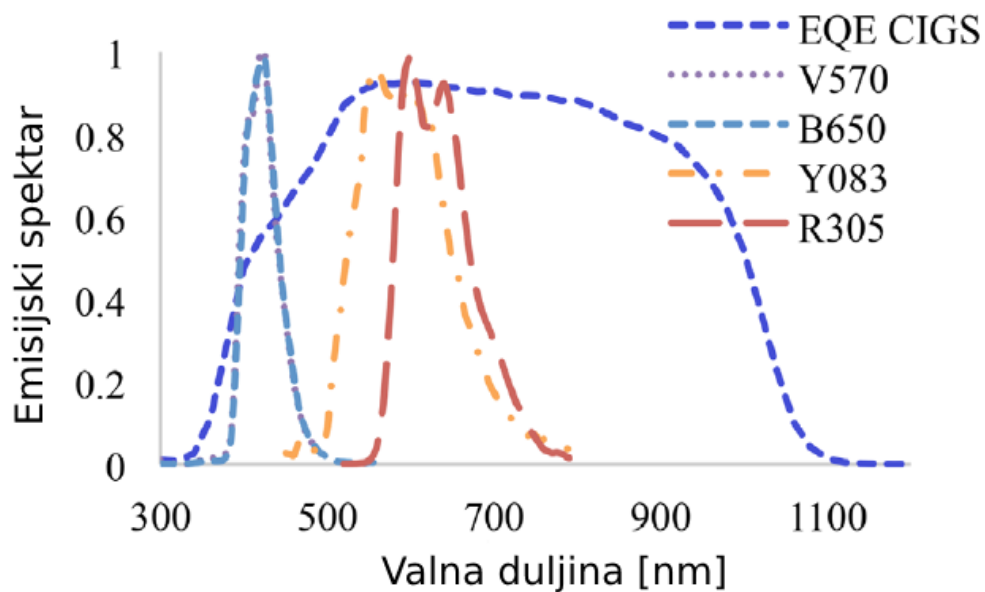
- *up-conversion* (dva IR fotona se konvertiraju u jedan foton u vidljivom području)
- *down-conversion* (jedan UV foton se konvertira u dva fotona u vidljivom ili IR području)
- *down-shifting* (jedan UV foton se konvertira u jedan foton u vidljivom ili IR području)

kao što je prikazano na Slika 15. Do *Down-shifting* ili *down-conversion* procesa dolazi u sloju koji se nalazi između solarne ćelije i izvora, dok do *up-conversion* procesa dolazi u sloju ispod solarne ćelije (sa stražnje strane).

U svrhu postizanja Luminescent down-shiftinga (LDS) mogu se koristiti luminiscentne organske boje kojima se modificira EVA folija [7]. Luminiscentne boje dobro apsorbiraju u području u kojem je kvantna efikasnost solarne ćelije mala (u ovom slučaju UV dio spektra), a istovremeno luminisciraju u području za koje solarne ćelije ima veću kvantnu efikasnost (vidljivo). Primjer emisijskog spektra za različite organske boje i kvantna efikasnost CIGS ćelije prikazan je na Slika 16. Vidljivo je kako različite organske boje imaju različit emisijski spektar, što može utjecati na efikasnost solarne ćelije. Silicijske ćelije imaju najveću efikasnost pretvorbe u vidljivom dijelu spektra (od 400 do 700 nm), u kojem najveću emisiju imaju crvena i žuta luminiscentna boja.



Slika 15: Shematski prikaz procesa pretvorbe fotona: (a) down-shifting, (b) down-conversion, (c) up-conversion, (d) položaj sloja za down-shifting ili down conversion, (e) položaj sloja za up-conversion [25]



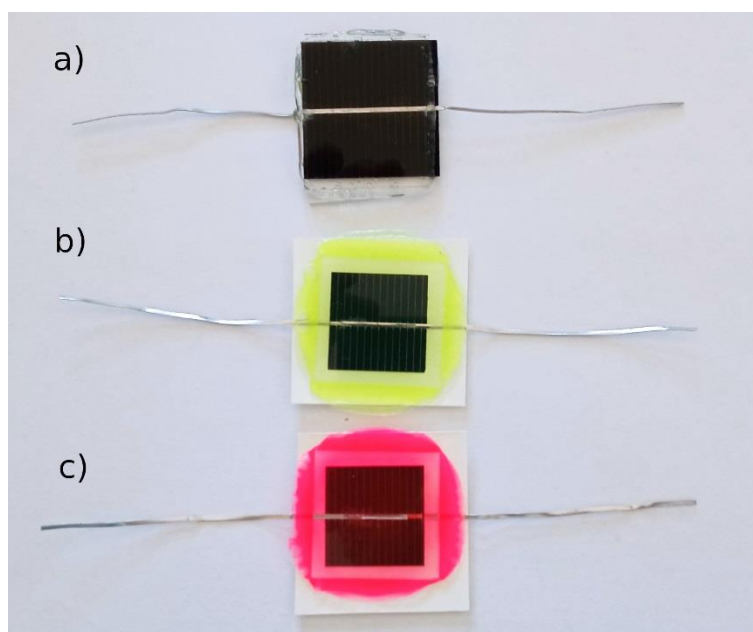
Slika 16: Emisijski spektar različitih Lumogen F organskih boja otopljenih u acetonu: ljubičaste (Violet 570), plave (Blue 650), žute (Yellow 083) i crvene (Red 305) uspoređen s vanjskom kvantnom efikasnošću CIGS solarne ćelije [6]

4. Eksperimentalni postav i postupak mjerenja

4.1. Uzorci mc-Si solarnih ćelija – priprema i modifikacija

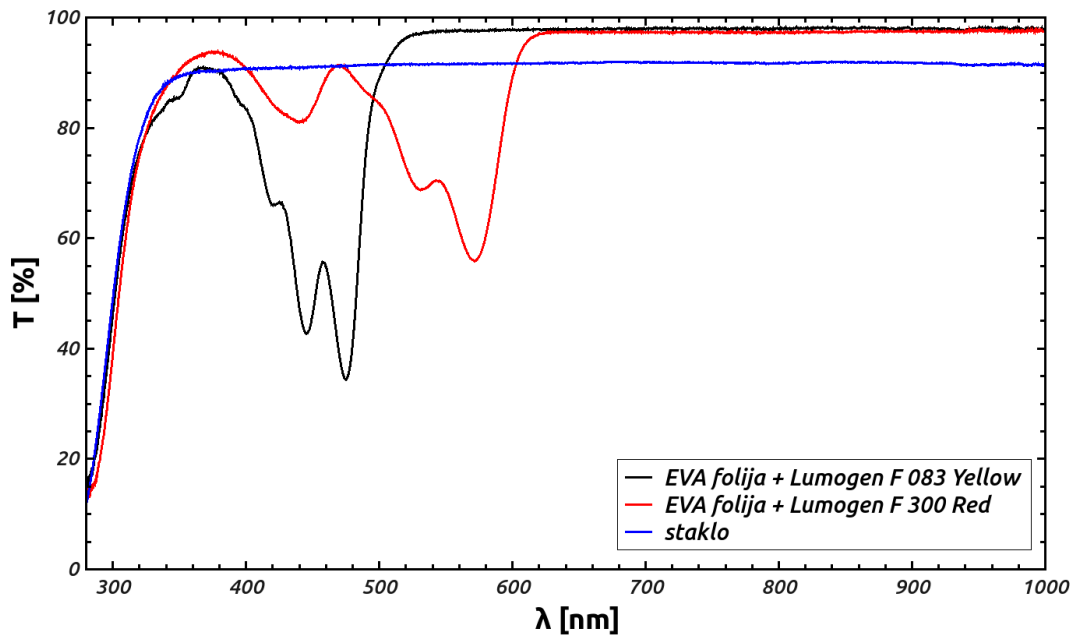
U okviru rada analizirane su IV karakteristike i spektralni odziv 3 solarne ćelije polikristalnog silicija površine 2cm x 2cm enkapsulirane s različitim uzorcima EVA folije (Slika 17):

1. standardna nemodificirana EVA folija
2. EVA folija modificirana žutom organskom bojom Lumogen Yellow
3. EVA folija modificirana crvenom organskom bojom Lumogen Red



Slika 17: Uzorci c-Si solarnih ćelija: a) sa standardnom nemodificiranom EVA folijom, b) s EVA folijom modificiranom Lumogen Yellow bojom, c) s EVA folijom modificiranom Lumogen Red.

Modificirani uzorci EVA folije su pripremljeni tako da se prah luminiscentnih boja (Lumogen F 300 Red i Lumogen F 083 Yellow) miješanjem otopi u etanolu. Uzorci EVA folije se urone u otopinu i ostave 12 sati kako bi se boja apsorbirala na površinu EVA folije. Nakon završetka postupka bojanja, višak boje se pažljivo ispere čistim etanolom.



