

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
FUNDAMENTINIŲ MOKSLŲ FAKULTETAS
FIZIKOS KATEDRA

TVIRTINU
Katedros vedėjas

(Parašas)

(Vardas, pavardė)

(Data)

Konstantin Leškevič

**DIRBTINIO ŠVIESOS ŠALTINIO POVEIKIO SAULĖS ELEMENTAMS
TYRIMAS**

**RESEARCH OF ARTIFICIAL LIGHT SOURCE EFFECTS ON SOLAR
CELLS**

Baigiamasis magistro darbas

Saulės elementų ir modulių inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 621J91001
Technologijų studijų kryptis

Vadovas

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

Lietuvių kalbos konsultantas

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

Vilnius, 2018

Vilniaus Gedimino technikos universitetas

Fundamentinių mokslų fakultetas

Fizikos katedra

ISBN ISSN

Egz. sk.

Data-....-....

Saulės elementų ir modulių inžinerijos studijų programos baigiamasis magistro darbas

Pavadinimas **Šviesos šaltinio poveikio saulės elementams tyrimas**

Autorius **Konstantin Leškevič**

Vadovas doc. dr. **Vaida Vasiliauskienė**

Kalba

☒ X

lietuvių

☐

užsienio

Anotacija

Baigiamajame magistro darbe išnagrinėta mokslinė literatūra, kurioje aprašomi nuolatiniai ir blykstiniai šviesos šaltiniai. Išnagrinėtos šviesos šaltinių taikymo fotovoltinių modulių generavimo charakteristikoms tirti galimybės.

Baigiamajame darbe pateikta fotovoltinio modulio charakteristikų, naudojant dirbtinius šviesos šaltinius, nustatymo metodika ir įranga. Baigiamajam darbui parengti, atlikti fotovoltinio modulio parametrų matavimai naudojant skirtingus dirbtinius šviesos šaltinius: saulės spektro simulatorių ir lazerį, siekiant įvertinti skirtingų šviesos šaltinių poveikį įvairiems saulės elementams. Išnagrinėti fotovoltinio modulio charakteristikų pokyčiai ir juos lemiančios priežastys laboratorinėmis sąlygomis. Baigiamojo darbo metu atlikti tyrimai pristatyti Berlyne, Helmholtz – Zentrum Berlin für Materialien und Energie institute rengtoje konferencijoje.

Atlikus teorinę ir praktinę baigiamojo darbo analizę, pateikiamos baigiamojo darbo išvados ir rekomendacijos.

Darbą sudaro 6 dalys: įvadas, literatūros apžvalga, eksperimentinių tyrimų metodika, eksperimentinių tyrimų rezultatų analizė išvados ir rekomendacijos, literatūros sąrašas.

Darbo apimtis – 64 p. teksto be priedų, 51 iliustr., 7 lent., 40 bibliografiniai šaltiniai.

Prasminiai žodžiai: fotovoltinis, elementas, modulis, spektras, simulatorius, voltamperinė, fotosrovė, elektroluminescencija

Vilnius Gediminas Technical University

Fundamental science faculty

Physics department

ISBN ISSN

Copies No.

Date-....-....

Solar Cells and Modules Engineering study programme master thesis.

Title: **Research of Light Source Effects on Solar Cells**

Author **Konstantin Leškevič** Academic supervisor **Assoc. Prof. Dr. Vaida Vasiliauskienė**

Thesis language

☒

Lithuanian

☐

Foreign (English)

Annotation

In the final masters thesis, scientific literature is reviewed, which describes psteady state and flash sources of light. Determined application of light sources for the study of photovoltaic modules power generation characteristics.

In the final masters thesis methodology and equipment for photovoltaic modules parameters determination using artificial light sources is presented. For the final work, measurements of photovoltaic module parameters using different artificial light sources: solar spectrum simulator and laser are used to estimate the influence of different light sources on various solar cells. Research of the final thesis was presented at a conference held at Helmholtz – Zentrum Berlin für Materialien und Energie in Berlin.

Analysis for changes in the characteristics of the photovoltaic module and their causes in laboratory conditions was made.

After theoretical and practical analysis of the final work, conclusions and recommendations of the final thesis are presented.

Structure: introduction, literature review, experimental research methodology, analysis of experimental results conclusions and suggestions, references.

Thesis consist of: 64 p. text without appendixes, 51 pictures, 7 tables, 40 bibliographical entries.

Keywords: photovoltaic, cell, module, spectrum, simulator, current–voltage, photocurrent, electroluminescence.

TURINYS

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS	9
LENTELIŲ SĄRAŠAS	11
SANTRUMPŲ SĄRAŠAS	12
ĮVADAS	14
1. LITERATŪROS APŽVALGA	16
1.1. Atsinaujanti energetika	16
1.1.1. Saulės energetikos privalumai ir trūkumai	17
1.1.2. Saulės energetikos potencialas	18
1.2. Saulės elementų rūšys	20
1.3. Saulės elemento nuostoliai	22
1.4. Dirbtiniai šviesos šaltiniai	24
1.4.1. Lempas	24
1.4.1.1. Halogeninės lempas	24
1.4.1.2. Fluorescencinės lempas	24
1.4.1.3. Kontaktinės išlydžio lempas	25
1.4.1.4. Metalų halogenidų lempas	25
1.4.2. Saulės šviesos simulatoriai	25
1.4.2.1. Saulės šviesos simulatoriaus parinkimas	26
1.4.2.2. Saulės šviesos simulatorių spektrinis atitikimas	26
1.4.2.3. Saulės šviesos simulatorių tipai	27
1.4.3. Lazeriai	29
1.5. Literatūros apžvalgos išvados	31
2. EKSPERIMENTINIŲ TYRIMŲ METODIKA IR PRIETAISAI	33
2.1. Eksperimentinių tyrimų metodikos ir prietaisų skyriaus išvados	48
3. EKSPERIMENTINIŲ TYRIMŲ REZULTATAI IR ANALIZĖ	49
3.1. Impulsinio simulatoriaus šviesos įtaka polikristalinio silicio saulės elementams	49
3.2. Lazerio šviesos poveikis SF saulės elementams	54
3.3. Eksperimentinių tyrimų rezultatų ir analizės skyriaus išvados	64
REKOMENDACIJOS	65
LITERATŪRA	66

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1.1 pav. Palyginamasis energijos suvartojimo pokytis 2005–2015 m. (BP Statistical... 2016)	16
1.2 pav. Investicijos į atsinaujinančią energetiką (EEA Report... 2016)	19
1.3 pav. Saulės energetikos vystymosi scenarijus pasaulyje (Global Market... 2015)	19
1.4 pav. Saulės energetikos vystymosi scenarijus pasaulyje (Global Market... 2017)	20
1.5 pav. AM 1.5G spektro sugertis ir nuostoliai kristalinio silicio SE (Gersmann 2017)	23
1.6 pav. Singletinių būsenų skaidymas	24
1.7 pav. AM0, AM1.5G ir 5800 K juodojo kūno spinduliavimo spektro palyginimas (Würfel 2005)	27
1.8 pav. GaInP/GaAs/Ge saulės elemento kvantinio efektyvumo palyginimas su AM0 spektru (Jenkins 2005)	28
1.9 pav. AM 0 ir „Spectrolab“ X-25 spektro palyginimas (Jenkins 2005)	29
1.10 pav. Saulės simulatoriaus skleidžiamas spektras kai visos trys GaInP/GaAs/Ge tendeminio saulės elemento komponentės yra tinkamai apšviestos palyginimas su AM0 (Jenkins 2005)	29
1.11 pav. Lazerio principinė schema (Fluorescencinė...2018)	30
1.12 pav. Spinduliavimo būdai (Bach 2012)	30
2.1 pav. Eksperimentui naudotas SE Amerisolar (Amerisolar...2013)	34
2.2 pav. Elektrinio bloko principinė schema (Markvart 2013)	35
2.3 pav. Saulės spektro simulatorius PASAN A+ (Bordogna 2013)	35
2.4 pav. Šviesos impulso generatorius BV85 (Bordogna 2013)	36
2.5 pav. Xe lempa	37
2.6 pav. Xe lempos skleidžiamas spektras (Bordogna 2013)	37
2.7 pav. PASAN A+ saulės šviesos simulatoriaus kontrolinė celė (Bordogna 2013)	38
2.8. pav. Tyrimui naudojamų prietaisų jungimo schema (Bordogna 2013)	38
2.9. pav. Naudojamų prietaisų elektrinė jungimo schema (Bordogna 2013)	39
2.10 pav. Tipinė SunSim 8.0 Software darbo aplinka	40
2.11 pav. VAL lange pateikiami duomenys (Bordogna 2013)	41
2.12 pav. GPH lange pateikiami duomenys(Bordogna 2013)	41
2.13 pav. Sistemos kalibravimo metodai	42
2.14. pav. a) AMOLF SE struktūrinė schema; b) AMOLF SE	43
2.15. pav. Magnetinio lauko matavimo įrenginys Gauss/Teslameter F51	44

