

Modeliranje perovskitnih solarnih ćelija

Bagladi, Lara

Master's thesis / Diplomski rad

2020

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Chemical Engineering and Technology / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:149:904417>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-03**



Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Chemical Engineering and Technology University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE
SVEUČILIŠNI DIPLOMSKI STUDIJ

Lara Bagladi

DIPLOMSKI RAD

Zagreb, prosinac 2020.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I
TEHNOLOGIJE POVJERENSTVO ZA DIPLOMSKE
ISPITE

Kandidatkinja Lara Bagladi

Predala je izrađen diplomski rad dana: 17. prosinca 2020.

Povjerenstvo u sastavu:

Prof. dr. sc. Jelena Macan, Fakultet kemijskog
inženjerstva i tehnologije, Sveučilište u Zagrebu
Izv. prof. dr. sc. Helena Otmačić Ćurković, Fakultet
kemijskog inženjerstva i tehnologije, Sveučilište u
Zagrebu Doc. dr. sc. Denis Stanić, Sveučilište J. J.
Strossmayera u Osijeku
Prof. dr. sc. Marko Rogošić, Fakultet kemijskog
inženjerstva i tehnologije, Sveučilište u Zagrebu
(zamjena)

povoljno je ocijenilo diplomski rad i odobrilo obranu
diplomskog rada pred povjerenstvom u istom sastavu.

Diplomski ispit održat će se dana: 22. prosinca 2020.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE
SVEUČILIŠNI DIPLOMSKI STUDIJ

Lara Bagladi

MODELIRANJE PEROVSKITNIH SOLARNIH ĆELIJA
MODELLING OF PEROVSKITE SOLAR CELLS

DIPLOMSKI RAD

Mentor: Prof. dr. sc. Jelena Macan

Komentor: Doc. dr. sc. Denis Stanić

Članovi ispitnog povjerenstva:

Prof. dr. sc. Jelena Macan

Izv. prof. dr. sc. Helena Otmačić Ćurković

Doc. dr. sc. Denis Stanić

Zagreb, prosinac 2020.

ZAHVALE

Ovim se putem želim zahvaliti Doc. dr. sc. Denisu Staniću i Prof. dr. sc. Jeleni Macan na sjajnom mentorstvu te znatnom uloženom trudu i vremenu.

Ovaj rad je izrađen u sklopu projekta Hrvatske zaklade za znanost IP2018-01-5246 Nanokompoziti s perovskitima za fotovoltaike, fotokatalizu i senzoriku.

SAŽETAK

Perovskitne solarne ćelije nameću se kao jedno od glavnih rješenja u području iskorištavanja solarne energije. U proteklom je desetljeću njihova efikasnost konverzije energije dostigla vrijednosti od preko 20 %, uz veliki potencijal za daljnju optimizaciju.

Numeričke simulacije jedna su od ključnih tehnika za razumijevanje operativnih mehanizama solarnih ćelija te predviđanje njihove maksimalne efikasnosti.

U ovom radu prikazan je model perovskitne solarne ćelije sastavljene od slojeva indijeva kositrova oksida, TiO_2 , formamidinijeva olovnog oksida, SpiroMeOTAD i zlata koristeći SCAPS-1D program. Model je bio korišten u svrhu određivanja utjecaja parametara solarne ćelije na njezina svojstva koja uključuju efikasnost (PCE), faktor popunjavanja (FF), struju kratkog spoja (J_{sc}) te napon otvorenog kruga (V_{oc}). Rezultati dobiveni simulacijama pokazali su da svojstvima solarne ćelije većinskim dijelom pridonose debljina sloja perovskita, koncentracija akceptora (N_A), koncentracija defekata (N_t) te u manjoj mjeri koncentracija donora (N_D).

Ključne riječi: perovskitna solarna ćelija, numeričko modeliranje, SCAPS-1D

ABSTRACT

Perovskite solar cells stand out as a leading solution in the solar energy device area. In the last decade the energy conversion efficiency has reached values of over 20 % with great potential for future optimization. Numerical simulations are a crucial technique for understanding the operational mechanisms for solar cells and for predicting the maximum efficiency.

In this paper, a model of a perovskite solar cell composed of layers of indium titanium oxide, TiO_2 , formamidinium lead iodide, SpiroMeOTAD and gold was shown by using the SCAPS-1D software. The influence of solar cell parameters on its properties, such as efficiency (PCE), fill factor (FF), short circuit current (J_{sc}) and open circuit voltage (V_{oc}) was investigated. The simulation results have shown that the perovskite layer thickness, acceptor concentration (N_A), defect concentration (N_t) and in a smaller way donor concentration (N_D) are the parameters that mainly influence the solar cell properties.

Key words: perovskite solar cell, modelling, SCAPS-1D

Sadržaj

| | |
|---|----|
| 1. UVOD..... | 1 |
| 2. OPĆI DIO | 2 |
| 2.1. Princip rada solarne ćelije | 3 |
| 2.2. Izrada uređaja | 6 |
| 2.2.1. Klasična n-i-p struktura | 6 |
| 2.2.2. Obrnuta p-i-n struktura..... | 7 |
| 2.3. Parametri solarne ćelije i ekvivalentni strujni krug | 8 |
| 2.3.1. Gustoća struje kratkog spoja..... | 9 |
| 2.3.2. Napon otvorenog kruga | 9 |
| 2.3.3. Faktor popunjavanja..... | 9 |
| 2.3.4. Efikasnost konverzije | 11 |
| 2.3.6. Ekvivalentni strujni krug | 12 |
| 3. MODELIRANJE SOLARNE ĆELIJE | 15 |
| 3.1. SCAPS | 15 |
| 3.2. Parametri solarne ćelije korišteni u modeliranju | 15 |
| 4. REZULTATI I RASPRAVA | 19 |
| 4.1. Utjecaj promjene debljine perovskitnog sloja i promjene koncentracije defekata | 19 |
| 4.2. Utjecaj debljine HTL i ETL slojeva..... | 21 |
| 4.3. Utjecaj dopiranja ETL i HTL slojeva..... | 24 |
| 4.4. Strujno-naponska karakteristika solarne ćelije | 27 |
| 5. ZAKLJUČAK | 29 |
| 6. POPIS LITERATURE..... | 30 |
| 7. ŽIVOTOPIS..... | 32 |

1. UVOD

Implementacija održivog sustava opskrbe energijom jedno je od najvećih pitanja današnjice u cilju prevencije daljnjih klimatskih promjena. Solarna energija ima potencijal biti ključna u rješavanju navedenog problema radi svoje velike dostupnosti i raznolike mogućnosti primjene. Sustavi solarne energije lako se integriraju u postojeće strukture te značajno doprinose njezinom impresivnom rastu u upotrebi.

Područje fotonaponskih uređaja vrlo je široko te se odnosi na optiku, materijale, fiziku izrade solarnih ćelija te električna svojstva koja su potrebna za samostalne, povezane mrežne sustave [1]. Prvi praktični fotonaponski uređaj (PV) baziran na kristalnom siliciju demonstriran je 1954. u Bell Laboratories. Nakon desetljeća unaprjeđivanja, tehnologija koja koristi kristalni silicij dominira globalnim tržištem PV-a, dok je mali dio raspoređen između novijih tehnologija koje uključuju polikristalne tanke filmove, amorfne poluvodiče, bojom senzibilizirane solarne ćelije (DSSC), organske solarne ćelije te solarne ćelije bazirane na kvantnim točkama. Kako bi se zadovoljili zahtjevi tržišta, alternativne tehnologije moraju posjedovati poželjnu kombinaciju velike učinkovitosti pretvorbe energije (PCE), niske cijene izrade i dobre stabilnosti. Istraživanja u proteklih godinama su pokazala da organometalni halidni perovskiti (OMHP) imaju potencijal zadovoljiti navedene zahtjeve [2].

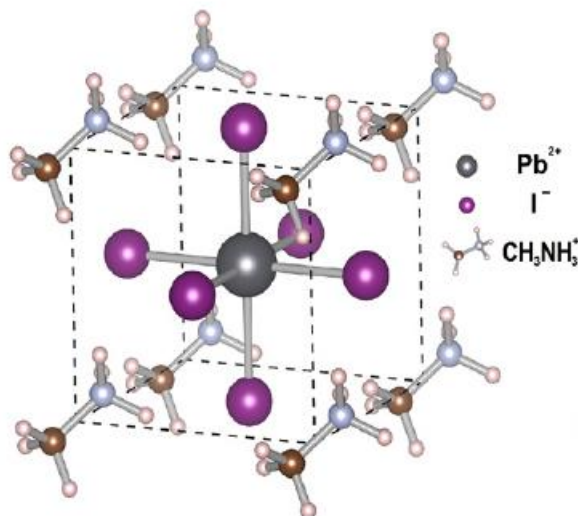
Pojava perovskitnih solarnih ćelija revolucionirala je područje ne samo zbog njihove visoke učinkovitosti, već i zbog fleksibilnosti u izradi ćelije. Superiore performanse perovskitnih solarnih ćelija daju naslutiti da perovskitni materijali posjeduju jedinstvena intrinzična svojstva [3].

Zahvaljujući intenzivnom istraživanju proteklih godina, perovskitne solarne ćelije su trenutno usporedive, ako ne i bolje od drugih PV tehnologija, a niska cijena izrade im daje potencijal za dominaciju na tržištu u bliskoj budućnosti [2].

2. OPĆI DIO

Termin perovskit odnosi se kristalnu strukturu kalcijevog titanata (CaTiO_3). U području optoelektronike, organometalni halidni perovskiti su grupa materijala koji posjeduju formulu AMX_3 , gdje je A organski kation poput formamidinijevog ($\text{NH}_2\text{CHNH}_2^+$) ili metilamonijevog (CH_3NH_3^+), M je dvovalentni kation (Pb^{2+} , Sn^{2+}), a X jednovalentni halidni anion (I^- , Br^- , Cl^-).

Na slici 1. je prikazana kristalna struktura $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ (MAPbI_3) perovskita.



Slika 1. Kristalna struktura $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ perovskita
[2]

U jediničnoj ćeliji OMHP-a, osam A^+ kationa locirano je na vrhovima kubične ćelije, M^{2+} kation lociran je u centru ćelije, dok su anioni oktaedralno koordinirani na plohama ćelije [2,3]. Glavni cilj ranih istraživanja OMHP-a bio je razvoj novih materijala za primjenu u tranzistorima i diodama koje emitiraju svjetlost (LED). Prva poznata upotreba je kao boja u DSSC, gdje je dobivena učinkovitost od 3 % zbog korištenja tekućeg elektrolita. Nakon razvoja čvrstofaznih ćelija, učinkovitost PV uređaja baziranih na OMHP značajno je narasla te je postignuta do sad najveća zabilježena vrijednost od 21 % [5].