Slika 18: Transmisija uzoraka EVA folije modificirane luminiscentnim organskim bojama Lumogen F i laminirane između dva stakalca [7]

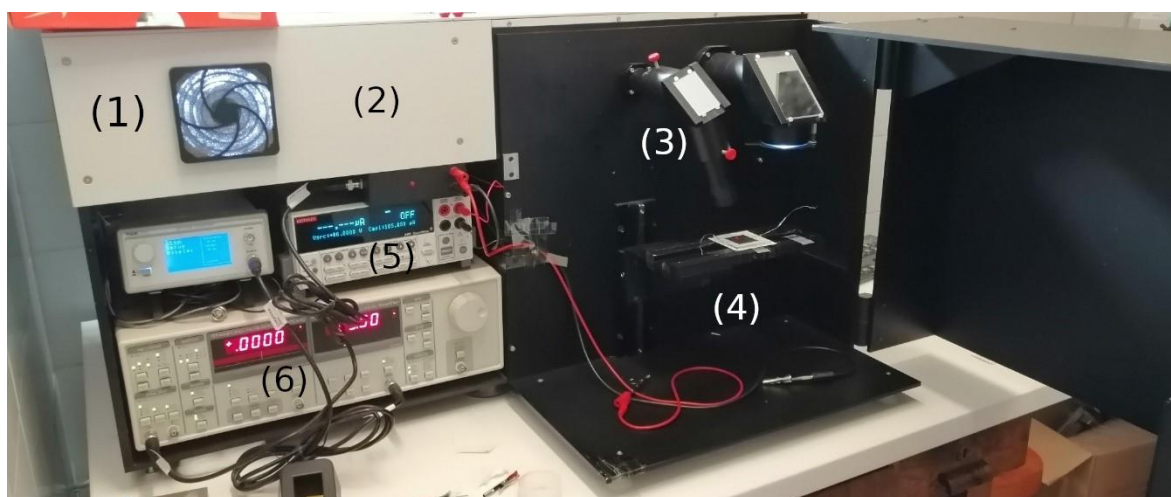
Na Slika 18 prikazana je transmisija uzoraka EVA folije modificiranih luminiscentnim organskim bojama normirana na transmisiju nemodificirane EVA folije. Za usporedbu je prikazana transmisija čistoga stakla koje je transparentno u vidljivom dijelu spektra i značajno počinje apsorbirati u UV dijelu spektra ispod 300 nm. Iz grafa (Slika 18) se primjećuje da Lumogen F Red boja ima smanjenu transmisiju u intervalu valnih duljina 450 do 600 nm, dok je ona nešto veća za $\lambda > 650$ nm. Boja Lumogen F Yellow ima smanjenu transmisiju u intervalu valnih duljina 400 do 500 nm, a veću od transmisije stakla za $\lambda > 500$ nm. Smanjena transmisija oba uzorka može se povezati s apsorpcijom (i refleksijom) Lumogen boja u tom dijelu spektra. Emisijski spektar za korištene boje (Slika 16) nam pokazuje da Lumogen F Yellow boja emitira u približnom intervalu od 550 do 650 nm, a Lumogen F Red u intervalu 600 do 700 nm. Emisijski spektar je povezan s luminiscentnim down-shiftingom (LDS).

Iz standardnih polikristalnih solarnih ćelija veličine 160x160 mm koje se koriste pri sklapanju solarnih modula, laserom su izrezani uzorci veličine 20x20 mm i zalemljeni električni kontakti.

Na kraju se solarna ćelija polikristalnog silicija enkapsulira u mini-modul između stakalca i pripremljenog uzoraka EVA folije s prednje strane i bijele folije sa stražnje strane. Enkapsulacija je provedena zagrijavanjem u vakuumu u cijevnoj peći na temperaturi 150°C tijekom 20 minuta [7].

4.2. Mjerenje I-V karakteristike i spektralnog odziva

Mjerni postav za mjerenje I-V karakteristike i spektralnog odziva solarnih ćelija se sastoji od solarnog simulatora modela 175-9011 WL-QE (White Light Quantum Efficiency System) i povezanog računala s potrebnim softverom za upravljanje solarnim simulatorom, te grafički prikaz i analizu izmjerenih podataka [40]. Osnovni dijelovi postava prikazani su i označeni na Slika 19. Kao izvor svjetla u solarnom simulatoru se koristi ksenonska lampa snage 150 W čiji spektar je vrlo sličan spektru Sunca. Dodatno se on prilagođava optičkim filtrima kako bi bio u skladu sa standardom AM1.5G.



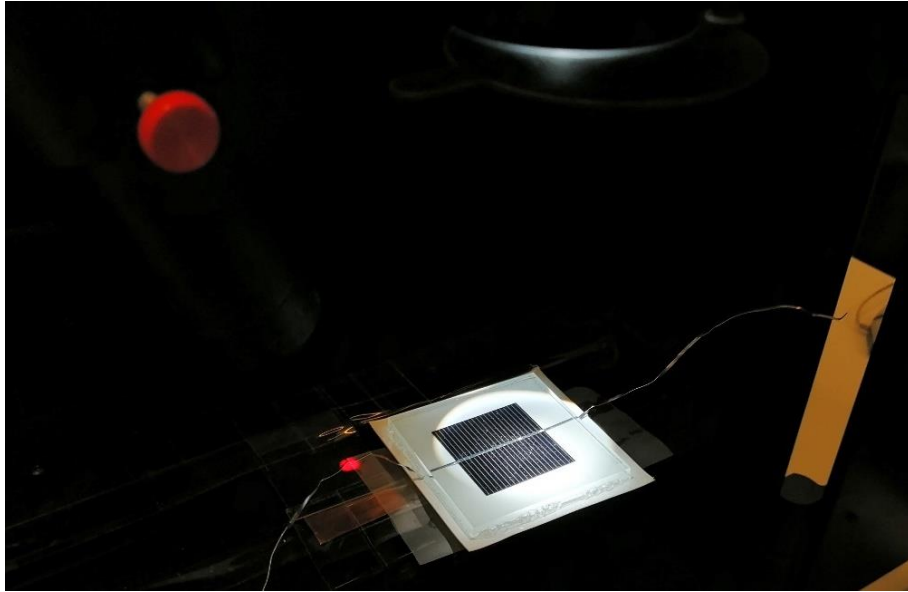
Slika 19: Mjerni postav sa solarnim simulatorom za mjerenje I-V karakteristike i spektralnog odziva solarnih ćelija. U kućištu označeni brojevima nalaze se izvor pozadinskog svjetla s filterom (1), izvor svjetla s monokromatorom za mjerenje spektralnog odziva (2), optički sustav za fokusiranje svjetlosnog snopa na nosač uzoraka (3), nosač uzoraka (4), Keithley multi metar 2410 za mjerenje I-V karakteristike (5), lock-in pojačalo SR830 s chopperom za mjerenje spektralnog odziva (6).

Prije samog mjerenja I-V karakteristike, u skladu sa standardnim protokolom za mjerenje IV karakteristike, snaga Xe svjetlosnog izvora treba biti podešena kako bi intenzitet svjetla kojim se osvjetljava uzorak bio jednak 1000 W/m^2 što odgovara prosječnom intenzitetu sunčevog zračenja na Zemljinoj površini (AM1.5G standard).

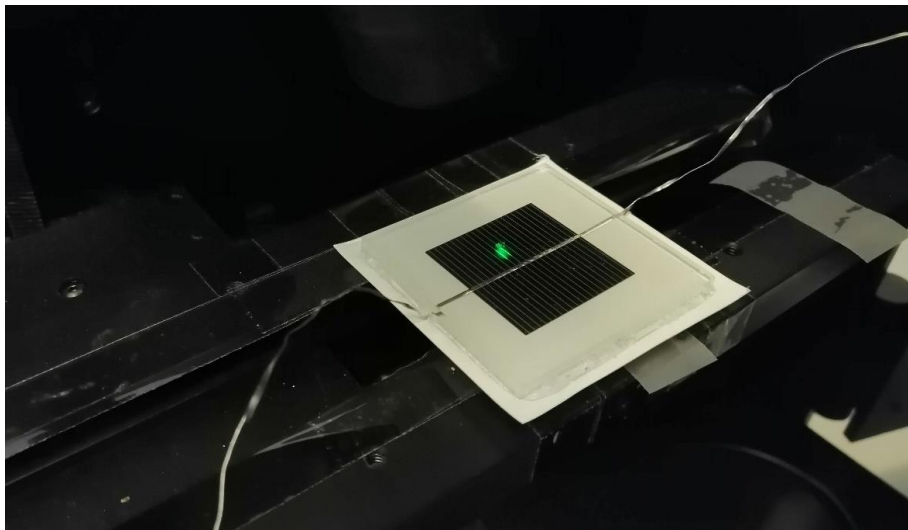
Uzorak solarne ćelije se stavlja na postolje solarnog simulatora tako da snop svjetlosti homogeno osvjetljava površinu uzorka (Slika 20). Krajevi vodiča solarnih ćelija (kontakti) se spajaju na mjerni uređaj. Za mjerenje IV karakteristike koristi se multimeter Keithley 2410 koji ujedno služi i kao izvor napona. Napon na solarnoj ćeliji mijenja se u određenom rasponu vrijednosti te se mjeri generirana struja u solarnoj ćeliji pri svakoj pojedinoj vrijednosti napona. Prostor u kojem se vrši mjerenje treba biti potpuno zamračen, tj. prilikom mjerenja zasun za zamračenje mora biti zatvoren. Cijeli postupak mjerenja je u potpunosti automatiziran. Parametri kao što su gustoća i raspon mjernih točaka se odabiru kroz GUI² aplikaciju na računalu s kojeg se i upravlja postupkom mjerenja. Rezultati mjerenja (napon, struja, otpor) se zapisuju u .lvm datoteku (eng. LabVIEW Measurement Files) u ASCII formatu. Zapis je strukturiran korištenjem redaka i stupaca.