2.16. pav. 1) Lazerio galios valdiklis; 2) lazerio diodo temperatūros reguliavimo įrenginys; 3) ThorLabs lazeris	44
2.17. pav. ThorLabs šviesos spinduliavimo galios skaitiklis	45
2.18. pav. Signalų generatorius SR830 DSP (Stanford...2011)	45
2.19. pav. Lazerio šviesos poveikio SE parametrų tyrimo naudotų prietaisų jungimo principinė schema	46
2.20. pav. LabView programinės įrangos programavimo darbalaukis	47
3.1. pav. Idealaus Amerisolar SE voltamperinė charakteristika (New...2013)	49
3.2. pav. Pasan A+ impulsiniu simulatoriumi apšviesto Amerisolar SE voltamperinė charakteristika (raudonas langelis – galia, mėlynas langelis – srovės stipris $I(A)$).....	50
3.3 pav. Idealaus ir tiriamojo SE srovės priklausomybės nuo įtampos palyginimas.....	51
3.4. pav. Elektroluminescencijos būdu aptikti SE netobulumai	52
3.5 pav. Pasan A+ impulsiniu simulatoriumi apšviesto antrojo Amerisolar SE voltamperinė charakteristika.....	52
3.6 pav. Teorinio ir antro tiriamojo SE įtampos nuo srovės priklausomybės palyginimas	53
3.7 pav. Elektroluminescencijos būdu aptikti antrajame SE netobulumai.....	54
3.8. pav. Nuo magnetinės indukcijos priklausanti generuojama fotosrovė Amolf SF SE (mėlyni apskritimai); nuo lazerio šviesos moduliavimo priklausanti fotosrovė (raudoni kvadratai). ...	55
3.9. pav. Fotosrovės priklausomybė nuo magnetinės indukcijos esant lazerio šviesos ir galios fluktuacijai	56
3.10. pav. Fotosrovės priklausomybė nuo magnetinės indukcijos, kurią lemia mažas sinchroninio stiprintuvo jautris	57
3.11. pav. Fotosrovės priklausomybė nuo magnetinės indukcijos, kai padidinama lazerio galia	57
3.12. pav. Fotosrovės priklausomybė nuo magnetinės indukcijos, kai nestabilios Helmholtz'o ritės	58
3.13 pav. Fotosrovės priklausomybė nuo magnetinės indukcijos kai sinchroninio stiprintuvo jautris per didelis	59
3.14 pav. Fotosrovės priklausomybė nuo magnetinės indukcijos, keičiant magnetinę indukciją 10000–10500 Gs ribose	60
3.15 pav. Saulės elemento degradavimas, stebint fotosrovės priklausomybę nuo magnetinės indukcijos	61
3.16a pav. Fotosrovės priklausomybė nuo magnetinės indukcijos pašalinus nustatytas klaidas	62

3.16b. pav. Vidutinės fotosrovės priklausomybė nuo magnetinės indukcijos, pašalinus nustatytas klaidas.....	62
3.17a pav. Kartojamas fotosrovės priklausomybės nuo magnetinės indukcijos tyrimas pašalinus nustatytas klaidas.....	63
3.17b pav. Kartoto fotosrovės priklausomybės nuo magnetinės indukcijos tyrimo vidutinės reikšmės.....	63

LENTELIŲ SĄRAŠAS

1.1 lentelė. Atsinaujinančios energijos gavyba pagal regionus. (Global Energy... 2016)	17
1.2 lentelė. Saulės jėgainių generuojama energija kai kuriose Europos Sąjungos valstybėse 2013 m. (Adomavičius 2014)	18
1.3 lentelė. Įvairių tipų lazerių parametrai ir jų panaudojimo sritys (Williams 2008).....	31
2.1 lentelė. Amerisolar SE techniniai parametrai (Amerisolar...2013).....	34
2.2 lentelė. PASAN A+ techninės charakteristikos (Bordogna 2013).....	35
3.1 lentelė. Idealaus ir tiriamojo SE parametrų palyginimas	51
3.2 lentelė. Teorinio ir antrojo tiriamojo SE parametrų palyginimas	53

SANTRUMPŲ SĄRAŠAS

AM – oro masės koeficientas (angl. *air mass*);
Ar – argonas;
Au – auksas;
CdSe – kadmio selenitas.
CdTe – kadmio telūridas;
CIS – vario indžio diselenidas;
CIGS – vario indžio galio selenidas;
CO₂ – anglies dioksidas;
CVD (angl. *Chemical Vapour Deposition*) – cheminis garų nusodinimas;
FF (angl. *Fill Factor*) – užpildos faktorius;
GaAs – galio arsenidas;
Ge – germanis;
InAs – indžio arsenidas;
InP – indžio fosfidas;
IR – infraraudonoji spinduliuotė;
ITO – indžio alavo oksidas;
I–V – voltamperinė charakteristika;
Kr – kriptonas;
LCOE (angl. *Levelized Cost of Electricity*) – lyginamoji elektros kaina;
LTI - ilgalaikis šviesos nestabilumas;
MoO_x – molibdeno oksidas;
MPP – metilo perileno pigmentas;
PSU (angl. *Power Supply Unit*) – galios tiekimo sistema;
Pt – platina;
PV (angl. *photovoltaic*) – fotovoltinis;
SE – saulės elementas;
SF (angl. *Singlet Fission*) – singletinių būsenų skaidymas;
PS (angl. *Pulsed State system*) – impulsinės šviesos saulės spektro simulatorius;
SE – saulės elementas;
Si – silicis;
Sn – alavas;
SS (angl. *Steady State system*) – nuolatinės šviesos saulės spektro simulatorius;
STI – trumpalaikis šviesos nestabilumas;

TiO₂ – titano oksidas;

USD – Jungtinių Amerikos Valstijų doleris;

UV – ultravioletinė spinduliuotė;

ZnO – cinko oksidas;

ZnS – cinko sulfidas;

Xe – ksenonas.

IVADAS

Problema

2015 m. beveik visos pasaulio šalys pasirašė Jungtinių Tautų Klimato kaitos sutartį (angl. *UN Climate Change Agreement*) įsipareigodamos riboti kylančią ilgalaikę temperatūrą iki 2 °C virš prieš industrinio lygio. Vienas iš būdų pasiekti nustatytų tikslų, tai sumažinti Šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisijas. Tai galima pasiekti diversifikuojant energetikos sektorių, t.y. iškastinį kurą keičiant atsinaujinančiais energijos šaltiniais. Kaip didžiausią potencialą turinti išskiriama fotovoltinė energetika.

Vienas iš pagrindinių argumentų vis plačiau naudoti fotovoltinę energetiką, tai jos lyginamoji elektros kaina LCOE (angl. *Levelized Cost of Electricity*). LCOE susideda iš gyvavimo ciklo kainos proporcijos su energijos kiekio pagaminto viso veikimo metu. Nors fotovoltinių sistemų kaina ir nukris iki neregėtai žemų kainų, tačiau bendrai fotovoltinės energetikos kaina išliks pakankamai aukšta, dėl ją sudarančių darbo kaštų, žemės nuomos kainos ir pan.. Todėl vienas iš būdų padidinti LCOE, tai padidinti naudojamų elementų efektyvumą arba sumažinti €/W santykį.

Kadangi saulės elementų rinka tik pastaraisiais metais pradėjo augti, todėl nėra atlikta pakankamai tyrimų, norint nustatyti dirbtinių šviesos šaltinių poveikį saulės elementams. Saulės elementų charakteristikas sunku įvertinti dėl nuolat kintančių meteorologinių sąlygų, tačiau kontroliuojamomis laboratorinėmis sąlygomis, tokius vertinimus atlikti yra žymiai paprasčiau naudojant dirbtinės saulės spektro simulatorius bei lazerius, su kuriais atliktų eksperimentų nėra daug.