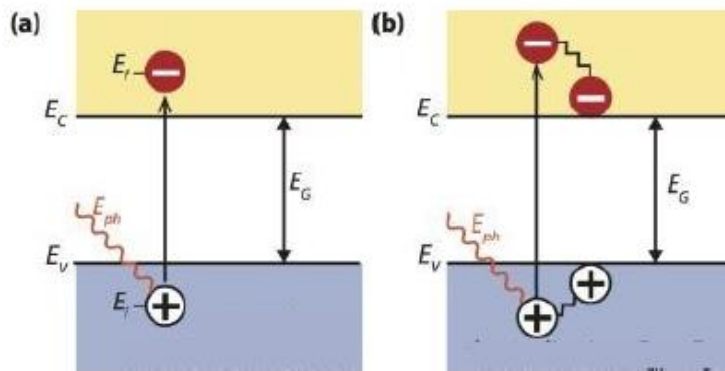
Uz fleksibilnost u izradi, OMHP materijali posjeduju nekoliko odličnih optoelektroničkih svojstava koja ih čine idealnim izborom za primjenu u PV uređajima. Širina zabranjene zone OMHP materijala je prikladna za jednostruko spojene solarne ćelije izložene solarnom radijacijskom spektru te ju je moguće varirati izmjenom organskih i halidnih iona. Koeficijent optičke apsorpcije OMHP-a je veći nego kod drugih PV materijala poput Si, CdTe, bakrova

indijeva galijeva selenida te amornog Si:H. Zahvaljujući tome je moguće smanjiti debljinu apsorbirajućeg sloja što za posljedicu ima manju cijenu potrebnog materijala. Nadalje, visoka mobilnost elektrona i šupljina te dugački vijek nosioca naboja daju duge duljine difuzije te se nosioci naboja mogu slobodno prenijeti preko apsorbirajućeg sloja prije rekombinacije. Zbog male količine defekata, utjecaj ne-radijacijske rekombinacije nije značajan što dovodi do većih napona otvorenog kruga [6].

Iako perovskitne solarne ćelije pokazuju veliki potencijal, potrebno je riješiti nekoliko izazova prije njihove komercijalizacije. Najznačajniji izazovi su loša dugotrajna stabilnost, te problematična proizvodnja na velikoj skali potrebna za tržišnu dostupnost. Također se javlja problem utjecaja na okoliš i zdravlje ljudi zbog činjenice da OMHP materijali sadrže olovo [2].

2.1. Princip rada solarne ćelije

Princip rada solarne ćelije zasniva se na fotonaponskom efektu, odnosno stvaranju razlike potencijala između materijala zbog elektromagnetskog zračenja. Apsorpcijom fotona u materijalu dolazi do pobuđivanja elektrona iz osnovnog stanja E_i u pobuđeno stanje E_f . Foton se može apsorbirati u materijal jedino kad su prisutni energetske nivoe čija je razlika jednaka energiji fotona, odnosno kad vrijedi $h\nu = E_f - E_i$, gdje je h Planckova konstanta, a ν frekvencija svjetlosti. U idealnom poluvodiču, elektroni mogu popunjavati energetske nivoe ispod valentne vrpce, E_v , i iznad vodljive vrpce, E_c . Između njih je energetske područje koje nije dostupno elektronima, odnosno zabranjena zona, a razlika energija između vodljive i valentne vrpce naziva se energija zabranjene zone te vrijedi $E_g = E_c - E_v$. Foton energije manje od one zabranjene zone poluvodiča nije moguće apsorbirati u materijal, te on prolazi kroz materijal bez interakcija [6,7].



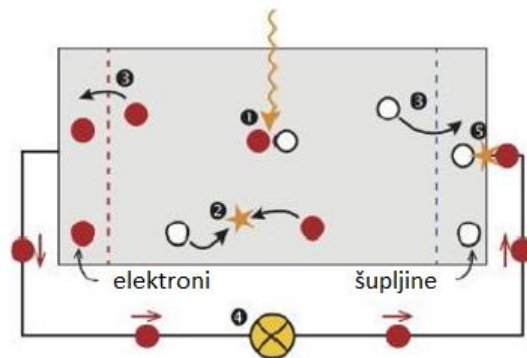
Slika 2. Shematski prikaz apsorpcije fotona a) foton energije E_{ph} ekscitira elektron iz stanja E_i u stanje E_f uz stvaranje para elektron-šupljina b) ako je E_{ph} veća od E_g , dio energije se termalizira [1]

U realnom poluvodiču, valentna i vodljiva vrpca nisu ravne, već variraju ovisno o takozvanom k -vektoru koji opisuje moment elektrona u poluvodiču. Energija elektrona ovisi o njegovom momentu zbog periodične strukture kristala poluvodiča. U slučaju da se maksimum valentne vrpce i minimum vodljive vrpce nalaze na istom k -vektoru, elektron je moguće pobuditi iz valentne u vodljivu vrpcu bez promjene njegovog momenta te se takav materijal naziva direktni poluvodič. Ako elektron nije moguće ekscitirati bez promjene u njegovom momentu, to se može postići jedino vibracijama u kristalnoj strukturi materijala, a materijal se naziva indirektnim poluvodičem. Apsorpcijski koeficijent znatno je veći za materijale u kojima nije potrebna promjena momenta [6,8].

Kad je elektron pobuđen iz stanja E_i u stanje E_f , u stanju E_i nastaje praznina koja se ponaša kao čestica pozitivnog elementarnog naboja, takozvana šupljina. Apsorpcijom fotona tako dolazi do generacije para elektron-šupljina kao što je prikazano na slici 2. Radijacijska energija fotona prevodi se u kemijsku energiju para elektron-šupljina, a maksimalna učinkovitost konverzije određena je termodinamikom.

Nakon nastanka para elektron-šupljina, u većini materijala dolazi do rekombinacije, odnosno, povratka elektrona u osnovno energijsko stanje. Energija se pritom može otpustiti u obliku fotona radijacijskom rekombinacijom, prenijeti na druge elektrone i šupljine ili otpustiti preko kristalne strukture ne-radijacijskom rekombinacijom. Termalizacija je proces tijekom kojeg par elektron-šupljina predaje višak energije dobivene od fotona čija je energija veća od energije procijepa. Taj

višak energije predaje se kristalnoj rešetki u obliku topline sve dok se elektron ne spusti na dno vodljive vrpce, a šupljina ne popne na vrh valentne vrpce. Maksimalna učinkovitost konverzije energije solarne ćelije tako je znatno manja od termodinamičkog ograničenja [6]. Ako se energiju pohranjenu u paru elektron-šupljina želi iskoristiti u radu vanjskog strujnog kruga, potrebno je postaviti polupropusnu membranu s obje strane apsorpcijskog materijala koja će osiguravati samo jedan smjer prijenosa naboja koji je suprotan za elektrone i šupljine. U većini solarnih ćelija ove su membrane izrađene od n- i p-tipa poluvodiča [7,8].



Slika 3. Prikaz osnovnog principa rada solarne ćelije [1]

Solarna ćelija mora biti izrađena na način da elektroni i šupljine mogu doći do membrana prije rekombinacije, odnosno vrijeme koje je potrebno za razdvajanje elektrona i šupljina mora biti manje od vremena rekombinacije, stoga apsorpcijski materijal treba biti optimalne debljine, da bi se elektroni i šupljine stigli razdvojiti prije nego što se rekombiniraju.

Razdvojeni se naboji zatim pomoću električnih kontakata prevode u vanjski strujni krug, prevodeći tako kemijsku energiju para elektron-šupljina u električnu energiju. Nakon prolaska elektrona kroz vanjski strujni krug, dolazi do rekombinacije sa šupljinama na spoju metala i apsorpcijskog materijala [8].

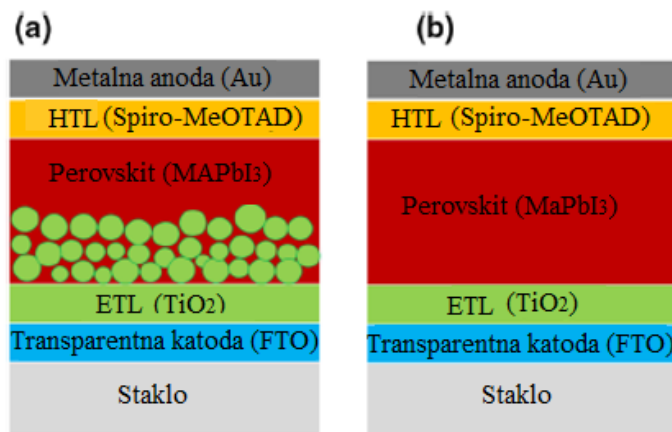
Nemogućnost konverzije fotona energije manje od one zabranjene zone i termalizacija fotona energije veće od one zabranjene zone dva su najznačajnija mehanizma zbog kojih dolazi do gubitaka u radu solarne ćelije.

2.2. Izrada uređaja

U ranim su se fazama istraživanja OMHP spojevi u PV uređajima koristili kao zamjena za boju u bojom senzibiliziranim solarnim ćelijama (DSSC). Struktura DSSC ćelija sastoji se tipično od poroznog sloja TiO_2 koji je prekriven i ispunjen bojom koja služi kao apsorbirajući materijal. U ovakvoj strukturi, TiO_2 služi prikupljanju i transportu elektrona dok elektrolit ima ulogu nosioca šupljina. Prvi uređaji bazirani na OMHP spojevima koristili su sličnu strukturu, sa slojem TiO_2 prekrivenim OMHP. Znatna napredak postignut je zamjenom tekućeg elektrolita elektrolitom u krutom stanju. Kao posljedica pojavili su se tankoslojni PV uređaji u kojima je OMHP postavljen između sloja za transport elektrona (ETL) i sloja za transport šupljina (HTL). Ovisno o tome koji od slojeva je prvo izložen Sunčevoj svjetlosti, strukture je moguće kategorizirati kao klasične p-i-n ili obrnute n-i-p (vidi poglavlja 2.2.1. i 2.2.2.). Izrada uređaja određuje materijale koji će se koristiti za prijenos naboja (ETL i HTL) te materijale koji će se koristiti za elektrode [2,9].

2.2.1. Klasična n-i-p struktura

Mezooksopska n-i-p struktura originalan je način izrade PV uređaja te je još uvijek u širokoj upotrebi. Struktura se sastoji od katode, kompaktnog ETL sloja, sloja mezoporoznog oksida na koji je nanesen sloj perovskita, zatim HTL sloja i, na kraju, metalne anode.