Postupak mjerenja vanjske kvantne efikasnosti (EQE) solarne ćelije razlikuje se od postupka mjerenja I-V karakteristike. Pored osvjetljavanja bijelom pozadinskom svjetlošću koja odgovara AM1.5 spektru, dio solarne ćelije se dodatno osvjetljava monokromatskom svjetlošću određene valne duljine (Slika 21). Monokromatski izvor svjetla je ksenonska lampa čija svjetlost prolazi kroz chopper i motorizirani monokromator raspona 250 – 2500 nm [40]. S obzirom na to da je doprinos monokromatskog svjetla ukupnoj struji solarne ćelije vrlo mali za mjerenje se umjesto Keithley multimetra se koristi lock-in pojačalo u sprezi s optičkim chopperom kojim se intenzitet upadnog snopa monokromatskog svjetla periodično mijenja. Neki od dostupnih parametra za mjerenje su opseg testiranih valnih duljina, razmak između svakog mjerenja (npr. u ovom slučaju svakih 10 nm) i slično. Mjerenja vanjske kvantne efikasnosti (EQE) na tri navedena uzorka smo proveli u rasponu valnih duljina od 320 do 1200 nm, s korakom od 10 nm. Mjerenje izvan tog područja valnih duljina (ispod i iznad) nema pretjeranog smisla jer u tim graničnim slučajevima EQE vrlo brzo pada. Izmjerene vrijednosti struje solarne ćelije u ovisnosti o valnoj duljini monokromatskog svjetla zapisuju se u ASCII datoteku slično kao i kod mjerenja I-V karakteristike. Prije mjerenja EQE bilo je potrebno kalibrirati monokromator, te izmjeriti intenzitet monokromatskog snopa svjetlosti na poziciji uzorka kako bi rezultati EQE bili ispravno normirani na intenzitet upadnog svjetla.

² GUI – eng. Graphical User Interface, grafičko korisničko sučelje



Slika 20: Pozicioniranje mjernog uzorka solarne ćelije kod mjerenja I-V karakteristike.



Slika 21: Pozicioniranje mjernog uzorka pri mjerenju spektralnog odziva solarne ćelije. Na površini solarne ćelije jasno se može uočiti područje osvijetljeno snopom monokromatske svjetlosti (zeleno).

4.3. Obrada rezultata i prilagodba teorijskom modelu

Obrada rezultata i prilagodba teorijskom modelu provedena je korištenjem softwera Jupyter Notebook pomoću računalnog koda (skripte) pisane u programskom jeziku

Pythonu 3. Skripta se nalazi u Dodatku A. Biblioteke koje pri tome koristimo su *pvlb-python* (v0.9.0), *matplotlib*, *NumPy* i *Pandas*.

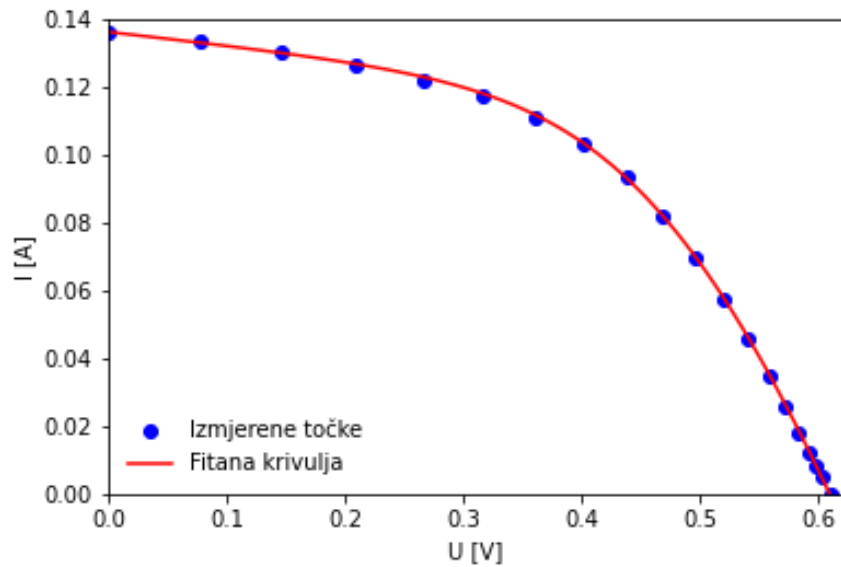
Najprije je potrebno rezultate mjerenja učitati iz .lvm datoteka. Vrijednosti su iščitane iz datoteke tako da su podaci za svaki stupac spremljeni u zasebnu listu. Pri tome je potrebno provjeriti polaritet električnih kontakata solarne ćelije tijekom mjerenja I-V karakteristike. U slučaju da je mjerena solarna ćelija spojena u obrnutoj polarizaciji (negativne vrijednosti struje), potrebno je promijeniti predznak struje kako bi se I-V karakteristika nalazila u prvom kvadrantu (pozitivna struja i napon).

Biblioteka *pvlb-python* je skup funkcija i klasa za simuliranje i modeliranje performansi fotonaponskih sustava. Python verzija *pvlb* alata koji je izvorno razvijen za Matlab u Sandia National Laboratories besplatno je dostupna putem GitHub repozitorija [29]. Starije verzije biblioteke mogu se instalirati korištenjem upravitelja paketa Pip ili Conda, dok je najnoviju verziju moguće instalirati korištenjem *conda-forge* kanala [30].

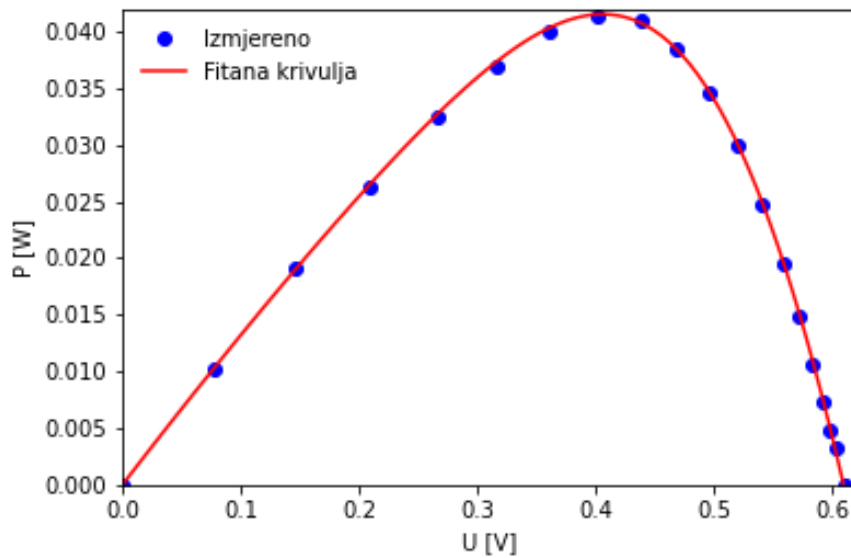
Kako bismo iz izmjerenih podataka dobili tražene parametre solarne ćelije (3.30): I_{ph} , I_0 , n , R_s i R_p koristimo metodu za prilagodbu teorijskom jedno-diodnom modelu *pvlb.ivtools.sde.fit_sandia_simple()*. Kao ulazni parametri prosljeđuju se izmjerene točke strujno naponske karakteristike (napon, struja) spremljenih u numpy polja. Opcionalni ulazni parametri uključuju početne vrijednosti V_{OC} , I_{SC} , V_{MP} i I_{MP} koji se procjenjuju na temelju ulaznih I-V podataka. Funkcija kao rezultat vraća niz (eng. tuple) koji sadrži I_{ph} , I_0 , R_s , R_p i nV_t izračunatih iz koeficijenta regresije metodom opisanom u teorijskom modelu. Uz pretpostavku da su mjerenja I-V karakteristike provedena na sobnoj temperaturi, faktor idealnosti n računamo dijeljenjem rezultata nV_t s vrijednosti $V_t = 0,02585$.

Dobivene parametre prosljeđujemo kao ulazne parametre za metodu *pvlb.pvsystem.singlediode()*. Navedena metoda korištenjem Lambertove W funkcije iz implicitne jednadžbe jedno-diodnog model (3.29) dobiva eksplicitna rješenja za $I = f(V)$ (3.37) i $V = f(I)$ (3.38), kao što je opisano u teorijskom dijelu rada. Rezultat je vraćen u obliku rječnik (eng. dictionary) koji sadrži parametre prilagodbe I_{SC} , V_{OC} , I_{MP} , V_{MP} , P_{MP} te polja I-V krivulje dobivene prilagodbom. Krivulju snage solarne ćelije računamo prema izrazu (3.16) za svaku mjerenu i točku rezultata prilagodbe i spremamo u listu.

Eksperimentalne rezultate i rezultate prilagodbe grafički prikazujemo korištenjem biblioteke *matplotlib*. Primjer usporedbe eksperimentalnih rezultata I-V i P-V krivulje i rezultata dobivenih prilagodbom jedno-diodnom modelu prikazani su na Slika 22 i Slici 23. Iz P-V krivulje je određena maksimalna snaga solarne ćelije P_{MP} .



Slika 22: Primjer eksperimentalno izmjerene I-V krivulje (simboli) i rezultata prilagodbe jedno-diodnom modelu (linija).

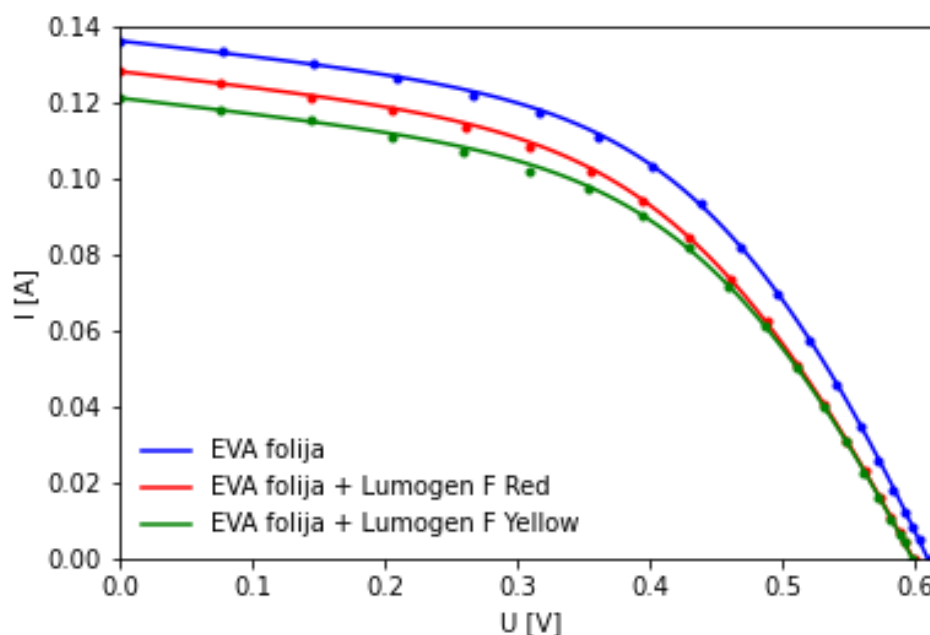


Slika 23: Primjer eksperimentalno izmjerene P-V krivulja (simboli) i rezultata prilagodbe jedno-diodnom modelu (linija).