Aktualumas

Pašalinus saulės elementų trūkumus ir nustačius jų pablogėjusio darbo našumo charakteristikas lemiančius faktorius dar iki juos įdiegiant į elektros energijos sistemą, būtų išvengta energijos gamybos nuostolių. Taip pat nustačius šviesos įtaką skirtingiems saulės elementams, būtų galima parinkti tinkamiausius saulės elementus naudoti fotovoltinėje energetikoje.

Saulės elementų parametrų su dirbtiniais šviesos šaltiniais tyrimai aktualūs, nes leidžia iširti saulės elementų charakteristikas laboratorinėmis sąlygomis, padeda įvertinti jų įtaką saulės elemento charakteristikoms bei nustatyti naujų saulės elementų veikimo principus.

Tyrimo objektas

Saulės elementai, naudojant tyrimui dirbtinius šviesos šaltinius.

Tikslas

Ištirti saulės elementų parametrus ir jų kitimą laboratorinėmis sąlygomis lemiančias priežastis, naudojant dirbtinius šviesos šaltinius.

Uždaviniai

1. Atlikti mokslinės literatūros analizę apie nuolatinius ir blykstinius šviesos šaltinius, jų poveikį saulės elementams.
2. Įsisavinti ir pritaikyti saulės elementų parametrų matavimo metodus, pasirenkant optimalius laboratorinėmis sąlygomis dirbtinius šviesos šaltinius saulės elementų fotovoltinėms savybėms tirti.
3. Atlikti saulės elemento parametrų matavimus, naudojant skirtingus dirbtinius šviesos šaltinius.
4. Ištirti saulės elemento voltamperines charakteristikas, naudojant saulės spektro simulatorių, ir jas palyginti su gamintojo nurodomomis charakteristikomis.
5. Nustatyti veiksnius darančius įtaką saulės elemento generuojamos fotosrovės nustatymo tikslumui, naudojant lazerį.

Temos naujumas.

Tobulėjant technologijoms, atsinaujinančios energijos išteklius kaip energijos diversifikavimo šaltinį naudoti tampa pigiau, lyginant su importuojamu iškastiniu kuru. Saulės energetika laikoma perspektyviausia energetikos šaka, tačiau nors ir fotovoltiniu būdu gaminama elektros energija ir pinga, tačiau dėl į LCOE įeinančių kaštų saulės energetikai yra sunku išlikti konkurencingai. Todėl būtina ieškoti naujų būdų kaip padidinti saulės elementais generuojamą galią, o tam būtina nustatyti šviesos šaltinių poveikį saulės elementams. Mokslinių darbų, kuriuose tiriamas dirbtinių šviesos šaltinių poveikis saulės elementams nėra daug, todėl šiame darbe atlikti reikšmingi saulės energetikos sektoriui tyrimai, vertinant šviesos poveikį saulės elementams ir nustatant naujų saulės elementų panaudojimo perspektyvas.

Tyrimo ir analizės metodai.

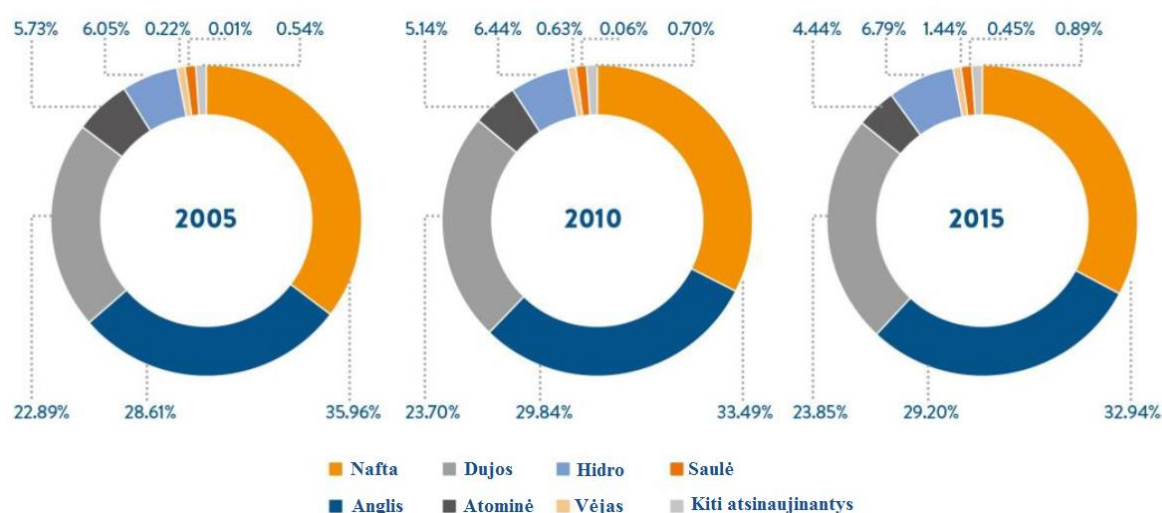
Tirtų saulės elementų parametrams nustatyti naudotas Pasa A+ saulės spektro simulatorius ir ThorLabs LP637-SP70 lazeris. Sukurta nauja sistema SF procesus naudojančių saulės elementų generuojamai fotosrovei nustatyti. Gautiems duomenis susisteminti ir analizuoti naudota SunSim 8.0 Software ir LabView programinė įranga.

1. LITERATŪROS APŽVALGA

1.1. Atsinaujanti energetika

Per pastaruosius 15 metų pasaulio energetikoje buvo stebimi žymūs vartojamų energijos šaltinių pokyčiai. Netikėtai didelės investicijos į atsinaujinančių energijos šaltinių rinką bei sparti atsinaujinančios energetikos plėtra besivystančiose šalyse pakeitė energijos sektorių. Visa tai prisidėjo prie mažėjančių energijos kainų, ekonomikos augimo. Daugelis šalių pradėjo naudoti diversifikuotus energijos šaltinius, kartu su valstybiniais elektros energijos tiekimo tinklais ar privačiais energijos mikro–tinklais.

Žemiau pateiktame (žr. 1.1 pav.) pavaizduota energijos sektoriuje suvartojamų šaltinių kaita.



1.1 pav. Palyginamasis energijos suvartojimo pokytis 2005–2015 m. (BP Statistical... 2016)

Iš pateiktų duomenų matome, kad atsinaujinančios energetikos dalis per 10 metų pakito nuo 6,82 % iki 9,57 %.

Įdiegta saulės energijos jėgainių galia eksponentiškai augo ir pasiekė apie 227 GW 2015 metų pabaigoje, pagamindama 1 % visos naudojamos elektros energijos. Saulės energijos galia naudojama šildymui ir vėsinimui 2015 metais siekė 406 GW (World Energy... 2016).

2015 metais Europoje buvo pagaminama 34,2 % visos pasaulyje atsinaujinančios energijos. (žr. 1.1 lentelę).

1.1 lentelė. Atsinaujinančios energijos gavyba pagal regionus. (Global Energy... 2016)

Regionas	Atsinaujinančios energijos dalis elektros gamyboje 2005 m., %	Atsinaujinančios energijos dalis elektros gamyboje 2010 m., %	Atsinaujinančios energijos dalis elektros gamyboje 2015 m., %
Afrika	16,9	17,4	18,9
Azija	13,9	16,1	20,3
NVS	18,0	16,7	16,1
Europa	20,1	25,7	34,2
Lotynų Amerika	59,3	57,7	52,4
Vid. Rytai	4,3	2,0	2,2
Š. Amerika	24,0	25,8	27,7
Australija ir Okeanija	17,9	18,6	25,0

Skalūnų naftos ir dujų plėtra energetikos sektoriuje, lemia išteklių su mažesnėmis sąnaudomis išgavimą. Be potencialiai milžiniškų skalūnų naftos ir dujų išteklių, atsinaujinančių energijos šaltinių plėtra didėja ir tampa ekonomiškai konkurencinga.

