

Vilniaus universitetas

Fizikos fakultetas

Fotonikos ir nanotechnologijų institutas

Darius Antonovič

**SAULĖS ELEMENTŲ VOLTAMPERINIŲ CHARAKTERISTIŲ MODELIAVIMAS
„SYNOPSIS TCAD“ PROGRAMŲ PAKETU**

Magistro studijų baigiamasis darbas

Fotonikos ir nanotechnologijų studijų programa

Studentas:

Darius Antonovič

Darbo vadovas:

Prof. dr. Vincas
Tamošiūnas

Instituto direktorius:

Prof. habil. dr
Saulius Antanas
Juršėnas

Vilnius 2023

Turinys

Įvadas	1
1. Literatūros apžvalga	2
1.1 Saulės elementų struktūra ir veikimo principai	2
1.2 Svarbiausi saulės elementų parametrai	6
1.3 „Sentaurus Device“ veikimo principai	8
1.4 Optinių modeliavimų integravimas į „Sentaurus Device“	10
1.5 Spindulių sekimo algoritmas	11
2. Tyrimų metodika	13
2.1 Saulės elementų struktūrų aprašymai ir šablonų veikimo principai	13
2.2 Duomenų apdorojimas ir parametų nustatymas	17
2.3 Spektrų formatavimas ir fotonų srautų normavimas	19
3. Rezultatai	21
3.1 Spektrų optimizavimas kristalinio silicio (c – Si) saulės elementams	21
3.2 Spektrų optimizavimas vienos sandūros GaAs saulės elementams	26
3.3 Spektrų optimizavimas dviejų sandūrų GaInP/GaAs saulės elementams	31
3.4 Optimizuotų spektrų palyginimas	35
Išvados	38
Literatūros sąrašas	39
Bibliografija	42
Santrauka	43

Ivadas

Sparčiai didėjanti pasaulinė energijos paklausa ir kylantys šiltnamio efektą sukeliančių dujų lygiai verčia ieškoti alternatyvių energijos šaltinių susidoroti su šiomis problemomis. Tarptautinė energetikos agentūra (angl. International Energy Agency – IEA) apskaičiavo, kad pasaulinės anglies dvideginio (CO₂) emisijos gali būti sumažintos maždaug 70% iki 2050 m. išnaudojant atsinaujinančius energijos šaltinius kaip biomasę, vėjo, geoterminę ir saulės energiją [1]. Saulės energetikai tenka svarbus vaidmuo, kadangi nuo 2001 m. bendra pasaulio fotovoltinių sistemų galia kasmet auga 47 % [1], o kristalinių silicio saulės modulių savikaina 2022 m. pasiekė 18ct/W [2]. Šiandien silicio saulės elementai sudaro 95% komercinių saulės elementų pasaulinės rinkos [3], o jų našumas siekia 26.3% [4]. Našumo rekordą vienos sandūros elementams išlaiko vienos sandūros GaAs saulės celės su 27.6% našumu [5]. Vis plačiau vystomos kelių sandūrų saulės celių technologijos sudaro sąlygas pasiekti net didesnes našumo vertes kaip, pavyzdžiui, 32.8% [6] su dviejų sandūrų GaInP/GaAs celėmis. Tačiau, pagaminus saulės elementus, yra būtina patikrinti jų savybes, kas yra atliekama apšviečiant elementą saulės imitatoriumi ir matuojant jų voltamperines (I – V) kreives ir kvantinį našumą (angl. quantum efficiency – QE). Saulės imitatoriai tradiciškai buvo gaminami naudojant ksenono (Xe) dujų išlydžio arba metalo halogenidų išlydžio lempas, tačiau jas reikia įkaitinti ir atvėsinti, būtina įdėti priežiūra ir jų tarnavimo laikas yra gana ribotas. Tačiau pastaraisiais metais didelės galios puslaidininkinių šviestukų (angl. light – emitting diode – LED) technologijos buvo išvystytos įvairiems spektriniams intervalams, kas sukūrė sąlygas vystyti šviestukų pagrindo saulės imitatorius, galinčius pakeisti ksenoninius [7]. Be to, prieš inicijuojant aukšto našumo saulės elementų gamybą yra reikalingas detalus prietaiso modeliavimas, kad būtų išvengti nereikalingi gamybos kaštai ir įvertintos saulės celės savybės.

Šio darbo tikslas buvo pritaikyti „Synopsis Sentaurus TCAD“ programų paketą modeliuoti procesus skirtingų rūšių saulės elementuose: išnaudoti pakete įdiegtus spindulių sekimo (angl. ray tracing) algoritmus šviesos sklidimo saulės elementuose modeliavimui, ištirti, kokį poveikį skirtingo tipo saulės celėms gali turėti standartinio „AM1.5G“ spektro ir šviestukus naudojančių saulės imitatorių spektrų skirtumai, bei optimizuoti saulės imitatorių spektrus skirtingų rūšių saulės elementams.

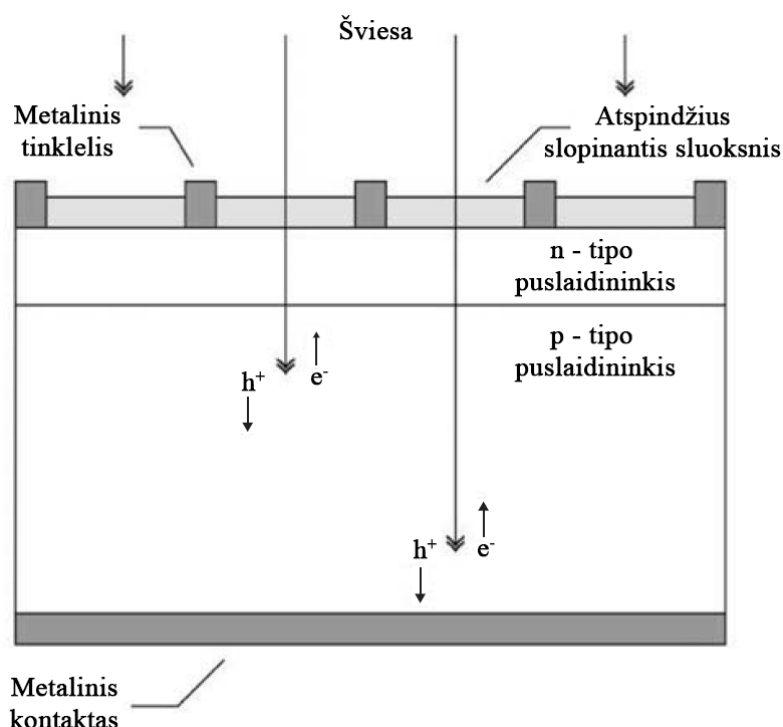
Dėkoju prof. habil. dr. Eugenijui Gaubui už sudarytą galimybę naudotis Fotonikos ir nanotechnologijų instituto (FNI) Fotelektrinių reiškinų tyrimų grupės skaičiavimų serverių resursais ir „Synopsis Sentaurus TCAD“ licenzija.

1. Literatūros apžvalga

1.1 Saulės elementų struktūra ir veikimo principai

Puslaidininkiniai saulės elementai arba saulės celės yra, iš esmės, paprasti prietaisai. Puslaidininkiai geba sugerti šviesą ir dalį sugertų fotonų energijos perduoti krūvininkams – elektronams ir skylėms. Puslaidininkinis diodas atskiria ir surenka šiuos krūvininkus ir nukreipia sugeneruotą elektros srovę pasirinkta kryptimi. Taigi saulės elementas yra tiesiog puslaidininkinis diodas, kuris buvo kruopščiai suprojektuotas ir pagamintas, kad vyktų efektyvus šviesos sugėrimas ir konversija į elektros energiją [8].

Įprastos vienos sandūros saulės celės struktūros iliustracija yra pavaizduota 1 pav. Saulės šviesa krinta iš viršaus, ant priekinio saulės celės paviršiaus. Metalinis tinklelis ant priekinio paviršiaus sudaro vieną iš diodo kontaktų, pro kurio tarpus krentanti šviesa pasiekia žemiau esantį puslaidininkį, kuriame ši šviesa yra sugerama ir paverčiama elektros energija. Atspindžius slopinantis sluoksnis tarp tinklelio juostų padidina į puslaidininkį praleidžiamos šviesos kiekį. Puslaidininkinis diodas yra sukuriamas, kai n – tipo puslaidininkis ir p – tipo puslaidininkis yra sujungiami, kad susidarytų p – n sandūra. Tai paprastai pasiekama per specifinių priemaišų difuziją arba nusodinimo procesus. Kitas diodo elektrinis kontaktas yra suformuojamas iš metalinio sluoksnio saulės elemento gale.

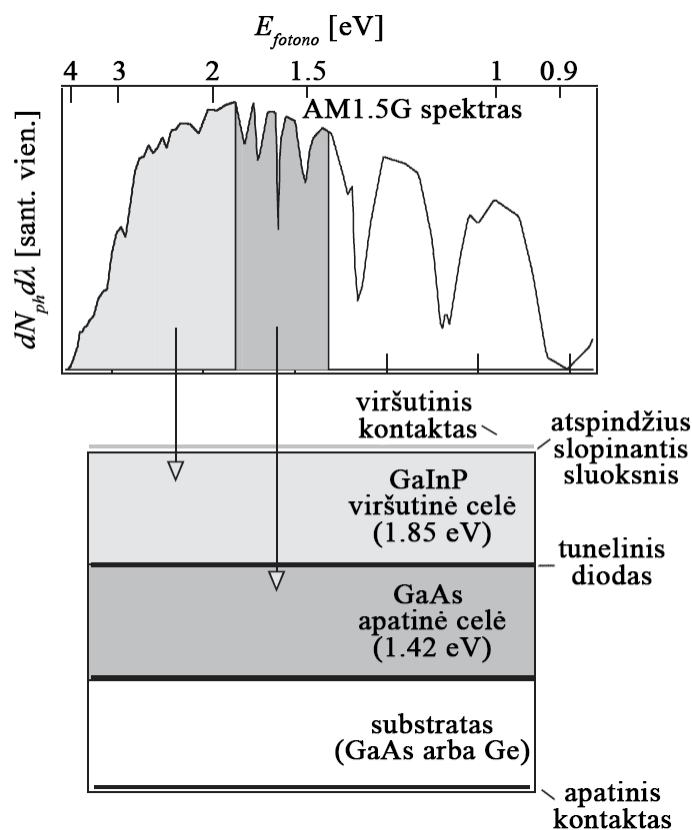


1 pav. Įprasto vienos sandūros saulės elemento veikimo principas. Pavaizduota elektronų ir skylių porų ($e^- - h^+$) generacija. Pagal [8].

Saulės celės gali būti gaminamos iš įvairių puslaidininkinių medžiagų, dažniausiai silicio (Si): kristalinio, polikristalinio ir amorfinio. Saulės celės taip pat gaminamos iš kitų puslaidininkinių

medžiagų kaip GaAs, GaInP, Cu(InGa)Se₂ ir CdTe. Saulės celių medžiagos parenkamos daugiausia atsižvelgiant į tai, kaip jų absorbcijos charakteristikos atitinka Saulės spektrą, bei į gamybos kaštus [8]. Silicis yra dažniausias pasirinkimas dėl to, kad jo absorbcijos charakteristikos gana tiksliai atitinka Saulės spektrą, o silicio gamybos technologijos yra gerai išvystytos dėl medžiagos paplitimo puslaidininkinės elektronikos pramonėje.

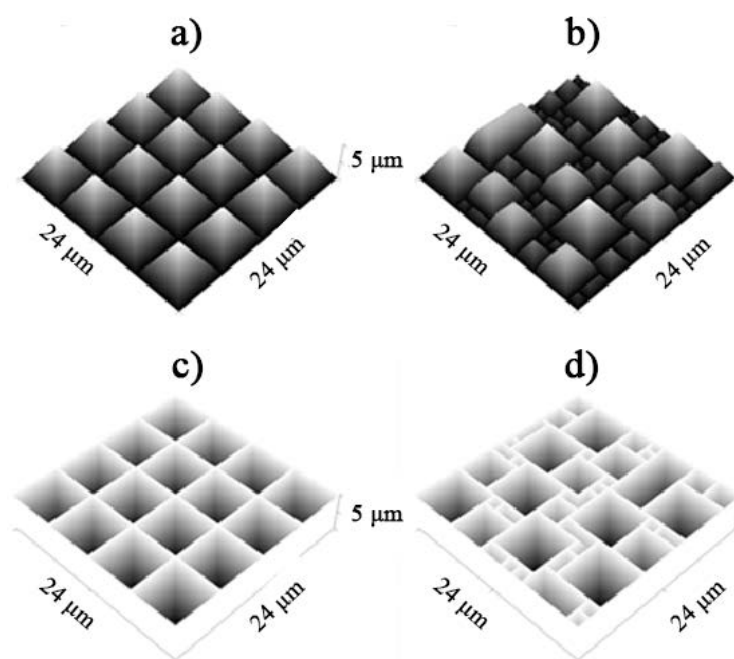
Tačiau vienos sandūros saulės celės atveju našumas yra ribojamas pačios celės konstrukcijos: fotonų, kurių energija yra didesnė už saulės celės medžiagos draustinį juostos tarpą, perteklinė energija yra prarandama šilumos forma, o fotonai, kurių energija yra mažesnė už saulės celės medžiagos draustinį juostos tarpą, yra išvis nesugeriami. Šią problemą išsprendžia kelių sandūrų saulės elementai, sudaryti iš kelių sudėtinių saulės celių su skirtingų puslaidininkinių medžiagų pagrindais: Saulės spektras yra išskirstomas į kelis spektrinius intervalus ir kiekvienam iš šių spektrinių intervalų yra suderinamas sudėtinio saulės elemento medžiagos draustinės juostos tarpas [8]. Šios technologijos koncepcija yra pavaizduota 2 pav.



2 pav. Dviejų sandūrų GaInP/GaAs saulės elemento struktūros iliustracija, nurodanti, kuriuos spektrinius intervalus sugeria kiekviena sudėtinė celė. Pagal [8].

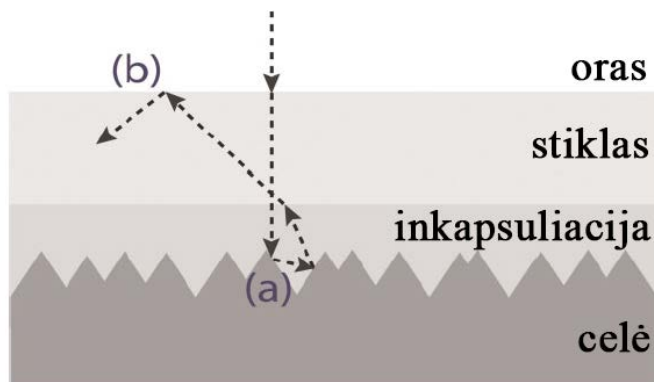
Saulės elemento šviesos sugertis žymiai padidėja, kai jo paviršius yra tekstūruotas. Kai celės paviršius yra grubus, o ne plokščias, jos atspindys sumažėja ir didesnė dalis ant prietaiso krintančios

spinduliuotės gali būti išnaudota, kas leidžia pasiekti didesnę našumą. Šis aspektas yra ypač svarbus saulės elementams su silicio padėklu, kadangi priekinio paviršiaus atspindžio sumažinimas, o ne šviesos pagavimo tobulinimas, yra pagrindinė priemonė padidinti trumpojo jungimo srovę (I_{sc}). Keturi skirtingų tekstūrų pavyzdžiai yra parodyti 3 pav. Iš šių būdų dažniausiai pasitaikantis yra netvarkingai išdėstytų skirtingų dydžių vertikalinių piramidžių masyvas, kuris yra suformuojamas esdinant $\{100\}$ orientacijos silicio padėklą šarminiu tirpalu [9]. Viena iš mažiau paplitusių tekstūrų yra tvarkingai išdėstytų vienodo dydžio apverstų piramidžių masyvas, reikalaujantis santykinai brangių fotolitografijos procedūrų. Nepaisant aukštos kainos, tokia tekstūra užtikrina itin silpnus atspindžius, todėl yra naudojama aukščiausių našumų silicio saulės elementų projektavime.



3 pav. Skirtingų silicio saulės elementų paviršiaus tekstūros: a) tvarkingai išdėstytos vertikalios vienodo dydžio piramidės; b) netvarkingai išdėstytos vertikalios skirtingo dydžio piramidės; c) tvarkingai išdėstytos apverstos vienodo dydžio piramidės; d) netvarkingai išdėstytos apverstos skirtingo dydžio piramidės. Pagal [10].

Saulės elementai yra sujungiami į modulius, kuriuose jie yra inkapsuliuojami tam, kad būtų užtikrintas ilgalaikis stabilumas esant realioms veikimo sąlygoms. Be to, yra žinoma, kad yra įmanoma pagerinti modulio našumą tinkamai parenkant inkapsuliacijos sluoksnio ir dengiamojo stiklo sluoksnio lūžio rodiklius. Pavyzdžiui, šviesa, kurią atspindi tekstūruotas saulės elemento paviršius (4 pav., (a)), gali būti sugrąžinama atgal į saulės elementą dėl visiško vidaus atspindžio stiklo ir oro riboje (4 pav., (b)) [9].



4 pav. Šviesos atspindžiai inkapsuliuotame elemente: a) Krintanti šviesa dalinai atsispindi nuo tekstūruoto paviršiaus; b) Oro ir stiklo sluoksnio riboje atspindėtas šviesos spindulys kartais visiškai atsispindi modulio viduje. Pagal [9].

Į Saulės šviesą galima žiūrėti kaip į fotonų su skirtingomis energijomis srautą. Spinduliuotės bangos ilgis λ ir fotono energija E_λ yra susiję pagal:

$$E_\lambda = \frac{h * c}{\lambda}, \quad (1)$$

kur h – Planck'o konstanta, c – šviesos greitis. Tik fotonai su energija, kuri yra didesnė už draustinės juostos plotį, su didele tikimybe gali sukurti elektrono – skylės porą. Todėl Saulės šviesos spektras yra svarbus projektuojant saulės elementus.

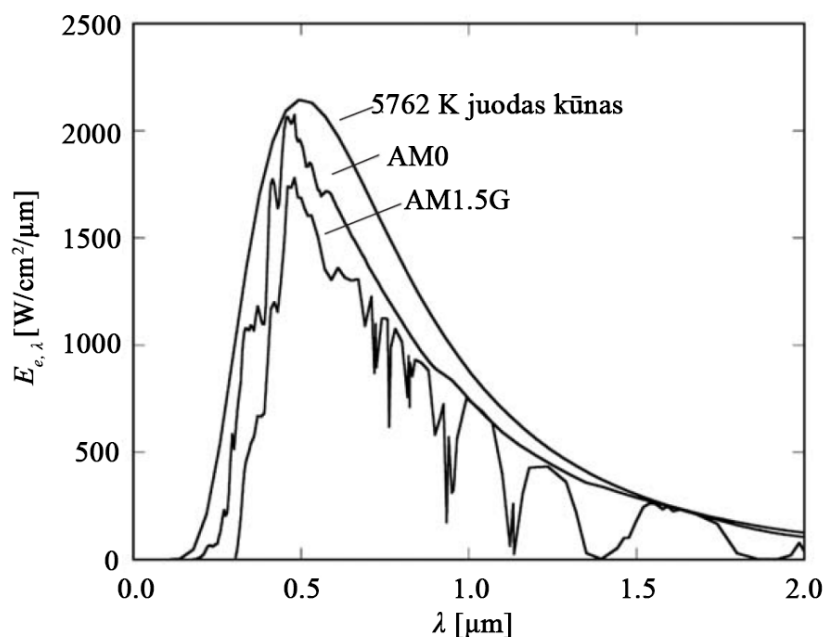
Saulės paviršiaus temperatūra yra apytiksliai 5762 K, o jos spektras yra artimas tos pačios temperatūros juodo kūno spinduliuotės spektrui. Saulės spinduliuotė, kaip ir visų juodų kūnų spinduliuotė, yra izotropinė. Tačiau didelis Žemės atstumas nuo Saulės reiškia, jog tik tie fotonai, kurie yra skleidžiami tiesiai į Žemę, prisideda prie Saulės spektro, stebimo iš Žemės. Todėl, kalbant apie praktinius taikymus, į Žemę krintančią šviesą galima laikyti lygiagrečiais fotonų srautais. Prie pat viršutinės Žemės atmosferos ribos spinduliuotės energinė apšvieta, arba Saulės konstanta, yra apie 1.353 kW/m^2 , o spektrinis pasiskirstymas vadinamas nulinės oro masės („AM0“) spinduliuotės spektru [8]. Oro masė (angl. air mass – AM) yra parametras, apibūdinantis, kokio storio atmosferos sluoksnį praeina šviesos spindulys ir yra apskaičiuojamas pagal:

$$AM = \frac{1}{\cos\theta}, \quad (2)$$

kur θ – šviesos kritimo kampas ($\theta = 0$, kai Saulė yra tiesiai virš stebėtojo). „AM“ parametras ties Žemės paviršiumi yra visada didesnis arba lygus 1.