5. Rezultati i rasprava

5.1. Strujno-naponska karakteristika

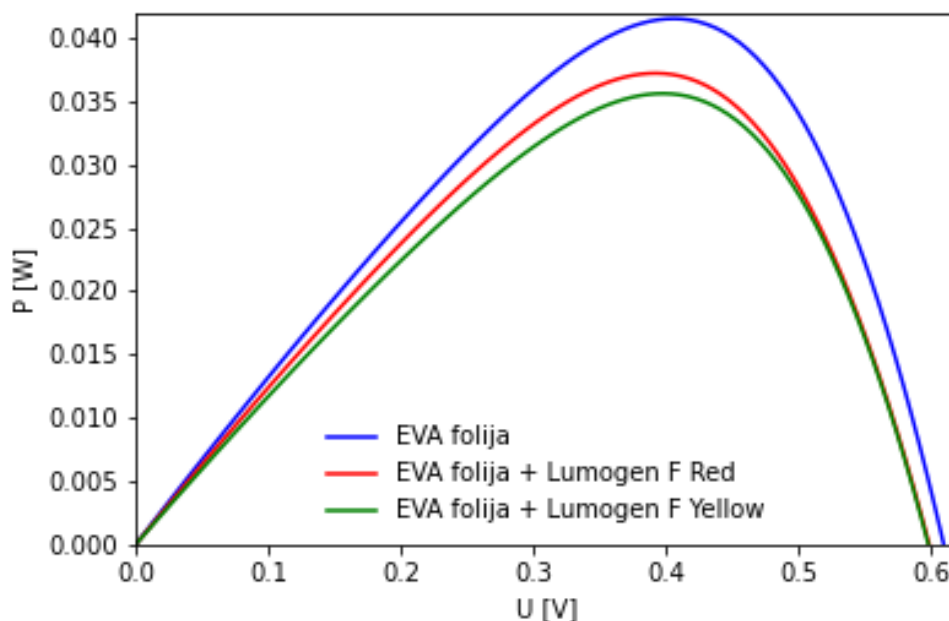
Izmjereni podaci I-V karakteristika za sva tri uzorka su prikazani na Slika 24. Iz odsječka na y osi vidimo da najveću vrijednost struje kratkog spoja I_{SC} postiže ćelija s ne modificiranom EVA folijom. Vrijednosti nagiba na rubovima I-V karakteristike (V_{OC} i I_{SC}) koji definiraju otpore R_s i R_p , ukazuju da je shunt otpor R_p veći od serijskog otpora R_s , što je u skladu s teorijskim očekivanjem.



Slika 24: Usporedba I-V krivulja dobivenih korištenim modelom i prikaz podudaranja s eksperimentalno prikupljenim podacima. Simbolima su prikazani eksperimentalni podaci, dok su linijama prikazani podaci dobiveni prilagodbom teorijskog modela eksperimentalnim podacima.

Pored eksperimentalnih podatak, za usporedbu su prikazani rezultati prilagodbe jedno-diodnom teorijskom modelu. Usporedba eksperimentalnih I-V krivulja i rezultata prilagodbe (Slika 24) potvrđuje da korišteni teorijski model s jednom diodom dobro opisuje eksperimentalne podatke.

P-V graf dobiven prilagodbom teorijskom model (Slika 25) daje uvid u postignutu maksimalnu snagu korištenih uzoraka (radna točka). Može se zaključiti kako uzorci s modificiranom EVA folijom postižu manje vrijednosti maksimalne snage, a time i manju efikasnost pretvorbe.



Slika 25: Usporedba P-V krivulja testiranih uzorka dobivenih korištenim modelom

Vrijednosti osnovnih parametara solarnih ćelija dobiveni primjenom jedno-diodnog modela su navedeni u Tablica 1. Napon otvorenog kruga, V_{OC} , za sva tri testirana uzorka ima vrijednost približno 0,6 V, što je u skladu s teorijskim predviđanjem za polikristalnu silicijsku solarnu ćeliju. Gustoća struje kratkog spoja J_{SC} je u očekivanom rasponu 28-35 mA/cm² za komercijalne ćelije. Gustoća struje kratkog spoja J_{SC} ovisi o nekoliko parametara opisanih u Poglavlju 3.6, a kao čimbenike njezinog smanjenja kod uzoraka s modificiranom EVA folijom možemo isključiti uzroke koji su vezani za samu solarnu ćeliju (površina i vjerojatnost prikupljanja) jer sva tri uzorka koriste isti tip solarne ćelije i istih su površina (4 cm²). Preostali čimbenici se odnose na intenzitet i spektar upadnog zračenja te optičkim svojstvima ćelije koja smo mijenjali modificiranjem EVA folije.

Točka maksimalne snage ovisi o V_{MP} i I_{MP} , a V_{MP} je za sva tri uzorka gotovo identičan i iznosi ~0,4V. Ćelija s nemodificiranom EVA folijom ima najmanje vrijednosti otpora R_s i R_p , pa s time i veće vrijednosti V_{MP} i I_{MP} u točki maksimalne snage. Veća P_{MP} stoga isključivo ovisi o vrijednosti I_{MP} , koja je s vrijednosti od 100 mA najveća za uzorak s ne modificiranom EVA folijom.

	Nemodificirana EVA folija	EVA folija + Lumogen F Red	EVA folija + Lumogen F Yellow
I_L [mA]	140	133	125
I₀ [μA]	15,8	17,4	17,6
N	2,65	2,65	2,67
R_s [Ω]	0,769	0,897	0,836
R_p [Ω]	24,9	24,3	24,3
V_{oc} [V]	0,610	0,599	0,598
I_{sc} [mA]	136	128	121
J_{sc} [mA/cm²]	34	32	30,3
V_{MP} [V]	0,406	0,407	0,407
I_{MP} [mA]	100	90,9	87
P_{MP} [W]	41,5 x 10 ⁻³	37 x 10 ⁻³	35,6 x 10 ⁻³
FF [%]	50,0	48,3	49,1
η [%]	10,4	9,26	8,9

Tablica 1: Parametri solarnih ćelija dobiveni primjenom jedno-diodnog modela na izmjerene podatke

Efikasnost je prema jed. (3.20) proporcionalna vrijednosti P_{MP} , pa očekivano uzorak s većim P_{MP} ima ujedno i veću efikasnost. Vrijednosti efikasnosti za sve testirane uzorke su nešto niže od očekivanih 13-16% za komercijalne polikristalne solarne ćelije. Razlog vjerojatno leži u velikom postotku neosvijetljene površine koju zaklanjaju električni kontakti (Slika 17). Efikasnost solarnih ćelija čije su EVA folije modificirane Lumogen F bojama su manje od uzorka s nemodificiranom folijom. Isto je već prikazano usporednim P-V grafom (Slika 25), a brojke pokazuju smanjenje efikasnosti od 10-15% za uzorke modificirane Lumogen F bojom.

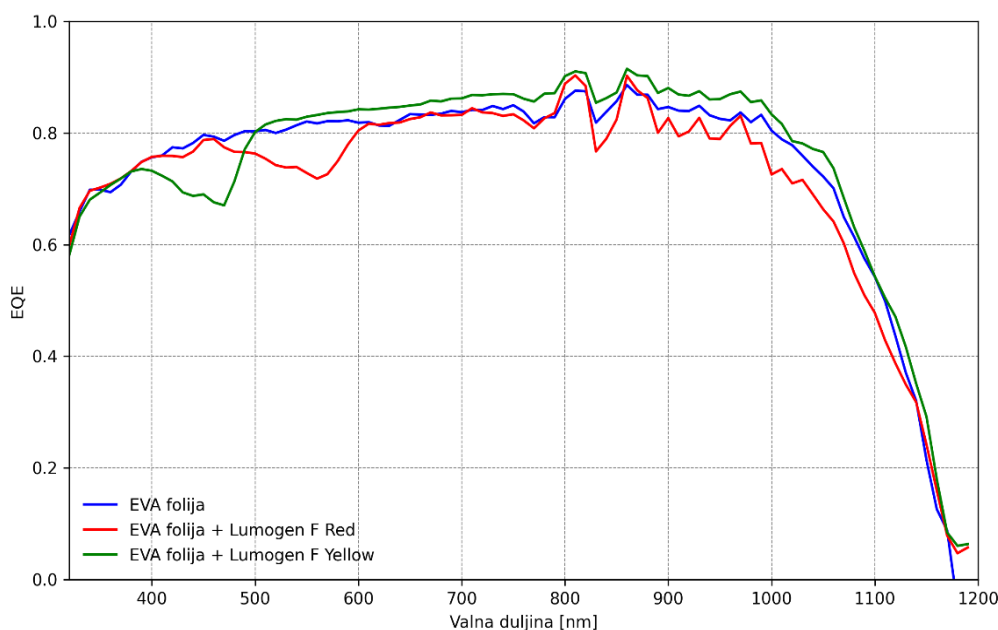
Fill faktor (FF) je najmanji za uzorak modificiran crvenom bojom. Uzrok treba tražiti u vrijednostima otpora, a uzorak modificiran crvenom bojom ima najveći R_s . Veći serijski otpor ukazuje na veću položenost krivulje u točki oko V_{oc} i objašnjava smanjeni FF.