1.1.1. Saulės energetikos privalumai ir trūkumai

Privalumai:

- saulės energija priskiriama atsinaujinantiems energijos šaltiniams: toks energijos šaltinis nebus išseikvotas kol saulė švies;
- tokia energijos rūšis turi didelį potencialą: žemės paviršių pasiekia 120 000 TW saulės spinduliuojamos energijos;
- saulės energetika yra tvari ir aplinkai draugiška: ateities kartoms paliksime tokias pačias galimybes naudotis energijos resursais, kuriuos turime mes, tačiau nors ir yra taršos emisijų gaminant, transportuojant ir diegiant saulės energijos sistemas, bet ji neprilygsta daugumai konvencinių energijos šaltinių;
- saulės energijos prieinamumas: saulės energiją galima konvertuoti į elektros energiją ne tik šalyse esančiose netoli pusiaujo, bet ir visame pasaulyje, taip pat kaip vienintelis energijos šaltinis naudojamas kosminiuose aparatuose;
- maži išlaikymo kaštai: SE suteikiama apie 20–25 m. garantija, o individualių namų saulės energijos sistemų savininkams reikia tik kelis kartus per metus jas nuvalyti (Solar energy... 2014).

Trūkumai:

- energijos gavimo kaina: nors SE pagaminamos energijos kaina ir sumažėjo nuo ~ 4 USD/W (2007 m.) iki ~ 1,8 USD/W (2015 m.) , tačiau vis dar yra brangesnė lyginant su iškastiniu kuru (World Energy... 2016);
- ribotas energijos gavimas: galimybė gaminti elektros energija priklauso nuo paros meto ir klimato sąlygų, t.y. naktį ar apsiniaukusią dieną energija nėra gaminama arba

jos gaunama labai mažai;

- didelė energijos saugojimo kaina: norint užtikrinti energijos tiekimą, tokiai energijai saugoti reikalingos baterijos, kurios šiuo metu yra ganėtinai brangios, tačiau elektros energijos poreikio pikas yra vidudienį ir sutampa su SE pagaminamos energijos piku;
- gamybai naudojami reti elementai: kai kurių saulės elementų pvz. CIGS (žr. 1.2 skyrių) gamybai naudojami retai aptinkami cheminiai elementai, tokie kaip kadmis ir telūras;
- užimamas plotas: pagaminamos energijos kiekis priklauso nuo saulės elementų (toliau – SE) ploto (W/m^2) (Solar energy... 2014).

1.1.2. Saulės energetikos potencialas

Lietuvoje, taip pat ir kitose Baltijos regiono šalyse saulės energijos nepakanka vietiniams energijoms poreikiams tenkinti. Tačiau tai galima paneigti, palyginus daugiametę vidutinę saulės ekspoziciją (kWh/m^2), tenkančią horizontaliam paviršiui (žr. 1.2 lentelę).

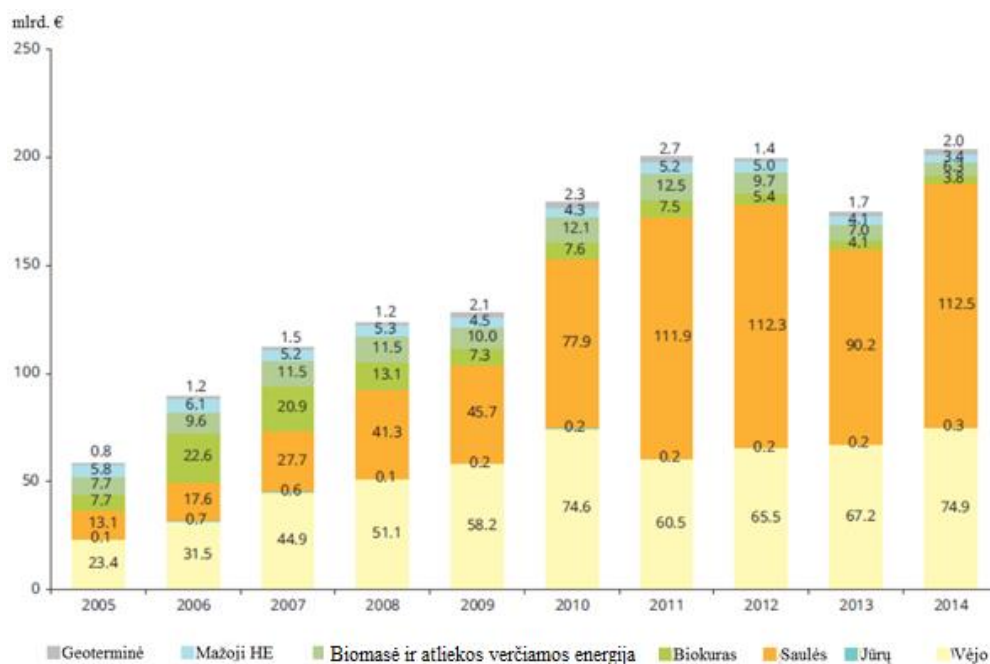
1.2 lentelė. Saulės jėgainių generuojama energija kai kuriose Europos Sąjungos valstybėse 2013 m. (Adomavičius 2014)

Šalis	Saulės ekspozicija į horizontalų paviršių, kWh/m^2	Saulės jėgainių generuojama energija, GW	Saulės energijos dalis bendrai sunaudojamoje energijoje, %
Vokietija	950–1300	36,013	5,30
Belgija	950–1050	3,000	3,45
Čekija	1030–11300	2,160	3,40
Nyderlandai	950–1050	0,650	0,53
Danija	950–1000	0,532	1,67
Didžioji Britanija	800–1200	2,900	0,81
Lietuva	950–1070	0,068	0,45

Verta pastebėti, kad Vokietijoje saulėtų valandų skaičius yra labai panašus kaip ir Lietuvoje. Pietiniuose Vokietijos rajonuose saulės energijos kiekis siekia 1200 kWh/m^2 , o šiauriniuose rajonuose – tik iki 950 kWh/m^2 . Nepaisant to, šioje valstybėje saulės energijos naudojimas yra labai skatinamas. Menkas saulės energijos panaudojimas Lietuvoje yra grindžiamas tuo, kad čia yra netinkamos klimatinės sąlygos. Šį argumentą galima paneigti kaimyninės Lenkijos pavyzdžiu, kur saulės energijos kiekis yra labai panašus kaip ir Lietuvoje: per metus Lenkijoje į horizontalų paviršių krenta nuo 970 iki 1100 kWh/m^2 saulės energijos. Per 2001–2008 metus vidutinis saulės energijos šilumai gaminti panaudojimas Lenkijoje augo 43 % per metus ir Lenkija tapo trečiąja pagal šilumos iš saulės energijos gavybą Europos valstybe (Vasarevičius 2011).

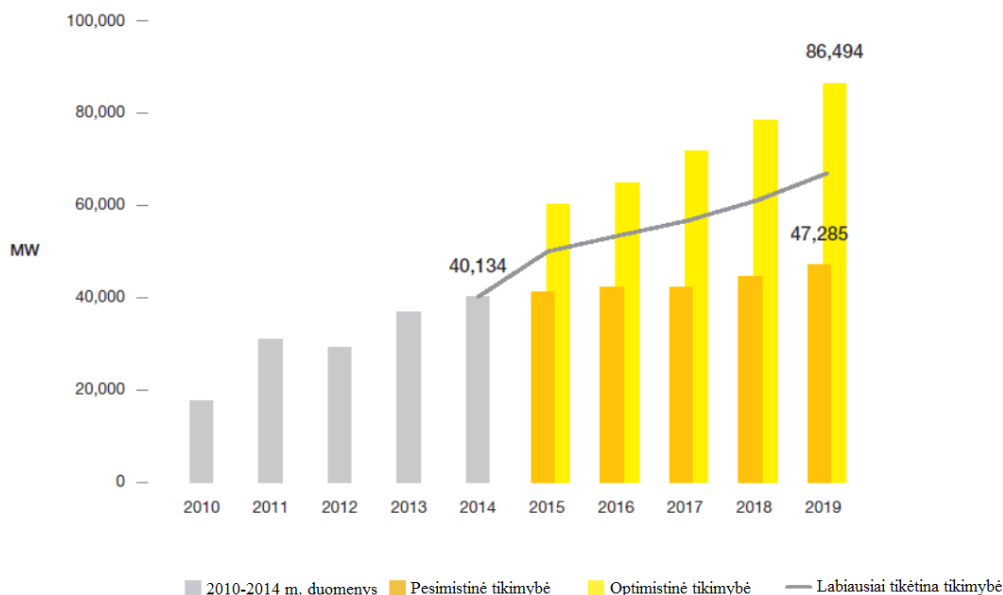
Europos Sąjungos direktyvoje 2009/28/EC nurodyta, kad 2020 m. atsinaujinančios energetikos dalis visame energetikos sektoriuje, turi sudaryti 20 %. Iš 1.2 paveikslo matome,

kad investicijos 2005–2014 m. laikotarpiu į saulės energetikos sektorių padidėjo nuo 13,1 iki 112,5 mlrd. €.