Saulės celių eksploatacinės savybės yra dažniausiai matuojamos „AM1.5“ ($\theta = 48.2^\circ$) spektro sąlygomis, esant 1 kW/m^2 energinei apšvietai [8]. Žemės paviršių pasiekia ne tik tiesiogiai iš Saulės

pasiekama spinduliuotė bet ir išsklaidyta aplinkoje ir atmosferoje šviesa. Ši difuzinė (netiesioginė) komponentė gali, pavyzdžiui, sudaryti dešimtis procentų šviesos, krentančios ant saulės elemento. Todėl, greta „AM“ parametro, paprastai yra nurodoma ir papildoma raidė, kuri parodo, ar išmatuotame spektre yra difuzinė komponentė, ar ne. „AM1.5G“ (angl. global) spektre yra difuzinė komponentė, o „AM1.5D“ (angl. direct) – ne. Juodo kūno ($T = 5762$ K), „AM0“ ir „AM1.5G“ spinduliuotės spektrai yra parodyti 5 pav.

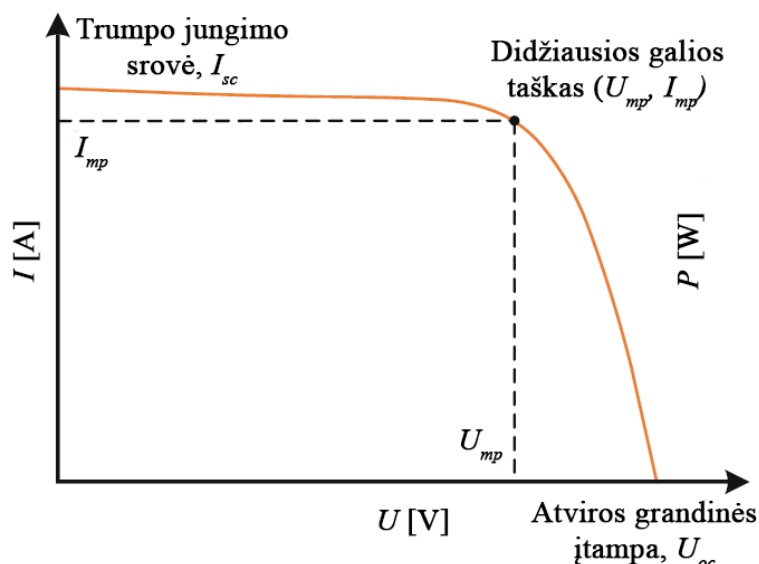


5 pav. 5762 K temperatūros juodo kūno, „AM0“, „AM1.5G“ spektrai. Pagal [8].

1.2 Svarbiausi saulės elementų parametrai

Saulės elementų voltamperinės charakteristikos matuojamos standartinėmis sąlygomis: $t = 25$ °C temperatūroje, esant $E_e = 1$ kW/m² energinei apšviestai, esant „AM1.5G“ spektrui [7]. Svarbiausi saulės celės voltamperinės charakteristikos parametrai (6 pav.) yra šie:

- Atvirosios grandinės įtampa (angl. open – circuit voltage – U_{oc}) – išmatuota įtampos vertė tarp saulės elemento kontaktų, kai yra prijungta begalinė apkrovos varža. Ši įtampa yra didžiausia, kurią gali generuoti elementas.
- Trumpojo jungimo srovė (angl. short – circuit current – I_{sc}) – didžiausia srovė, kurią gali sugeneruoti saulės elementas, kada abu elemento kontaktai yra sujungti ir nėra apkrovos varžos.
- Didžiausios galios taškas (angl. maximum power point – MPP) – taškas, kuriame elementas teikia didžiausią įmanomą elektrinę galią, o įtampa ir srovės stipris šiame taške žymimi atitinkamai kaip U_{mp} ir I_{mp} .



6 pav. Saulės elemento I – V charakteristika su pažymėtais trumpojo jungimo srovės (I_{sc}), atvirosios grandinės įtampos (U_{oc}) ir didžiausios galios taškais (U_{mp} , I_{mp}). Pagal [11].

Dar vienas svarbus parametras yra kvantinis našumas (angl. quantum efficiency – QE), kuris yra naudojamas apibūdinti sąryšį tarp trumpojo jungimo srovės (I_{sc}) ir fotonų srauto. Kvantinį našumą galima apibrėžti dviem būdais [12]. Pirmas yra išorinis kvantinis našumas (angl. external quantum efficiency – EQE), apibrėžiantis tikimybę, kad λ bangos ilgio fotonas gali sugeneruoti elektroną, aprašomas kaip:

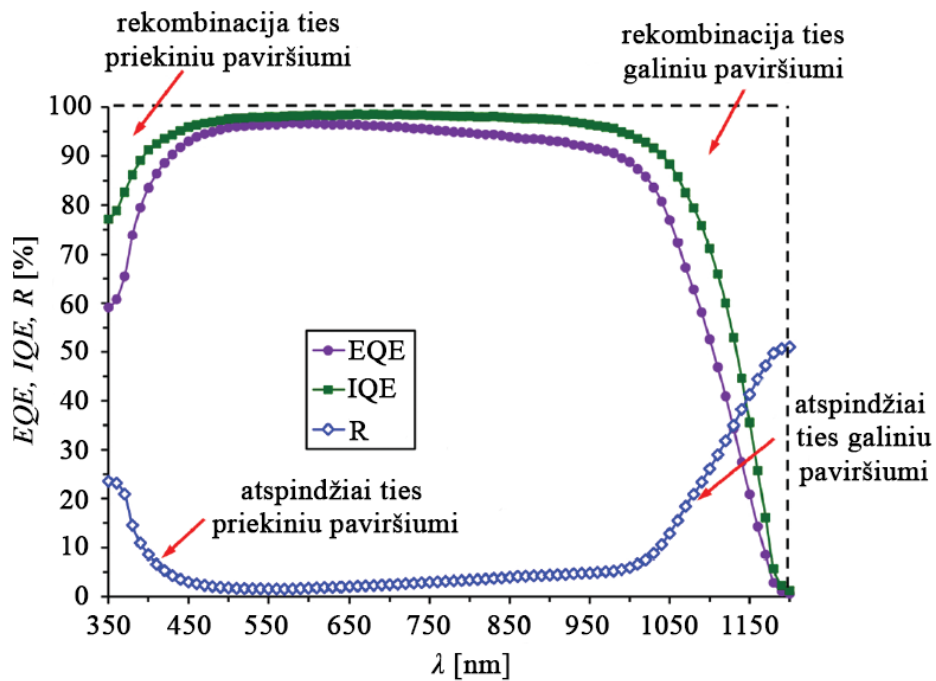
$$EQE(\lambda) = \frac{I_{sc}(\lambda)}{q * A * Q(\lambda)}, \quad (3)$$

kur $Q(\lambda)$ – krintančio fotonų srauto tankis (skaičius tenkantis ploto vienetui per laiką), A – saulės elemento plotas, q – elektrono krūvis.

Antrasis yra vidinis kvantinis našumas (angl. internal quantum efficiency – IQE), kuris yra apibrėžiamas kaip tikimybė, kad krintantis λ bangos ilgio fotonas, jau sugertas elemento, gali sugeneruoti elektroną [12]. Vidinis kvantinis našumas nurodo santykį tarp fotokrūvininkų, prisidedančių prie trumpojo jungimo srovės, skaičiaus ir saulės elemento sugertų fotonų skaičiaus:

$$IQE(\lambda) = \frac{I_{sc}(\lambda)}{qA(1 - T(\lambda))(1 - R(\lambda))Q(\lambda)}, \quad (4)$$

čia $R(\lambda)$ – atspindžio koeficientas, $T(\lambda)$ – saulės elemento šviesos pralaidumo koeficientas.



7 pav. Įprastos vidinio ir išorinio kvantinių našumų (IQE ir EQE) bei atspindžio koeficiento (R) priklausomybės nuo krįntančios šviesos bangos ilgio silicio saulės elementui. Pagal [13].

Kvantinis našumas gali būti pateiktas kaip bangos ilgio arba energijos funkcija (7 pav.). Nors kvantinio našumo priklausomybė nuo bangos ilgio idealios saulės celės atveju turėtų stačiakampę formą (7 pav. juoda punktyrinė linija), daugumos saulės elementų kvantinis našumas sumažėja dėl rekombinacijos efektų ar atspindžių. Tie patys mechanizmai, kurie daro įtaką surinkimo tikimybei, taip pat daro įtaką kvantiniam našumui. Pavyzdžiui, priekinio paviršiaus pasyvacija yra svarbiausia šalia paviršiaus generuojamiems krūvininkams, o kadangi mėlyna šviesa sugerama labai arti paviršiaus, sparti priekinio paviršiaus rekombinacija daugiausiai paveiks mėlynąją kvantinio našumo spektro dalį [14]. Fotonų, kurių energija yra mažesnė už draustinės juostos tarpą, kvantinis našumas yra artimas 0.

1.3 „Sentaurs Device“ veikimo principai

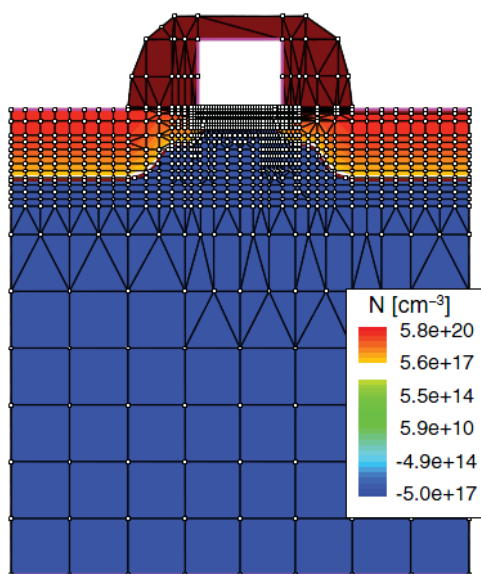
Šiame darbe naudojama „Synopsys Sentaurs TCAD“ paketą sudaro skirtingų įrankių ir programų rinkinys, tačiau paketo pagrindą sudaro „Sentaurs Device“ programa, kuri skaitmeniniu būdu modeliuoja atskirų puslaidininkinių prietaisų arba kelių puslaidininkinių prietaisų, sujungtų grandinėje, elektrines savybes. Kontaktų srovės, įtampos ir krūviai yra apskaičiuojami remiantis fizinių prietaisų lygčių rinkiniu, apibūdinančiu krūvininkų pasiskirstymus ir laidumo mechanizmus. Realus puslaidininkinis prietaisas kaip, pavyzdžiui, tranzistorius, programoje yra vaizduojamas kaip virtualus įrenginys, kurio fizinės savybės yra diskretizuotos ant netolygaus mazgų tinklelio (8 pav.) [15].

Taigi, virtualus prietaisas yra tikro įrenginio aproksimacija. Tolydžios savybės, kaip legiravimo profiliai, yra atvaizduojamos ant išsklaidyto tinklelio, todėl yra apibrėžiamos tik ribotame kiekyje diskrečių erdvės taškų. Legiravimo laipsnis bet kuriame taške tarp mazgų arba bet koks fizinis dydis, apskaičiuotas „Sentaurus Device“ programos, gali būti gautas interpoliuojant. Kiekvieno virtualaus prietaiso struktūra yra aprašoma „Synopsys Sentaurus TCAD“ įrankių rinkinio „TDR“ failu, kuriame yra ši informacija:

- Tinklelis, kuriame yra įvairių sričių aprašymai: ribos, medžiagų rūšys ir elektrinių kontaktų vietos. Be to, jame yra visų diskrečių mazgų vietos. Bet kurio prietaiso struktūrai optimalus tinklelis skiriasi priklausomai nuo modeliavimo tipo. Paprastai, daugumai dvimačių (2D) modeliavimų bendras mazgų skaičius yra nuo 2000 iki 4000 [15]. Aukštų galių prietaisams ir trimatėms (3D) struktūroms reikalingas žymiai didesnis mazgų skaičius.
- Informacija apie prietaisų savybes, kaip legiravimo profilius, pateikti susietų su diskrečiais mazgais duomenų forma. 8 pav. parodytas įprastas pavyzdys: MOSFET struktūros legiravimo profilis, diskretizuotas mišrių elementų tinkleliu.

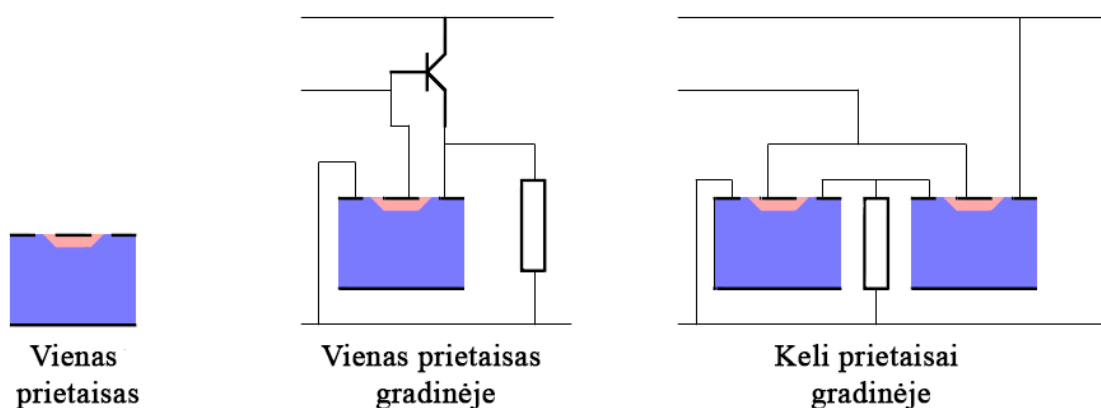
„Sentaurus Device“ pasižymi įvairiomis funkcijomis kaip:

- Platus prietaisų fizikos ir puslaidininkinių įrenginių savybių modelių rinkinys: dreifiniai, difuziniai, termodinaminiai ir hidrodinaminiai modeliai.
- Bendras įvairių prietaisų geometrijų palaikymas: 1D, 2D, 3D ir 2D cilindrinė.
- Mišrių režimų palaikymas „SPICE“ grandinių modeliams.



8 pav. Dvimatis (2D) legiravimo profilis, kuris yra diskretizuotas modeliavimo tinklelio mazguose, pavyzdys [15].

Įvairių prietaisų ir grandinių suderinamumas „Sentaurs Device“ programai suteikia galimybę vykdyti trijų rūšių modeliavimus: vieno prietaiso, vieno prietaiso grandinėje ir kelių prietaisų grandinėje (9 pav.). Kelių prietaisų modeliavimas gali apjungti prietaisus su skirtingų matmenų tinkeliais, o atskiruose įrenginiuose galima pritaikyti skirtingus fizinius modelius, kas suteikia didesnę lankstumą.

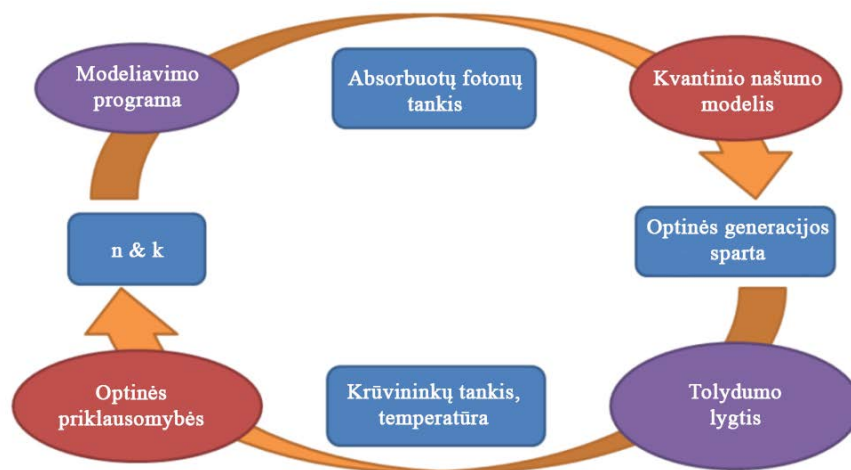


9 pav. Trijų rūšių modeliavimai. Pagal [15].

1.4 Optinių modeliavimų integravimas į „Sentaurs Device“

„Sentaurs Device“ leidžia apskaičiuoti sugertos spinduliuotės generuojamą krūvį naudojant skirtingus sprendimo metodus (angl. solver) kaip, pavyzdžiui, pernašos matricos metodą (angl. transfer matrix method – TMM), spindulio sekimo algoritimą (angl. ray tracing) ir pluošto sklidimo metodą (angl. beam propagation method – BPM) arba pritaikyti išorines programas [15].

Nepriklausomai nuo pasirinkto optinio modeliavimo būdo, „Sentaurs Device“ sąsaja optinės generacijos spartos modelių susiejimui su elektriniais modeliais yra identiška (10 pav.). Pavyzdžiui, modeliavimo srities regionui galima nustatyti lūžio rodiklį (n) ir ekstinkcijos koeficientą (k), naudojant skirtingus kompleksinių lūžio rodiklių modelius, tokius kaip, pavyzdžiui, pastovius, priklausomus nuo bangos ilgio, priklausomus nuo temperatūros, priklausomus nuo krūvininkų tankio arba kitus naudotojo apibrėžtus. Priklausomai nuo lūžio rodiklio (n) ir ekstinkcijos koeficiento (k) verčių, pasirinkta modeliavimo programa apskaičiuoja absorbuotų fotonų tankį, kuris kiekvienam tinklelio mazgui duoda absorbuotų fotonų skaičių tūrio vienetui ir sekundei.



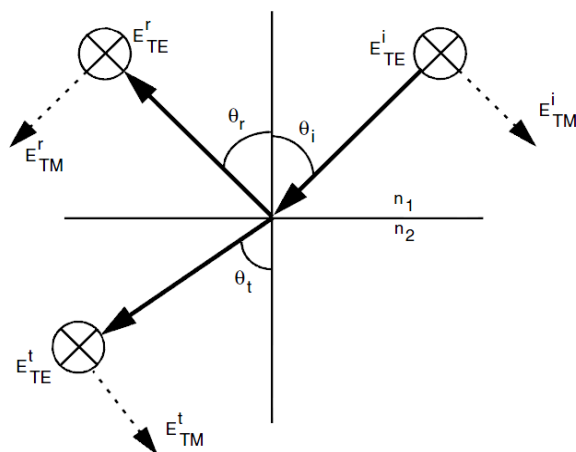
10 pav. Optinių įrenginių modeliavimo seka. Pagal [15].