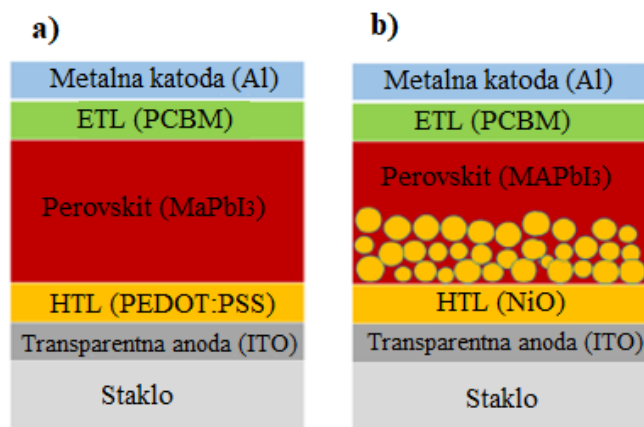
Slika 4. Shematski prikaz perovskitne solarne ćelije za a) mezooksopsku i b) planaranu n-i-p strukturu [2]

U opisanoj strukturi, mezooksopski sloj doprinosi skupljanju naboja tako da smanjuje duljinu prijenosa naboja, što sprječava gubitak napona između kontakata te doprinosi apsorpciji fotona. U

početku su ovakvi PV uređaji koristili debeli porozni sloj kako bi apsorpcija svjetlosti bila što veća. Ipak se pokazalo da navedene pore ograničavaju rast kristala, odnosno da je znatna količina OMHP prisutna u neuređenoj amorfnoj fazi. Kao posljedica su dobiveni niži napon otvorenog kruga (V_{oc}) te manja struja kratkog spoja (J_{sc}). Problem je riješen smanjenjem debljine mezoporoznog sloja što je omogućilo bolju kristalizaciju sloja perovskita. Ispunjenje pora i morfologija perovskita znatno ovisi o debljini mezoporoznog sloja. Smanjenjem debljine poroznog sloja postiže se formiranje perovskitnog sloja na poroznoj strukturi. Popunjenje pora omogućuje veliku brzinu transporta nosioca naboja te visoku učinkovitost na spoju mezoporoznog i perovskitnog sloja. Nakon što dođe do razdvajanja naboja, njihova rekombinacija između ETL i HTL sloja onemogućena je zbog relativnih pozicija njihovih vodljivih i valentnih vrpca. Spomenute prednosti razlog su popularnosti mezoskopske n-i-p strukture u literaturi [9,10]. Planarna n-i-p struktura razvila se iz mezoskopske. U prvo se vrijeme smatralo da je mezoporozni ETL sloj ključan za učinkovitost PV, uređaja obzirom da je prijenos šupljina kroz HTL sloj znatno učinkovitiji od prijenosa elektrona kroz ETL. Ipak, kontroliranjem formiranja perovskitnog sloja te međufaza između perovskita, slojeva za transport naboja i elektroda, pokazalo se da je visoku učinkovitost PV uređaja moguće postići bez mezoporoznog sloja. Usprkos tomu što planarni n-i-p PV uređaji pokazuju veće V_{oc} i J_{sc} u usporedbi s mezoskopskim uređajima, također pokazuju i veću strujno – naponsku histerezu što dovodi do smanjenja učinkovitosti. Iz navedenog razloga, moderni planarni n-i-p uređaji koriste vrlo tanki sloj mezoporoznog materijala [10].

2.2.2. Obrnuta p-i-n struktura

U slučaju kada je red depozicije obrnut, odnosno kada se prvo deponira HTL sloj, dobiva se p-i-n struktura. PV uređaj se formira na vodljivom polimeru p-tipa, najčešće PEDOT:PSS (polietilendioksitiofen:polistirensulfonat), koji služi kao HTL. Nakon depozicije perovskitnog materijala, dodaju se organski sloj koji služi kao ETL te metalna katoda.



Slika 5. Shematski prikaz perovskitne solarne ćelije za a) planarnu i b) mezoskopsku p-i-n strukturu [2]

U ranim su se uređajima koristili perovskitni materijali u kombinaciji s fulerenom kao donor – akceptorski par. Kako su uređaji napredovali, organski akceptor se polako zamijenio ETL slojem te je postignuta struktura perovskita između dva organska materijala koji služe prijenosu naboja. Efikasnost planarnih p-i-n uređaja značajno se poboljšala zbog korištenja naprednijih tehnike pripreme materijala [11].

2.3. Parametri solarne ćelije i ekvivalentni strujni krug

Osnovni parametri solarnih ćelija koji se koriste za njihovu karakterizaciju su maksimalna snaga, P_{max} , gustoća struje kratkog spoja, J_{sc} , napon otvorenog kruga, V_{oc} , te faktor popunjavanja, FF. Navedeni se parametri očitavaju iz strujno-naponske karakteristike, a njihova kombinacija daje učinkovitost konverzije, η [1].

Kako bi mjerenja strujno-naponske karakteristike bila relevantna, potrebno je provesti mjerenja pri standardnim uvjetima, za koje vrijedi zračenje od 1000 W/m^2 , AM1,5 (koeficijent mase zraka koji definira izravnu optičku duljinu puta kroz Zemljinu atmosferu) te konstantna temperatura solarne ćelije od $25 \text{ }^\circ\text{C}$ [1].

2.3.1. Gustoća struje kratkog spoja

Gustoća struje kratkog spoja, J_{sc} , predstavlja struju koja prolazi kroz vanjski strujni krug kad nije prisutan napon između elektroda solarne ćelije. Struja kratkog spoja ovisi o dotoku fotona koji je određen spektrom dostupnog Sunčevog zračenja, što je za standardne uvjete AM1,5. Struja kratkog spoja često se koristi kao maksimalna moguća struja koju je moguće dobiti od solarne ćelije, a ovisi o optičkim svojstvima poput apsorpcije aktivnog sloja te refleksije.

Za idealne slučajeve vrijedi $J_{sc} = J_{ph}$ što pokazuje da je u slučaju idealne diode, faktor koji određuje fotogeneriranu gustoću struje (J_{ph}) duljina difuzije nosioca naboja, odnosno duljina koju nosioci naboja prijeđu prije rekombinacije [1,12].

2.3.2. Napon otvorenog kruga

Napon otvorenog kruga, V_{oc} , predstavlja napon pri kojem struja ne prolazi kroz vanjski strujni krug, odnosno najveći napon koji je moguće dobiti od solarne ćelije. Napon otvorenog kruga ovisi o gustoći fotogenerirane struje uz pretpostavku da je ukupna gustoća struje jednaka nuli.

$$V_{oc} = \frac{k_B T}{q} \ln \left(\frac{J_{ph}}{J_0} + 1 \right) \approx \frac{k_B T}{q} \ln \left(\frac{J_{ph}}{J_0} \right)$$

Prikazana jednadžba pokazuje da V_{oc} ovisi o gustoći struje solarne ćelije, J_0 , te gustoći fotogenerirane struje, J_{ph} . Aproximacija je valjana jer vrijedi $J_{ph} \gg J_0$. Kako J_0 ovisi o rekombinaciji nosioca naboja, može se reći da je napon otvorenog kruga mjera rekombinacije u solarnoj ćeliji [1,13].

2.3.3. Faktor popunjavanja

Faktor popunjavanja odnos je između maksimalne snage koju generira solarna ćelija ($P_{max} = I_{mpp} V_{mpp}$) i umnoška V_{oc} i J_{sc} .

$$FF = \frac{J_{mpp} V_{mpp}}{J_{sc} V_{oc}}$$

U gornjoj jednadžbi umnožak u brojniku predstavlja točku u strujno-naponskoj karakteristici solarne ćelije u kojoj ona daje najveću snagu (*maximum power point*). Za optimalan rad PV uređaja bitno je da on radi u točki maksimalne snage.

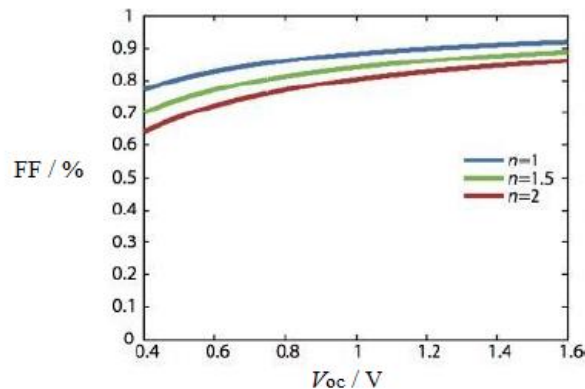
Pod pretpostavkom da se solarna ćelija ponaša kao idealna dioda, faktor popunjavanja moguće je izraziti kao funkciju napona otvorenog kruga, V_{oc} .

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

gdje je v_{oc} normalizirani napon.

$$v_{oc} = \frac{k_B T}{V_{oc}}$$

Navedena jednadžba je dobra aproksimacija idealne vrijednosti faktora popunjavanja kad vrijedi $v_{oc} > 10$. Jednadžba pokazuje da je FF funkcija V_{oc} . Ipak, FF se ne mijenja drastično s promjenom V_{oc} , a za solarne ćelije s nekim apsorpcijskim materijalima nisu karakteristične velike promjene u naponu otvorenog kruga [1,14].



Slika 6. Grafički prikaz faktora popunjavanja kao funkcije napona otvorenog kruga [1]

Za solarne ćelije koje se ne ponašaju kao idealna dioda koristi se aproksimacija Boltzmanovog faktora koja uključuje faktor idealnosti, n .

$$\exp \frac{qV_a}{nk_B T}$$

Faktor idealnosti mjera je kvalitete spoja i tipa rekombinacije solarne ćelije, a njegova vrijednost raste ako su prisutni različiti mehanizmi rekombinacije. Velika vrijednost n smanjuje FF te, posljedično, smanjuje vrijednost napona otvorenog kruga [1].

2.3.4. Efikasnost konverzije

Efikasnost konverzije računa se kao odnos između maksimalne generirane snage te snage generirane pri upadu svjetlosti P_{in} [1].

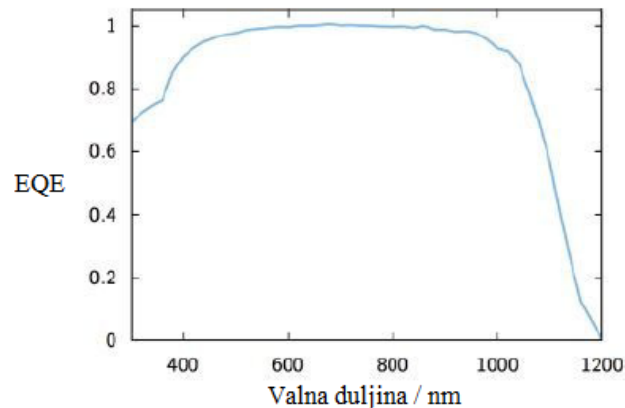
$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{I_{mpp}V_{mpp}}{P_{in}} = \frac{I_{sc}V_{oc}FF}{P_{in}}$$

2.3.5. Eksterna kvantna efikasnost

Eksterna kvantna efikasnost $EQE(\lambda)$ je dio upadnih fotona koji mogu generirati par elektron-šupljina u solarnoj ćeliji te su uspješno prikupljeni. Ovisi o valnoj duljini te se mjeri osvjetljavanjem solarne ćelije monokromatskom svjetlošću valne duljine λ te mjerenjem fotogenerirane struje, I_{ph} .

$$EQE(\lambda) = \frac{I_{ph}}{q\Psi_{ph,\lambda}}$$

gdje je q elementarni naboj, a $\Psi_{ph,\lambda}$ tok fotona valne λ duljine koji upadaju na solarnu ćeliju.