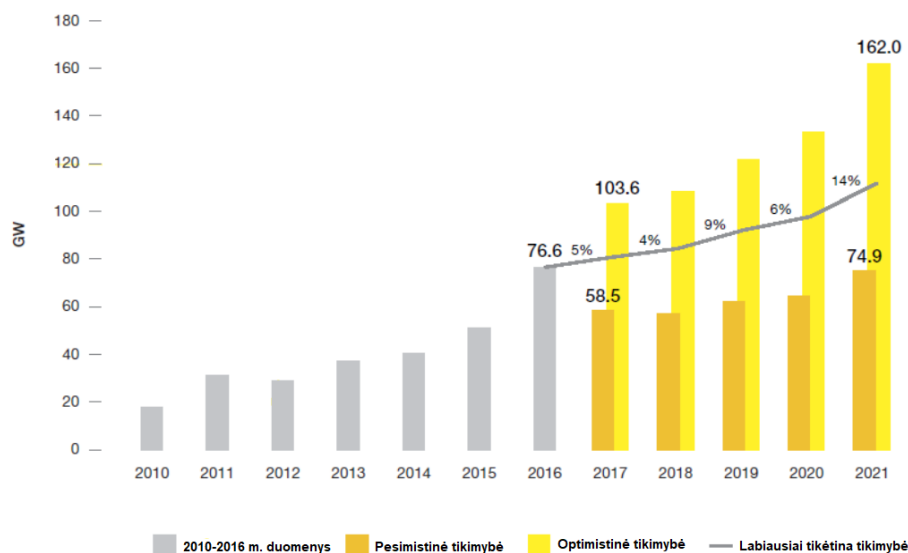


1.2 pav. Investicijos į atsinaujinančią energetiką (EEA Report... 2016)

Europos Sąjungos direktyvoje 2009/28/EC nurodyta, kad 2030 m. atsinaujinančios energetikos dalis visame energetikos sektoriuje, turi sudaryti 27 %. Pastaraisiais metais SE tyrimai ir diegimas į bendrąją energijos rinką labai suintensyvėjo (žr. 1.3-1.4 pav.).



1.3 pav. Saulės energetikos vystymosi scenarijus pasaulyje (Global Market... 2015)



1.4 pav. Saulės energetikos vystymosi scenarijus pasaulyje (Global Market... 2017)

Lygindami 1.3 ir 1.4 paveiksluose pateiktus duomenis matome, kad 2015 m. pateikta labiausiai tikėtina tikimybė pagal 2017 m. duomenis išsipildė bei viršijo lūkesčius.

Viena iš saulės energetikos augimo priežasčių pasirašytas Kioto protokolas. (Jungtinių...2017) bei ratifikuota Paryžiaus sutartis 2016 m. Be to viena iš Europos Sąjungos mokslo rėmimo programos prioritetinių kryptų yra fotovoltinių (toliau – PV) prietaisų tyrimas, kūrimas ir tobulinimas.

1.2. Saulės elementų rūšys

Plačiausiai paplitę yra monokristalinio, polikristalinio ir amorfinio Si saulės elementai.

Monokristaliniai Si saulės elementai. Gaminant monokristalinius silicio SE, silicio plokštelė yra auginama aplink vieną bazinį monokristalą ir sukuriamas idealiai orientuotas kristalinis tinklulis. (Skirtumai...2016)

Monokristaliniai Si SE dar neseniai buvo gaminami iš *p* tipo monokristalinių Si plokštelių, kurių skersmuo 100–150 mm, o storis 200–300 μm . tobulėjant gamybos technologijoms pradėtos gaminti 25 μm storio plokštelės. Dėl šios priežasties, tokie SE atpigo nuo 4–5 iki maždaug 1 USD/W o remiantis naujausiais žiniasklaidos pranešimais – iki 0,52 USD/W (gamintojo kaina). Maksimalus šiuo metu laboratorinėmis sąlygomis gaunamas šių SE naudingumo koeficientas siekia 24 %, o pramoniniu būdu gaminamų – 20–21 % (Petrauskas 2012).

Polikristalinio Si SE. Šiuo metu rinkoje vis labiau pradedami naudoti polikristaliniai Si SE, o jų platų naudojimą lemia maža gamybos kaina ir didelis efektyvumas. Polikristaliniai Si SE skirstomi į multikristalinius ir mikrokristalinius SE. Multikristaliniai SE gaminami iš

perlydytų ir greitai kristalizuotų monokristalinio Si SE gamyboje susidariusių atliekų. Mikrokristaliniai Si SE gamybos būdas pagrįstas amorfinio Si (toliau – a-Si) sluoksnių nusodintų cheminiu būdu iš garų fazės (CVD – *Chemical Vapour Deposition*) technologija, kai susidarę kelių μm dydžio kristalai neleidžia pasireikšti *Wronski – Staebler efektui* (hidrogenizuotų jungčių išnykimui). (Krotkus 2008)

Standartinis polikristalinio Si fotoelemento storis yra 200–300 μm . Si draustinės juostos plotis yra 1,12 eV. Laboratorinėmis sąlygomis pagamintų polikristalinio Si SE naudingumo koeficientas 17,8 %. SE rinkoje kaip pagrindinė medžiaga yra Si, kuri sudaro net 80–90 % rinkos. Polikristaliniai Si SE paplitę dėl parametų stabilumo, t.y. laikui bėgant jie mažiausiai kinta (Petrauskas 2012).

Amorfinio Si saulės elementai. a-Si pasižymi plačia draustine juosta, siekiančia 1,75 eV ir didele absorbcija, kuri apie 40 kartų didesnė, negu monokristalinio Si. Laboratorinėmis sąlygomis gaminamų a-Si naudingumo koeficientas $\eta = 12 \%$, tačiau per pirmąjį naudojimo mėnesį šis koeficientas sumažėja iki $\eta = 7\text{--}8 \%$, o paskui išlieka stabilus. Amorfinio Si SE gamybai naudojamos mikrometrų storio plėvelės, todėl sunaudojama mažai medžiagos, o tokie SE pigesni (Petrauskas 2012).

Plonaplėviai saulės SE gaminami a-Si pagrindu arba kitų toliau paminėtų neorganinių medžiagų pagrindu.

Kiti plonaplėviai neorganiniai saulės elementai. SE naudojami ir cheminių elementų periodinės lentelės III-V grupės junginiai, tokie kaip galio arsenidas (GaAs), indžio fosfidas (InP), kadmio telūridas (CdTe), vario indžio diselenidas (CIS) ir vario indžio galio selenidas (CIGS). GaAs SE savo parametrais yra geresni nei monokristalinio Si SE. Dėl platesnės draudžiamosios juostos iš GaAs pagaminti SE pasižymi didesne absorbcija negu Si, jo SE gali būti plonesni. Tačiau dėl didelės GaAs kainos, šie SE pagrinde naudojami tik astronautikos pramonėje ir eksperimentinėse sistemose, kur kaina nėra pagrindinis faktorius gamyboje (Petrauskas 2012).

Iš CdTe pagaminti SE pasižymi didele absorbcija. Maksimalus CdTe naudingumo koeficientas $\eta = 15,8 \%$. Tačiau Cd yra labai nuodingas ir tai komplikuoja tokių plėvelių gamybą bei naudojimą. Panašių rezultatų pasiekta ir su CIS. Iš šios medžiagos pagamintų SE naudingumo koeficientas siekia $\eta = 17,1 \%$. Šių SE gamybos procesas gana sudėtingas, tačiau jie pasižymi labai gera absorbcija (99 %) ir parametų stabilumu.