Pasirinkus norimą kvantinio našumo modelį (angl. quantum yield model („Sentaurus Device“ sąvoka)), galima apibrėžti kaip absorbuotų fotonų tankis bus konvertuojamas į optinės generacijos spartą. Kvantinio našumo modelio sudėtingumas svyruoja nuo supaprastinto modelio (angl. unity), pagal kurį daroma prielaida, kad kiekvienas absorbuotas fotonas sukuria vieną elektrono – skylės porą, iki sudėtingesnių modelių (angl. effective absorption), kuriuose atsižvelgiama į laisvų krūvininkų absorbciją. Be to, leidžiama nustatyti dar sudėtingesnius vartotojo apibrėžtus modelius.

Optinės generacijos sparta yra toliau įterpiama į tolydumo lygtį (angl. continuity equation), todėl visos kitos lygtys gali būti nuosekliai išspręstos su šia optinės generacijos sparta. Priklausomai nuo pasirinkto kompleksinio lūžio rodiklio modelio, lūžio rodiklio ir ekstinkcijos koeficiento vertės gali priklausyti nuo temperatūros ar krūvininkų tankio. Tokiu atveju anksčiau aprašyti veiksmai kartojami tol, kol sprendiniai konverguos. Tačiau daugeliu atvejų inertiškiems įrenginiams temperatūros ir krūvininkų tankio įtaka lūžio rodiklio (n) ir ekstinkcijos koeficiento (k) vertėms yra menka, tad ciklas yra įvertinamas tik vieną kartą.

1.5 Spindulių sekimo algoritmas

„Sentaurus Device“ palaiko fotogeneracijos modeliavimą naudojant spindulių sekimo algoritimą (angl. ray tracing) dvimatėms (2D) ir trimatėms (3D) struktūroms su naudotojo pasirinkta geometrija. Lūžio, sklaidimo ir atspindžio skaičiavimai yra paremti geometrine optika, gali būti apibrėžtos specialios kraštinės sąlygos. Dviejų tinklelių tankių sistema gali būti naudojama siekiant pagreitinti modeliavimus su spindulių sekimo algoritmu. Kiekviena sritis ir medžiaga privalo turėti apibrėžtą kompleksinį lūžio rodiklį parametru faile. Jeigu nurodytas lūžio rodiklis lygus 0, tai jo vertė yra nustatoma kaip 1.



11 pav. Krintantis spindulys skyla į atspindėtą ir praėjusį spindulius ties skiriamąja riba: „TE“ modos komponentės poliarizacijos vektorius išlaiko tą pačią kryptį, o „TM“ modos komponentės poliarizacijos vektorius – keičia kryptį [15].

Įprastiniam spindulio sekimui naudojamas rekursinis modelis: jis prasideda nuo krintančio spindulio ir sukuria dvejetainį „medį“, kurio „šakos“ aprašo spindulių pernašą ir atspindį. Krintantis spindulys pasiekia ribą tarp dviejų terpių su skirtingais lūžio rodikliais (n_1 ir n_2), dėl ko atsiranda atspindėtas ir praėjęs spinduliai (11 pav.). Krintantis, atspindėtas ir praėjęs spinduliai yra atitinkamai pažymėti raidėmis i , r ir t , o jų kampai – atitinkamai θ_i , θ_r , ir θ_t . Šie kampai gali būti aprašyti pagal Snell'io dėsnį:

$$n_1 \sin(\theta_i) = n_2 \sin(\theta_t) \quad (5)$$

Siekiant apibrėžti šiuos kampus, turi būti aiškiai apibrėžta kritimo plokštuma. Aprašius šią plokštumą, gali būti apibrėžtos „TE“ ir „TM“ poliarizacijos sąvokos [15]. Kai kompleksiniame lūžio rodiklyje yra įsivaizduojama dalis – ekstinkcijos koeficientas k , vyksta fotonų sugertis. Fotonų sugertis vyksta ne tik puslaidininkiuose, bet ir visose medžiagose, kuriose spindulių sekimo algoritmo ekstinkcijos koeficientas yra teigiamas. Norint ją konvertuoti į sugerties koeficientą, naudojama ši formulė:

$$\alpha(\lambda)[cm^{-1}] = \frac{4\pi k}{\lambda} \quad (6)$$

Atvejais, kada spinduliai yra atsitiktinai išsklaidomi, kaip, pavyzdžiui, ant grubių paviršių, reikalingas "Monte Carlo" tipo spindulių sekimo algoritmas. Sakykime, kad spindulys pasiekia dviejų medžiagų ribą. Pagal deterministinio modelio teoriją spindulys skils į atspindėtą dalį ir praėjusią dalį ties šia riba. „Monte Carlo“ modelio atveju tik vieno spindulio kelias yra sekamas, o atspindžio koeficientas lemia tikimybę, ar spindulys bus atspindėtas, ar praėjęs [15].

„Monte Carlo“ spindulių sekimo algoritmas įprastoje medžiagų riboje yra toks:

1. Apskaičiuojami atspindžio ir pralaidumo koeficientai, R ir T , iš medžiagų skiriamosios ribos.

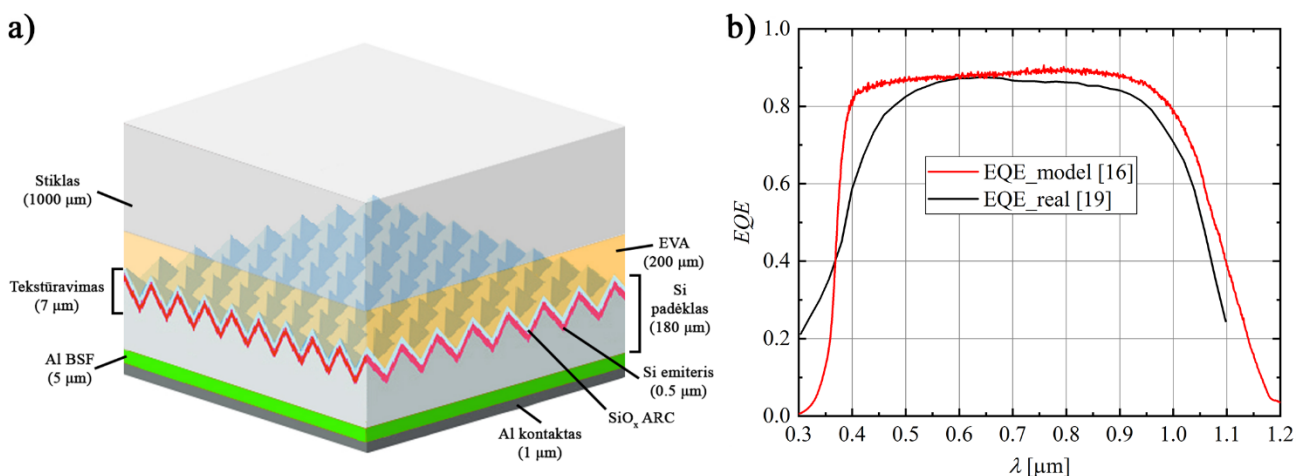
2. Sugeneruojamas atsitiktinis skaičius, r .
3. Jei $r \leq R$, tada spindulys yra tik atspindimas.
4. Jei $r > R$, tada spindulys yra tik praleidžiamas.

2. Tyrimų metodika

2.1 Saulės elementų struktūrų aprašymai ir šablonų veikimo principai

Šiame darbe pristatomi modeliavimai buvo atliekami su trijų skirtingų rūšių saulės elementais: kristalinio silicio (c – Si) saulės elementu [16], vienos sandūros GaAs saulės elementu [17] ir dviejų sandūrų GaInP/GaAs saulės elementu [18]. Visi šie elementai „Synopsys Sentaurus TCAD“ pakete turi modeliavimo šablonus, skirtus modeliuoti voltamperines charakteristikas, esant skirtingų spektrų apšvietai, ir išorinio kvantinio našumo (angl. external quantum efficiency – EQE) spektrus.

Kristalinio silicio (c – Si) saulės celės atveju buvo modeliuojamas 10 μm ilgio ir 10 μm pločio saulės elemento segmentas. Šis saulės elementas yra sudarytas iš 180 μm storio silicio padėklo su 10^{16} cm^{-3} priemaišų koncentracija. Padėklo viršutiniai 7 μm yra tekstūruotas paviršius, sudarytas iš tvarkingai išdėstytų vertikalių vienodo dydžio piramidžių, padengtų SiO_x atspindžius slopinančiu sluoksniu (angl. anti – reflective coating – ARC). Nors ši tekstūra yra retesnė realiuose taikymuose negu tekstūra su netvarkingai išdėstytomis vertikaliomis skirtingo dydžio piramidėmis, periodinės kraštinės sąlygos leidžia sumažinti skaičiavimų apimtį. Žemiau SiO_x sluoksnio yra 0.5 μm storio legiruoto silicio emiteris. Be to, žemiau padėklo yra 5 μm storio legiruoto aliuminio sluoksnis (angl. back surface field – BSF) ir 1 μm storio galinis kontaktas iš aliuminio. Virš saulės elemento yra 200 μm storio etilo vinilo acetato (EVA) inkapsuliacijos sluoksnis, o virš jo – 1000 μm storio stiklo sluoksnis. Modeliuojamos celės segmento struktūra pavaizduota 12a pav.

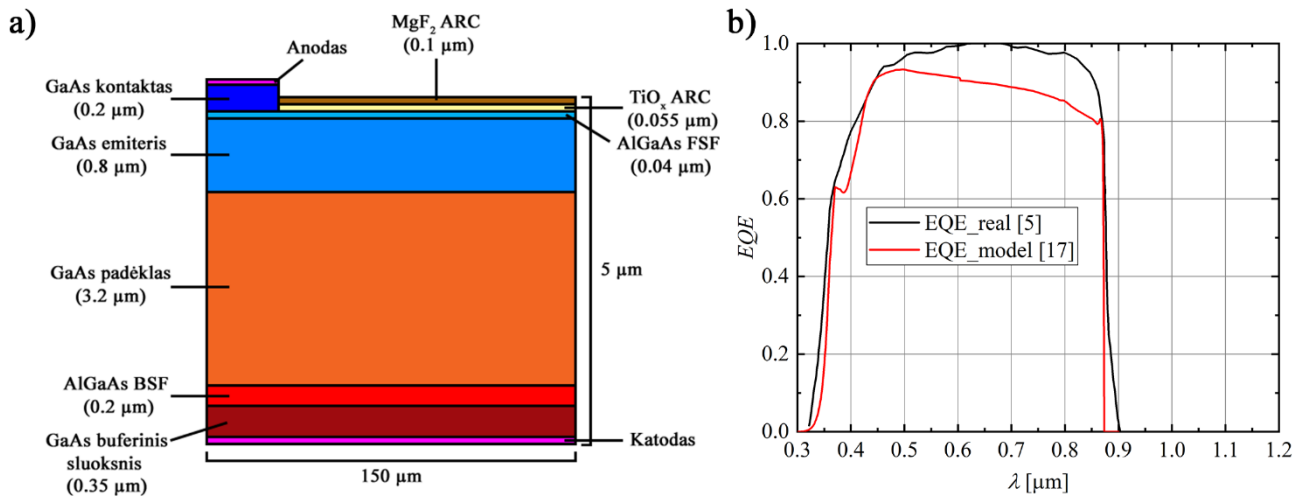


12 pav. a) Modeliuojamo kristalinio silicio (c – Si) saulės celės segmento struktūra. Pagal [16]; b) Modeliuojamos („EQE_model“) [16] ir realios („EQE_real“) [19] kristalinio silicio (c – Si) saulės celės išorinio kvantinio našumo (EQE) spektrai.

12b pav. yra pateikti modeliuojamos kristalinio silicio (c - Si) saulės celės [16] ir realaus atitiktens [19] išorinio kvantinio našumo (EQE) spektrai. Analizuojant spektrus, pastebima, jog modeliuojamos celės atveju išorinio kvantinio našumo (EQE) spektrui būdingos vertės virš $0.8 \cdot 0.4 - 1 \mu\text{m}$ bangų ilgių intervale, o realios celės atveju: $0.45 - 0.95 \mu\text{m}$ bangų ilgių intervale. Nepaisant šių skirtumų, modeliuojama celė patenkinamu tikslumu atkartoja realios celės išorinio kvantinio našumo (EQE) spektro formą.

Šio šablono trimačio (3D) atvejo programoje vienu metu yra modeliuojami keturi skirtingi atvejai su kristalinio silicio (c - Si) saulės celėmis: saulės celė su plokščiu atspindžius slopinančiu paviršiumi, saulės celė su atitinkamai vertikalių ir apverstų piramidžių atspindžius slopinančio sluoksnio tekstūravimu bei atvejis, kada celė yra inkapsuluota etilo vinilo acetatu (EVA) bei padengta viršutiniu stiklo sluoksniu. Atspindžius slopinančios dangos atspindžio koeficientų skaičiavimai yra paremti pernašos matricos metodu (angl. transfer matrix method – TMM), o galinis saulės elemento paviršius yra laikomas grubiu ir jam yra taikomas „Phong“ sklaidos modelis. Darbo metu dėmesys buvo skirtas atvejui, kada kristalinio silicio (c - Si) saulės celė turi atspindžius slopinantį sluoksnį su vertikalių piramidžių tekstūravimu ir etilo vinilo acetato (EVA) inkapsuliacija bei viršutiniu stiklo sluoksniu. Toks modelis tiksliausiai atitinka realaus silicio saulės elemento konstrukciją.

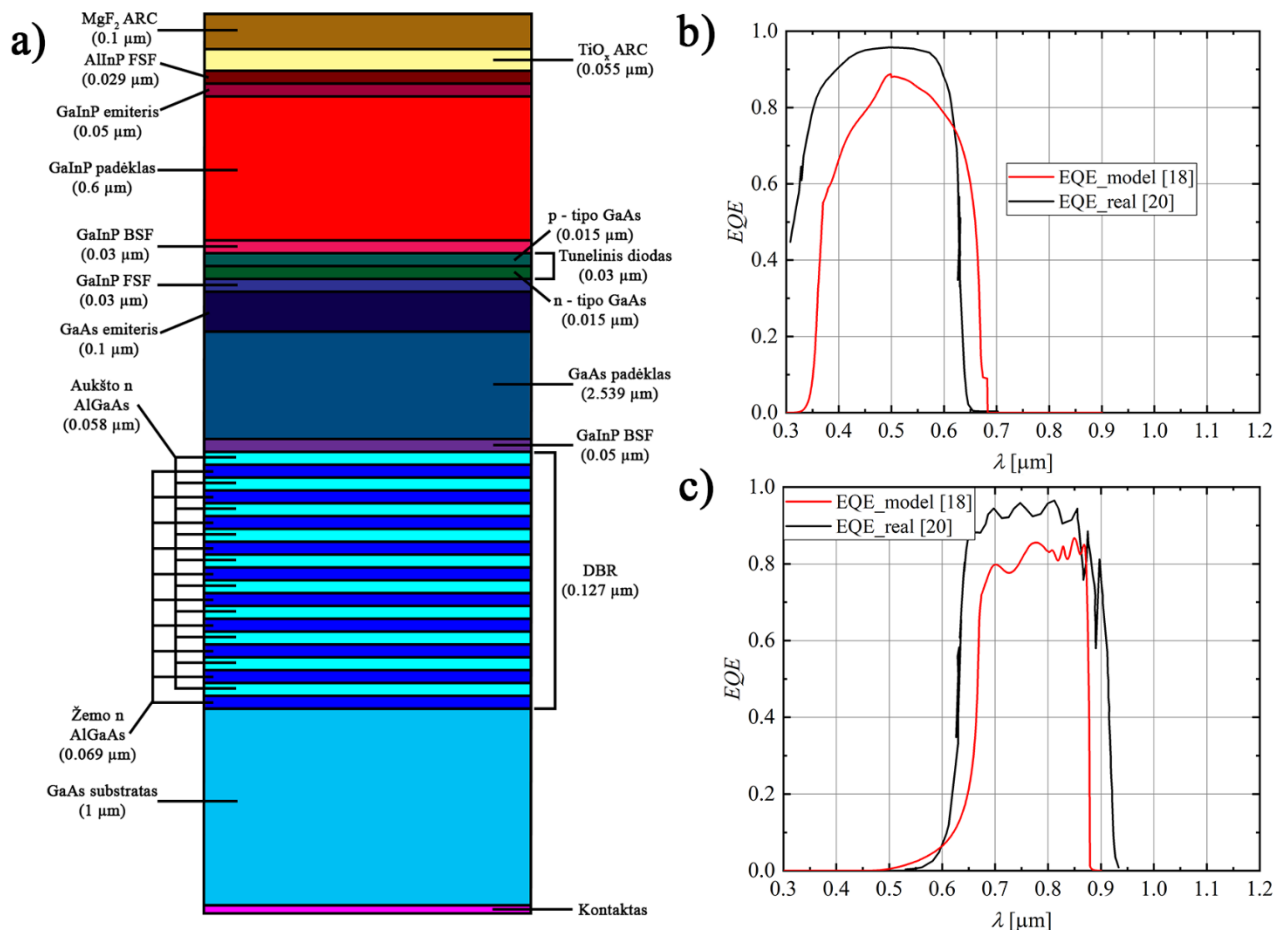
Priešingai nei su kristalinio silicio (c - Si) saulės cele, vienos sandūros GaAs celės atveju turime dvimatį (2D) modeliavimo šablona, kuris modeliuoja $150 \mu\text{m}$ pločio ir $5 \mu\text{m}$ storio saulės elemento segmentą. Kadangi vienos sandūros GaAs celė vietoj tekstūravimo turi plokščius atspindžius slopinančius sluoksnius (angl. anti - reflective coating – ARC), perėjimas į dvimatę (2D) erdvę neturi neigiamos įtakos modelio tikslumui ir leidžia dar labiau sumažinto modeliavimo apimtį. Šie sluoksniai yra $0.1 \mu\text{m}$ MgF_2 sluoksnis ties celės viršumi ir $0.055 \mu\text{m}$ TiO_x sluoksnį žemiau jo. Į kairę nuo šių sluoksnių yra $0.2 \mu\text{m}$ GaAs kontaktas, padengtas anodu. Šios celės pagrindas yra $3.2 \mu\text{m}$ GaAs padėklas su 10^{17}cm^{-3} priemaišų koncentracija. Virš šio padėklo yra $0.8 \mu\text{m}$ storio GaAs emiteris ir $0.04 \mu\text{m}$ storio legiruotas AlGaAs FSF (angl. front surface field) sluoksnis. Žemiau šio padėklo yra $0.2 \mu\text{m}$ storio legiruotas AlGaAs BSF (angl. back surface field) sluoksnis, $0.35 \mu\text{m}$ storio GaAs buferinis sluoksnis ir katodas. Modeliuojamo segmento iliustracija yra pateikta 13a pav.



13 pav. a) Modeliuojamo vienos sandūros GaAs saulės celės segmento struktūra. Pagal [17]; b) Modeliuojamos („EQE_model“) [17] ir realios („EQE_real“) [5] vienos sandūros GaAs saulės celės išorinio kvantinio našumo (EQE) spektrai .

13b pav. yra pateikti modeliuojamos vienos sandūros GaAs celės [17] ir realaus atitikmens [5] išorinio kvantinio našumo (EQE) spektrai. Žvelgiant į spektrus, pastebima, kad realios celės atveju yra pasiekiamas 1 vertės didžiausias išorinis kvantinis našumas (EQE), o modeliuojamos celės atveju – apytiksliai 0.9 vertės. Nors spektrų maksimumų vertės skiriasi, abiem atvejais didžiausio išorinio kvantinio našumo (EQE) vertės, t. y., virš 0.8, buvo išsidėsčiusios 300 – 875 nm diapazone. Taigi, modeliuojama celė didžiąja dalimi atkartoja realios celės spektro formą.