Slika 7. Prikaz eksterne kvantne efikasnosti za solarnu ćeliju baziranu na kristaliničnom siliciju [1]

Oblik EQE krivulje ovisan je o optičkim i električnim gubitcima poput parazitske apsorpcije i gubitaka zbog rekombinacije, što čini analizu kompleksnom [1,15]. Pri malim valnim duljinama samo se mali dio svjetlosti prevodi u parove elektron-šupljina. Većina fotona je u tom slučaju već apsorbirana u slojeve kroz koje svjetlost prolazi prije nego što dođe do apsorpcijskog sloja, što se

naziva parazitska apsorpcija. Za velike valne duljine debljina prodiranja svjetlosti prelazi debljinu apsorpcijskog sloja koji u tom slučaju postaje transparentan, pa većina fotona prođe kroz solarnu ćeliju prije nego što ih je moguće apsorbirati.

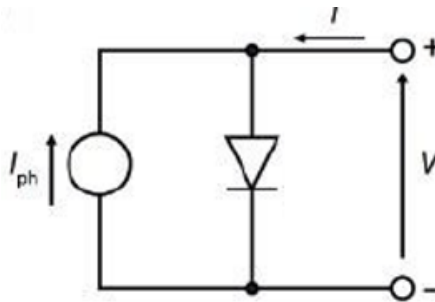
Za solarne ćelije kod kojih je duljina difuzije nosioca naboja kraća od debljine sloja, EQE krivulja se približava manjim vrijednostima zbog rekombinacijskih gubitaka u solarnoj ćeliji [1,13].

2.3.6. Ekvivalentni strujni krug

Za osvijetljenu solarnu ćeliju koja se ponaša kao idealna dioda, strujno-naponska karakteristika se može opisati jednadžbom:

$$J(V) = J_{rec}(V) - J_{gen}(V) - J_{ph} = J_0 \left[\exp \frac{qV}{k_B T} - 1 \right] - J_{ph}$$

gdje je J_{rec} gustoća struje rekombinacije, a J_{gen} gustoća generirane struje. Navedeno ponašanje moguće je opisati jednostavnim ekvivalentnim strujnim krugom u kojem su dioda i izvor struje povezani paralelno (slika 8.)

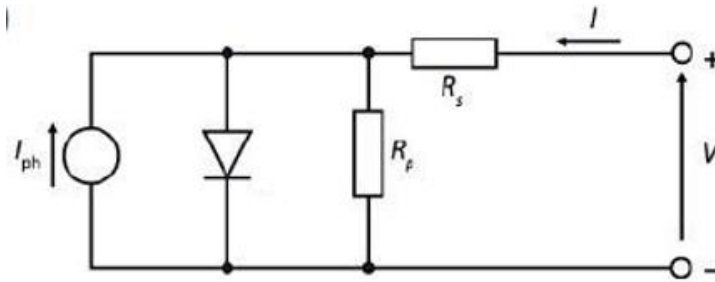


Slika 8. Prikaz ekvivalentnog strujnog kruga za idealnu solarnu ćeliju [1]

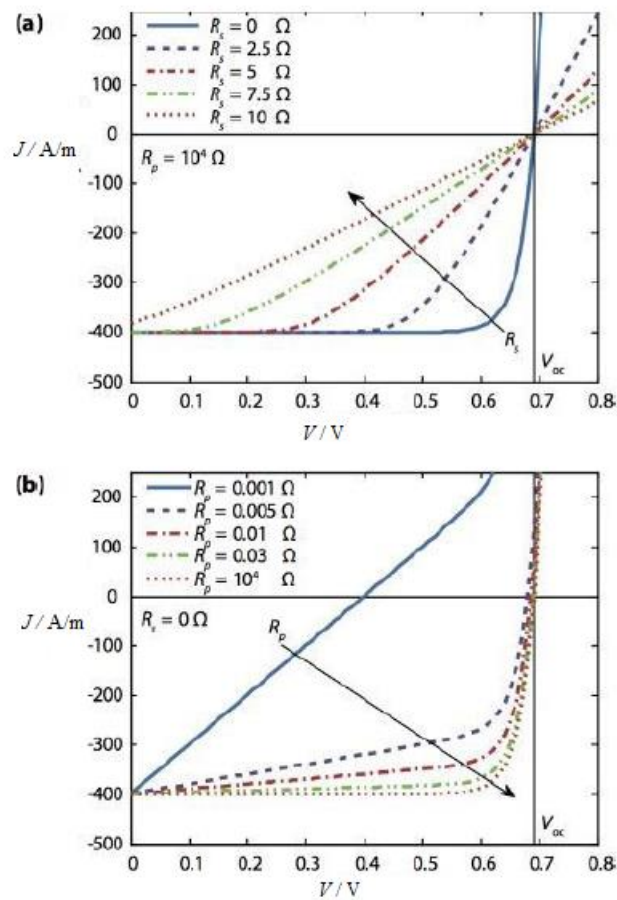
Strujno-naponska karakteristika za rad solarne ćelije u realnim uvjetima može se opisati jednadžbom:

$$J = J_0 \left\{ \exp \left[\frac{q(V - A J_s R_s)}{k_B T} \right] - 1 \right\} + \frac{V - A J_s R_s}{R_p} - J_{ph}$$

gdje je A površina solarne ćelije, R_s serijski otpor, a R_p paralelni otpor. Prvi dio jednadžbe opisuje generiranu gustoću struje u mraku dok drugi dio opisuje fotogeneriranu gustoću struje. U realnim uvjetima stoga na faktor popunjavanja utječu serijski otpor, R_s , te paralelni otpor, R_p . Njihov utjecaj na strujno-naponsku karakteristiku također se može prikazati ekvivalentnim strujnim krugom (slika 9).

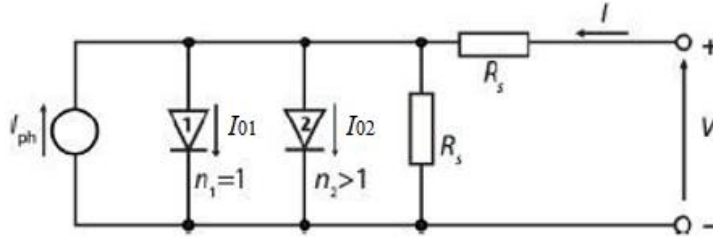


Slika 9. Prikaz ekvivalentnog strujnog kruga za solarnu ćeliju s otporima R_s i R_p [1]



Slika 10. Grafički prikaz utjecaja a) serijskog otpora i b) paralelnog otpora na strujno-naponsku karakteristiku solarne ćelije [1]

U realnom slučaju na faktor popunjavanja također utječu dodatni mehanizmi rekombinacije. Solarna ćelija koja se ne ponaša kao idealna dioda najčešće se prikazuje ekvivalentnim strujnim krugom s dvije diode (slika 11.).



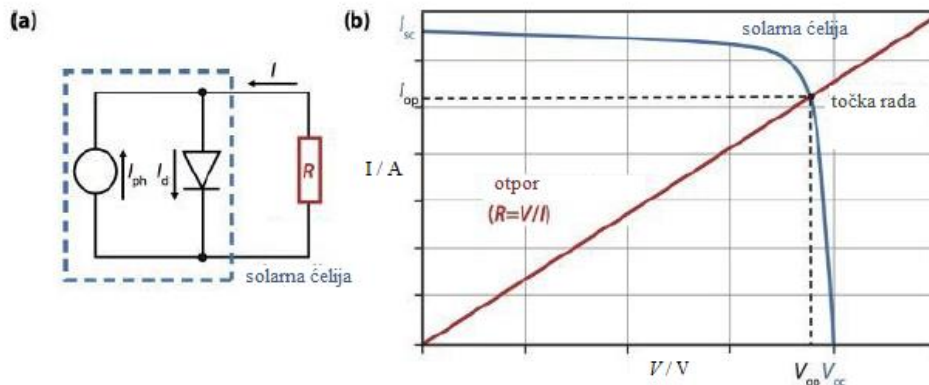
Slika 11. Prikaz ekvivalentnog strujnog kruga temeljenog na modelu solarne ćelije s dvije diode [1]

Strujno-naponska karakteristika solarne ćelije s dvije diode opisuje se jednadžbom:

$$J = J_{01} \left\{ \exp \left[\frac{q(V - A J_s R_s)}{n_1 k_B T} \right] - 1 \right\} + J_{02} \left\{ \exp \left[\frac{q(V - A J_s R_s)}{n_2 k_B T} \right] - 1 \right\} + \frac{V - A J_s R_s}{R_p} - J_{ph}$$

gdje su J_{01} i J_{02} gustoće struje dviju dioda, a n_1 i n_2 faktori idealnosti istih.

Za prikaz rada solarne ćelije kombinira se ekvivalentni strujni krug solarne ćelije koja se ponaša kao idealna dioda i omski otpor, R (slika 12.).



Slika 12. a) Prikaz ekvivalentnog strujnog kruga uz dodatak omskog otpora
b) Grafički prikaz rada jednostavne solarne ćelije u sjecištu I-V krivulje i otpora, R [1]

Slika 12. b) prikazuje strujno-naponsku karakteristiku osvijetljene solarne ćelije. Promatra se solarne ćelije aktivne površine A koja je spojena na otpornik pa se ne promatra gustoća struje, J , već struja $I = AJ$. Također, slika 12. b) prikazuje I - V krivulju omskog otpora koja je linearna jer vrijedi $R = V/I$. U točki na kojoj radi jednostavni PV uređaj, solarne ćelije daje snagu $P_{op} = I_{op}V_{op}$ [1,16].

3. MODELIRANJE SOLARNE ĆELIJE

3.1. SCAPS

SCAPS je jednodimenzionalni program za simulaciju solarnih ćelija razvijen na odjelu za Elektroniku i Informacijske Sustave (ELIS) Sveučilišta u Gentu. Program je inicijalno bio izrađen za karakterizaciju CuInSe_2 i CdTe struktura, no u skorije su vrijeme uvedene ekstenzije koje omogućavaju karakterizaciju kristalnih struktura poput Si i GaAs te amorfne struktura poput amornog silicija. Osim što omogućava usporednu analizu do sedam slojeva poluvodiča, moguća je karakterizacija i izračun parametara navedenih u prethodnom poglavlju. SCAPS program također nudi mogućnost karakterizacije rekombinacijskih mehanizama te gubitaka u svim slojevima simulirane solarne ćelije [17].

3.2. Parametri solarne ćelije korišteni u modeliranju

Prije početka simulacija, bili su definirani slojevi solarne ćelije prema shemi prikazanoj na Slici 13.



Slika 13. Shema slojeva solarne ćelije korištene u SCAPS simulaciji

Debljine pojedinih slojeva solarne ćelije iznose:

- debljina ITO filma: 310 – 370 nm
- debljina TiO₂ mezoporoznog filma: 500 – 950 nm
- debljina perovskitnog filma: 500 – 550 nm
- debljina SPIRO MeOTAD filma: 250 – 300 nm.