Dažikliais jautrinti saulės elementai. Šių SE veikimas pagrįstas, regeneratyviais fotoelektriniais procesais. Šioje SE sistemoje šviesą sugeriančios medžiagos – dažikliai yra atskiriami nuo terpės pernešančios krūvininkus. Kai naudojamos n tipo puslaidininkinė

medžiaga TiO_2 , elektros energijos gamybos ciklas prasideda dažiklio sužadiniu, sugeriant fotoną nuo TiO_2 – elektrolito sąlyčio paviršiaus, ir injektuojant elektroną į TiO_2 . Šis elektronas juda link priekinio elektrodo, t.y. elektros srovei laidaus stiklo. Organinių junginių tirpalų ir jodido sudėties elektrolitas – terpė pernešanti krūvininkus tarp galinio elektrodo ir dažiklio molekulių. Dėl mažesnio pasipriešinimo elektronų judėjimui, galinis elektrodas padengiamas Pt, kuri veikia kaip katalizatorius. Tik molekulės esančios puslaidininkinės medžiagos paviršiuje gali efektyviai injektuoti krūvininkus į puslaidininkį, naudingumo koef. (~ 90 %).

Tačiau bendra naudojamo dažiklio šviesos sugertis yra ganėtinai maža, o tai mažina fotosrovės susidarymą, tuo pačiu tokio SE efektyvumą, kuris siekia apie 1 % (Valiulis 2012).

Organiniai SE. Organiniai SE skirstomi į:

- molekuliniai;
- polimeriniai;
- plokščiųjų sistemų;
- tūrinės heterostruktūros.

Tokiems SE naudojamos organinės medžiagos (organiniai stiklai, polimerai ir t.t.) pasižymi p ir n tipo puslaidininkinių savybėmis. Šioms medžiagoms būdingas didelis optinis sugerties koeficientas, o tai leidžia sumažinti SE storį, tuo pačiu tokių SE kainą bei svorį.

Organinių SE sluoksnis kuriame generuojami krūvininkai yra gerokai siauresnis nei neorganinių SE, todėl dažnai naudojamas fullerenas (angl. *Buckminsterfullerene*) C_{60} . Šiuose SE C_{60} naudojamas kaip akceptorius elektronams.

Gaminant organinį SE Au (kontaktas) ir metilu pakeisto perileno pigmentu (MPP) sluoksniai garinami ant In-Sn oksiduoto stiklo. Vėliau nusodinama $\text{ZnPc}+\text{C}_{60}$ kompozicinė medžiaga. Naudojant šias medžiagas jau pasiekiamas 1–3 % šviesos konversijos naudingumo koeficientas (Valiulis 2012).

1.3. Saulės elemento nuostoliai

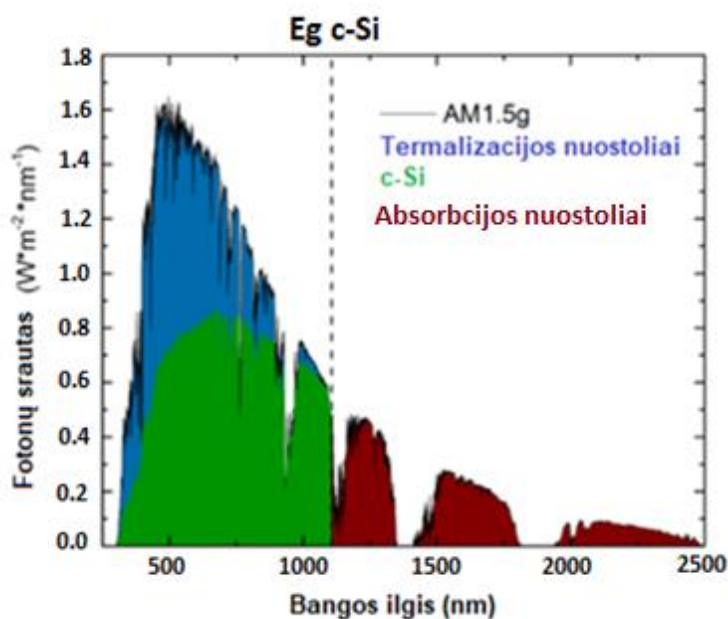
SE nuostoliai susideda iš:

- atspindžio nuostolių;
- konversijos nuostolių;
- šilumos nuostolių;
- absorbcijos nuostolių.

Atspindžio nuostoliai atsiranda dėl to, kad dalis į SE krentančių šviesos fotonų atspindimi nuo jo paviršiaus. Nors visi SE yra padengiami neatspindinčia danga, tačiau vis gi

dalį fotonų atsispindi nuo šio paviršiaus ir tai sudaro apie 8 % visos į SE krentančios energijos. (Saulės elemento...2006).

Absorbcijos ir šilumos nuostoliai priklauso nuo šviesos bangų ilgio (žr. 1.5 pav.).



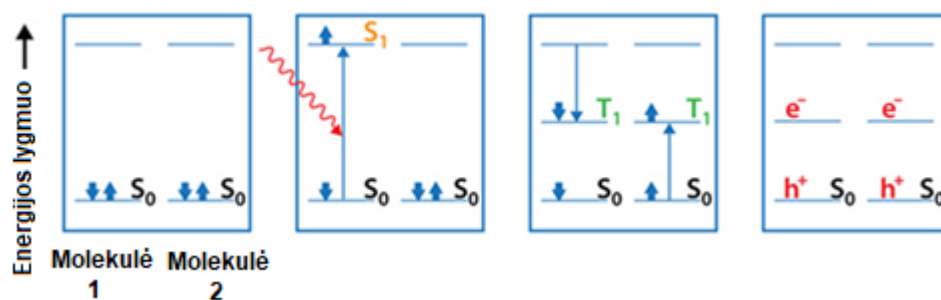
1.5 pav. AM 1.5G spektro sugertis ir nuostoliai kristalinio silicio SE (Gersmann 2017)

Kai kurie iš SE sugeneruotų elektronų nepatenka į išorinę grandinę ir dėl to susidaro konversijos nuostoliai, kurie sudaro 25 % visos į SE krentančios energijos. (Saulės elemento... 2006).

Fotonai, kurių bangos ilgis $\lambda > E_g$ (bangos ilgis didesnis už draustinės juostos plotį) negali sukurti elektronas – skylė poros, nes turi per mažai energijos. Silicio draustinės juostos tarpas $E_g = 1,12$ eV, jį atitinka fotonas, kurio bangos ilgis $\lambda = 1100$ nm, todėl vidutiniškai 23 % prarandamas silicio SE efektyvumas. T.y. kai fotono energija yra didesnė negu draustinės energijos juostos plotis, tai toks fotonas virst šiluma. Esant mažesnei fotono energijai nei medžiagos draustinių energijų juostos plotis – jis nebus sugertas.

Iš 1.5 pav. matome, kad tik dalis energijos gali būti absorbuojama SE. Galime matyti, kad esant mažam bangos ilgiui (< 1000 nm), susidaro dideli termalizacijos nuostoliai, o bangos ilgiui esant didesniai nei 1000 nm, pagrindiniai nuostoliai – absorbcijos.

Vienas iš būdų išvengti trumpabangėje spektro dalyje atsirandančių termalizacijos nuostolių – singletinių būsenų skaidymo procesas (žr. 1.6 pav.).



1.6 pav. Singletinių būsenų skaidymas

Šviesa aktyvuotos molekulės iš pagrindinės singletinės būsenos S_0 pereina į aukštesnę singletinę būseną S_1 (šviesos sugertis). Iš žemiausio sužadinto lygmens S_1 relaksacija gali vykti singletinių būsenų skaidymo procesu kai pakinta singleto būsena į du tripletus T_1 , t.y. energija nėra kuriama, o tik perskirstoma, taip atsiradę du tripletai gali sugeneruoti dvi elektronų-skylių poras, generuodamos didesnę fotosrovę. SE veikdami šiuo principu padidintų PV jėgainių generuojamą galią, tuo pačiu sumažindami LCOE.

1.4. Dirbtiniai šviesos šaltiniai

1.4.1. Lempas

1.4.1.1. Halogeninės lempos

Tai kaitrinės lempos, kurių gaubiamasis balionėlis užpildytas halogeniniais garais, tokiais kaip bromas ar jodas. Ši technologija leidžia padidinti kaitrinės lempos veikimo trukmę bei padidinti volframinio siūlelio temperatūrą, nes tokioje aplinkoje volframo jonai sunkiau sublimuoja. Dėl aukštesnės siūlelio temperatūros, halogeninės lempos spinduliuoja efektyviau UV spektro dalyje negu įprastinės kaitrinės lempos, todėl tokios lempos papildomai ekranuojamos stiklo gaubtais (Žukauskas 2008).

Tokios lempos naudojamos siekiant geresnio šviesinio našumo bei aukštesnės spalvinės temperatūros.