Dviejų sandūrų GaInP/GaAs celės atveju yra modeliuojamas 1 μm pločio ir 5 μm storio celės fragmentas, kurio struktūra yra pateikta 14a pav. Šiuo mes irgi turime dvimatį (2D) šabloną, kadangi celė irgi yra padengta plokščiais atspindžius slopinančiais sluoksniais (angl. anti – reflective coating – ARC): 0.1 μm MgF₂ sluoksniu ties celės paviršiumi ir 0.055 μm TiO_x sluoksniu žemiau jo. Tačiau ši celė ypatinga tuo, kad ji yra realiai sudaryta iš dviejų sudėtinių celių: viršutinės GaInP celės ir apatinės GaAs celės. Abi šios celės yra atskirtos 0.03 μm storio tuneliniu diodu. Šį diodą sudaro 0.015 μm storio p – tipo legiravimo GaAs sluoksniu žemiau viršutinės celės ir 0.015 μm storio n – tipo legiravimo GaAs sluoksniu virš apatinės celės. Viršutinės celės pagrindas yra 0.6 μm storio GaInP padėklas su $1.2 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ priemaišų koncentracija. Virš šio padėklo yra 0.05 μm storio GaInP emiteris ir 0.029 μm legiruotas storio AlInP FSF (angl. front surface field) sluoksnis. Žemiau padėklo yra 0.03 μm storio legiruotas GaInP BSF (angl. back surface field) sluoksnis.



14 pav. a) Modeliuojamo dviejų sandūrų GaInP/GaAs saulės celės segmento struktūra; Modeliuojamos („EQE_model“) [18] ir realios („EQE_real“) [20] dviejų sandūrų GaInP/GaAs saulės celės išorinio kvantinio našumo (EQE) spektrai: viršutinei celei (b) ir apatinei celei (c).

Apatinės celės pagrindas yra 2.539 μm storio GaAs padėklas su 10^{17} cm^{-3} priemaišų koncentracija. Virš šio padėklo yra 0.1 μm storio GaAs emiteris ir 0.03 μm storio legiruotas GaInP FSF (angl. front surface field) sluoksnis. Žemiau šio padėklo yra 0.05 μm storio legiruotas GaInP BSF (angl. back surface field) sluoksnis. Žemiau šio sluoksnio yra 0.127 μm storio paskirstytas Bragg'o reflektorius (angl. distributed Bragg reflector – DBR). Šis reflektorius yra sudarytas iš periodiškų aukšto ir žemo lūžio rodiklio (n) AlGaAs sluoksnių: pradedant aukšto lūžio rodiklio (n) 0.058 μm storio AlGaAs sluoksniu, kuris pereina į žemo lūžio rodiklio (n) 0.069 μm storio AlGaAs sluoksnį. Kiekvieno iš šių sluoksnių yra po 10. Žemiau šio reflektoriaus yra 1 μm storio GaAs substratas ir galinis kontaktas.

14b – 14c pav. pateikti dviejų sandūrų GaInP/GaAs saulės celės [18] ir realaus atitikmens [20] sandūrų išorinio kvantinio našumo (EQE) spektrai. Šiuo atveju nėra vieno išorinio kvantinio našumo (EQE) grafiko, nes celė yra sudaryta iš dviejų skirtingų medžiagų celių su skirtingais spektrais. Lyginant su praeitomis celėmis, matosi didesni nuokrypiai nuo spektrų, pateiktų šaltiniuose. Modeliuojamos viršutinė celės spektro maksimumas yra žemesnis nei realios ir nėra pilno formos atitikimo, tačiau abu spektrai apytiksliai sutelpa į panašų bangų ilgių intervalą. Modeliuojamos

apatinės celės spektras, lyginant su viršutine, tiksliau atitinka realios celės spektrą su panašia forma, didžiąja dalimi sutampančiu bangų ilgių intervalu bet su žemesniais maksimumais.

2.2 Duomenų apdorojimas ir parametru nustatymas

„Synopsys Sentaurus TCAD“ programų paketas pasižymi įvairiais įrankiais, tačiau šiame moksliniame darbe daugiausiai dėmesio buvo skiriama dviem programoms: „Sentaurus Workbench“ ir „Sentaurus Visual Device“. „Sentaurus Workbench“ yra programa, kuri per grafinę sąsają leidžia valdyti skirtingus „Synopsys Sentaurus TCAD“ paketo įrankius bei failus vietoj to, kad individualiai tvarkyti kiekvieną modeliavimo aspektą. Pagrindinis jos pranašumas, lyginant su įprasta modeliavimo sesija, yra galimybė nustatyti atitinkamus įvesties failų parametrus, kad būtų įmanoma paleisti vienu metu kelis modeliavimus arba modeliavimų grupes [15]. Modeliavimo sesijos išskirstymas į skirtingus uždavinius ir aplankus leidžia pateikti aiškų bendros modeliavimo aplinkos vaizdą. „Sentaurus Workbench“ grafinės sąsajos pavyzdys kristalinio silicio (c – Si) saulės celių modeliavimui pateiktas 15 pav.

		1	2	3	4
SDE	geo	planar	inverted	upright	upright_eva_fca_glass
	specfile	am15g_1.2um.bt	am15g_1.2um.bt	am15g_1.2um.bt	am15g_1.2um.bt
	nrays	5000	5000	5000	5000
SDEVICE	minintens	1e-4	1e-4	1e-4	1e-4
	depthlimit	80000	80000	80000	80000
	model	diffuse_tmm_mc	diffuse_tmm_mc	diffuse_tmm_mc	diffuse_tmm_mc_fca
INSPECT		--	--	--	--
	R0_307	0.562	0.273	0.321	0.042
	R0_762	0.089	0.012	0.015	0.072
	R1_218	0.462	0.368	0.399	0.230
	RTAmin	0.998	0.999	0.999	1.000
	RTAmax	1.000	1.000	1.000	1.000
	jph	35.949	41.699	41.416	37.922

15 pav. „Sentaurus Workbench“ sąsaja, parengta modeliavimams su kristalinio silicio (c – Si) saulės elementais [16].

15 pav. matomos dvi eilutės, kurios šiuo atveju buvo keičiamos: „geo“ ir „specfile“. „specfile“ eilutėse buvo nurodomi spektrų failai kiekvienam kristalinio silicio (c – Si) saulės elementui, pagal kuriuos buvo apšviečiami šie saulės elementai. Reikia pabrėžti, kad kiekvienas stulpelis šiuo atveju

atitinka saulės elementą su skirtingomis inkapsuliacijomis ir skirtingomis atspindžius slopinančio sluoksnio tekstūromis ir paviršiniais sluoksniais, kurie yra nustatomi „geo“ eilutėje:

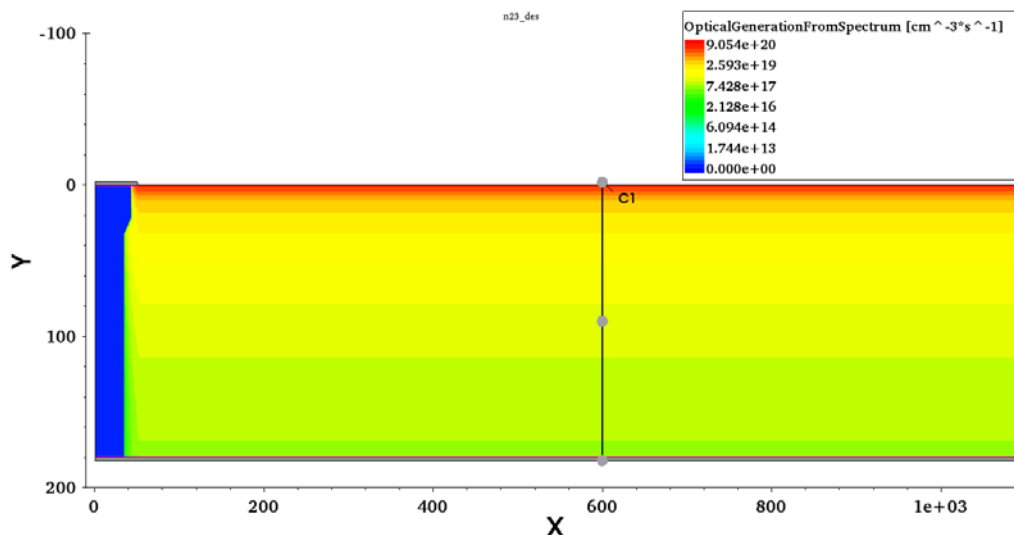
- „planar“ – plokščias atspindžius slopinantis sluoksnis, nėra inkapsuliacijos ir paviršinio stiklo sluoksnio.
- „inverted“ – atspindžius slopinantis sluoksnis su apverstų piramidžių tekstūra, nėra inkapsuliacijos ir paviršinio stiklo sluoksnio.
- „upright“ – atspindžius slopinantis sluoksnis su vertikalių piramidžių tekstūra, nėra inkapsuliacijos ir paviršinio stiklo sluoksnio.
- „upright_eva_fca_glass“ – atspindžius slopinantis sluoksnis su vertikalių piramidžių tekstūra, etilo vinilo acetato (EVA) inkapsuliacija, paviršinis stiklo sluoksnis. „fca“ šiuo atveju reiškia, jog yra įtraukiami legiravimo profiliai laisvų krūvininkų sugerties (angl. free – carrier absorption – FCA) skaičiavimams.

Vienos sandūros GaAs saulės celė ir dviejų sandūrų GaInP/ GaAs saulės celė taip pat turi panašias grafinės sąsajas. Vienos sandūros GaAs saulės celė grafinėje sąsajoje yra pateiktas tik vienas atvejis, nes celė naudoja tik plokščius atspindžius slopinančius sluoksnius, tačiau spektro failai turėjo būti keičiami per programų kodą. Kaip ir su kristalinio silicio (c – Si) saulės cele dviejų sandūrų GaInP/ GaAs saulės celės grafinė sąsaja leidžia keisti spektrą, kuriuo buvo apšviečiamas celės fragmentas, o pats šablonas yra išskirstytas į tris atvejus: viršutinės celės, apatinės celės ir pilnos celės.

Be to, „Sentaurus Visual“ programa leidžia vizualizuoti modeliavimo rezultatus ir generuoti grafikus, kuriuose yra rodomi laukai, geometrijos ir regionai [15]. Yra įmanoma tikrinti voltamperines charakteristikas, legiravimo profilius ir išgauti duomenis zondo ir kitų matavimo įrankių dėka, kam daugiausiai ir buvo naudojama programa šiame darbe.

Voltamperinių charakteristikų bei kvantinių našumų kreivių duomenų apdorojimui buvo naudojamos tam skirtos šablone esančios programos. Dėl ribotų programinės įrangos galimybių duomenys iš „TDR“ failų buvo eksportuojami pjūviais, kurio pavyzdys yra matomas 16 pav. Šioje iliustracijoje Y ašis atitinka kristalinio silicio (c – Si) saulės celės segmento storį mikrometrais (μm), o X – celės segmento plotį mikrometrais (μm). Reikia pabrėžti, jog šiuo atveju celės vaizdas „Sentaurus Visual“ programoje neatitinka modeliuojamo atvejo, kadangi optinės generacijos spartos duomenys iš trimačio (3D) atvejo yra įterpiami į paprastesnį dvimatį (2D) atvejį, kad būtų sumažintos modeliavimo apimtys. 16 pav. matomo saulės elemento storis atitinka modeliuojamos celės padėklo storį su apatiniu kontaktu – 181 μm , o plotis – 1.1 mm, visi legiruoti padėklo sluoksniai taip pat yra struktūroje. Tekstūra 16 pav. nerodoma, nes optinės generacijos sparta jau buvo suskaičiuota trimačiu

(3D) atveju, todėl šiuo atveju yra nereikalinga. Šio pjūvio esmė yra, kad jis suteikia galimybę išgauti saulės elemento optinės generacijos spartos priklausomybes nuo gylio skirtingoms celės sritims. Pjūviai visais atvejais kristalinio silicio (c – Si) saulės celei buvo atliekami ties 600 μm , kur optinės generacijos spartos pasiskirstymai yra pastovūs ir neveikiami priekinio kontakto šešėlio.



16 pav. Optinės generacijos spartos pasiskirstymo vaizdas dvimatėje (2D) kristalinio silicio (c – Si) saulės celėje su X ašies pjūviu ties 600 μm .

2.3 Spektrų formatavimas ir fotonų srautų normavimas

Modeliuojant voltamperines kreives buvo keičiami tik saulės elementus apšviečiančios šviesos spektrai. Šalia etaloninio „AM1.5G“ spektro [21], remiantis kuriuo buvo lyginami rezultatai, atlikome modeliavimus ir su kitais spektrais: Žygimanto Vosylius ir bendraautorių pademonstruoto 14 cm x 16 cm ploto saulės imitatoriaus iš 22 šviestukų [22]; su keliais Žygimanto Vosylius ir bendraautorių teoriškai apskaičiuotais A+ klasės spektrais [23]. Spektrų duomenis atitinka failai, kuriuos sudaro du stulpeliai: vienas su bangų ilgiais, išreikštais mikrometrais (μm), ir antras su tuos bangų ilgius atitinkančiomis energinėmis apšvietomis, išreikštomis vatais į kvadratinį centimetrą (W/cm^2). Norint išvengti problemų su skaičiavimais yra būtina, kad energinės apšvietos verčių suma bet kuriam spektro failui, ar tai būtų imitatorius ar Saulės spektras, būtų lygi arba artima $0.0836 \text{ W}/\text{cm}^2$ (300 – 1200 nm intervale). Be to, energinės apšvietos vertė negali būti lygi 0, kadangi tai sukelia problemų generuojant voltamperines (I – V) kreives, todėl visais atvejais nulinės vertės buvo pakeistos į artimas nuliui (pvz., $10^{-12} \text{ W}/\text{cm}^2$). Duotam spektro failui, programų paketas apskaičiuoja kiekvienam bangos ilgiui optines generacijos spartas ir išsaugo tos spartos priklausomybės nuo bangos ilgio ir nuo celės gylio duomenis į atskirą failą, kuris vėliau yra įkeliamas tolimesnius į voltamperinės kreivės (I – V) ir kvantinio našumo (EQE ir IQE) skaičiavimus.

Reikia atsižvelgti į faktą, kad 2020 m. lapkritį pasikeitė „IEC 60904“ standartai, skirti saulės imitatorių charakteristikų klasifikacijai [24]. Saulės imitatorių spektrai dabar yra vertinami platesniame bangų ilgių intervale: 300 – 1200 nm. Taip pat atsirado A+ klasės apibrėžimas, leidžiantis dvigubai mažesnius 12.5% suminės energinės apšvietos nuokrypius nuo referencinės 836.1 W/m² vertės lyginant su A klasės spektru. Dėl klasifikacijų pokyčio senesni spektrai kaip, pavyzdžiui, Žygmanto Vosylius ir bendraautorių pademonstruoto saulės imitatoriaus iš 22 šviestukų [22], turi būti suformatuoti, kad jų energinė apšvieta, vietoj to, kad būtų lygi 1000 W/m² 400 – 1100 nm ilgio bangų intervale, būtų lygi 836.1 W/m² 300 – 1200 nm ilgio bangų intervale. Dėl šios priežasties yra reikalingas normavimo daugiklis (F_{norm}). Apskaičiuoti šiam daugikliui yra du metodai. Pirmu atveju yra susumuojamos visos energinių apšvietų vertės iš „AM1.5G“ spektro failo ($\sum_{300}^{1200} E_{e_AM1.5G}(\lambda)$) ir visos energinės apšvietos vertės iš imitatoriaus spektro failo 300 – 1200 nm bangų ilgių intervale ($\sum_{300}^{1200} E_{e_imit}(\lambda)$). Šių dviejų sumų santykis yra lygus normavimo daugikliui:

$$F_{norm} = \frac{\sum_{300}^{1200} E_{e_AM1.5G}(\lambda)}{\sum_{300}^{1200} E_{e_imit}(\lambda)}, \quad (7)$$

Antras būdas yra apskaičiuoti santykį tarp fotonų srautų tankių abiejuose spektruose ($N(\lambda)$). Tam yra reikalingas nuo bangos ilgio priklausantis idealaus fotodiodo jautris (angl. spectral response – SR), kurį galima apskaičiuoti pagal formulę [25]:

$$SR(\lambda) = \frac{QE * \lambda}{1.2398}, \quad (8)$$

čia $SR(\lambda)$ – jautris atitinkamam bangos ilgiui (A/W), QE – saulės celės kvantinis našumas, kuris idealiam saulės elementui lygus 1, λ – bangos ilgis mikrometrais (μm).

Kiekvienam bangos ilgiui paskaičiavus jautrį, jis yra padauginamas iš atitinkamos energinės apšvietos vertės pasirinktam bangos ilgiui ir padalinamas iš elementaraus krūvio:

$$N(\lambda) = \frac{SR(\lambda) * I(\lambda)}{e}, \quad (9)$$

čia $N(\lambda)$ – atitinkamo bangos ilgio fotonų srauto tankis, $I(\lambda)$ – atitinkamo bangos ilgio energinė apšvieta, e – elementarus krūvis.

Visos fotonų srautų tankių vertės yra susumuojamos 300 – 1200 nm bangų ilgių intervale imitatoriaus spektrui ($\sum_{300}^{1200} N_{imit}(\lambda)$) ir etaloniniam spektrui ($\sum_{300}^{1200} N_{AM1.5G}(\lambda)$). Šių sumų santykis lygus normavimo daugikliui:

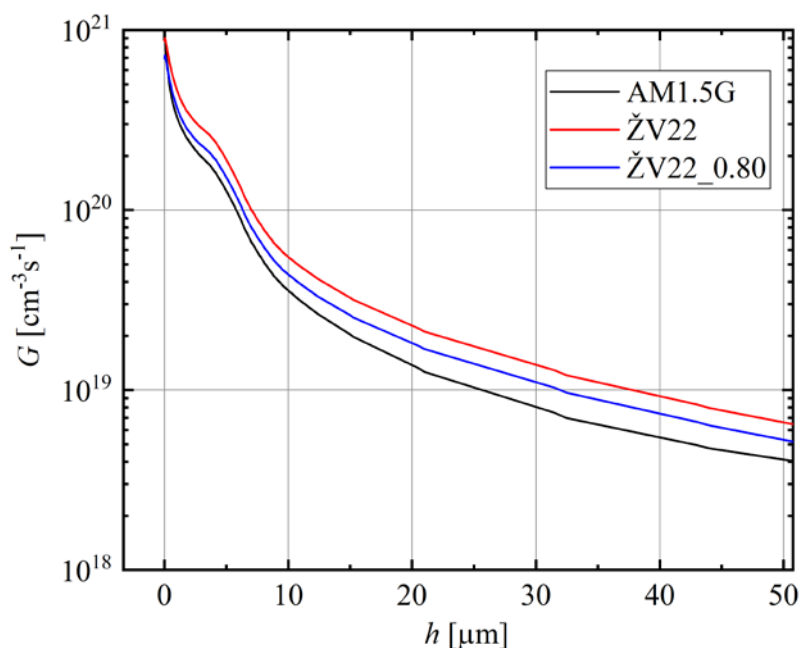
$$F_{norm} = \frac{\sum_{300}^{1200} N_{AM1.5G}(\lambda)}{\sum_{300}^{1200} N_{imit}(\lambda)}, \quad (10)$$

Suradus daugiklį, iš jo yra padauginamos visos energinė apšvietos vertės imitatoriaus spektro faile.