Određeni su i parametri solarne ćelije:

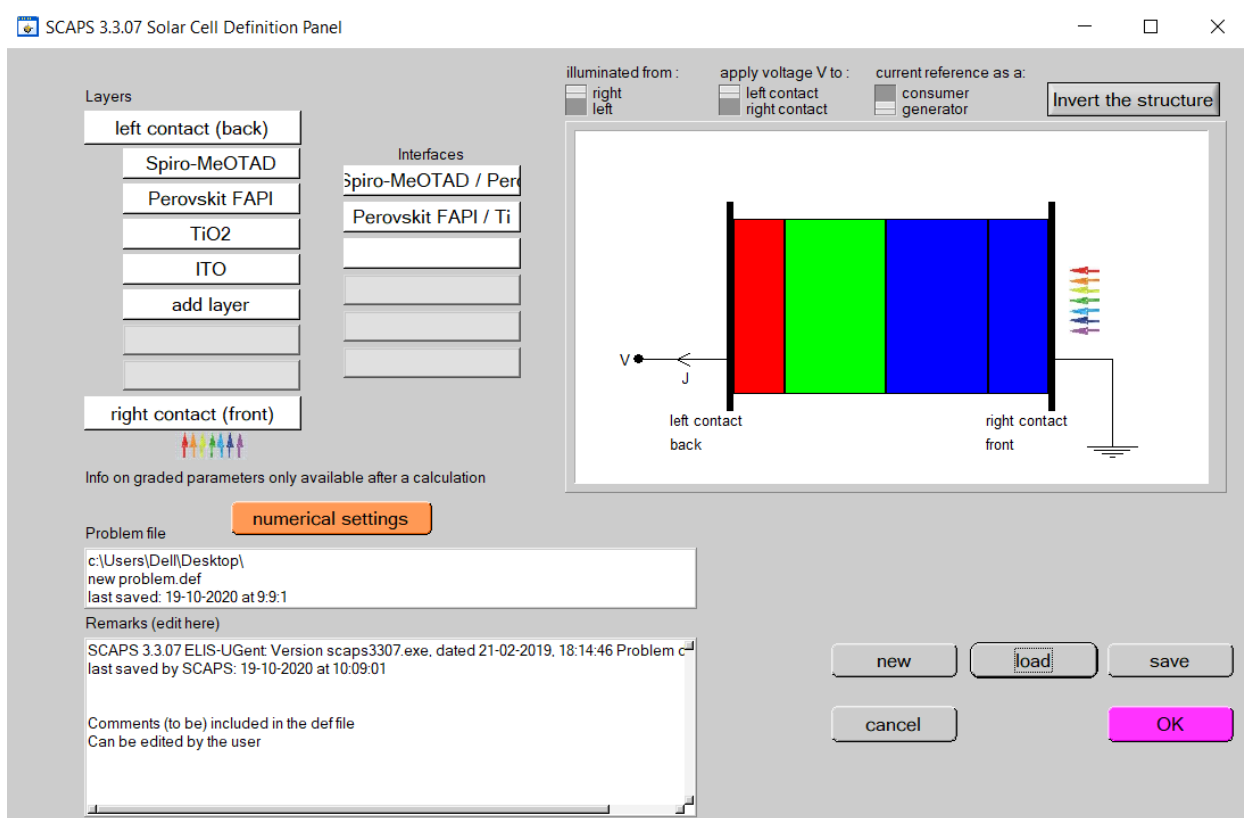
- napon otvorenog kruga $V_{oc} = 0,749$ V
- struja kratkog spoja $I_{sc} = -15,562$ mA
- faktor popunjavanja $FF = 0,49$
- učinkovitost $PCE = 5,63$ %.

Navedenim se podacima raspolagalo na početku simulacije. Ostali parametri korišteni u simulaciji preuzeti su iz literature i dani u Tablici 1.

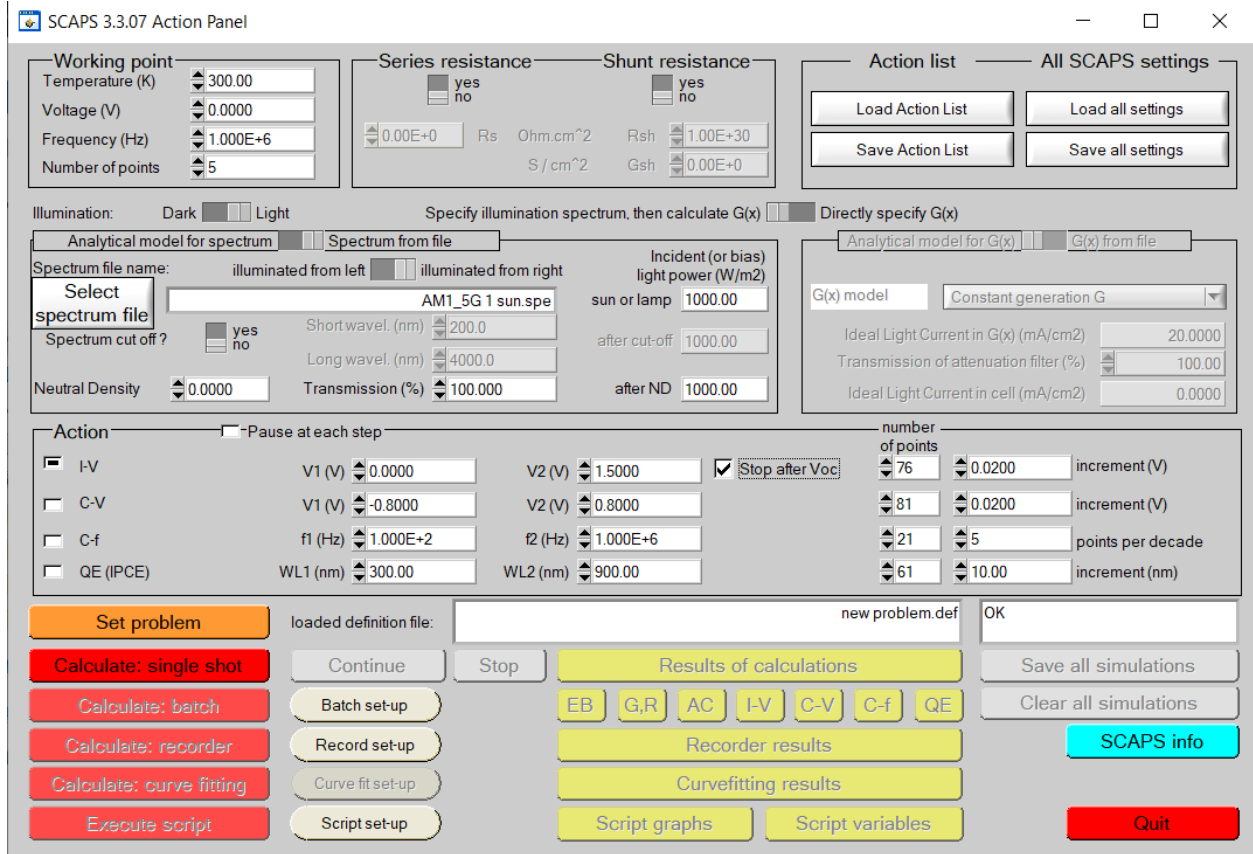
Tablica 1. Parametri korišteni za simulaciju solarne ćelije [18]

| Parametar | ITO | TiO ₂ | Perovskit FAPI | Siro-MeOTAD |
|---|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Debljina/nm | 300 | 500 | 500 | 250 |
| Energijski procijep/eV | 3,6 | 3,26 | 1,55 | 2,9 |
| Elektronski afinitet/eV | 4,1 | 4,2 | 3,95 | 2,2 |
| Relativna dielektrična permitivnost | 10 | 10 | 6,6 | 3 |
| CB efektivna gustoća stanja/cm ⁻³ | $2 \cdot 10^{18}$ | $2,2 \cdot 10^{18}$ | $2 \cdot 10^{19}$ | $2,2 \cdot 10^{18}$ |
| VB efektivna gustoća stanja/cm ⁻³ | $1,8 \cdot 10^{19}$ | $1,8 \cdot 10^{18}$ | $2 \cdot 10^{18}$ | $1,8 \cdot 10^{18}$ |
| Termička brzina elektrona/cm s ⁻¹ | 10^7 | 10^7 | 10^7 | 10^7 |
| Termička brzina šupljina/cm s ⁻¹ | 10^7 | 10^7 | 10^7 | 10^7 |
| Mobilnost elektrona/cm ² V s ⁻¹ | 50 | 20 | 0,28 | 10^{-4} |
| Mobilnost šupljina/cm ² V s ⁻¹ | 75 | 10 | 2 | 10^{-4} |
| Koncentracija donora N_D /cm ⁻³ | 10^{19} | 10^{17} | 0 | 0 |
| Koncentracija akceptora N_A /cm ⁻³ | 0 | 0 | $1,3 \cdot 10^{16}$ | 10^{18} |
| Koncentracija defekata N_i /cm ⁻³ | 10^{15} | 10^{15} | $4 \cdot 10^{13}$ | 10^{15} |

Tako definirani slojevi solarne ćelije u SCAPS-u prikazani su na slici 14. Sunčeva svjetlost upada na ITO sloj, odnosno desni kontakt na shematskom prikazu i prolazi do sloja perovskita gdje se odvija apsorpcija svjetlosti i generacija parova elektron-šupljina. Generirani elektroni i šupljine razdvajaju se prema transportnom sloju za elektrone (ETL), odnosno TiO_2 i šupljine (HTL), odnosno Spiro-MeOTAD. Ovisno o zadanim ulaznim parametrima solarne ćelije (Tablica 1.), simulacija izračunava I - V karakteristiku solarne ćelije te njezine pripadajuće parametre: napon otvorenog kruga (V_{oc}), gustoću struje kratkog spoja (J_{sc}), faktor popunjavanja (FF) te učinkovitost solarne ćelije (PCE).