1.4.1.2. Fluorescencinės lempos

Fluorescencinėse lempose šviesos sukūrimas pagrįstas fotoluminescencijos reiškiny. (Žukauskas 2008) Tokiose lempose generuojama UV spinduliuotė verčiama į regimąją spektro dalį, taigi tokiose lempose vyksta žemo slėgio (0,5–0,8 Pa) išlydis gyvsidabrio garuose, o tokia spinduliuotė sugerama fluorescuojančia medžiaga padengtame balionėlyje. Energiją sugėrusi fluorescuojančioji medžiaga (fosforas) spinduliuoja regimojo spektro ruožuose, šiuo atveju

fosforas vadinamas liuminoforu (Tamulaitis 2008). Tokios lempos naudojamos dėl jų ekonomiškumo ir ilgaamžiškumo.

1.4.1.3. Kontaktinės išlydžio lempos

Fluorescencinėse lempose išlydžio metu išspinduliuoti fotonai sužadina liuminoforus, tačiau naudojamos ir tokio išlydžio lempos, kuriuose naudojama tiesiogiai atsirandanti spinduliuotė. Kontaktinės išlydžio lempos skirstomos į žemo ir aukšto slėgio lempas. Daugelio metalų garai yra chemiškai aktyvūs ir reaguoja su lempų konstrukcinėmis dalimis. Tik pastaruoju metu pavyko sukurti išlydžio lempas, naudojant kitus metalus balionėliuose, užpildant tų metalų halidų garais (Tamulaitis 2008).

1.4.1.4. Metalų halogenidų lempos

Metalų halogenidų lempose spinduliuotė atsiranda dėl elektronų šuolių ne tik gyvsidabrio, bet ir kitų metalų atomuose bei jonuose. Šios lempos užpildomos metalų halogenidais siekiant padidinti metalų jonų koncentraciją išlydžio srityje bei sumažinti metalų jonų koncentraciją ant lempos balionėlio, tokiu būdu išvengiant lempos dalių korozijos.

Tokių lempų šviesinis našumas 70–110 lm/W, kai tuo tarpu liuminiscencinių lempų šviesinis našumas siekia apie 85 lm/W. Šios lempos naudojamos tik nuolatiniai šviesai gauti, nes lempą išjungus, dėl didelio lemposje esančio garų slėgio sunku ją pakartotinai įjungti, todėl tenka laukti 5–10 min., kol ji atvės ir garų slėgis sumažės (Tamulaitis 2008).

1.4.2. Saulės šviesos simuliatoriai

Saulės šviesos simuliatoriai – šviesos šaltiniai skleidžiantys šviesą artimą saulės šviesai, t.y. jų spinduliavimo spektras yra artimas saulės spektrui. (Novičkovas 2014). Naudojant saulės šviesos simuliatorių, laboratorinėmis sąlygomis galima tirti įvairias medžiagas pavyzdžiui plastikus. Dažniausiai tiriamos SE charakteristikos, kokybė ir veikimo efektyvumas. Saulės šviesos simuliatoriuose naudojamos įvairių dujų išlydžio lempos, halogenų kaitrinės lempos (Technical Note...2017).

Didžiausia saulės simuliatorių su tradicinėmis lempomis problema – šių lempų mažas energinis efektyvumas, eksploatacinių savybių kitimas su laiku, kompleksiška kontrolė ir tinkamos temperatūros palaikymas. Be to, tokios lempos turi pakankamai mažą ~1000 val. tarnavimo laiką (Novičkovas 2014).

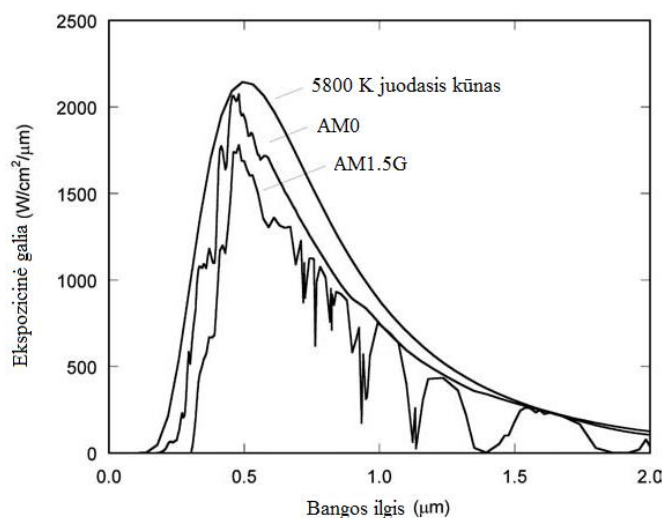
1.4.2.1. Saulės šviesos simulatoriaus parinkimas

Šiuo metu rinkoje yra gausu įmonių, kurios siūlo įsigyti saulės spektro simulatorius, tačiau dažnai tai būna tik ksenoninis šviesos šaltinis (angl. *xenon light source*). (Technical Papers...2015). Pagal IEC 904-9 standartą, saulės spektro simulatorius, tai visa įranga, reikalinga saulės apšvietai bei spektrui atkartoti, kuri turi atitikti C (žemiausia leidžiama klasė) arba aukštesnės klasės standartinę įrangą. (Commission Electrotechnique...1995). Saulės simulatorių klasės skirstomos į tris saulės šviesos simulatorių tipus: *Class A*, *Class B* ir *Class C* pagal leidžiamus nuokrypius nuo trijų pagrindinių apibrėžtų charakteristikų: saulės šviesos spektro atitikimo, šviesos spindulio nevienodumo (angl. *non-uniformity of the light beam*) ir šviesos spindulio stabilumo laike.

1.4.2.2. Saulės šviesos simulatorių spektrinis atitikimas

Saulės apšvieta, pasiekianti žemės paviršių, priklauso nuo kelių faktorių, tokių kaip: aukštis, ilguma, platuma, paros metas ar vyraujančios klimatinės sąlygos. Šie faktoriai apibrėžia kokį atstumą šviesos spindulys turi praeiti pro atmosferą, kad šis pasiektų žemės paviršių – toks, dydis vadinamas *atmosferos oro mase* (angl. *air mass*) (toliau – *AM*). Dėl industrinio SE testavimo *AM* buvo standartizuota ir suskirstyta į: *AM0* (saulės šviesos spinduliuotė atvirame kosmose), *AM1D (Direct)*, *AM1G (Global)*, *AM1.5D*, *AM1.5G*, *AM2D* ir *AM2G*. *AM1.5G*, *AM*, atsižvelgiant į kokį atstumą spinduliuotei reikia prasiskverbti žemės atmosfera. *AM1.5G* laikomas standartiniu saulės spektru, t.y. spinduliuotei tenka pereiti oru kelią ~1,5 atmosferos storio (Krotkus 2008). Šis *AM1.5G* apibrėžtas tarptautiniais standartais IEC 60904 ir ASTM G-173 (žr. 1.7 pav.)

Šviesos simulatoriui *Commission Electrotechnique Internationale* apibrėžtas standartinis šviesos intensyvumas esant su *AM1.5G* filtru – lygus 1000 W/m^2 . Toks šviesos intensyvumas vadinamas „viena saulė“ (angl. „*one sun*“) (Granek...2004).



1.7 pav. AM0, AM1.5G ir 5800 K juodojo kūno spinduliavimo spektro palyginimas (Würfel 2005)

Class A ($\pm 25\%$) saulės spektro simulatorius turi artimiausią šviesos spektrą lyginant su saulės spektru, toliau seka *Class B* ($\pm 40\%$) ir *Class C* ($+100/-60\%$). Jeigu pardavėjo pateiktoje šviesos simulatoriaus specifikacijoje nenurodyta simulatoriaus tipas, tai toks įrenginys turi būti laikomas paprasčiausiu ksenoniniu šviesos šaltiniu. Bendru atveju, kuo šviesos simulatoriaus skleidžiamas spektras artimesnis saulės spektrui, tuo brangesnis įrenginys (Technical Papers...2015).