3. Rezultatai

3.1 Spektrų optimizavimas kristalinio silicio (c – Si) saulės elementams

Šiame skyriuje buvo atliekami modeliavimai su kristalinio silicio (c – Si) saulės cele. Modeliavimai buvo atlikti su etaloniniu „AM1.5G“ spektru [21], senesnį standartą atitinkančio Ž. Vosylius bei bendraautorių pademonstruoto saulės imitatoriaus spektru [22] ir naujus standartus atitinkančiais Ž. Vosylius ir bendraautorių apskaičiuotais A+ klasės spektrais [23]. Siekiant optimizuoti senesnį standartą atitinkantį spektrą, kuris grafikuose ir tolimesniuose rezultatuose bus žymimas kaip „ŽV22“, buvo sugeneruoti optinės generacijos spartos (G) priklausomybės nuo celės gylio (h) grafikai, apskaičiuoti normavimo daugikliai ir sumodeliuotos voltamperinės charakteristikos. Apskaičiuotiems A+ klasės spektrams, siekiant įsitikinti, kad jie atitinka reikiamas specifikacijas [24], irgi buvo apskaičiuoti normavimo daugikliai. Sumodeliavus visiems spektrams voltamperines charakteristikas, buvo palyginti skirtumai tarp rezultatų vien tik iš šviestukų sudarytiems imitatoriams ir hibridiniams imitatoriams bei įvertintas jų taikymas kristalinio silicio (c – Si) saulės elementams.



17 pav. Optinės generacijos spartos (G) priklausomybės nuo gylio (h) kristalinio silicio (c – Si) saulės elementui, apšviestam skirtingais spektrais: etaloniniu „AM1.5G“ [21], pademonstruoto imitatoriaus [22], „ŽV22“, pademonstruoto imitatoriaus [22] su 0.80 daugikliu, „ŽV22_0.80“.

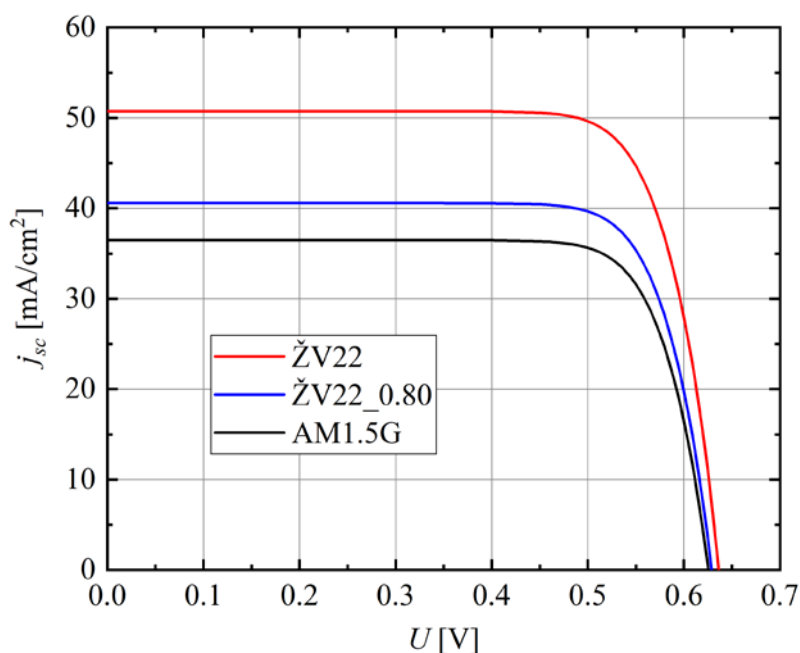
17 pav. yra pateiktos „Sentaurus Device“ suskaičiuotos optinės generacijos spartos (G) priklausomybės nuo saulės celės gylio (h) etaloniniam „AM1.5G“ ir senesnio standarto saulės imitatoriaus „ŽV22“ spektrui. Analizuojant šį grafiką yra akivaizdu, jog „ŽV22“ spektro atveju

optinės generacijos spartos yra didesnės lyginant su etaloninio „AM1.5G“ spektro atveju. Taip galėjo atsitikti todėl, kad straipsnyje [22] buvo pademonstruota 1000 W/m² energinė apšvieta 400 – 1100 nm bangų ilgių ruože. „AM1.5G“ gaunama 1000 W/m² energinė apšvieta visam spektrui. Buvo reikalingas normavimo daugiklis (F_{norm}), kuris leistų sulygtinti „ŽV22“ spektro energinę apšvietą 300 – 1200 nm bangų ilgių intervale su „AM1.5G“ spektro energine apšvieta. Normavimo daugiklių (F_{norm}) vertės, gautos naudojantis abiem metodais, aprašytais metodikos 2.3 skyriuje, yra pateiktos 1 lentelėje.

Metodas	F_{norm}	F_{norm_avg}
Energinių apšvietų santykis	0.795	0.797
Fotonų srautų tankių santykis	0.799	

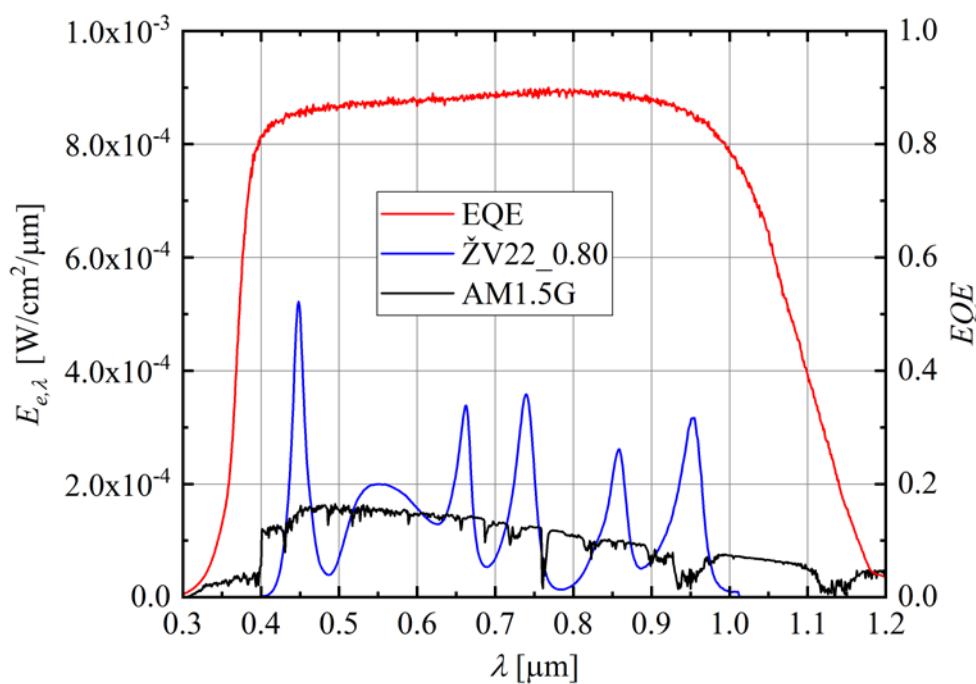
1 lentelė. Normavimo daugiklių vertės pademonstruoto saulės imitatoriaus [22] spektrui, „ŽV22“, su verčių aritmetiniu vidurkiu F_{norm_avg} .

Kaip matoma 1 lentelėje, abiem metodais apskaičiuotos vertės yra tarpusavyje labai artimos, todėl abu metodai gali būti taikomi šiai užduočiai. „ŽV22“ spektro atvejui galutinis daugiklis yra labai artimas 0.80, todėl iš šios skaičiaus buvo padaugintos visos energinės apšvietos vertės, esančios „ŽV22“ spektro faile. Atlikus modeliavimus su optimizuotu spektru „ŽV22_0.80“, kuris atitinka pademonstruoto saulės imitatoriaus [22] spektrą su 0.80 daugikliu, buvo gauta optinės generacijos spartos priklausomybė, pateikta 17 pav. ir voltamperinės charakteristikos 18 pav.



18 pav. Voltamperinės charakteristikos kristalinio silicio (c – Si) saulės elementui, apšviestam skirtingais spektrais: etaloniniu „AM1.5G“ [21], pademonstruoto imitatoriaus [22], „ŽV22“, pademonstruoto imitatoriaus [22] su 0.80 daugikliu, „ŽV22_0.80“.

Kaip matoma 17 pav., optimizavimas leido sumažinti optinės generacijos spartos skirtumus tarp atvejo, kada saulės elementas buvo apšviestas pademonstruoto saulės imitatoriaus [22] spektru, „ŽV22“, ir atvejo, kada saulės elementas buvo apšviestas etaloniniu „AM1.5G“ spektru. Optimizavimo teigiama įtaka taip pat matoma 18 pav., kur pademonstruoto imitatoriaus [22] su 0.80 daugikliu spektru, „ŽV22_0.80“, apšviestos saulės celės voltamperinės charakteristikos trumpo jungimo srovės tankio vertės (j_{sc}) nuokrypis (Δj_{sc}) nuo etaloniniu „AM1.5G“ spektru apšviesto saulės elemento vertės yra mažesnis ($\Delta j_{sc} = 4.1 \text{ mA/cm}^2$) lyginant su neoptimizuotu „ŽV22“ spektru apšviesto saulės elemento verte ($\Delta j_{sc} = 14.3 \text{ mA/cm}^2$). Be to, atviros grandinės įtampos (U_{oc}) vertė, kai celė buvo apšviesta optimizuotu „ŽV22_0.80“ spektru ($U_{oc} = 0.630 \text{ V}$), buvo artimesnė atvejui su etaloniniu „AM1.5G“ spektru ($U_{oc} = 0.627 \text{ V}$) nei atvejui su neoptimizuotu „ŽV22“ spektru ($U_{oc} = 0.637 \text{ V}$). Tačiau optimizuoto spektro „ŽV22_0.80“ atveju trumpo jungimo srovės tankio vertė (j_{sc}) vis tiek yra didesnė už etaloninio spektro atvejo. Siekiant paaiškinti šį nuokrypį, reikia atsižvelgti į imitatoriaus spektrą ir kristalinio silicio (c – Si) saulės celės išorinio kvantinio našumo (EQE) spektrą, pateiktus 19 pav.

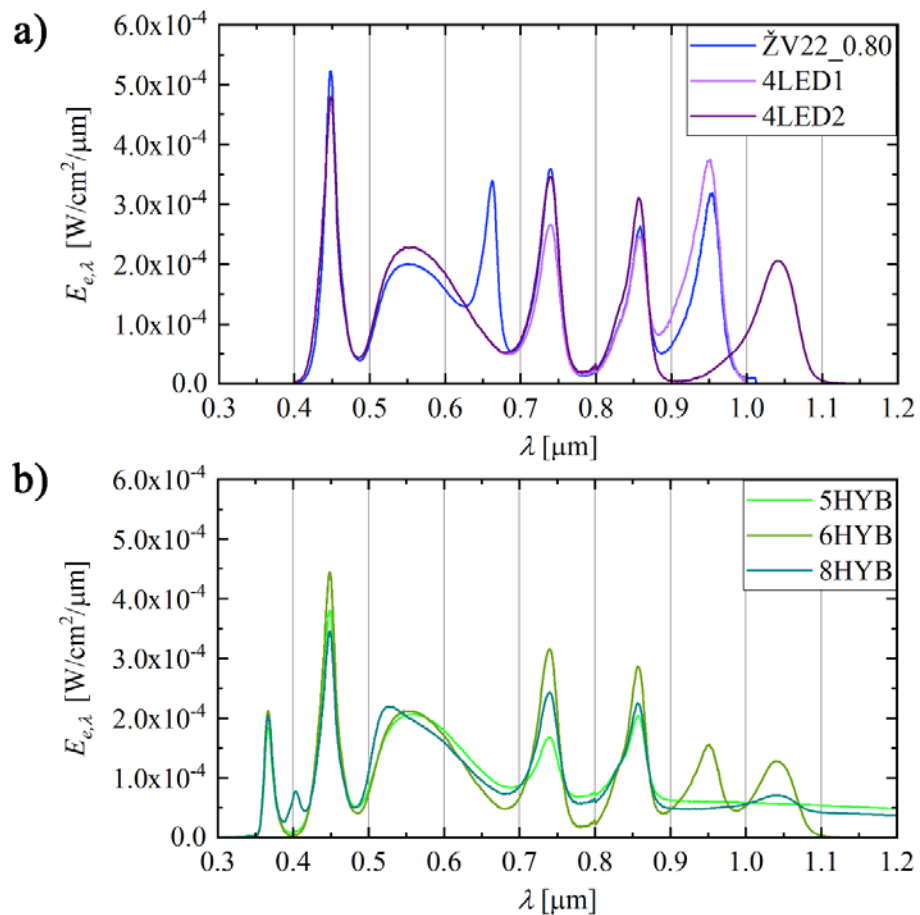


19 pav. Pademonstruoto saulės imitatoriaus [22] spektras su 0.80 daugikliu, „ŽV22_0.80“, ir etaloninis „AM1.5G“ spektras [21] (kairioji Y ašis – spektrinė energinė apšvieta ($E_{e,\lambda}$)) bei kristalinio silicio (c – Si) saulės elemento išorinio kvantinio našumo (EQE) spektras [16] (dešinioji Y ašis – EQE).

Žiūrint į 19 pav., galima pastebėti, išorinis kvantinis našumas (EQE) mažėja ultravioletinių bangų ruože (0.3 – 0.4 μm) dėl rekombinacijos ir atspindžių ties priekiniu celės paviršiumi ir infraraudonųjų bangų ruože (matoma virš 1.0 μm) dėl rekombinacijos ir atspindžių ties galiniu celės paviršiumi.

Taigi, fotosrovei daugiausiai įtakos turi 0.4 – 1.0 μm bangų ilgių intervalo šviesa. „ŽV22_0.80“ spektre visa šviesa patenka į 0.4 – 1.0 μm ruožą, kas ir lemia didesnes trumpo jungimo srovės tankio (j_{sc}) vertes.

Tolimesni modeliavimai su kristalinio silicio (c – Si) cele buvo atlikti kartu su kelių teoriškai apskaičiuotų imitatorių spektrais [23]. Saulės celė buvo apšviesta saulės imitatorių, sudarytų vien tik iš šviestukų, spektrais, kurie bus žymimi „LED“, ir hibridinių saulės imitatorių, sudarytų iš šviestukų ir halogeninių lempų, spektrais, kurie bus žymimi „HYB“. Skaičiai, einantys prieš šiuos pavadinimus indikuoja, kiek šaltinių sudaro spektrą, o skaičiai po pavadinimų – žymės skirtingus spektrus, jeigu yra vienodas šaltinių skaičius (20a pav.). Visi šie apskaičiuoti spektrai atitinka A+ klasės saulės imitatorių reikalavimus [24].



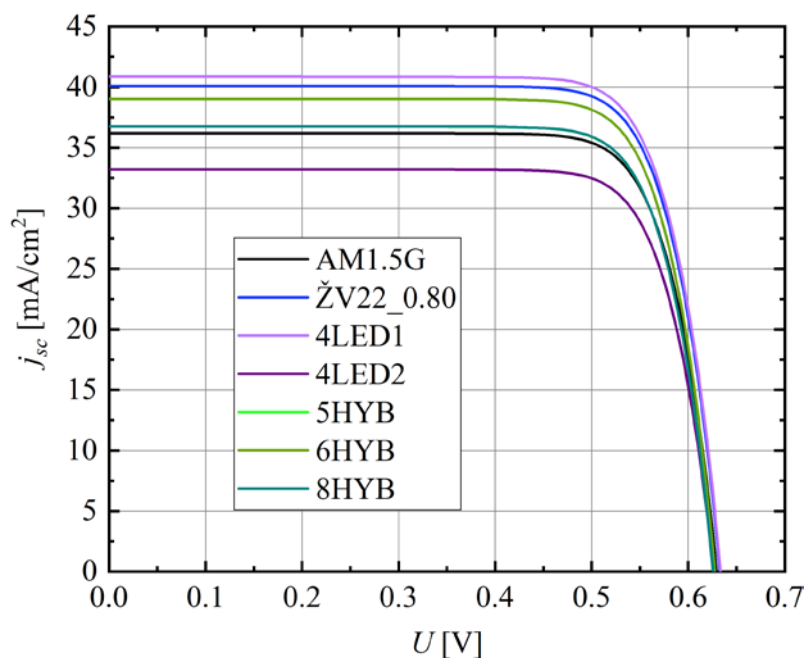
20 pav. a) Pademonstruoto saulės imitatoriaus [22] su 0.80 daugikliu spektras, „ŽV22_0.80“, ir tik iš šviestukų sudarytų A+ klasės imitatorių („LED“) spektrai [23]; b) Hibridinių A+ klasės imitatorių („HYB“) spektrai [23].

Siekiant patikrinti straipsnyje [23] apskaičiuotų saulės imitatorių spektrų A+ klasės specifikacijas, visiems šiems spektrams buvo apskaičiuoti normavimo daugikliai (F_{norm}) pagal metodus, aprašytus metodikos 2.3 skyriuje. Skaičiavimų rezultatai pateikti 2 lentelėje, kur, kaip matoma, visų normavimo daugiklių vertės buvo labai artimos 1, todėl papildomas optimizavimas nebuvo taikomas. Be to, su

visais šiais spektrais buvo atlikti voltamperinių charakteristikų modeliavimai, jų grafikai yra pateikti 21 pav.

Spektras	Metodas	F_{norm}	F_{norm_avg}
„4LED1“	Energinių apšvietų santykis	0.999	0.996
	Fotonų srautų tankių santykis	0.992	
„4LED2“	Energinių apšvietų santykis	0.999	0.991
	Fotonų srautų tankių santykis	0.983	
„5HYB“	Energinių apšvietų santykis	0.999	0.987
	Fotonų srautų tankių santykis	0.974	
„6HYB“	Energinių apšvietų santykis	0.999	0.997
	Fotonų srautų tankių santykis	0.995	
„8HYB“	Energinių apšvietų santykis	0.999	0.995
	Fotonų srautų tankių santykis	0.991	

2 lentelė. Normavimo daugiklių vertės teoriškai apskaičiuotiems A+ klasės spektrams [23] su verčių aritmetiniais vidurkais F_{norm_avg} .



21 pav. Voltamperinės charakteristikos kristalinio silicio (c – Si) saulės elementui, apšviestam skirtingais spektrais: etaloniniu „AM1.5G“ [21], pademonstruoto saulės imitatoriaus [22] su 0.80 daugikliu spektru, „ŽV22_0.80“, teoriškai apskaičiuotais A+ klasės saulės imitatorių spektrais [23].

Pastaba: „HYB5“ ir „HYB8“ kreivės persikloja.

Žiūrint į voltamperines charakteristikas 21 pav., matoma, jog etaloniniu „AM1.5G“ spektru apšviesto saulės elementas trumpo jungimo srovės tankio vertė yra lygi $j_{sc} = 36.19 \text{ mA/cm}^2$. Kalbant apie vien tik iš šviestukų sudarytus imitatorius, nuokrypis nuo etaloninės vertės saulės elementui, apšviestam „4LED2“ spektru, ($\Delta j_{sc} = 2.7 \text{ mA/cm}^2$) yra mažesnis nei saulės elementui, apšviestam „4LED1“ spektru, ($\Delta j_{sc} = 4.3 \text{ mA/cm}^2$). Taigi, „4LED2“ spektras duoda 7.5% santykinį nuokrypį, o „4LED1“ – 12%. Norint paaiškinti šiuos skirtumus reikia atsižvelgti į 20a pav. pateiktus spektrus: kaip matome, 400 – 700 nm intervale abiem imitatoriams panaudotas tas pats baltas „Bridgelux“ šviestukas su vienoda galia. 700 – 900nm intervale yra naudojami du 740 nm ir 850 nm dominuojančio bangos ilgio šviestukai, kurių galios nežymiai skiriasi. Didžiausią skirtumą matome 900 – 1200nm intervale, kur 940 nm šviestukas yra panaudotas „4LED1“ imitatoriuje, o 1050 nm šviestukas – „4LED2“ imitatoriuje. Šis pokytis lemia mažėjančias fotosroves dėl mažėjančio išorinio kvantinio našumo (EQE) virš 1000 nm. Tačiau šis pakeitimas neleidžia išvis panaikinti fotosrovės pertekliaus, nes etaloniniame „AM1.5G“ spektre nedidelė dalis šviesos yra arti 1200 nm bangos ilgio, kur išorinis kvantinis našumas (EQE) yra labai mažas.