Dobivene vrijednosti faktora idealnosti su nešto veće od teorijskog očekivanja koje je u rasponu od idealni $n=1$ za teorijski savršenu kristalnu rešetku do $n \approx 2$. Faktor idealnosti

dobiven iz prilagodbom teorijskog modela vrijednosti 2,65 ukazuje na dominaciju rekombinacije u zoni osiromašenja. Prema teoriji, I_0 bi trebala biti reda veličine nekoliko desetaka μA , što parametri dobiveni prilagodbom i pokazuju. Kvalitetnije solarna ćelija će imati manju struju I_0 , što se podudara s dobivenim vrijednostima.

5.2. Vanjska kvantna efikasnost (EQE)

Izmjereni podaci za spektralnu ovisnost vanjske kvantne efikasnosti za sva tri uzorka solarnih ćelija prikazane su na Slika 26. EQE za standardnu solarnu ćeliju s nemodificiranom EVA folijom kontinuirano raste počevši od valne duljine 320 nm dok ne dosegne maksimum na oko 800 nm, te je relativno konstanta do oko 1000 nm. Kvantna efikasnost naglo pada na valnim duljinama većim od 1000 nm. Na oko 1150 nm EQE postaje vrlo mala što je u skladu s vrijednošću širine zabranjenog područja kristalnog silicija.



Slika 26: Vanjska kvantna efikasnost (EQE) za raspon valnih duljina od 320 nm do 1200 nm

EQE za solarne ćelije s modificiranom EVA folijom ima sličnu spektralnu ovisnost u bliskom infracrvenom području dok na nižim valnim duljinama mogu se uočiti područja smanjene EQE. To se može objasniti usporedbom s izmjerenom transmisijom modificiranih EVA folija prikazanih na Slici 18. Pad EQE za uzorak s modificiranom EVA folijom

crvenom Lumogen F bojom u intervalu 450 do 600 nm se podudara sa smanjenom transmisijom uzorka modificirane EVA folije.

Solarna ćelija čija je EVA folija modificirana žutom Lumogen F bojom očekivano ima pad kvantne efikasnosti u području 400 do 500 nm, koje se podudara s područjem apsorpcije EVA folije modificirane sa žutom bojom.

Iako se očekivalo da bi primjena luminiscentnih boja mogla imati pozitivan učinak na spektralni odziv solarnih ćelija u dijelu spektra gdje luminiscentna boja ima značajnu apsorpciju, te time i na ukupnu efikasnost pretvorbe to nije potvrđeno u eksperimentu. Za to postoji nekoliko mogućih razloga. Naime, efikasnost procesa apsorpcije/emisije fotona molekula organske boje manja je od jedan. Stoga npr. ako molekule organske boje apsorbiraju 100 fotona, emitiraju samo 90 fotona što onda smanjuje i broj fotona koji dolaze do solarne ćelije i sudjeluju u generiranju foto-struje. Također molekule boje emitiraju u svim smjerovima tako da je samo dio emitiran u smjeru površine solarne ćelije. Također dio emitiranih fotona se ponovno apsorbira u molekulama boje s obzirom na to da se područja apsorpcije i emisije u jednom dijelu valnih duljina preklapaju.

6. Zaključak

U ovom diplomskom radu izmjerene su i analizirane I-V karakteristike i spektralni odziv (EQE) solarnih ćelija polikristalnog silicija. Razmatran je utjecaj modifikacije EVA folije organskim Lumogen F bojama na karakteristike solarnih ćelija polikristalnog silicija. Pripremljena su tri uzorka, jedan s ne modificiranom EVA folijom kao referentni, i dva uzorka s modificiranim EVA folijama bojama Lumogen F Red i Lumogen F Yellow. Pored zadovoljavajućeg estetskog učinka (promjena boje) analiziran je i utjecaj na pojedine parametre solarnih ćelija primjenom teorijskog modela s jednom diodom, te su dobiveni sljedeći rezultati:

- Primjenom luminiscentnih boja Lumogen F na EVA foliju moguće je modificirati standardni solarni spektar AM1.5, što dokazuju grafovi transmisije i mjerenja EQE tako modificiranih solarnih ćelija. Organska boja Lumogen F Red apsorbira za $\lambda < 600$ nm i luminiscira za $\lambda \approx 600$ nm. Boja Lumogen F Yellow apsorbira za $\lambda < 500$ nm, a emitira za $\lambda \approx 500$ nm.
- Korišteni jedno-diodni model za prilagodbu I-V krivulje i dobivanje nepoznatih parametara je pokazao zanemariva odstupanja od eksperimentalno izmjerenih podataka. Vrijednosti parametara dobivenih korištenjem navedenog modela odgovaraju teorijskim očekivanjima i usporedive su s vrijednostima za komercijalne solarne ćelije polikristalnog silicija.
- Vrijednost za faktor idealnosti $n \approx 2,65$ za testirane uzorke ukazuje na dominaciju rekombinacije u osiromašenom području i nesavršenosti kristalne rešetke korištenih uzoraka.
- Solarne ćelije s modificiranom EVA folijom imaju manju ukupnu efikasnost od ćelije s ne modificiranom EVA folijom. To je posljedica smanjenja EQE na manjim valnim duljinama, a uzrokovana je smanjenom transmisijom svjetlosti modificirane EVA folije.
- Primjenom luminiscentnih boja može se dobiti željeni estetski efekt uz smanjenje efikasnosti solarne ćelije za 10-15%.

7. Metodički dio

7.1. Uvod: Interaktivna nastava fizike

Promatranje i mjerenje (uz stvaranje teorijskih modela i njihovom provjerom kroz eksperiment) su osnovni alati svakog fizičara. Električni strujni krugovi u osnovnoj školi su izvrsna vježba zaključivanja u vođenom istraživanju kroz pokuse. Model strujnog kruga gradimo kroz niz jednostavnih pokusa koji su prilika da učenici kroz zajednički eksperimentalni rad razvijaju sposobnosti timskog rada i suradnje te međusobno poštovanje. Za takav konstruktivistički model učenja potrebno je osigurati i održavati visok stupanj učenikove intelektualne aktivnosti tijekom nastave. Stoga je važna početna motivacija za istraživanje koja se gradi u uvodnom dijelu sata. Učenici se sa strujnim krugovima svjesno ili nesvjesno susreću svakodnevno, a motivacija za proučavanje jednostavnih strujnih krugova s baterijom može biti razumijevanje korištenja uređaja poput mobitela, električnog romobila i sve popularnijih električnih automobila. Uspjeh pojedinca iz zajednice uvijek može biti nadahnuće za poticanje zainteresiranosti, te se u tom aspektu mogu spomenuti uspjesi Nikole Tesle i nedavni uspjeh mladog inovatora Mate Rimca.

Pokusi u nastavi fizike omogućuju učenicima stjecanje direktnog iskustva o fizikalnim pojavama. Izvođenje pokusa daje interesantniju dinamiku nastave te potiču učenika na intelektualni angažman. Stoga bi se svaka škola i svaki nastavnik fizike trebao zalagati za što bolju opremljenost vlastitog kabineta s potrebnim priborom za izvođenje pokusa, kako bi nastava bila što kvalitetnija i sadržajnija za učenike. Snimljeni pokusi i računalne simulacije ne mogu zamijeniti izvođenje pokusa, jer se time gubi iskustveni faktor pri opažanju pojave. Pokusi se prema ulozi mogu podijeliti na: opservacijski, istraživački i aplikacijski. Istraživački pokus se koristi za istraživanje pojave ili testiranje hipoteze i najčešće ga izvode učenici u manjim grupama [34].

Čest problem kod susreta sa strujom je tzv. „potrošački“ model strujnog kruga. Ideja trošenja je vrlo dominantna i svoj korijen vuče iz svakodnevnog slenga, gdje učenik čuje da se struja troši. Na potrošački model se nadovezuje i problem sekvencijalnog zaključivanja o strujnom krugu. Učenik često prolazak struje kroz strujni krug od baterije do prve zapreke (trošila) doživljava kao stanice kroz čiji prolazak se vrijednost struje smanjuje. Isto vlada

alternativna koncepcija da promjena u strujnom krugu utječe samo na elemente koji se nalaze iza promjene („nizvodno“). Navedeni intuitivni model je vrlo teško ispraviti, ali počinje jednostavnom činjenicom da je struja u serijskom strujnom krugu svugdje jednaka. Ideju trošenja struje je potrebno korigirati zamjenom koncepata da je struja samo „dostavljač“ energije, a energija se u trošilu pretvara iz električne u druge oblike [35].

Tradicionalni predavački stil nastave s pukim iznošenjem činjenica bez iskustvenog faktora nije dovoljan za korekciju potrošačkog modela. Najbolji pristup za korekciju je istraživački usmjerena nastava u kojem razvijamo sposobnosti znanstvenog i kritičkog zaključivanja učenika. Sat možemo otvoriti razrednom raspravom uvodnog problema vrijednosti struje prije i nakon žaruljice. Kroz vođenu raspravu nastavnika i učenika, učenici predstavljaju svoju hipotezu i ideju kako postavljenu hipotezu testirati pokusom. Izvođenje pokusa je idealno u grupama veličine od 2 do 4 učenika. U grupama većim od 4 često dolazi do otežane međusobne komunikacije, pojave da jedan ili dva učenika preuzmu inicijativu u slaganju strujnog kruga, dok su ostali članovi grupe pasivni ili nezainteresirani. Uloga nastavnika je poticati uključenost svih učenika u izvođenje pokusa, jer samo aktivnim sudjelovanjem može doći do internaliziranja opaženog. Nakon svakog izvedenog pokusa potrebno je provesti raspravu o dobivenim rezultatima i iz njih izvući zaključke i univerzalne zakone koje učenici zapisuju u bilježnice [36].