Slika 14. Prikaz definiranih slojeva solarne ćelije u SCAPS programu



Slika 15. Prikaz postavljenih parametara za simulaciju u SCAPS programu

4. REZULTATI I RASPRAVA

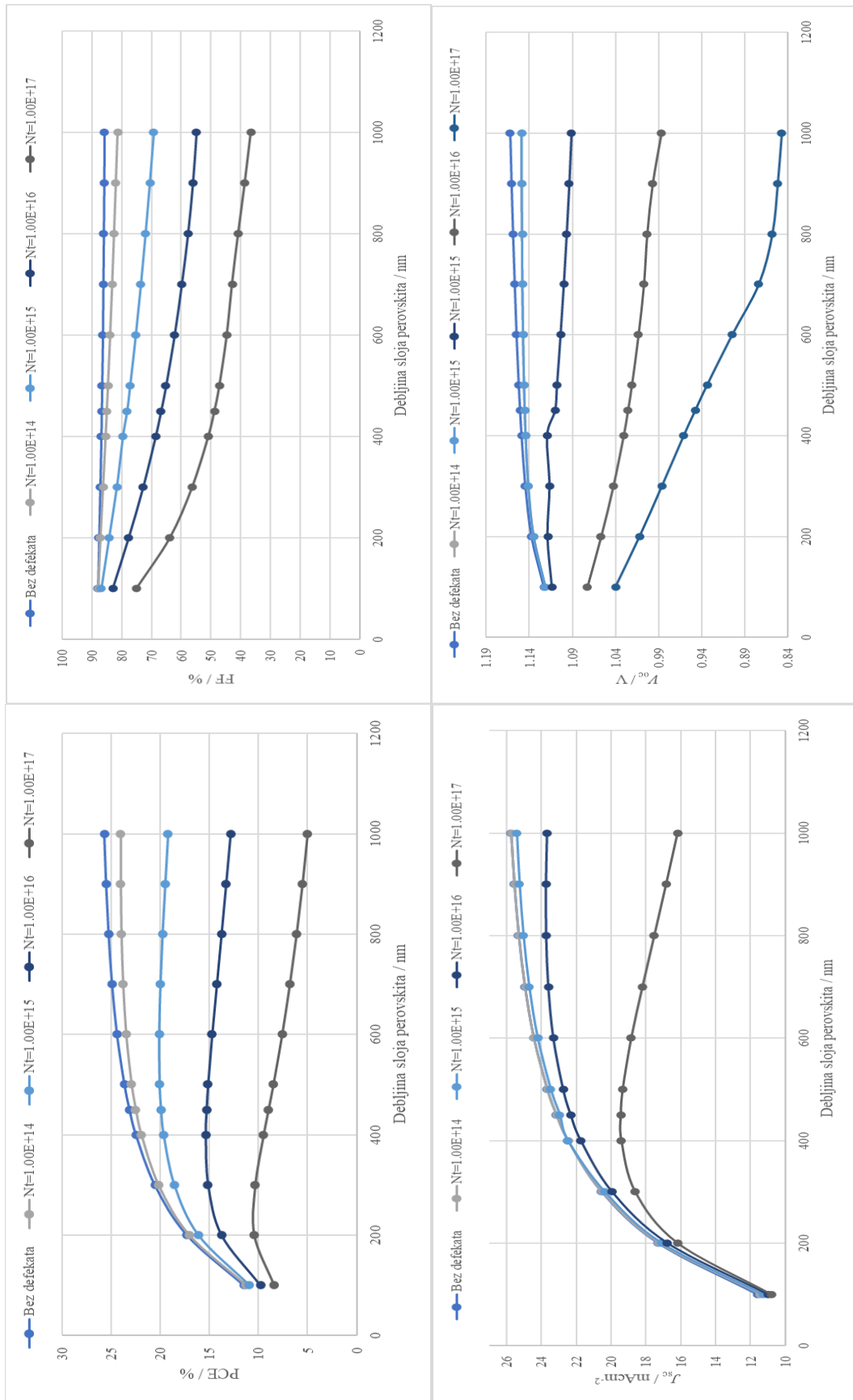
4.1. Utjecaj promjene debljine perovskitnog sloja i promjene koncentracije defekata

Promatran je utjecaj promjene debljine perovskitnog sloja na parametre solarne ćelije. Debljina perovskitnog sloja mijenjana je u rasponu 100 – 1000 nm, a koncentracija defekata, N_t u rasponu $10^{14} - 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, uz simulaciju bez defekata što predstavlja idealnu strukturu.

Povećanjem debljine perovskitnog sloja, povećava se apsorpcija upadnih fotona i generiranje parova elektron-šupljina čime učinkovitost solarne ćelije raste. No, daljnjim porastom debljine sloja, elektroni i šupljine moraju prijeći veći put do ETL i HTL slojeva čime se povećava vjerojatnost njihove rekombinacije. Dakle, krivulje učinkovitosti imat će maksimum koji će upućivati na optimalnu debljinu perovskitnog sloja, kao što je i prikazano na prethodnoj slici. Rezultati modeliranja pokazuju porast učinkovitosti solarne ćelije (PCE) s porastom debljine perovskitnog sloja za idealnu strukturu. Dodavanjem defekata (realna struktura), učinkovitost postiže maksimum za određenu debljinu, a potom se smanjuje. Povećanjem koncentracije defekata, maksimum krivulje učinkovitosti pomiče se prema manjim debljinama perovskitnog sloja.

Faktor popunjenosti pokazuje monotono opadanje s porastom debljine perovskita. Razlog je taj što FF jako ovisi o električnom polju, a električno polje se smanjuje porastom debljine sloja. Navedeno dovodi do smanjenja prikupljenih nositelja naboja i smanjenja faktora popunjenosti. Gustoća struje kratkog spoja, J_{sc} , pokazuje porast s povećanjem debljine perovskitnog sloja. Razlog je poboljšanje spektralnog odziva na većim valnim duljinama zbog povećanja debljine apsorberskog sloja. Porast koncentracije defekata očekivano smanjuje J_{sc} jer defekti povećavaju mogućnost rekombinacije čime se smanjuje difuzijska duljina nositelja naboja i njihovo vrijeme života.

S druge strane, napon otvorenog kruga (V_{oc}) blago raste povećanjem debljine perovskitnog sloja za manje iznose koncentracije defekata N_t , dok za veće koncentracije počinje opadati. Razlog opadanja V_{oc} je u povećanoj rekombinaciji elektrona i šupljina zbog porasta debljine perovskitnog sloja.



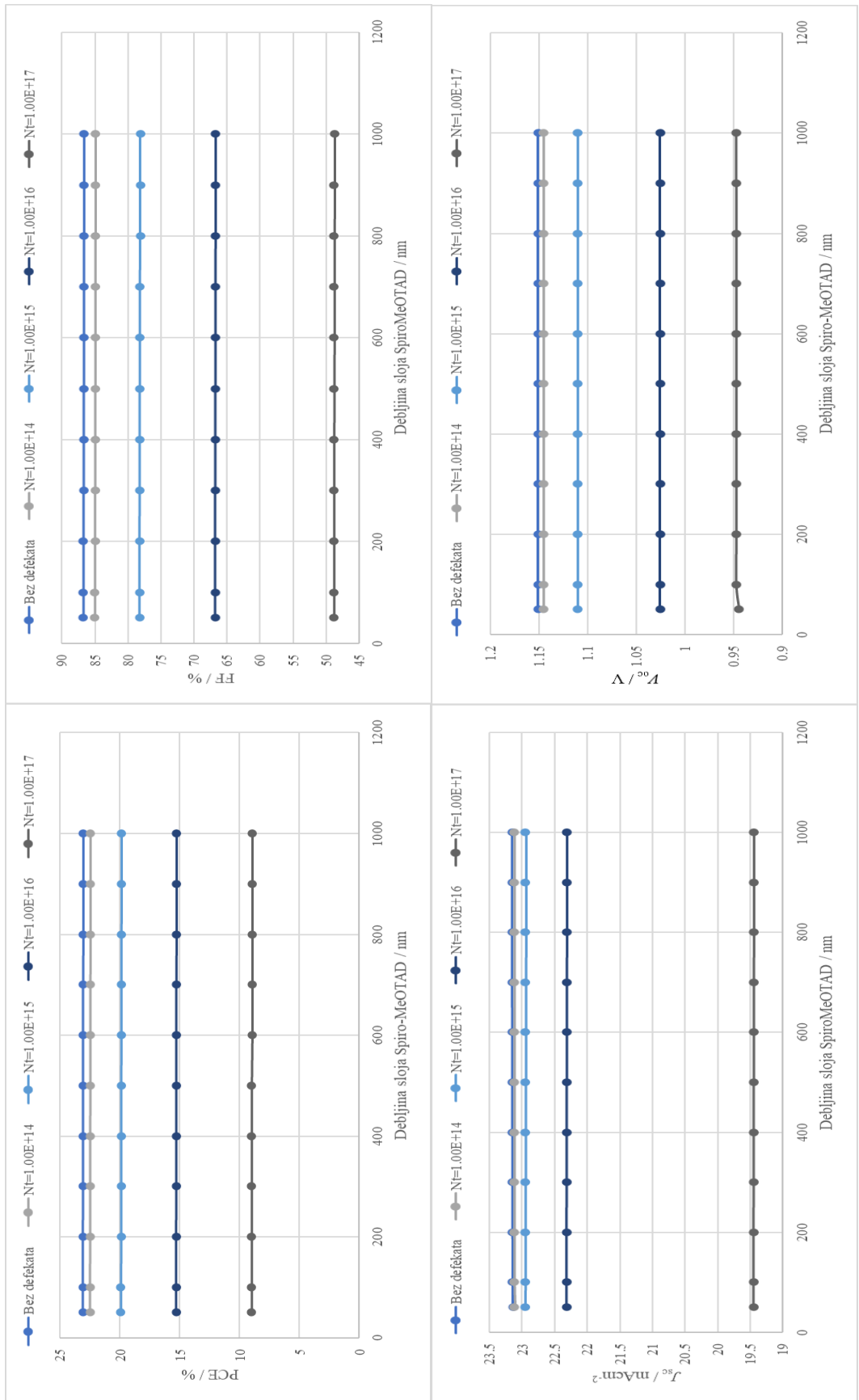
Slika 16. Ovisnost parametara solarne ćelije o debljini perovskinskog sloja i koncentraciji defekata

4.2. Utjecaj debljine HTL i ETL slojeva

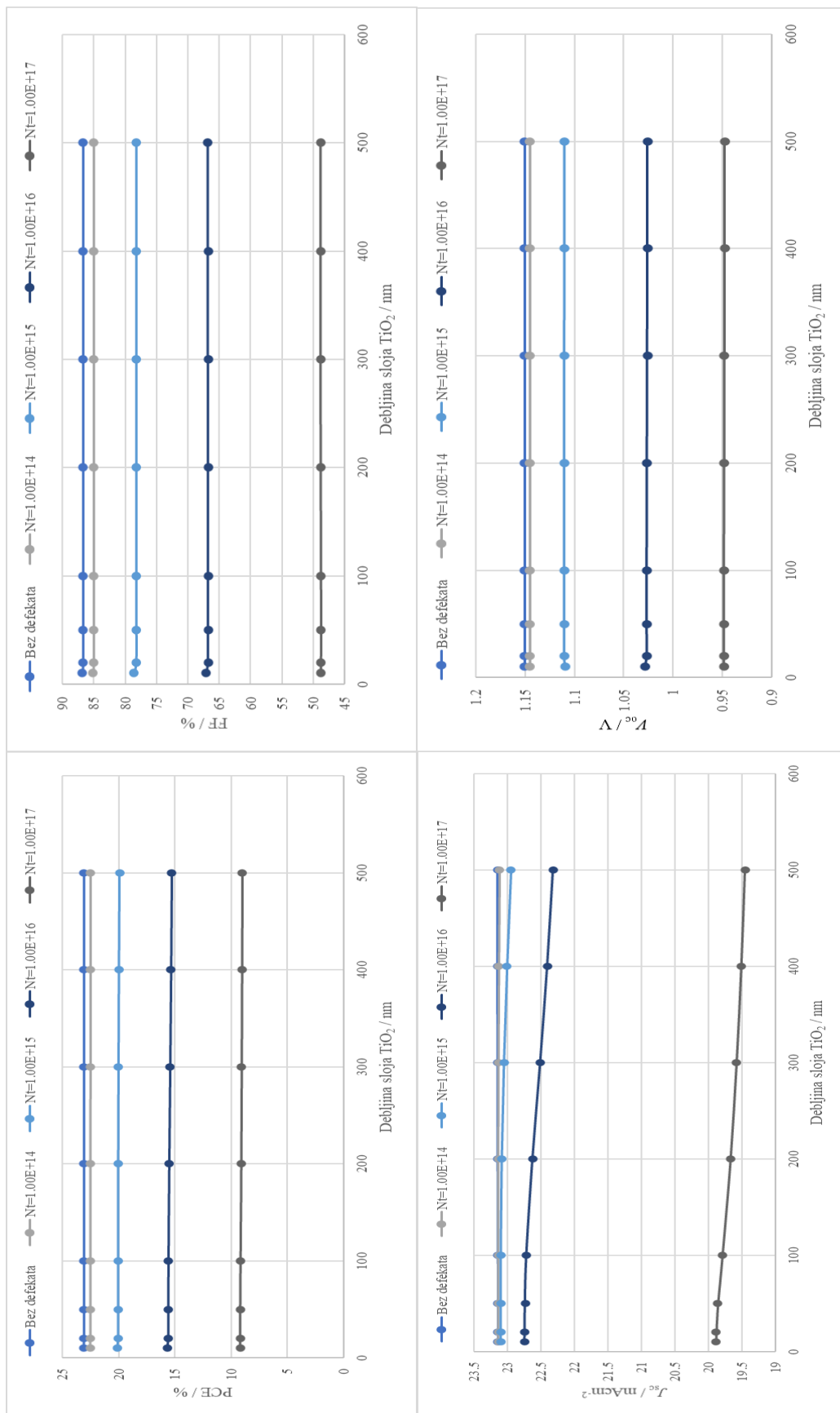
Iz slike 17. vidljivo je da debljina HTL sloja ne utječe na gotovo niti jedan parametar solarne ćelije. Jedini utjecaj postiže se promjenom koncentracije defekata čiji porast znatno smanjuje učinkovitost i faktor popunjavanja, a u manjoj mjeri i J_{sc} i V_{oc} .