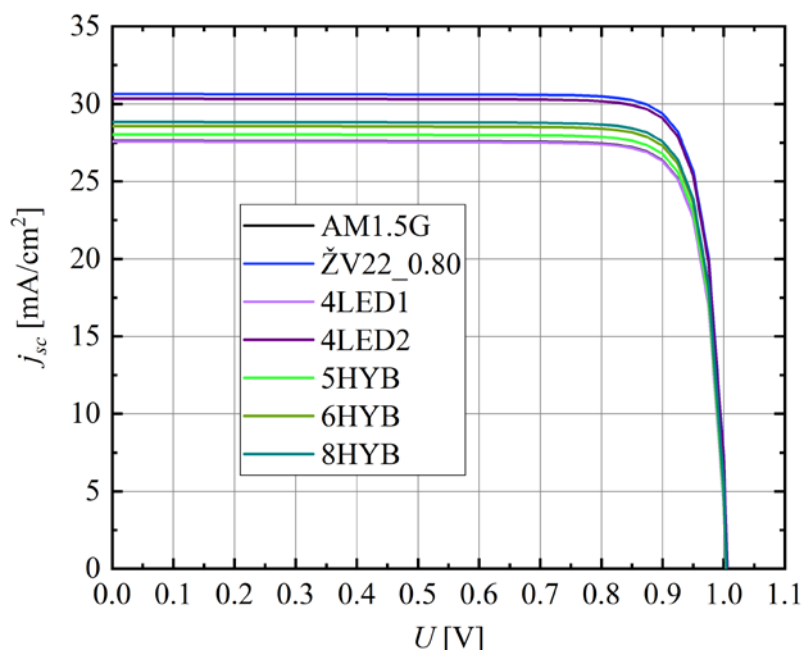
Ši problema išsprendžiama panaudojus hibridinius imitatorius. Kaip matoma iš suskaičiuotų „5HYB“ ir „8HYB“ A+ klasės saulės imitatorių voltamperinių charakteristikų, tikslesnis spektro aproksimavimas 1000 – 1200nm intervale bei papildomi šviestukai UV spektro ruože (20b. pav) leidžia beveik panaikinti fotosrovės perteklių, kas matoma iš duomenų pateiktų 20 pav. Fotosrovės tankio perteklius sumažėja iki $\Delta j_{sc} = 0.53 \text{ mA/cm}^2$ „5HYB“ atveju ir iki $\Delta j_{sc} = 0.58 \text{ mA/cm}^2$ „8HYB“ atveju, t. y., gaunami atitinkami 1.5% ir 1.6% santykiniai nuokrypiai.

Apibendrinant, šiuo atveju matome, kad net optimizavimas per normavimo daugiklius negali sumažinti fotosrovės pertekliaus senesnius standartus atitinkantiems saulės imitatoriams. Įvertinus voltamperines charakteristikas, galima teigti, jog kristalinio silicio (c – Si) saulės elementų atveju A+ klasės hibridinių saulės imitatorių kreivės pasižymėjo trumpo jungimo srovės tankios vertėmis (j_{sc}), kurios yra arčiausios „AM1.5G“ atvejo vertei. Atviros grandinės įtamos (U_{oc}) visas atvejais tarpusavyje buvo labai artimos – 0.01 V ribose.

3.2 Spektrų optimizavimas vienos sandūros GaAs saulės elementams

Šiame skyriuje buvo atliekami modeliavimai su vienos sandūros GaAs saulės elementu. Modeliavimai buvo atlikti su etaloniniu „AM1.5G“ spektru [21], pademonstruoto saulės imitatoriaus [22] su 0.80 daugikliu spektru, „ŽV22_0.80“, ir naujus A+ klasės standartus atitinkančiais Ž. Vosylius ir bendraautorių apskaičiuotais spektrais [23]. Visiems spektrams buvo sumodeliuotos voltamperinės charakteristikos, buvo palyginti skirtumai tarp rezultatų vien tik iš šviestukų sudarytiems imitatoriams ir hibridiniams imitatoriams. Be to, siekiant dar labiau sumažinti fotosrovės

perteklių ir gauti tikslesnius rezultatus, vienas iš spektrų buvo pasirinktas naujam optimizavimui: buvo individualiai keičiamos spektrą sudarančių šaltinių energinės apšvietos vertės ir apskaičiuojami reikiami daugikliai.



22 pav. Voltamperinės charakteristikos vienos sandūros GaAs saulės elementui, apšviestam skirtingais spektrais: etaloniniu „AM1.5G“ [21], pademonstruoto saulės imitatoriaus [22] su 0.80 daugikliu spektru, „ŽV22_0.80“, teoriškai apskaičiuotais A+ klasės spektrais [23]. Pastaba: „4LED1“ ir „AM1.5G“ kreivės persikloja.

Sumodeliuotos voltamperinės charakteristikos vienos sandūros GaAs saulės celei yra pateiktos 22 pav. Kaip matoma iš grafikų, tarp imitatorių, sudarytų vien tik šviestukų, tiksliausią rezultatą pateikė „4LED1“ spektru apšviesta saulės celė su $\Delta j_{sc} = 0.04 \text{ mA/cm}^2$ nuokrypiu, t. y., 0.14% santykinu nuokrypiu. Kalbant apie hibridinių imitatorių spektrus, „5HYB“ voltamperinė kreivė pasižymėjo artimiausiomis vertėmis su $\Delta j_{sc} = 0.43 \text{ mA/cm}^2$, t. y., 1.6% santykinu nuokrypiu. Tačiau šiuo atveju yra matoma, kad tinkamai optimizuotas saulės imitatoriaus spektras gali sudaryti sąlygas mažesniems nei 1% santykiniams nuokrypiams. Todėl buvo nuspręsta atlikti „5HYB“ spektro optimizavimą vienos sandūros GaAs saulės celei, siekiant gauti tikslesnes vertes duodantį hibridinį imitatorių.

Šiuo atveju optimizavimas nėra identiškas tam, kuris buvo atliekamas kristalinio silicio (c – Si) celės atveju. Tačiau, prieš vykdant optimizavimą, būtinas paaiškinimas apie spektro generacijos tvarką. Šiuo atveju „5HYB“ spektras yra sudarytas iš penkių šaltinių: balto „Bridgelux“ šviestuko, 365 nm šviestuko, 740 nm šviestuko, 850 nm šviestuko ir „Bentham“ halogeninės lempos. Kiekvienas iš šių šaltinių, kaip matoma 23 pav., turi spektrą, kuriam yra apskaičiuota integruota energinė apšviesta (E_{int}). Be to, kiekvienam šaltinio spektrui Ž. Vosylius ir bendraautoriai [23] yra apskaičiavę reikiamą

energinę apšvietą (E_{reik}), kuri turi būti pasiekta, kad imitatoriaus spektras pasiektų būtiną 836.1 W/m^2 suminę energinę apšvietą. Priklausomai nuo apskaičiuoto saulės imitatoriaus, ši reikiama energinė apšvietą (E_{reik}) kiekvieno spektrui gali skirtis. Padalinus šaltinio reikiamą energinę apšvietą (E_{reik}) iš šaltinio integruotos energinės apšvietos (E_{int}), gaunamas daugiklis (M_{salt}), kuris nurodo kiek kartų turi būti padidintą realaus šaltinio galią, norint pasiekti reikiamą apšvietos vertę, o jeigu daugiklio vertė mažesnė už 1 – kiek kartų turi būti sumažinta. Visos minėtos vertės A+ klasės hibridinio imitatoriaus „5HYB“ spektrui yra pateiktos 3 lentelėje.

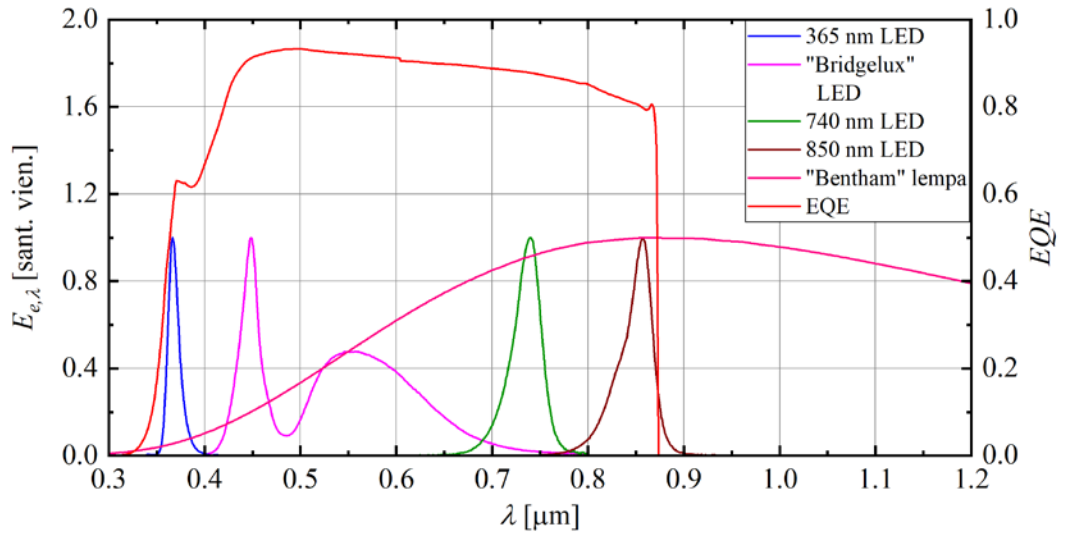
Šaltinis	$E_{int}, \text{ W/m}^2$	$E_{reik}, \text{ W/m}^2$	M_{salt}
„Bridgelux“ LED	0.9641	338.7	351.32
365 nm LED	2893.4	27.2	$9.4006 \cdot 10^{-3}$
740 nm LED	0.9294	39.1	42.071
850 nm LED	0.9985	55.2	55.283
„Bentham“ lempa	$1.8321 \cdot 10^4$	375.9	0.020517

3 lentelė. A+ klasės hibridinio imitatoriaus „5HYB“ spektro šaltinių energinių apšvietų ir daugiklių vertės.

Kiekvieno šaltinio atveju visos šaltinio spektro energinės apšvietos vertės buvo padaugintos iš jam apskaičiuoto daugiklio. Turint sandaugas, kiekvienam spektre esančiam bangos ilgio intervalui visų penkių šaltinių spektrų energinės apšvietos vertės buvo sudėtos, kas davė galutinį imitatoriaus spektrą:

$$\begin{aligned}
 E_{5HYB}(\lambda) = & E_{Bridgelux}(\lambda) * M_{Bridgelux} + E_{365nm_LED}(\lambda) * M_{365nm_LED} + \\
 & + E_{740nm_LED}(\lambda) * M_{740nm_LED} + E_{850nm_LED}(\lambda) * M_{850nm_LED} + \\
 & + E_{Bentham}(\lambda) * M_{Bentham}
 \end{aligned} \quad (11)$$

Kaip matoma 22 pav., „5HYB“ spektru apšviesto saulės elemento voltamperinė kreivė pasižymi fotosrovės pertekliumi, todėl reikėjo mažinti vieno iš pasirinktų šaltinių galią. Tačiau didžioji dalis pasirinkto šaltinio spektro turėjo būti bangų ilgių diapazone, kur vienos sandūros GaAs saulės celės išorinis kvantinis našumas (EQE) yra aukštas – kaip matoma 23 pav., 400 – 875 nm intervale. Kaip matoma 23 pav., visų šaltinių spektrai, apart nuo 365 nm šviestuko, yra didžiąja dalimi išsidėstę minėtame intervale. Kiekvienoje modifikacijoje buvo pasirenkamas vienas iš šių šaltinių: baltas „Bridgelux“ šviestukas, 740 nm šviestukas, 850 nm šviestukas arba „Bentham“ lempa. Pasirinktam šaltiniui buvo mažinama energinė apšvieta mažinant šaltinio daugiklį periodiniais žingsniais. Žingsnio vertė kiekvienu atveju buvo pasirinkta savo nuožiūra: pavyzdžiui, 850 nm šviestuko atveju daugiklio vertė (55.2) buvo mažinama kas 2.5 vertės žingsnį.



23 pav. Sunormuoti A+ klasės hibridinio saulės imitatoriaus „5HYB“ šaltinių spektrai (kairioji Y ašis – spektrinė energinė apšvieta ($E_{e,\lambda}$)) ir vienos sandūros GaAs saulės celės išorinio kvantinio našumo (EQE) spektras [17] (dešinoji Y ašis – EQE).

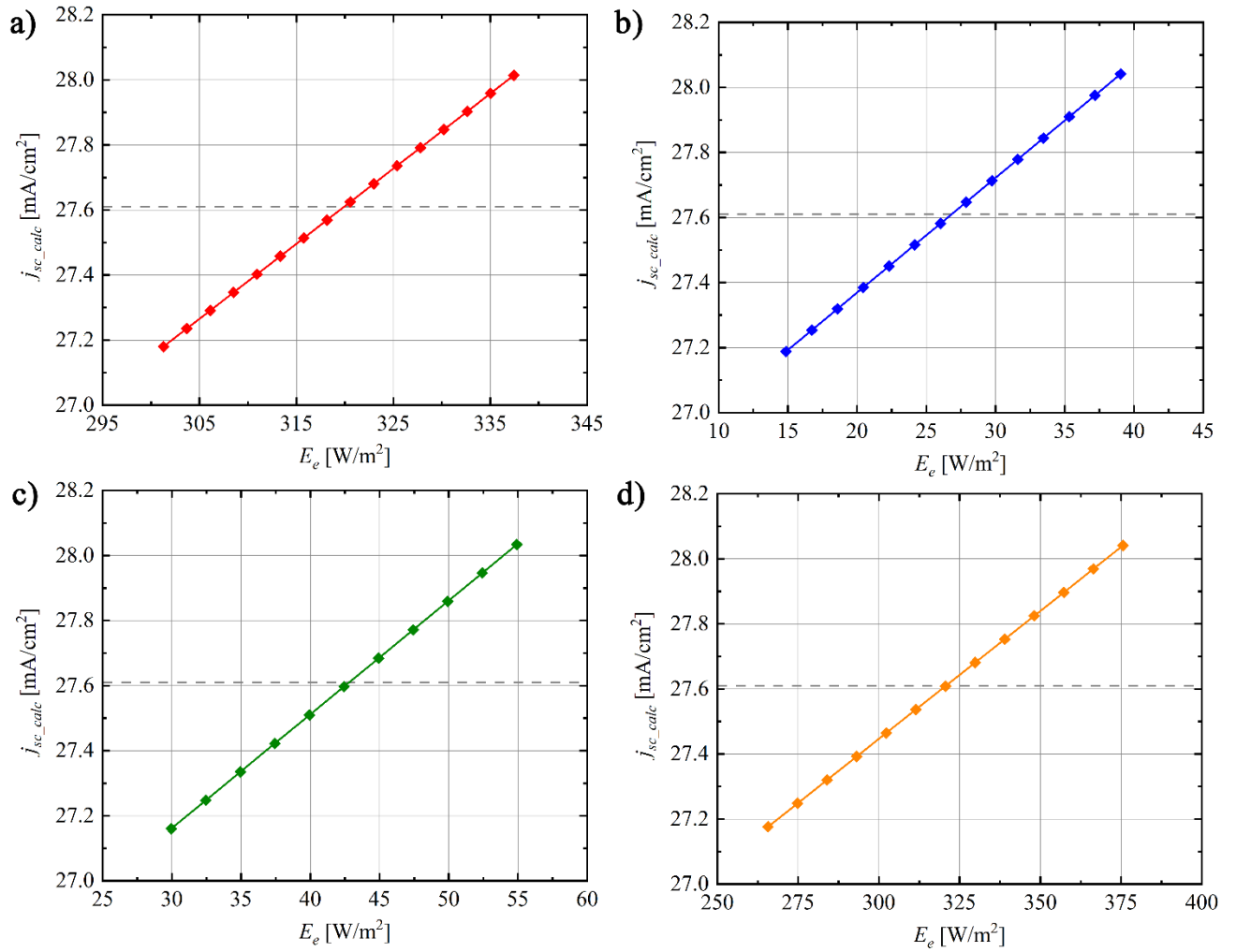
„AM1.5G“ spektru apšviesto saulės elemento voltamperinė kreivė pasižymi $j_{sc} = 27.61 \text{ mA/cm}^2$, o „5HYB“ atveju nuokrypis yra lygus $\Delta j_{sc} = 0.43 \text{ mA/cm}^2$. Taigi, kiekvienam šaltiniui energinė apšvieta buvo mažinama, kol trumpo jungimo srovės tankio (j_{sc}) vertės buvo šio nuokrypio ribose, t. y., nuo 27.18 mA/cm^2 iki 28.04 mA/cm^2 . Kad nereikėtų modeliuoti kiekvienos iteracijos, po kiekvieno mažinimo žingsnio buvo apskaičiuojama aproksimuota trumpo jungimo srovės tankio (j_{sc_calc}) vertė: modifikuoto spektro kiekvienam bangos ilgio intervalui ir atitinkamam intensyvumui buvo apskaičiuojamos srovės tankio vertės ($j_{sc_calc}(\lambda)$) su formule, panašia į (9):

$$j_{sc_calc}(\lambda) = SR(\lambda) * I(\lambda) * EQE(\lambda), \quad (12)$$

čia $EQE(\lambda)$ – išorinis kvantinis našumas (EQE) tam tikram bangos ilgiui. Susumavus visų bangos ilgių trumpo jungimo srovės tankių vertes ($j_{sc_calc}(\lambda)$), buvo gaunama aproksimuota trumpo jungimo srovės vertė (j_{sc_calc}):

$$j_{sc_calc} = \sum_{300}^{1200} j_{sc_calc}(\lambda) \quad (13)$$

Siekiant nustatyti tikslias energinės apšvietos vertes ir daugiklius šiems šaltiniams, kiekvienam iš modifikuotų šaltinių buvo sudaryti aproksimuotos trumpo jungimo srovės tankio (j_{sc_calc}) priklausomybės nuo energinės apšvietos (E_e) grafikai (24 pav.). Duomenų taškai buvo aproksimuoti tiesėmis ir iš šių tiesių susikirtimo taškų su punktyrinėmis linijomis, atitinkančiomis „AM1.5G“ spektru apšviesto saulės elemento $j_{sc} = 27.61 \text{ mA/cm}^2$ vertę, buvo nustatyti optimalūs kiekvieno šaltinio daugikliai.



24 pav. Optimalių A+ klasės hibridinio saulės imitatoriaus „5HYB“ spektro šaltinių galių nustatymas: a) baltam „Bridgelux“ šviestukui; b) 740 nm šviestukui; c) 850 nm šviestukui; d) „Bentham“ halogeninei lempai. Visuose grafikuose punktyrinė linija žymi „AM1.5G“ spektru apšviesto saulės elemento $j_{sc} = 27.61$ mA/cm² vertę.