Drugi koncept koji je potrebno usvojiti prilikom mjerenja struje u serijskom strujnom krugu je povezivanje sjaja žaruljica s vrijednosti struje. Žaruljica predstavlja prepreku (otpor) struji, te se spajanjem više žaruljica (otpora) ona smanjuje. Postavljanjem hipoteze i njezinog testiranja mjerenjem struje u serijskom strujnom krugu predstavlja proširenje prvog usvojenog koncepta (da je struja prije i poslije žaruljice jednaka) te nadograđuje općim zaključkom da je struja u serijskom strujnom krugu svugdje uvijek jednaka. Opažanjem i ciljanim pitanjima učenik također povezuje sjaj žaruljice s vrijednostima izmjerene struje.

Usvojenost novog koncepta najčešće provjeravamo u završnom dijelu sata, koji služi za učeničko utvrđivanje gradiva. Konceptualnim pitanjima s karticama može se provjeriti usvojenost znanja i razumijevanje naučenih koncepata primjenom na jednostavni ili prošireni problem.

7.2. Priprema za sat

Učenici su se na prijašnjim nastavnim satovima upoznali s modelom jednostavnog strujnog kruga i činjenicom da je električna struja usmjereno gibanje naboja. U tijeku ovog sata, učenici će se upoznati s uređajem za mjerenje struje - ampermetrom, njegovom oznakom u strujnom krugu i mjernom jedinicom za jakost struje. Samostalno će uz pomoć nastavnika spajati serijski strujni krug prema shemi, mjeriti struju ampermetrom te iz opažanja i mjerenja izvesti zaključke.

NASTAVNA PRIPREMA IZ FIZIKE

ŠKOLA: Osnovna škola

RAZRED: 8. raz

NASTAVNA JEDINICA: Mjerenje električne struje u serijski spojenom strujnom krugu

PREDVIĐEN BROJ SATI: 1

PREDMETNI ISHODI:

FIZ OŠ D.8.3. Analizira električnu struju i napon te primjenjuje koncepte rada i snage. [39]

Razrada ishoda:

- Navodi mjernu jedinicu za jakost el. struje i uređaj za mjerenje
- Opisuje način spajanja ampermetra u strujni krug
- Serijski spaja ampermetar u strujni krug te pomoću njega mjeri jakost struje
- Povezuje sjaj žaruljice s jačinom električne struje koja prolazi kroz nju
- Zaključuje da se u serijskom spoju struja smanjuje s povećanjem broja žaruljica (trošila)

MEĐUPREDMETNI ISHODI (OČEKIVANJA MEĐUPREDMETNIH TEMA):

UKU A.3.2. Primjena strategija učenja i rješavanje problema

Učenik se koristi različitim strategijama učenja i primjenjuje ih u ostvarivanju ciljeva učenja i rješavanju problema u svim područjima učenja uz povremeno praćenje učitelja.

UKU A.3.3. Kreativno mišljenje

Učenik samostalno oblikuje svoje ideje i kreativno pristupa rješavanju problema.

UKU A.3.4. Kritičko mišljenje

Učenik kritički promišlja i vrednuje ideje uz podršku učitelja.

VRSTA NASTAVE: INTERAKTIVNA ISTRAŽIVAČKI USMJERENA NASTAVA

NASTAVNE METODE:

- Demonstracija pokusa
- Učeničko izvođenje pokusa / mjerenja u skupinama
- Metoda razgovora - usmjerena rasprava
- Kooperativno rješavanje zadataka u skupinama
- Konceptualna pitanja s karticama
- Metoda pisanja /crtanja

OBLICI RADA:

- Frontalni
- Rad u skupinama

KORELACIJA S DRUGIM PREDMETIMA:

Tehnička kultura, Matematika

NASTAVNA POMAGALA I SREDSTVA:

Za svaku grupu: izvor el. energije (plosnata baterija), tri žaruljice u grlu, ampermetar, vodiči, sklopka, printani listići za grupni rad

Ostalo: ploča, kreda, računalo, projektor

TIJEK NASTAVNOG SATA

1. Uvodni dio (10 min)

UVODNI PROBLEM: Je li jakost struje u strujnom krugu jednaka prije i poslije žaruljice?

Cilj je potaknuti otvorenu raspravu. Očekujem različite odgovore, od toga da u jednostavnom strujnom krugu teče samo jedna električna struja do konceptualne poteškoće koja svoj korijen vuče iz iskustva u svakodnevnom govoru da „upaljena električna žarulja troši struju“. Iako su ovo već trebali usvojiti na prethodnom satu, neki će učenici vjerojatno i dalje braniti tvrdnju da se struja u žaruljici troši, pa se time i smanjuje prolaskom kroz žaruljicu.

- *Kako bismo mogli provjeriti je li struja jednaka prije i poslije žaruljice?*

Učenici bi trebali doći na ideju mjerenja jakosti struje prije i poslije žaruljice u strujnom krugu. Nastavnik uvodi novi uređaj za mjerenje, ampermetar koji mjeri jakost električne struje I . Mjerna jedinica je amper s oznakom A. Naglašava da se ampermetar u strujni krug spaja serijski.

To se može demonstrirati pomoću četiri (ili više) učenika/pomoćnika. Tri učenika se međusobno prime za ruke. Učenici svojim tijelima predstavljaju žarulje, a njihove ruke spojene vodiče. Nastavnik može biti baterija. Svi međusobno kada se drže za ruke čine zatvoreni krug. Četvrti učenik koji predstavlja ampermetar, odvoji dva učenika (prekine krug) i ubaci se između njih primivši ih za ruke (ponovno zatvori krug).

Nakon fizičke demonstracije priključenja ampermetra, nastavnik na ploči crta simbol za ampermetar i primjer izmjerene jakosti npr. $I = 1 \text{ A}$. Spominje da ampermetar može biti digitalni i analogni (povući analogiju s ručnim satovima).

Nastavnik na ploču zapisuje prvi dio naslova „Mjerenje električne struje“.

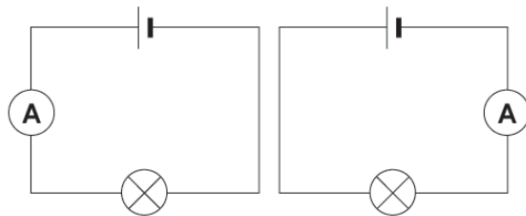
Učenici dobivaju uputu da se ampermetar prije spajanja u strujni krug treba namjestiti na najveću mjernu skalu i nikako ga spajati u strujni krug bez trošila (kako ne bi došlo do oštećenja samog uređaja). Također, treba paziti da je pozitivni ulaz ampermetra spojen s pozitivnim polom baterije i negativni ulaz s negativnim polom ako rade s analognim

uređajem. Ukoliko se radi o analognim uređajima, pokazuje kako točno očitati mjernu skalu na ampermetru.

Učenici u paru ili u grupi (ovisno o količini opreme) izvode mjerenja s priborom koji se nalazi na klupi. Pribor za svaku grupu: baterije, žaruljice, vodiči i barem jedan ampermetar. Ako su dostupna dva ampermetra po grupi, onda ih učenici spajaju istovremeno.

Grupni zadatak 1: (Radni list 1, u Prilogu)

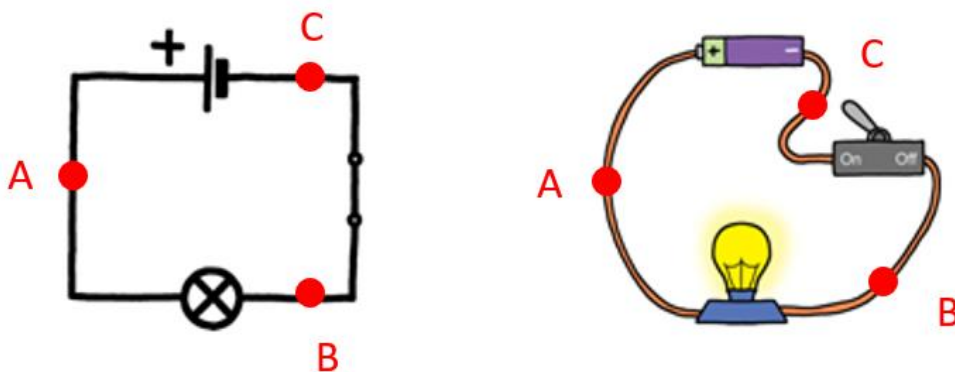
Spoji strujni krug prema shemi na slici a) s ampermetrom ispred žaruljice i b) s ampermetrom iza žaruljice te zapiši izmjerene jakosti električne struje.



- a) Izmjerena jakost struje $I_1 = \text{___ A}$
- b) Izmjerena jakost struje $I_2 = \text{___ A}$

Usporedi izmjerene vrijednosti električne struje. Kako objašnjavaš rezultat?

- ➔ Jakost električne struje je jednaka u cijelom strujnom krugu jer se radi samo o jednoj struji koja teče od baterije do žaruljice i nazad do baterije. Struja se ne troši prolaskom kroz žaruljicu!



Usporedi vrijednosti električne struje u točkama A, B i C. Zaokruži broj ispred točnog odgovora!

a) $I_A > I_B > I_C$

b) $I_B = I_C > I_A$

c) $I_A = I_B = I_C$

→ Ispravan odgovor je c)

Objasni svoj odgovor u prethodnom pitanju.

→ Jakost struje je jednaka u cijelom strujnom krugu jer se radi o samo jednoj struji koja teče od baterije do žaruljice i nazad do baterije. Struja se ne troši u žaruljici.