Utjecaj debljine ETL sloja na parametre solarne ćelije gotovo je zanemariv (slika 18.), osim kod gustoće struje kratkog spoja gdje se vidi lagani pad J_{sc} s porastom debljine ETL sloja, ali samo za veće koncentracije defekata.

Na temelju provedenih simulacija, zaključuje se da debljine ETL i HTL slojeva nemaju bitan utjecaj na parametre solarne ćelije.



Slika 17. Utjecaj promjene debljine HTL (Spiro-MeOTAD) sloja na parametre solarne ćelije



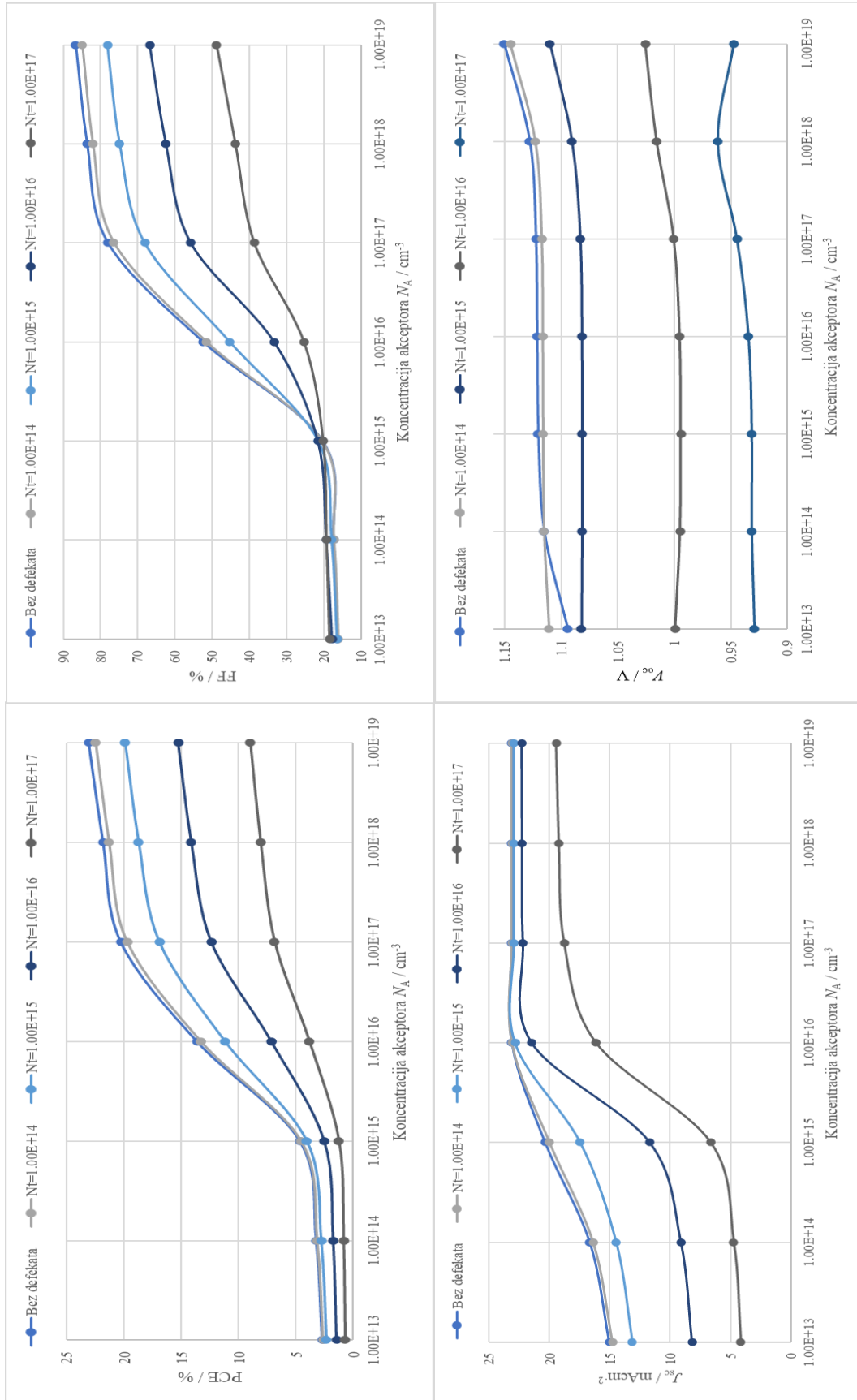
Slika 18. Utjecaj promjene debljine ETL (TiO₂) sloja na parametre solarne ćelije

4.3. Utjecaj dopiranja ETL i HTL slojeva

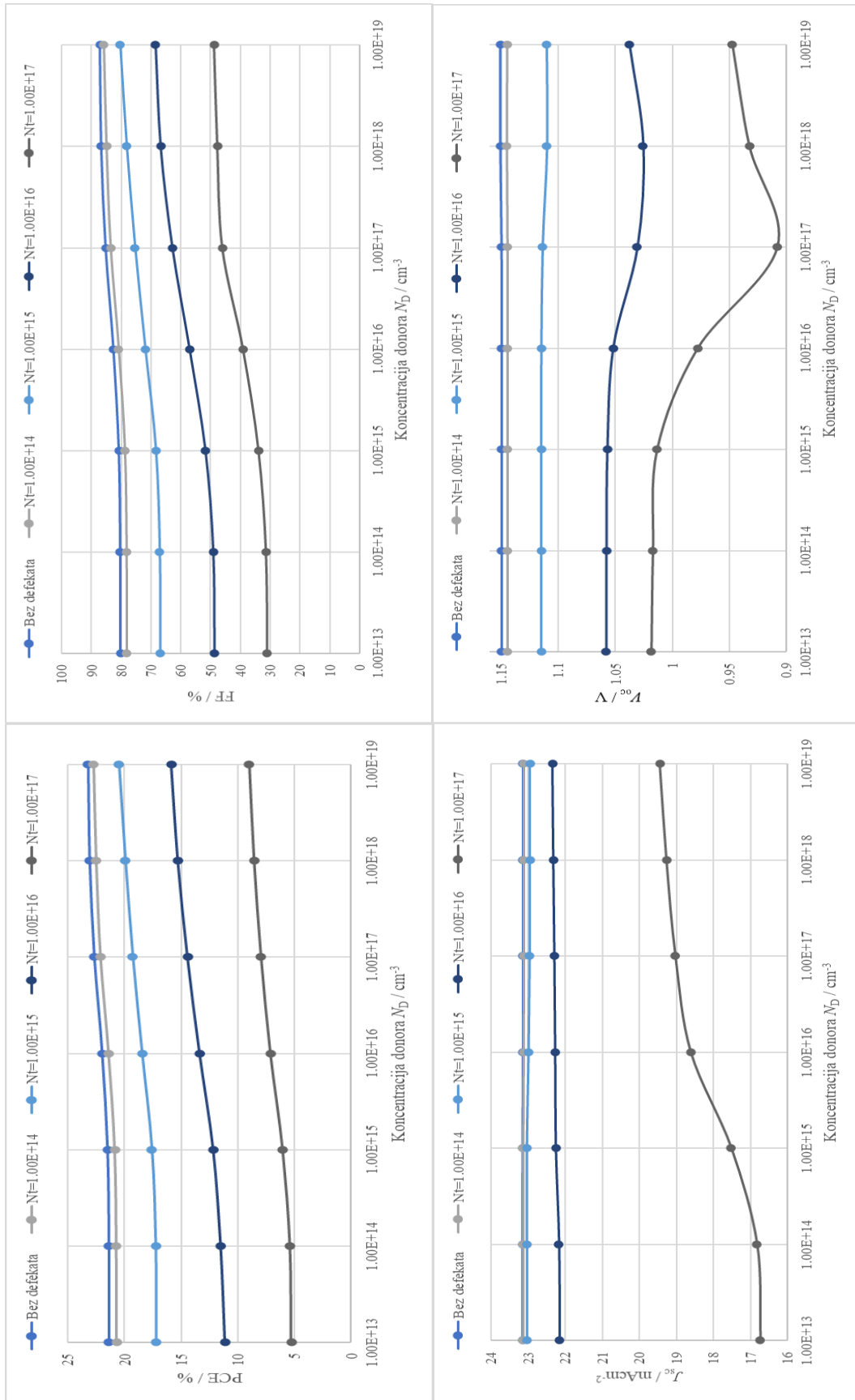
Dopiranje fotoaktivnog materijala (perovskita) u solarnoj ćeliji određuje električno ponašanje slojeva što utječe na rad solarne ćelije. Odgovarajuće dopiranje susjednih slojeva, ETL (TiO_2) i HTL (Spiro-MeOTAD), poboljšava električno polje na spojevima susjednih slojeva i može poboljšati parametre solarne ćelije. Kako bi se razumio utjecaj dopiranja ETL i HTL slojeva na parametre solarne ćelije, bile su mijenjane koncentracije dopiranja u rasponu od $10^{13} - 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, a rezultati su prikazani na slikama 19. i 20.