Kadangi 365 nm šviestukas yra už aukšto išorinio kvantinio našumo (EQE) intervalo ribų (400 – 875 nm), jis kiekvienu atveju buvo naudojamas kaip lyginamasis šaltinis, t. y., jo energinė apšvieta ir daugiklis buvo apskaičiuojami, žinant visų kitų šaltinių daugiklius, kad spektro suminė energinė apšvieta būtų lygi 836.1 W/m²:

$$\begin{aligned}
 M_{365nm_LED} = & (836.1 - E_{int_Bridgelux} * M_{Bridgelux} - E_{int_740nm_LED} * M_{int_740nm_LED} \\
 & - E_{int_850nm_LED} * M_{nt_850nm_LED} - E_{int_Bentham} * M_{Bentham}) \\
 & / E_{int_365nm_LED}
 \end{aligned} \tag{14}$$

Su optimizuotais spektrais buvo atlikti voltamperinių kreivių modeliavimai, aproksimuotos (j_{sc_calc}) ir sumodeliuotos (j_{sc_real}) trumpo jungimo srovės tankio vertės yra pateiktos 4 lentelėje.

Koreguojamas šaltinis	j_{sc_calc} , mA/cm^2	j_{sc_real} , mA/cm^2
„Bridgelux“ LED	27.61	27.61
740 nm LED	27.61	27.61
850 nm LED	27.61	27.61
„Bentham“ lempa	27.61	27.61

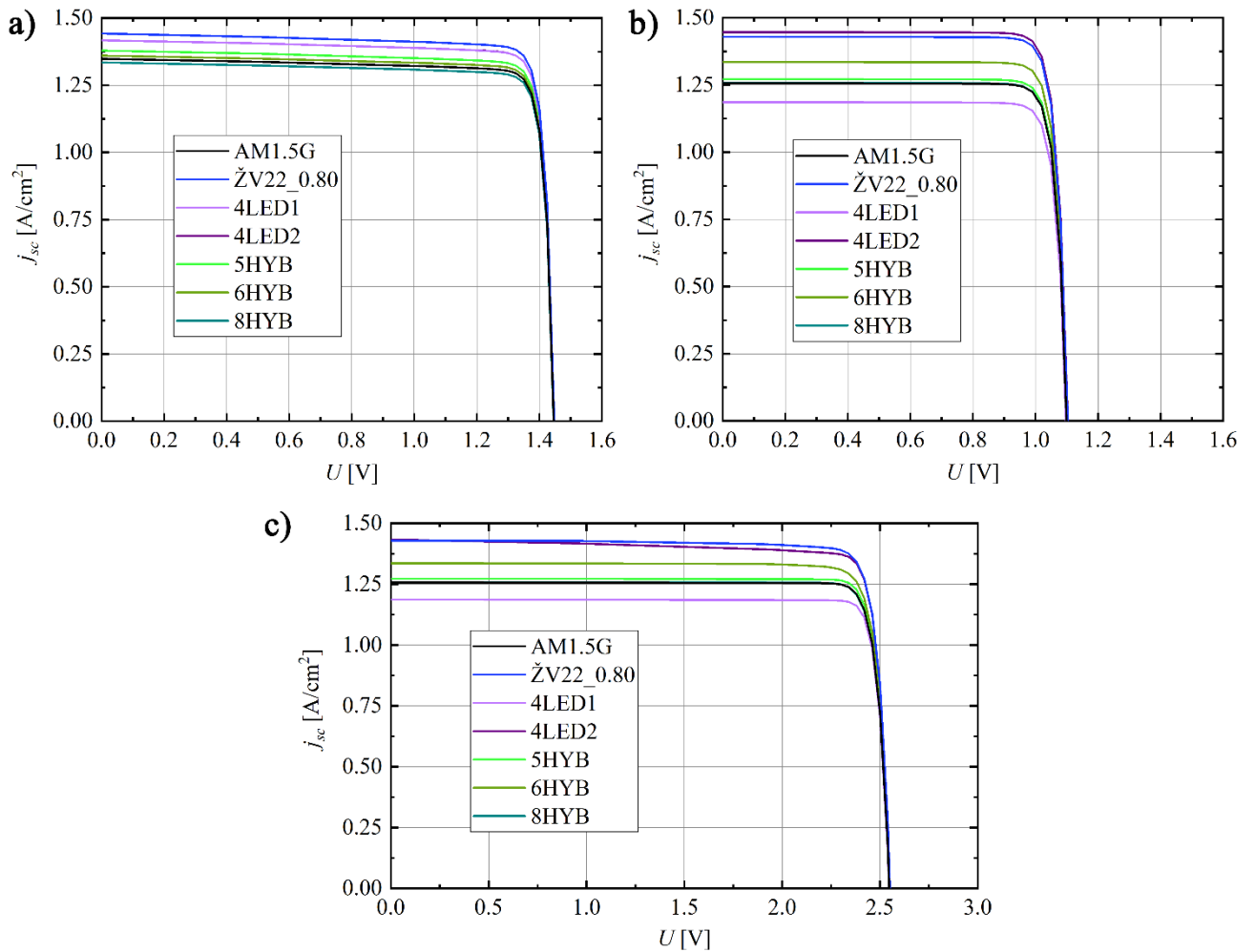
4 lentelė. A+ klasės hibridinio saulės imitatoriaus „5HYB“ spektro optimizacijoms aproksimuotos (j_{sc_calc}) ir sumodeliuotos (j_{sc_real}) trumpo jungimo srovės tankio vertės.

Apibendrinant galima daryti išvadą, jog A+ klasės hibridinio saulės imitatoriaus „5HYB“ spektro optimizavimas vienos sandūros GaAs saulės celei buvo sėkmingas, kadangi sumodeliuotų verčių (j_{sc_real}) nuokrypiai buvo $0.01 mA/cm^2$ eilėje. Naudota optimizavimo metodika įrodė savo tikslumą ir bus naudojama modeliavimams su dviejų sandūrų GaInP/GaAs saulės cele. Išanalizavus neoptimizuotų spektrų voltamperines charakteristikas, galima teigti, jog vienos sandūros GaAs saulės elementų atveju vien tik iš šviestukų sudaryti A+ klasės saulės imitatoriai tiksliausiai aproksimavo etaloniniu „AM1.5G“ spektru apšviestos saulės celės trumpo jungimo srovės tankio (j_{sc}) vertes. Atviros grandinės įtampos (U_{oc}) visas atvejais tarpusavyje buvo labai artimos – 0.01 V ribose.

3.3 Spektrų optimizavimas dviejų sandūrų GaInP/GaAs saulės elementams

Šiame skyriuje buvo atliekami modeliavimai su dviejų sandūrų GaInP/GaAs saulės elementu. Modeliavimai buvo atlikti su etaloniniu „AM1.5G“ spektru [21], pademonstruoto saulės imitatoriaus [22] su 0.80 daugikliu spektru, „ŽV22_0.80“, ir naujus A+ klasės standartus atitinkančiais Ž. Vosylius ir bendraautorių apskaičiuotais spektrais [23]. Visiems spektrams buvo sumodeliuotos voltamperinės charakteristikos, buvo palyginti skirtumai tarp rezultatų vien tik iš šviestukų sudarytiems imitatoriams ir hibridiniams imitatoriams. Kaip ir vienos sandūros GaAs celės atveju, siekiant dar labiau sumažinti fotosrovės perteklių ir gauti tikslesnius rezultatus, vienas iš spektrų buvo pasirinktas optimizavimui: buvo individualiai keičiamos spektrą sudarančių šaltinių energinės apšvietos vertės ir apskaičiuojami reikiami daugikliai.

Sumodeliuotos voltamperinės charakteristikos dviejų sandūrų GaInP/GaAs saulės celei yra pateiktos 25 pav. Ši saulės celė yra sudaryta iš dviejų sudėtinių celių – GaInP pagrindo viršutinės GaAs pagrindo apatinės, todėl šiuo atveju turime tris voltamperines charakteristikas: dvi atskiroms celėms ir vieną pilnai saulės celei.



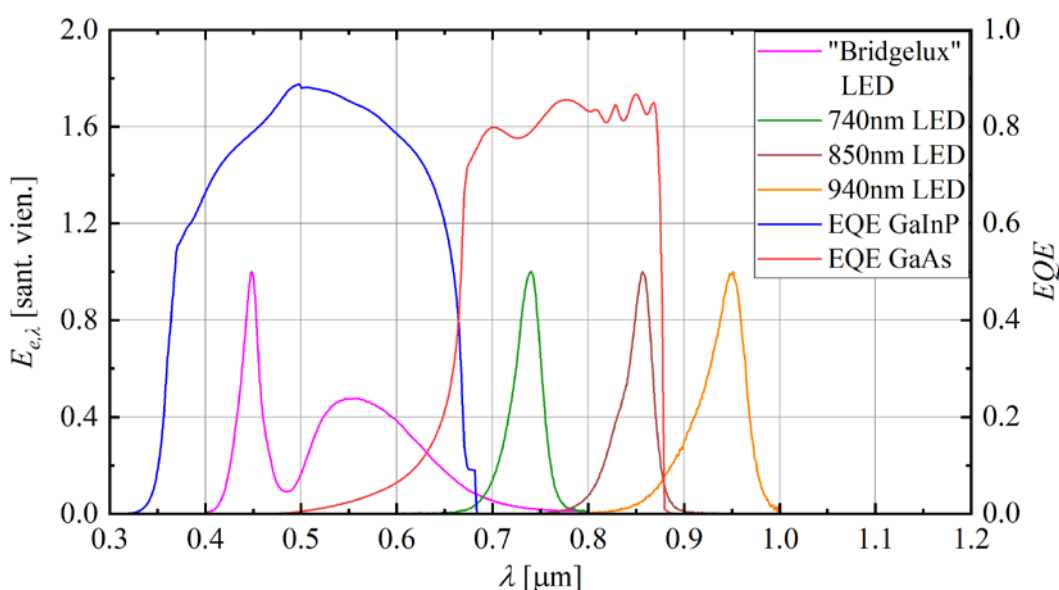
25 pav. Voltamperinės charakteristikos dviejų sandūrų GaInP/GaAs saulės elementui, apšviestam skirtingais spektrais: a) viršutinei GaInP celei; b) apatinei GaAs celei; c) pilnai celei.

Viršutinės celės atveju iš visų imitatorių „8HYB“ A+ klasės hibridinio saulės imitatoriaus spektru apšviestos sandūros trumpo jungimo srovės tankio vertė (j_{sc}) yra artimiausia „AM1.5G“ spektro kreivės vertei ($j_{sc} = 1.348 \text{ A/cm}^2$) su $\Delta j_{sc} = 0.004 \text{ A/cm}^2$ nuokrypiu, t. y., 0.3% santykinu nuokrypiu. Apatinės celės atveju irgi „8HYB“ A+ klasės saulės imitatoriaus spektru apšviesta sandūros trumpo jungimo srovės tankio vertė (j_{sc}) yra artimiausia „AM1.5G“ spektro kreivės vertei ($j_{sc} = 1.257 \text{ A/cm}^2$) su $\Delta j_{sc} = 0.002 \text{ mA/cm}^2$ nuokrypiu, t. y., 0.16% santykinu nuokrypiu.

Kalbant apie vien tik iš šviestukų sudarytus A+ klasės saulės imitatorius, viršutinės ir apatinės celės atvejais tiksliausius rezultatus pateikė „4LED1“ spektru apšviesta saulės celė su atitinkamais $\Delta j_{sc} = 0.069 \text{ A/cm}^2$ ir $\Delta j_{sc} = 0.071 \text{ A/cm}^2$ trumpo jungimo srovės tankio verčių (j_{sc}) nuokrypiais, t. y., atitinkamais 5.1% ir 5.6% santykiniais nuokrypiais. Analizuojant pilnos celės voltamperines charakteristikas (24c pav.), galima išžvelgti, kad atviros grandinės įtampos (U_{oc}) pilnos celės atveju yra lygios viršutinės ir apatinės sandūros atvirų grandinių įtampų (U_{oc}) sumoms. Atskirų sudėtinių celių ir pilnos celės atveju atviros grandinės įtampos (U_{oc}) tarpusavyje buvo labai artimos – 0.01 V

ribose. Tačiau trumpo jungimo srovės tankio (j_{sc}) vertės pilnos celės atveju yra labai artimos apatinės celės vertėms su $0.001 A/cm^2$ eilės nuokrypiais.

Optimizavimas jau buvo vykdomas su A+ klasės hibridinio saulės imitatoriaus spektru vienos sandūros GaAs celės atveju, kadangi tuo atveju vien iš šviestukų sudarytų A+ klasės saulės imitatorių spektrai pasižymėjo didžiausiu tikslumu. Tačiau šiuo atveju su dviejų sandūrų GaInP/GaAs saulės cele didžiausias tikslumas yra matomas su A+ klasės hibridiniais saulės imitatoriais, o tiksliausias A+ klasės saulės imitatorius, sudarytas, vien iš šviestukų, „4LED1“, pasižymi santykiniais trumpo jungimo srovės tankio (j_{sc}) nuokrypiais virš 5%. Todėl šis spektras buvo pasirinktas tolesniam optimizavimui. „4LED1“ spektrą sudarančių šaltinių spektrai ir sandūrų išorinio kvantinio našumo (EQE) spektrai yra pateikti 26 pav.

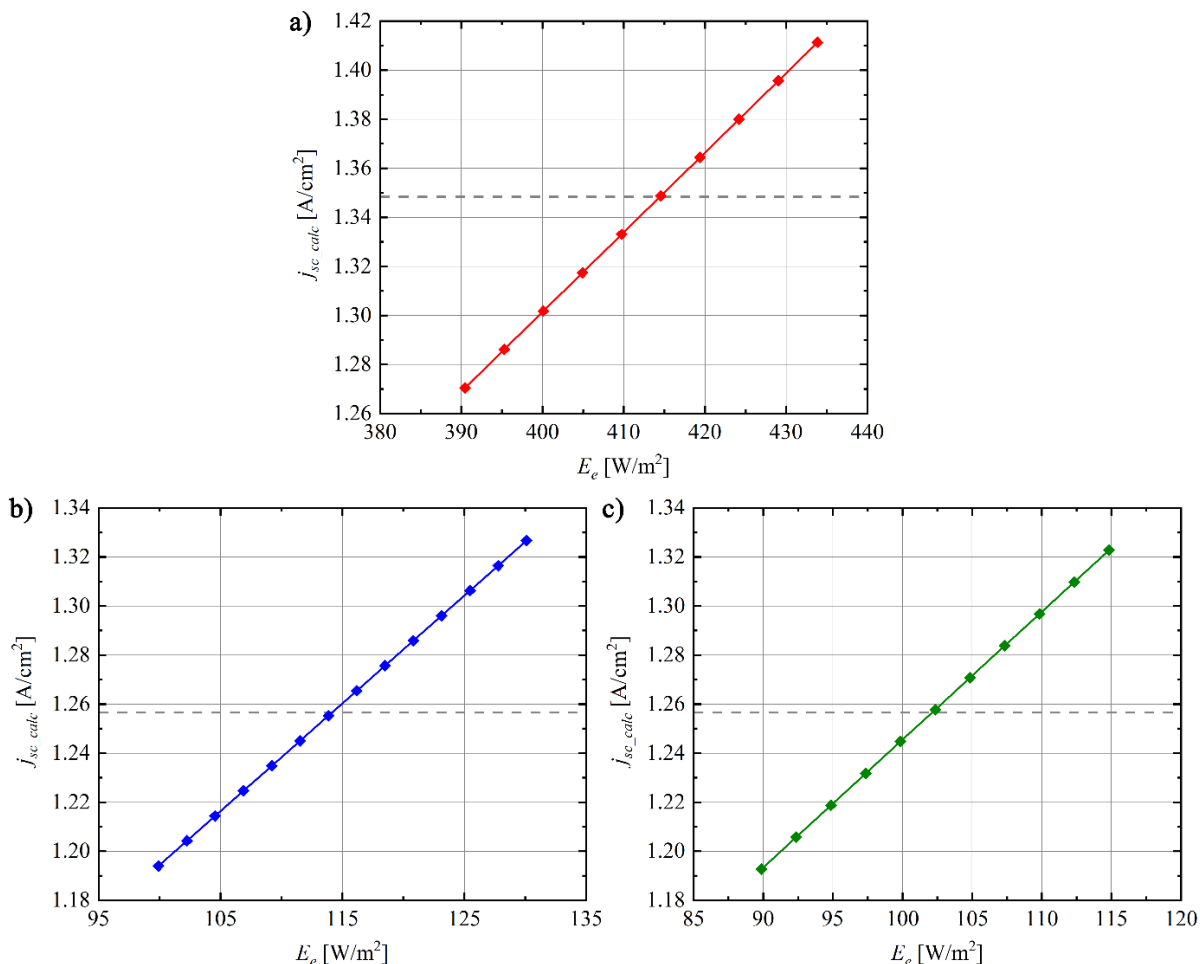


26 pav. Sunormuoti A+ klasės vien tik iš šviestukų sudaryto saulės imitatoriaus „4LED1“ šaltinių spektrai (kairioji Y ašis – spektrinė energinė apšvieta ($E_{e,\lambda}$)) ir dviejų sandūrų GaInP/GaAs saulės celės sandūrų išorinio kvantinio našumo (EQE) spektrai [18] (dešinioji Y ašis – EQE).

Optimizavimo eiga buvo analogiška naudotai vienos sandūros GaAs saulės celei, tačiau šiuo atveju mes turime du išorinio kvantinio našumo (EQE) spektrus dėl skirtingų, medžiagų, naudotų viršutinės ir apatinės celių gamyboje. Todėl vieni šaltiniai generuos fotosrovę tik vienoje celėje, o kiti – tik antroje. Kaip matoma 26 pav., viršutinei celei pagrindinį fotosrovės indėlį duoda baltas „Bridgelux“ šviestukas, o apatinei celei – 740 nm ir 850 nm šviestukai. Būtina pabrėžti, kad viršutinės celės atveju buvo fotosrovės perteklius (25a pav.), o apatinės – trūkumas (25b pav.), todėl „Bridgelux“ šviestuko galia buvo mažinama, o 740 nm ir 850 nm šviestukų – didinamos.

Iš pradžių buvo ieškoma „Bridgelux“ šviestuko energinės apšvietos. „AM1.5G“ spektro apšviestos viršutinės celės voltamperinė kreivė pateikia $j_{sc} = 1.348 A/cm^2$, „4LED1“ atveju nuokrypis nuo

šios vertės yra lygus $\Delta j_{sc} = 0.069 \text{ A/cm}^2$. Taigi, periodiškai mažinant daugiklį, šaltinio galia buvo mažinama, kol aproksimuotos trumpo jungimo srovės (j_{sc_calc}) vertės buvo šio nuokrypio ribose, t. y., nuo 1.279 A/cm^2 iki 1.417 A/cm^2 . Šiam šaltiniui buvo sudarytas aproksimuotos trumpo jungimo srovės tankio (j_{sc_calc}) priklausomybės nuo šaltinio energinės apšvietos (E_e) grafikas 27a pav. Aproximavus duomenų taškus tiese, buvo apskaičiuotas balto „Bridgelux“ šviestuko daugiklis bei galia, kurie buvo įstatyti į tolimesnius skaičiavimus.



27 pav. Optimalių „4LED1“ A+ klasės vien tik iš šviestukų sudaryto saulės imitatoriaus spektro šaltinių galių nustatymas: a) baltam „Bridgelux“ šviestukui. Punktyrinė linija žymi $j_{sc} = 1.348 \text{ A/cm}^2$; b) 740 nm šviestukui. Punktyrinė linija žymi $j_{sc} = 1.257 \text{ A/cm}^2$; c) 850 nm šviestukui. Punktyrinė linija žymi $j_{sc} = 1.257 \text{ A/cm}^2$.