Tijekom izvođenja zadatka, nastavnik obilazi grupe i provjerava jesu li dobro spojili strujni krug i znaju li očitati mjernu skalu ampermetra.

Provjera rezultata nakon izvedene vježbe:

- Troši li se električna struja prolaskom kroz žaruljicu?

Ne troši se. Razjasniti da ono što se zapravo „troši“ je energija izvora, tj. u žaruljici se električna energija pretvara u toplinsku i svjetlosnu.

2. Središnji dio (30 min)

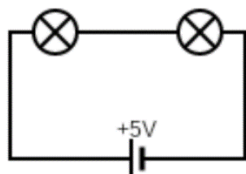
ISTRAŽIVAČKO PITANJE: Hoće li se sjaj prve žaruljice promijeniti ako u strujni krug u seriju dodamo još jednu ili više jednakih žaruljica?

Učenici usmeno u argumentiranoj raspravi iznose svoje pretpostavke. Očekivani odgovor je da će sjaj ostati isti (iskustveno iz kuće/stana, kada upalimo više svjetala) ili se smanjiti. Cilj je potaknuti znatiželju i želju za istraživanjem. Svoje postavljene hipoteze testiraju izvođenjem istraživačkog pokusa.

Grupni zadatak 2: (Radni list 2, u Prilogu)

1. Nacrtaj shemu zatvorenog strujnog kruga s dvije žaruljice spojene u seriju. Usporedi svoju shemu s ostalima u grupi.

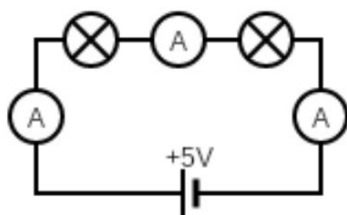
➔ Učenici svatko za sebe crta shemu i međusobno u grupi uspoređuju nacrtano.



2. Spoji strujni krug prema shemi iz zadatka 1. Kakav je sjaj žaruljice kada su spojene dvije žaruljice u seriji, a kakav kada je spojena samo jedna žaruljica?

➔ Primjećuju da serijski spojene žaruljice pojedinačno svijetle slabije nego kada je bila spojena samo jedna.

3. Na shemu iz 1. zadatka označi mjesta na koja možemo mjeriti struju.



4. Spoji strujni krug prema shemi dijela zadatka i očitaj izmjerenu vrijednost struje.

$$I = \text{_____ A}$$

5. Kakva je po iznosu izmjerena struja u strujnom krugu s dvije žaruljice u odnosu na onu s jednom u prvom zadatku (manja, jednaka, veća)?

➔ Struja s dvije žaruljice spojene u seriju je manja.

6. Što će se dogoditi ako u strujni krug serijski spojimo još jednu žaruljicu? Zapiši svoju pretpostavku. Provjeri svoju pretpostavku s ostalim članovima svog tima.

7. U postojeći strujni krug serijski spoji još jednu žaruljicu. Kakav je sada sjaj žaruljica u odnosu na prijašnje slučajeve? Kakva je struja?

→ Sjaj žaruljica je manji, izmjerena struja je manja.

Na ploču dodajemo u naslov nastavak „u serijski spojenom strujnom krugu“.

Nakon izvedenih mjerenja komentiramo dobivene rezultate.

- *Mijenja li se iznos struje prolaskom kroz žaruljicu?*

Trebali su uočiti da u serijskom spoju trošila kroz svaki dio strujnog kruga protječe jednaka električna struja.

- *Kako sjaj priključenih žaruljica u seriju ovisi o broju žaruljica?*

Sjaj žaruljice ovisi o broju serijski priključenih žaruljica. Sjaj se smanjuje što je broj serijski spojenih žaruljica veći.

- *Kako struja ovisi o broju žaruljica u seriji?*

Električna struja u strujnom krugu se smanjuje kako povećavamo broj spojenih žaruljica. (zapisati i istaknuti kao zaključak na ploču)

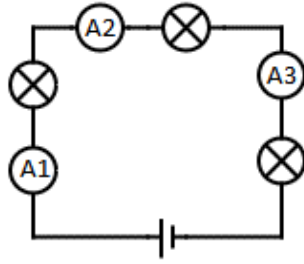
- *Kako sjaj žaruljice ovisi o izmjerenoj struji?*

Sjaj žaruljica je proporcionalan iznosu struje koja protječe tim strujnim krugom. (zapisati i istaknuti)

3. Završni dio (5 min)

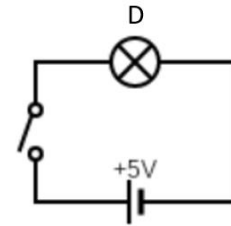
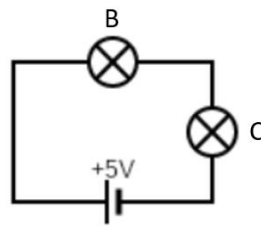
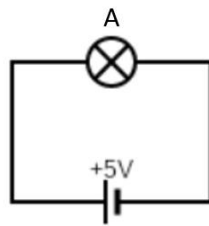
(pitanja s karticama, može se staviti i na projektor)

Pitanje 1. Ako kroz ampermetar A_2 mjerimo struju 0,2 A, koliku vrijednost električne struje pokazuju ampermetri A_1 i A_3 ? Objasni svoj odgovor.



- a) Ampermetar A1 pokazuje više, a A3 isto kao A3.
- b) Svi ampermetri mjere istu struju.
- c) Ampermetar A1 pokazuje više, a A3 manje nego A2.

Pitanje 2. Zaokruži točan poredak sjaja žaruljica počevši od najsjajnije u prikazanim strujnim krugovima. Objasni svoj odgovor.

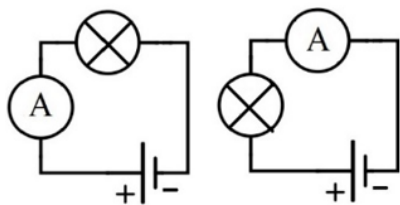


- a) $A > B > C > D$
- b) $D > B = C > A$
- c) $A = D > B = C$
- d) $A > B = C > D$

PLAN PLOČE:

Mjerenje električne struje u serijskom strujnom krugu |

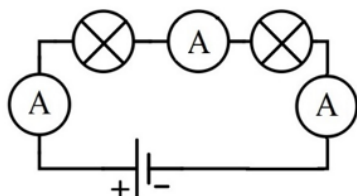
Grupni zadatak 1: mjerenje struje



Mjerni uređaj: Ampermetar

Struja se ne troši prolaskom kroz žaruljicu!

Grupni zadatak 2: struja u serijskom spoju



U serijskom strujnom krugu:

- el. struja se smanjuje s povećanjem broja spojenih žaruljica,
- sjaj žaruljice je proporcionalan iznosu struje.

Dodaci

A Skripta za prilagodbu rezultata teorijskom modelu

```
# Koristeni moduli i paketi
# pvlib v0.9.0
import pvlib
from numpy import *
import matplotlib.pyplot as plt
import pandas as pd

sed = loadtxt('IV_yellow.dat', unpack = True) # Promjeni ime datoteke
print(sed)

Vall = asarray(sed[0])
Iall = asarray(sed[1])
[Vall,Iall]

plt.plot(Vall,Iall)

# najdi parametre I_ph, I_0, nVt, Rs, Rp
fit_rez = pvlib.ivtools.sde.fit_sandia_simple(voltage=Vall, current=Iall)
I_ph, I_0, Rs, Rp, nNsVth = fit_rez
n = nNsVth/0.02585

# primjena modela
rez=pvsystem.singlediode(photocurrent=fit_rez[0], saturation_current=fit_rez[1],
resistance_series=fit_rez[2], resistance_shunt=fit_rez[3], nNsVth=fit_rez[4], ivcurve_pnts=100)
rez
```

```

# drawing I-V graph
plt.plot(Vall, Iall, 'bo', label="Izmjereno")
plt.plot(rez['v'], rez['i'], 'r-', label="Fitano")
plt.xlim(0, 0.62)
plt.ylim(0, 140)
plt.ylabel('I [A]')
plt.xlabel('U [V]')
plt.legend(loc='lower left', frameon=False)
plt.savefig('IV_fit_yellow.png') # spremanje I-V grafa
plt.show()

```

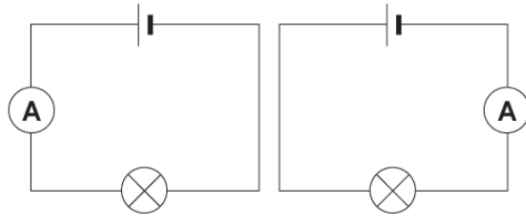
```

# drawing P-V graph
plt.plot(Vall, Vall*Iall, 'bo', label="Izmjereno")
plt.plot(rez['v'], rez['v']*rez['i'], 'r-', label="Fitano")
plt.xlim(0, 0.62)
plt.ylim(0, 0.042)
plt.ylabel('P [W]')
plt.xlabel('U [V]')
plt.legend(loc='upper left', frameon=False)
plt.savefig('PV_fit_zuta.png') # spremanje P-V grafa
plt.show()

```

B Radni list 1: Mjerenje struje prije i poslije žaruljice

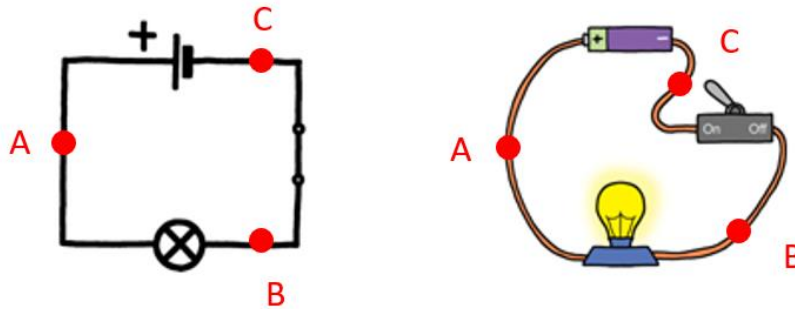
1. Spoji strujni krug prema shemi na slici a) s ampermetrom ispred žaruljice i b) s ampermetrom iza žaruljice te zapiši izmjerene jakosti električne struje.