Povećanje dopiranja ETL i HTL slojeva povećava električno polje među slojevima. Porast električnog potencijala rezultira boljim razdvajanjem elektrona i šupljina uz manju rekombinaciju i poboljšava svojstva solarne ćelije. Navedeno je potvrđeno na Slici 19. koja prikazuje promjenu parametara solarne ćelije s promjenom dopiranja HTL sloja. Svi parametri pokazuju porast s porastom dopiranja N_A , što je u skladu s gore navedenim objašnjenjem.

Slično je ponašanje stoga bilo očekivano i kod promatranja utjecaja koncentracije donora, N_D , na parametre solarne ćelije, što se može i vidjeti na slici 20. Kod parametara učinkovitosti i faktora popunjavanja, ova ovisnost je potvrđena, dok parametri J_{sc} i V_{oc} pokazuju slabu ovisnost o dopiranju za niže koncentracije defekata. Tek kada koncentracija defekata poraste iznad 10^{15} cm^{-3} , javlja se znatna ovisnost navedenih parametara o koncentraciji donora. Dok J_{sc} raste s povećanjem koncentracije N_D , V_{oc} pokazuje pojavu minimuma na krivuljama ovisnosti o N_D .



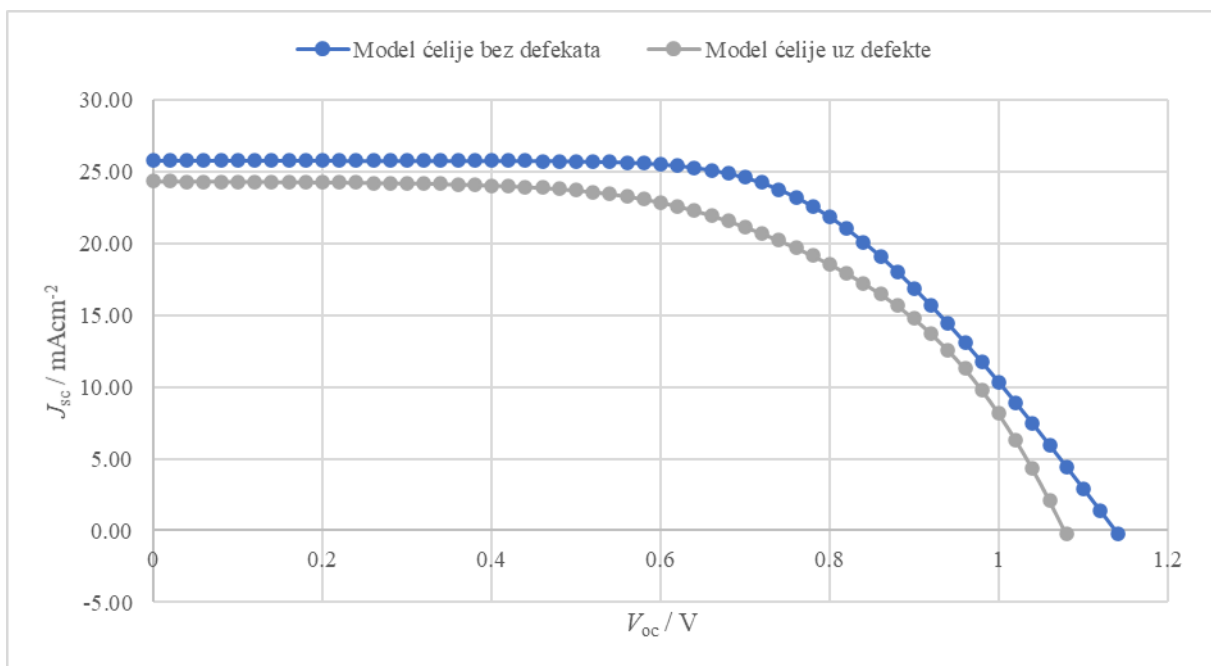
Slika 19. Utjecaj promjene koncentracije akceptora u HTL (Spiro-MeOTAD) sloju na parametre solarne ćelije



Slika 20. Utjecaj promjene koncentracije donora u ETL (TiO_2) sloju na parametre solarne ćelije

4.4. Strujno-naponska karakteristika solarne ćelije

Nakon provedenih simulacija grafički su prikazane strujno naponske karakteristike ispitivane solarne ćelije za model bez defekata i model uz defekte. Parametri pojedinih solarnih ćelija, kao i eksperimentalni rezultati nalaze se u Tablici 2.



Slika 21. Strujno-naponske karakteristike solarne ćelije bez defekata i solarne ćelije uz defekte dobivene modeliranjem

Tablica 2. Parametri za solarnu ćeliju bez defekata i uz defekte dobiveni modeliranjem te eksperimentalni rezultati

| Parametar | Bez defekata | Uz defekte | Eksperiment |
|----------------------|--------------|------------|-------------|
| V_{oc} / V | 1,14 | 1,08 | 0,749 |
| $J_{sc} / mAcm^{-2}$ | 25,75 | 24,32 | 15,562 |
| FF | 0,60 | 0,57 | 0,49 |
| PCE / % | 17,65 | 14,97 | 5,63 |

Rezultati modeliranja (slika 21.) očekivano su pokazali da ćelija bez defekata daje najbolje parametre i najveću učinkovitost. No, realna ćelija uvijek posjeduje određenu koncentraciju defekata koja je, u ovom modelu, $N_t = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ uz koncentraciju donora i akceptora

$N_D = N_A = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ kako je navedeno u literaturi [18].

Dobivena struno-naponska karakteristika za model ćelije bez defekata prikazana je na slici 21. te je vidljivo da su njezini parametri nešto lošiji u odnosu na model ćelije bez defekata što potvrđuju i rezultati u tablici 2. Usporedba modela i eksperimentalnih rezultata pokazuje da je model još uvijek puno bliži idealnoj solarnoj ćeliji nego realnoj. Nažalost, od eksperimentalnih rezultata bili su dobiveni samo parametri solarne ćelije. Stoga je za bolje razumijevanje utjecaja pojedinih elemenata na parametre solarne ćelije nužno izmjeriti strujno-naponsku karakteristiku koja će omogućiti određivanje dodatnih parametara i definiranje realnijeg modela solarne ćelije kao što je prikazano na slici 9.

5. ZAKLJUČAK

Korištenjem SCAPS – 1D programa uspješno je provedeno modeliranje solarne ćelije strukture ITO/TiO₂/FAP/SprioMeOTAD/Au. Istražen je utjecaj pojedinih parametara na svojstva solarne ćelije, koja uključuju efikasnost (PCE), faktor popunjavanja (FF), gustoću struje kratkog spoja (J_{sc}) te napon otvorenog kruga (V_{oc}).

Iz dobivenih grafičkih ovisnosti zaključuje se kako na gore navedena svojstva u najvećoj mjeri utječu debljina perovskitnog sloja, koncentracija akceptora (N_A) te koncentracija defekata (N_t) dok koncentracija donora (N_D) utječe u manjoj mjeri.

Debljine slojeva za transport elektrona (ETL) te transport šupljina (HTL) ne doprinose značajno promjeni svojstava solarne ćelije.

Za bolje razumijevanje utjecaja pojedinih elemenata na parametre solarne ćelije nužno je izmjeriti strujno-naponsku karakteristiku što će omogućiti definiranje realnijeg modela solarne ćelije.

6. POPIS LITERATURE

- [1] A. Smets, K. Jager, O. Isabella, R. Van Swaaij, M. Zeman, *Solar energy The physics and engineering of photovoltaic conversion, technologies and systems*, UIT Cambridge Limited, Cambridge, Ujedinjeno Kraljevstvo, (2016)
- [2] Z. Song, S. C. Watthage, A. B. Phillips, M. J. Heben, *Pathways toward high performance perovskite solar cells: review of recent advances in organo-metal halide perovskites for photovoltaic applications*, J. Photon. Energy 6(2), 022001 (2016)
- [3] W. Y. Yian, J. Yiang, J. Kang, Y. Yan, S. Wei, *Halide perovskite materials for solar cells: a theoretical review*, J. Mater. Chem. A 3(17), 8926–8942 (2016)
- [4] M. Saidaminov, A. Abdelhady, B. Murali, et al. *High-quality bulk hybrid perovskite single crystals within minutes by inverse temperature crystallization*. Nat. Commun. 6, 7586 (2015)
- [5] M. A. Green, A. Ho-Baillie, H. J. Snaith, *The emergence of perovskite solar cells*, Nat. Photon. 8(7), 506–514 (2014)
- [6] W. J. Yin, T. Shi, Y. Yan, *Unique Properties of Halide Perovskites as Possible Origins of the Superior Solar Cell Performance*. Adv. Mater. 26(27), 4653–4658 (2014)
- [7] D. Neamen, *Semiconductor Device Physics: Basic Principles*, McGraw-Hill, New York, NY, SAD (2012)
- [8] P. Würfel, *Physics of Solar Cells*, WILEY-VCH Verlag, Weinheim, Njemačka (2005)
- [9] H.-S. Kim, C.-R. Lee, J.-H. Im et al., *Lead iodide perovskite sensitized all-solid-state submicron thin film mesoscopic solar cell with efficiency exceeding 9%*, Sci. Rep. 2, 591 (2012)
- [10] J. H. Heo, S. H. Im, J. H. Noh et al., *Efficient inorganic-organic hybrid heterojunction solar cells containing perovskite compound and polymeric hole conductors*, Nat. Photon. 7(6), 486–491 (2013)
- [11] J.-Y. Jeng, Y.-F. Chiang, M.-H. Lee et al., *CH₃NH₃PbI₃ perovskite/fullerene planar-heterojunction hybrid solar cells*, Adv. Mater. 25(27), 3727–3732 (2013)

- [12] M. A. Green, *Solar cells: Operating principles, technology, and system applications*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, NJ, SAD (1982)
- [13] S. M. Sze, *Semiconductor Devices Physics and Technology*, John Wiley & Sons Inc, New York, NY, SAD (2002)
- [14] W. Shockley, W. T. Read, *Statistics of the Recombinations of Holes and Electrons*, Phys. Rev. 87, 835 (1952)
- [15] R. J. van Overstraeten, R. P. Mertens, *Physics, Technology and Use of Photovoltaics*, A. Hilger, Bristol, Ujedinjeno Kraljevstvo (1986)
- [16] T. Markvart, G. H. Bauer, *What is the useful energy of a photon?*, Appl. Phys. Lett. 101, 193901 (2012)
- [17] M. Burgelman, K. Decock, A. Niemegeers, J. Verschraegen, S. Degrave, *SCAPS manual* (2018)
- [18] R. Wei, *Modelling of Perovskite Solar Cells*, Masters Thesis, Queensland University of Technology (2018)

7. ŽIVOTOPIS

Lara Bagladi [REDACTED] 2015. godine maturira V. gimnaziju u Zagrebu. 2015. godine upisuje studij primijenjene kemije na Fakultetu kemijskog inženjerstva i tehnologije Sveučilišta u Zagrebu. U rujnu 2018. godine stiče akademski naziv sveučilišne prvostupnice primijenjene kemije. Od ljeta 2017. godine volontira na znanstveno-istraživačkim projektima na Institutu Ruđer Bošković u Laboratoriju za konverziju energije i senzore.