Esant šiam daugikliui, buvo ieškomos 740 nm ir 850 nm šviestukų galios. Kiekvienu atveju buvo keičiamas tik vieno iš šių dviejų šaltinių daugiklis. „AM1.5G“ spektro apšviestos apatinės celės voltamperinė kreivė pasižymi $j_{sc} = 1.257 \text{ A/cm}^2$, „4LED1“ atveju nuokrypis nuo šios vertės yra lygus $\Delta j_{sc} = 0.071 \text{ A/cm}^2$. Taigi, šiems šaltiniams, periodiškai didinant daugiklius, buvo didinamos energinės apšvietos, kol aproksimuotos trumpo jungimo srovės (j_{sc_calc}) vertės buvo šio nuokrypio ribose, t. y., nuo 1.186 A/cm^2 iki 1.328 A/cm^2 . Šiems šaltiniams taip pat buvo sudaryti trumpo

jungimo srovės tankių (J_{sc_calc}) priklausomybių nuo energinių apšvietų (E_e) grafikai 27b – 27c pav. ir per duomenų taškų aproksimavimą tiesėmis nustatyti daugikliai. Kadangi 940 nm šviestukas buvo už abiejų sandūrų išorinio kvantinio našumo (EQE) spektrų ribų, jis buvo naudojamas kaip lyginamasis šaltinis: jo energinė apšvieta ir daugiklis kiekvienu atveju buvo apskaičiuojami, kad suminė spektro energinė apšvieta būtų lygi 836.1 W/m².

Su optimizuotais spektrais buvo atlikti modeliavimai, aproksimuotos trumpo jungimo srovės tankio vertės (J_{sc_calc}) ir sumodeliuotos (J_{sc_real}) viršutinei ir apatinei sandūrai yra pateiktos 5 lentelėje.

Koreguojami šaltiniai	Viršutinė sandūra		Apatinė sandūra	
	J_{sc_calc} , A/cm ²	J_{sc_real} , A/cm ²	J_{sc_calc} , A/cm ²	J_{sc_real} , A/cm ²
„Bridgelux“ LED, 740 nm LED	1.349	1.334	1.257	1.258
„Bridgelux“ LED, 850 nm LED	1.348	1.334	1.256	1.258

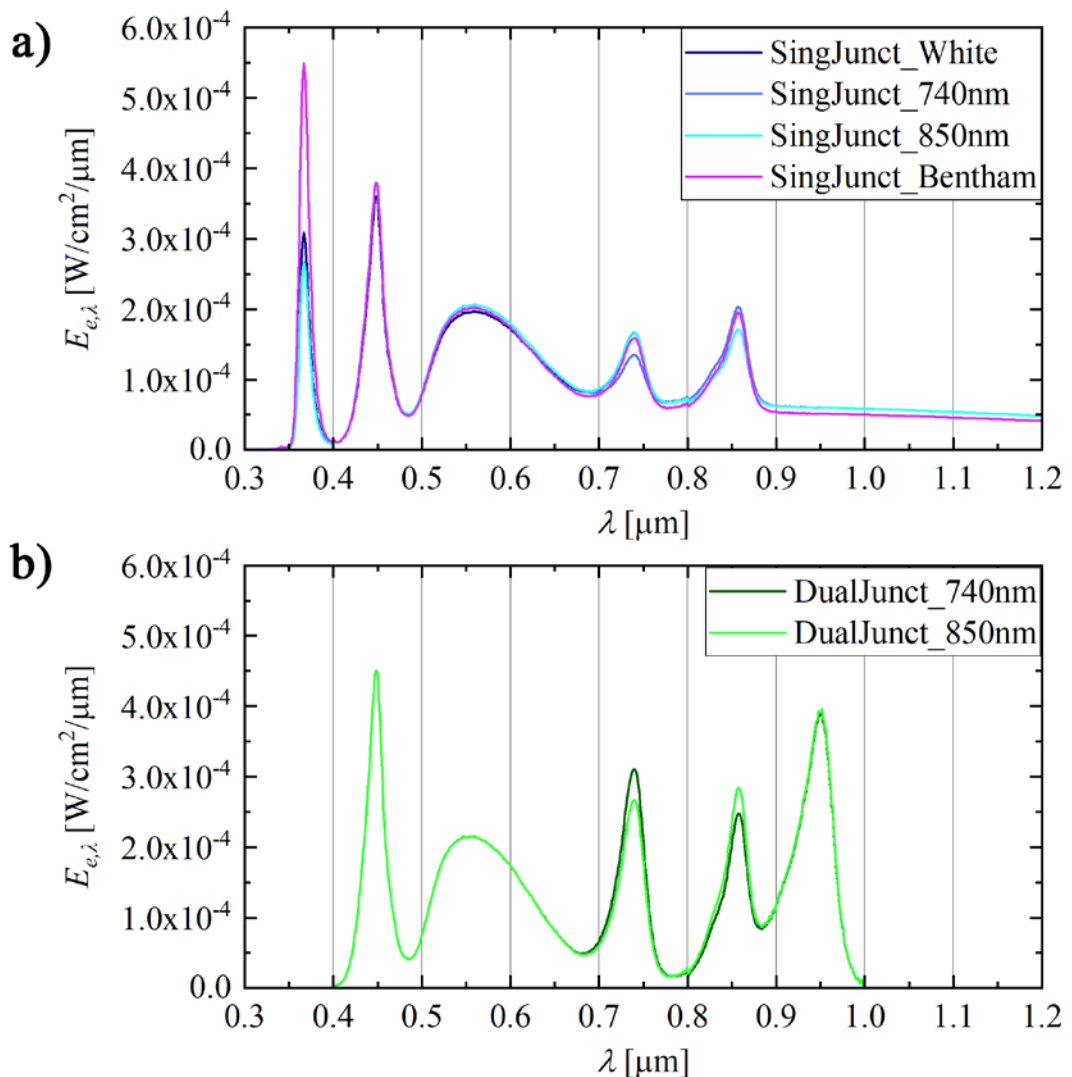
5 lentelė. A+ klasės vien tik iš šviestukų sudaryto saulės imitatoriaus „4LED1“ spektro optimizacijoms aproksimuotos (J_{sc_calc}) ir sumodeliuotos (J_{sc_real}) trumpo jungimo srovės tankio vertės.

Apibendrinant galima teigti, jog A+ klasės vien tik iš šviestukų sudaryto saulės imitatoriaus „4LED1“ spektro optimizavimas dviejų sandūrų GaInP/GaAs saulės celei buvo sėkmingas. Tai įrodo rezultatai 5 lentelėje, kur galima pastebėti, kad sumodeliuotos trumpo jungimo srovės tankio vertės (J_{sc_real}) viršutinei sandūrai turi 1% – 1.2% santykinį nuokrypį nuo apskaičiuotų verčių (J_{sc_calc}), o sumodeliuotos vertės apatinei sandūrai – žemiau 0.5%. Be to, nustatyta, kad iš neoptimizuotų A+ klasės saulės imitatorių hibridinių saulės imitatorių spektrai yra geriau pritaikyti dviejų sandūrų GaInP/GaAs saulės celėms. Tačiau, analizuojant voltamperines charakteristikas, visais atvejais buvo pastebėta, kad apatinė sandūra riboja pilnos celės jungimo srovės tankio (j_{sc}) vertes. Atviros grandinės įtampos (U_{oc}) pilnos celės atveju buvo lygios viršutinės ir apatinės sandūros atvirų grandinių įtampų (U_{oc}) sumoms. Atskirų sudėtinių celių ir pilnos celės atveju atviros grandinės įtampos (U_{oc}) tarpusavyje buvo labai artimos – 0.01 V ribose.

3.4 Optimizuotų spektrų palyginimas

Šiame skyriuje yra pateikiami optimizuotų spektrų grafikai. Atitinkamai kiekvienai celei optimizuotiems spektrams yra pateikti pavadinimai:

- Vienos sandūros GaAs saulės celei optimizuoti spektrai yra vadinami „SingJunct_“, kur pavadinimas po brūkšnio indikuoja vieną iš „5HYB“ A+ klasės saulės imitatoriaus spektro šaltinių, kurių galios buvo mažinamos. Visiems šiems spektrams 365 nm šviestuko energinė apšvieta buvo skaičiuojama, todėl jis nėra įtrauktas į pavadinimus.
- Dviejų sandūrų GaInP/GaAs saulės celei optimizuoti spektrai yra vadinami „DualJunct_“, kur pavadinimas po brūkšnio indikuoja vieną iš „4LED1“ A+ klasės saulės imitatoriaus spektro šaltinių, kurių galios buvo didinamos. Visiems šiems spektrams 940 nm šviestuko energinė apšvieta buvo skaičiuojama, o baltojo „Bridgelux“ šviestuko apskaičiuota galia visais atvejais buvo vienoda, todėl šie šaltiniai nėra įtraukti į pavadinimus.



28 pav. Optimizuotų spektrų grafikai: a) „5HYB“ hibridinio A+ klasės saulės imitatoriaus spektro optimizacijos vienos sandūros GaAs saulės celei; b) „4LED1“ vien tik iš šviestukų sudaryto A+ klasės saulės imitatoriaus spektro optimizacijos dviejų sandūrų GaInP/GaAs saulės celei.

Apskaičiuotos šaltinių energinės apšvietos						
Spektras	365 nm LED, W/m ²	“Bridgelux” LED, W/m ²	740 nm LED, W/m ²	850 nm LED, W/m ²	“Bentham” lempa, W/m ²	Suminė energinė apšvieta, W/m ²
“SingJunct_White”	45.92	320.0	39.10	55.20	375.9	836.1
“SingJunct_740nm”	39.47	338.7	26.82	55.20	375.9	836.1
“SingJunct_850nm”	39.58	338.7	39.10	42.81	375.9	836.1
“SingJunct_Bentham”	82.29	338.7	39.10	55.20	320.8	836.1

6 lentelė. Apskaičiuotos energinės apšvietos vertės kiekvienai „5HYB” hibridinio A+ klasės saulės imitatoriaus spektro optimizacijai vienos sandūros GaAs saulės celei ir optimizuotus spektrus sudarantiems šaltiniams. Spektrų pavadinimai atitinka kreivių pavadinimus 28a pav.

Apskaičiuotos šaltinių energinės apšvietos					
Spektras	“Bridgelux” LED, W/m ²	740 nm LED, W/m ²	850 nm LED, W/m ²	940 nm LED, W/m ²	Suminė energinė apšvieta, W/m ²
“DualJunct_740nm”	414.5	114.1	88.00	219.5	836.1
“DualJunct_850nm”	414.5	97.40	102.1	222.1	836.1

7 lentelė. Apskaičiuotos energinės apšvietos vertės „4LED1” vien tik iš šviestukų sudaryto A+ klasės saulės imitatoriaus spektro optimizacijai kiekvienai dviejų sandūrų GaInP/GaAs saulės celei ir optimizuotus spektrus sudarantiems šaltiniams. Spektrų pavadinimai atitinka kreivių pavadinimus 28b pav.

Išvados

1. Tiek ir vienos sandūros GaAs saulės elementų atveju, tiek ir dviejų sandūrų GaInP/GaAs saulės elementų atveju galimos A+ klasės saulės imitatorių konfigūracijos, gaunamos naudojant tik 4 šviestukų tipus ir galinčios užtikrinti mažesnį nei 1% fotosrovės nuokrypį nuo etaloninių verčių.
2. Hibridinio A+ klasės saulės imitatoriaus ir vienos sandūros GaAs saulės elementų atveju, fotosrovės nuokrypius galima efektyviai sumažinti, naudojant papildomą 365 nm šviestuką ir tinkamai parinkus šviesos šaltinių galias.

Literatūros sąrašas

- [1] P. Choudhary, R. K. Srivastava, "Sustainability perspectives – a review for solar photovoltaic trends and growth opportunities", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 227, 2019, DOI: doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.107.
- [2] V. Benda, L. Černa, "PV cells and modules – State of the art, limits and trends", *Heliyon*, Vol. 6, Nr. 12, 2020, DOI: doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05666.
- [3] Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, "Photovoltaics report", 2023.
- [4] K. Yoshikawa, H. Kawasaki, W. Yoshida, T. Irie, K. Konishi, K. Nakano, T. Uto, D. Adachi, M. Kanematsu, H. Uzu, K. Yamamoto, "Silicon heterojunction solar cell with interdigitated back contacts for a photoconversion efficiency over 26%", *Nature Energy*, Vol. 2, 2017, DOI: doi.org/10.1038/nenergy.2017.32.
- [5] B. M. Kayes, H. Nie, R. Twist, S. G. Spruytte, F. Reinhardt, I. C. Kizilyalli, G. S. Higashi, "27.6% conversion efficiency, a new record for single-junction solar cells under 1 sun illumination", 37th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 2011, DOI: 10.1109/PVSC.2011.6185831.
- [6] M. A. Green, E. D. Dunlop, G. Siefer, M. Yoshita, N. Kopidakis, K. Bothe, X. Hao, "Solar cell efficiency tables (Version 61)", *Progress in Photovoltaics*, Vol. 31, Nr. 1, 2022, DOI: doi.org/10.1002/pip.3646.
- [7] E. López-Fraguas, J. M. Sánchez-Pena, R. Vergaz, "A Low-Cost LED – Based Solar Simulator", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 68, Nr. 12, 2019, DOI: 10.1109/TIM.2019.2899513.
- [8] A. Luque, S. Hegedus, "Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, 2nd Edition", Wiley, 2011, ISBN: 0470721693.
- [9] S. C. Baker – Finch, K. R. McIntosh, "Reflection of normally incident light from silicon solar cells with pyramidal texture", *Progress in Photovoltaics*, Vol. 19, Nr. 4, 2011, DOI: 10.1002/pip.1050.
- [10] A. Stapf, C. Gondek, P. Nattrodt, E. Kroke, "Inverted Random Pyramids: Generation in HF – HCL – CL2 – Solutions and Simulation of the Influence of Surface Texture on Light Absorption

- in PERC Solar Cells", European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU PVSEC), 2016, DOI: 10.4229/EUPVSEC20162016-2BV.7.20.
- [11] Y. A. Jieb , E. Hossain, "Photovoltaic Systems. Fundamentals and applications", Springer, 2022, ISBN: 978 – 3 – 030 – 89780 – 2.
- [12] C. Zhang, J. Zhang, X. Ma, Q. Feng, "Semiconductor Photovoltaic Cells", Springer, 2021, ISBN: 978 – 981 – 15 – 9480 – 9.
- [13] Ilgu Yun, "Printed Electronics - Current Trends and Applications", InTechOpen, 2016, ISBN: 978 – 9535123019.
- [14] <https://www.pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/quantum-efficiency> (ž. 2023.03.19)
- [15] Synopsys Inc., „TCAD Documentation. Version S-2021.06“, 2021.
- [16] Synopsys Inc., "Sentaurus Technology Template: EQE and I – V Curve Calculation of a Textured Silicon Solar Cell Using the Raytracer", 2020.
- [17] Synopsys Inc., "Simulation of 2D Single - Junction GaAs Solar Cell", 2020.
- [18] Synopsys Inc., "Simulation of a GaAs/GaInP Dual - Junction Solar Cell".
- [19] A. Soman, S. Mondal, S. Bhatia, B. Arunachalam, S. Kumbhar, S. Saravanan, P. Nair, A. Antony, "Silicon Oxy Nitride - Silicon Nitride Surface Passivation of P type crystalline silicon solar cells with laser fired rear contacts", 32nd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 2016, DOI:10.4229/EUPVSEC20162016-2AV.2.32.
- [20] M. A. Steiner, R. M. France, J. Buencuerpo, J. F. Geisz, M. P. Nielsen, A. Pusch, W. J. Olavarria, M. Young, Nicholas J. Ekins-Daukes, "High Efficiency Inverted GaAs and GaInP/GaAs Solar Cells With Strain-Balanced GaInAs/GaAsP Quantum Wells", Advanced Energy Materials, Vol. 11, Nr. 4, DOI: doi.org/10.1002/aenm.202002874.
- [21] <https://www.nrel.gov/grid/solar-resource/spectra-am1.5.html> (ž. 2023.02.05).
- [22] Ž. Vosylius , A. Novičkovas , K. Laurinavičius, V. Tamošiūnas, "Rational Design of Scalable Solar Simulators With Arrays of Light-Emitting Diodes", IEEE Journal of Photovoltaics, Vol. 12, No. 2, 2022, DOI: 10.1109/JPHOTOV.2021.3136783.

- [23] Ž.Vosylius, D.Antonovič, A. Novičkovas, E. Gaubas, V. Tamošiūnas , "Rational Selection of Light Sources for LED-based Solar Simulators", rankraštis išsiųstas į Solar Energy žurnalą.
- [24] European Committee for Electrical Standardization (CENELEC), „Photovoltaic devices – Part 9: Classification of solar simulator characteristics (IEC 60904 – 9: 2020)“, 2020.
- [25] <https://pvpmc.sandia.gov/modeling-steps/2-dc-module-iv/effective-irradiance/spectral-response/>(ž. 2023.03.19).

Bibliografija

ANTONOVICĖ, Dariuš. *Saulės elementų voltamperinių charakteristikų modeliavimas „Synopsys TCAD“ programų paketu*. Fotonikos ir nanotechnologijų magistro studijų programos baigiamasis darbas. Vad. dr. Vincas Tamošiūnas. Vilnius: Vilniaus universitetas, Fizikos fakultetas, Fotonikos ir nanotechnologijų institutas, 2023, 43 p.

Pagaminus saulės elementus, yra būtina patikrinti jų savybes, apšviečiant juos saulės imitatoriumi. Pastaraisiais metais išvystyti didelės galios šviestukai leidžia pakeisti visus arba dalį saulės imitatoriuose tradiciškai naudojamų dujų išlydžio lempų. Šiame darbe buvo modeliuojamos skirtingų rūšių saulės elementų voltamperinės charakteristikos ($I - V$), jas apšviečiant hibridinių ir vien tik iš šviestukų sudarytų A+ klasės saulės imitatorių spektrais. Be to, buvo atliktos šių spektrų optimizacijos kiekvienai celei. Modeliavimui buvo pasitelktas „Synopsys TCAD“ programų paketas su jame įdiegtais vienos ir dviejų sandūrų saulės celių šablonais. Gautos optimizuotos spektrų konfigūracijos GaAs ir GaInP/GaAs saulės celėms leido užtikrinti mažesnę nei 1% fotosrovės nuokrypį nuo verčių, gautų apšviečiant saulės elementus etaloniniu „AM1.5G“ spektru.

Summary

Darius Antonovič. Modeling of solar cell current – voltage characteristic with the “Synopsys TCAD” program package

The aim of this work was to model the current – voltage characteristics for various types of solar cells under the illumination of different LED – based solar simulator spectra as well as to optimize solar simulator configurations for each type of cell. All simulations were carried out using the “Synopsys TCAD” program package and the built – in templates for each evaluated solar cell. Initial simulations were done with a crystalline (c – Si) Al – BSF solar cell, which, while illuminated with a spectrum of an older standard solar simulator, exhibited excess photocurrent in comparison to being illuminated with the reference “AM1.5G” spectrum. This issue was partially resolved via optimization of the outdated solar simulator in order to conform to new A+ class standards with an equalizing multiplier; however, the most accurate results were achieved through the implementation of A+ class hybrid solar simulators. Subsequent simulations with a single – junction GaAs solar cell showed that illumination with solely LED – based solar simulators can yield relative photocurrent deviations of the less than 1%. Properly optimized hybrid solar simulators for said solar cell were able to achieve similar results. In the case of a dual – junction GaInP/GaAs solar cell, hybrid solar simulators yielded a relative photocurrent deviation of the less than 1%. Optimization of solely LED – based solar simulators for this type of cell was more difficult due to it being composed of essentially two component cells with different external quantum efficiencies; nevertheless, the optimal configuration of a solely LED – based was achieved with a relative photocurrent deviation of the less than 1%