- a) Izmjerena jakost struje $I_1 = \text{___ A}$
b) Izmjerena jakost struje $I_2 = \text{___ A}$

Usporedi izmjerene vrijednosti električne struje. Kako objašnjavaš rezultat?

2. Usporedi vrijednosti električne struje u točkama A, B i C. Zaokruži slovo ispred točnog odgovora.



- a) $I_A > I_B > I_C$
b) $I_B = I_C > I_A$
c) $I_A = I_B = I_C$

Objasni svoj odgovor u prethodnom pitanju.

C Radni list 2. Mjerenje struje u serijskom strujnom krugu

1. Nacrtaj shemu zatvorenog strujnog kruga s dvije žaruljice spojene u seriju. Usporedi svoju shemu s ostalima u grupi.

2. Spoji strujni krug prema shemi iz zadatka 1. Kakav je sjaj žaruljice kada su spojene dvije žaruljice u seriji, a kakav kada je spojena samo jedna žaruljica?

Samo jedna: _____

Dvije žaruljice: _____

3. Na shemu iz 1. zadatka označi mjesta na koja možemo mjeriti struju.

4. Spoji strujni krug prema shemi dijela zadatka i očitaj izmjerenu vrijednost struje.

$I =$ _____

5. Kakva je po iznosu izmjerena struja u strujnom krugu s dvije žaruljice u odnosu na onu s jednom u prvom zadatku (manja, jednaka, veća)?

6. Što će se dogoditi ako u strujni krug serijski spojimo još jednu žaruljicu? Zapiši svoju pretpostavku. Provjeri svoju pretpostavku s ostalim članovima svog tima.

7. U postojeći strujni krug serijski spoji još jednu žaruljicu. Kakav je sada sjaj žaruljica u odnosu na prijašnje slučajeve? Kakva je struja?

Literatura

- [1] Goetzberger, A.; Hoffmann, V. U. Photovoltaic Solar Energy Generation. 1st ed. Berlin : Springer, 2005.
- [2] Goetzberger, A.; Knobloch, J.; Voß, B. Crystalline Silicon Solar Cells. 1st ed. Chichester : John Wiley & Sons, 1998.
- [3] Würfel, P. Physics of Solar Cells : From Principles to New Concepts. 1st ed. Weinheim : Willy-VCH Verlag, KGaA, 2005
- [4] Sunce, Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje. Leksikografski zavod Miroslav Krleža, <https://enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=58774>, 23.2.2021.
- [5] Luceño-Sánchez, J.A.; Díez-Pascual, A.M.; Capilla, R.P. Materials for Photovoltaics: State of Art and Recent Developments. // International Journal of Molecular Sciences (2019), <https://www.mdpi.com/1422-0067/20/4/976> , 25.8.2021.
- [6] Orenski, G.; Moulay, F.; Khan, A.; Jaunich, M.; Agroui, K.; Arfi, W.; Baretta, C.; Optical and thermal analysis of PVB encapsulant polymer functionalized with luminescent organic dyes. // New Concepts in Solar and Thermal Radiation Conversion and Reliability (September 2018), str. 7; San Diego, SAD
- [7] Gracin, D., Mintas, H., Juraić K. Modifikacija optičkih svojstava EVA folije primjenom luminiscentne organske boje Lumogen F; projektni izvještaj
- [8] Shockley, W.; Queisser, H. Detailed Balance Limit of Efficiency of p-n Junction Solar Cells // Journal of Applied Physics, Vol. 32, (1961) str. 510-519.
- [9] Energysage, Monocrystalline and polycrystalline solar panels, <https://www.energysage.com/solar/101/monocrystalline-vs-polycrystalline-solar-panels/> , 23.2.2021.
- [10] Wikipedia.org, slika Spektar zračenja Sunca, https://en.wikipedia.org/wiki/Sunlight#/media/File:Solar_spectrum_en.svg , 22.2.2021.
- [11] Liboff, R. L. Introductory Quantum Mechanics. SAD : Addison-Wesley Publishing Company, 1980
- [12] Rezk, H.; Babu, T. S.; Al-Dhaifallah, M.; Ziedan, H. A. A robust parameter estimation approach based on stochastic fractal search optimization algorithm applied to solar PV parameters // Energy Reports Vol. 7 (2021), str. 620-640.

- [13] Sabas, M. History of Solar Power, (18.2.2016.), Institute for energy research; <https://www.instituteforenergyresearch.org/renewable/solar/history-of-solar-power/> , 14.3.2021.
- [14] Fraas, L. M. Low-Cost Solar Electric Power. SAD : Springer, 2014
- [15] Klabučar, D. Kvantni start: oprezni Planck i radikalni Einsten. Šibenik : EXP EDIT, 2005
- [16] U.S. Department of Energy: Energy Efficiency and Renewable Energy; The History of Solar, https://www1.eere.energy.gov/solar/pdfs/solar_timeline.pdf , 14.3.2021.
- [17] Wikipedia.org, slika Fotoelektrične pretvorbe, https://hr.wikipedia.org/wiki/Solarna_fotonaponska_energija#/media/Datoteka:Fotoelektricna_konverzija_PN_spoju.jpg, 10.8.2021.
- [18] Office of Energy Efficiency & Renewable energy, Cadmium Telluride, <https://www.energy.gov/eere/solar/cadmium-telluride>, 2.9.2021.
- [19] Marinović, A., Mjerenje spektralne distribucije dielektrične funkcije nanokristalnog silicija. Diplomski rad. Zagreb : Prirodoslovno-matematički fakultet, 2010.
- [20] PV Education, Quantum Efficiency, <https://www.pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/quantum-efficiency>, 10.8.2021.
- [21] The National Renewable Energy Laboratory (NREL), <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html/>, 17.9.2021.
- [22] PV Education (više podstranica), <https://www.pveducation.org/> , 30.8.2021.
- [23] Diantoro, M.; Suprayogi, T.; Hidayat, A.; Taufiq, A.; Fuad, A.; Suryana, R. Shockley's Equation Fit Analyses for Solar Cell Parameters from I-V Curves : International Journal of Photoenergy, 1.4.2018, <https://www.hindawi.com/journals/ijp/2018/9214820/>, 30.8.2021.
- [24] Elkhoy, A.; Abou El-Ela, A. A. Optimal parameters estimation and modelling of photovoltaic modules using analytical method. // Heliyon. (srpanj 2019), <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6667704/> , 31.8.2021.
- [25] Daqin, C.; Yuansheng, W.; Maochun, H. Lanthanide nanomaterials with photon management characteristics for photovoltaic application. // Nano Energy (2012), str. 73-75. <http://ir.nsf.gov.cn/paperDownload/1000003577644.pdf>, 25.8.2021.

- [26] Solvis.hr, slika dijelovi solarnog modula, <https://solvis.hr/wp-content/uploads/2019/02/modul-1.png>, 2.9.2021.
- [27] Jones, C. B.; Hansen, C.; Single Diode Parameter Extraction from In-Field Photovoltaic I-V Curves on a Single Board Computer // Sandia National Laboratories (2019), Albuquerque, SAD
- [28] Hansen, C.; Parameter Estimation for Single Diode Models of Photovoltaic Modules : Sandia National Laboratories (ožujak 2015), str. 11-20, Albuquerque, SAD
- [29] Github repozitorij pplib biblioteke, <https://github.com/pplib>
- [30] Upute za instalaciju pplib biblioteke, <https://pplib-python.readthedocs.io/en/stable/installation.html>
- [31] Ratkaj, B.; Kurtović, R.; Kovačiček, A.; Krnjaić, Z. : FIZIKA 8, udžbenik za osmi razred osnovne škole, Profil, Zagreb, 2013.
- [32] Ratkaj, B; Kurtović, R; Kovačiček, A.; Krnjaić, Z. : Fizika 8, radna bilježnica, Profil, Zagreb, 2007.
- [33] Beštak Kadić, Z.; Brković, N.; Pećina, P. : Fizika 8, Alfa, Zagreb, 2014.
- [34] Planinić, M. Predavanja metodike nastave fizike: Kakva je uloga pokusa u istraživački usmjerenoj nastavi fizike?
- [35] Planinić, M. Predavanja metodike nastave fizike: OSNOVNI POJMOVI ELEKTROSTATIKE I STRUJNI KRUGOVI
- [36] R. Krsnik; Suvremene ideje u metodici nastave fizike; str 248
- [37] Franić, Nives. Pokusi sa strujnim krugovima u osnovnoj školi. Diplomski rad. Zagreb : Prirodoslovno-matematički fakultet, 2017.
- [38] Edutorij e-škole, Lekcija 2.1 Mjerenje električne struje, https://edutorij.e-škole.hr/share/proxy/alfresco-noauth/edutorij/api/proxy-guest/dd07b74e-e624-41d1-ae89-e904e72b97a5/html/1019_Mjerenje_elektricne_struje.html, 12.6.2021.
- [39] Kurikulum nastavnog predmeta Fizika, https://skolazazivot.hr/wp-content/uploads/2020/06/FIZ_kurikulum.pdf, 12.6.2021.
- [40] Sciencetech; Photovoltaic Testing System – Spectral Response and Quantum Efficiency, <https://sestar.irb.hr/images/instrumenti/documents/8.pdf>, 7.9.2021.

[41] Circuit diagram, online alat za izradu strujnih krugova, <https://www.circuit-diagram.org/editor/>