1.4.2.3. Saulės šviesos simulatorių tipai

Saulės simulatoriuose dažnai naudojami kelių rūšių šviesos šaltiniai. Dažniausiai naudojamos ksenono dujų išlydžio lempos, dėl jų skleidžiamos šviesos panašumo natūraliajam saulės spektrui, ksenono dujų išlydžio lempų šviesą – paprasta filtruoti, siekiant gauti *Class A* saulės simulatorių pagal IEC 904-9 standartą. Naudojant halogeninius šviesos šaltinius ir šviestukinių diodų sistemas šiuo metu pasiekiamas tik *Class B* saulės simulatorius. (Bliss 2009)

Saulės šviesos simulatoriai skirstomi į du tipus. Pirmasis – nuolatinės šviesos saulės spektro simulatorius (angl. *Steady State system*) (toliau – SS), antrasis – impulsinės šviesos saulės spektro simulatorius (angl. *Pulsed Simulator system*) (toliau – PS).

Patento US 13/390101 paraiškoje rašoma, kad testuojant SE charakteristikas, dalis į juos krentančios šviesos atsispindi į naudojamo saulės simulatoriaus paviršių, nuo saulės simulatoriaus paviršiaus vyksta antrinis atspindys atgal į testuojamą SE. Dėl to SE realusis apšvietimas yra didesnis, nei apšvietimas natūralioje aplinkoje, tai lemia sunkumus nustatant SE realųjį našumą. (Novičkovas 2014)

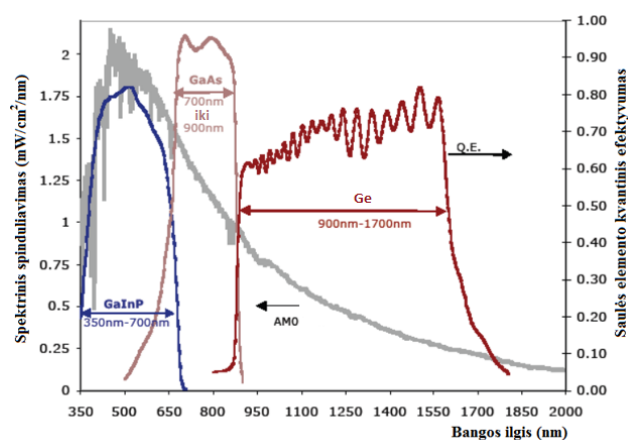
PS lempos, veikimo trukmė 40000–1000000 impulsų kai tuo tarpu SS lempos veikimo trukmė apie 1000 val. nepertraukiamo darbo (Granek 2004). Kadangi SE charakteristikų

nustatymas *PS* sistema trunka mažiau nei 1 s., tai tokia sistema galima atlikti tyrimą didesniame kiekiui SE kol prireiks keisti naudojamos įrangos šviesos šaltinius, lyginant su *SS* sistema.

Dauguma *PS* sistemų impulso trukmė 2–10 ms., todėl nustatant SE *I-V* charakteristiką, tyrimuose naudojama įranga turi spėti užfiksuoti gautus rezultatus, o toks SE sureaguoti į impulso šviesą. *PS* sistemos trūkumas – mažiau duomenų taškų *I-V* charakteristikos kreivėje (About...2016).

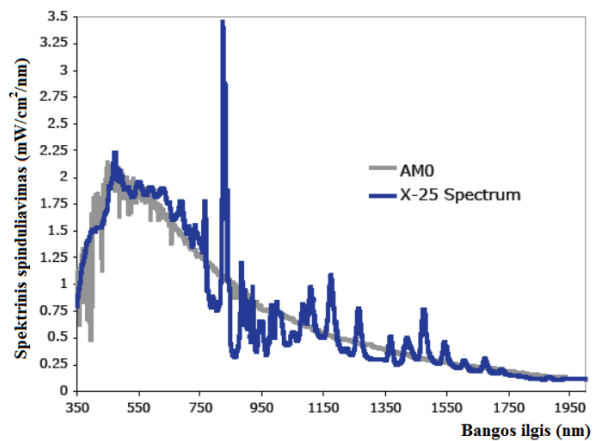
Trigubas AM0 saulės spektro simulatorius

Tendiniams SE tirti reikia tikslesnių saulės simulatorių lyginant su paprastaisiais SE, dėl AM0 standarto ir spektrinio atitikimo. GaInP/GaAs/Ge – SE, simulatoriaus spektras turi atitikti visas tris SE spektrines juostas (žr. 1.8 pav.)



1.8 pav. GaInP/GaAs/Ge saulės elemento kvantinio efektyvumo palyginimas su AM0 spektru (Jenkins 2005)

„Spectrolab“ X-25 komercinis, vienos ksenono dujų išlydžio lempos saulės spektro simulatorius, naudojamas *NASA Glenn Research Center*, idealiomis sąlygomis gali atitikti tik 2 sandūrų spektrą GaInP/GaAs/Ge SE su 1,3 % paklaida, tuo tarpu neatitikimas su apatiniu Ge SE spektru +8,8 %. „Spectrolab“ X-25 gerai atkuria AM 0 spektrą 350–750 nm ribose, tačiau bangos ilgiui esant didesniame nei 750 nm, jo spektrinis atitikimas staiga prastėja (žr. 1.9 pav.)

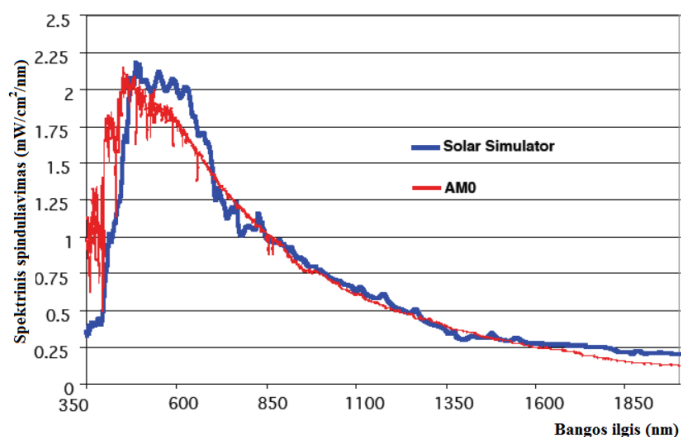


1.9 pav. AM 0 ir „Spectrolab“ X-25 spektro palyginimas (Jenkins 2005)

Trigubą AM 0 saulės šviesos simulatorių sudaro 40 volframinų lempų išdėstytų arti viena kitos, taip siekiant geresnio apšvietos vienodumo tiriamajam paviršiui. Šių lempų darbo režimas – 12 V įtampa, 75 W galia, veikimo trukmė apie 4000 val.

Įkaitinto volframinio siūlo spektras infraraudonojoje spektro dalyje neatitinka AM0 spektro, todėl šio simulatoriaus spektro atitikimui su AM0 naudojamas specialus filtras, kuris išdėstomas tarp volframinų lempų ir dichroinio veidrodžio.

Papildomai lempoms naudoti filtrai, 700–900 nm bangoms generuoti. Šio simulatoriaus skleidžiamas spektras pateiktas 1.10 pav.



1.10 pav. Saulės simulatoriaus skleidžiamas spektras kai visos trys GaInP/GaAs/Ge tendeminio saulės elemento komponentės yra tinkamai apšviestos palyginimas su AM0 (Jenkins 2005)

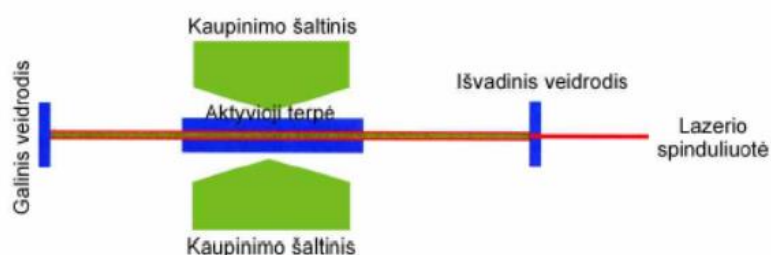
1.4.3. Lazeriai

Lazeris (angl. *LASER* – *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) – koherentinių EM bangų generavimo įrenginys, pagrįstas priverstinio spinduliavimo principu (Laser...2018).

Lazerių veikimo principas. Šio įrenginio veikimas dažniausiai pagrįstas EM spinduliuotės sąveika su medžiaga (aktyviąja terpe). Aktyviąja terpe gali būti visų agregatinių būsenų kūnai. Aktyviąją terpę paveikus išoriniu kaupimo šaltiniu, jos molekulių elektronai perkeliami į aukštesnius energetinius lygmenis, todėl pradeda generuoti ir stiprinti šviesą.

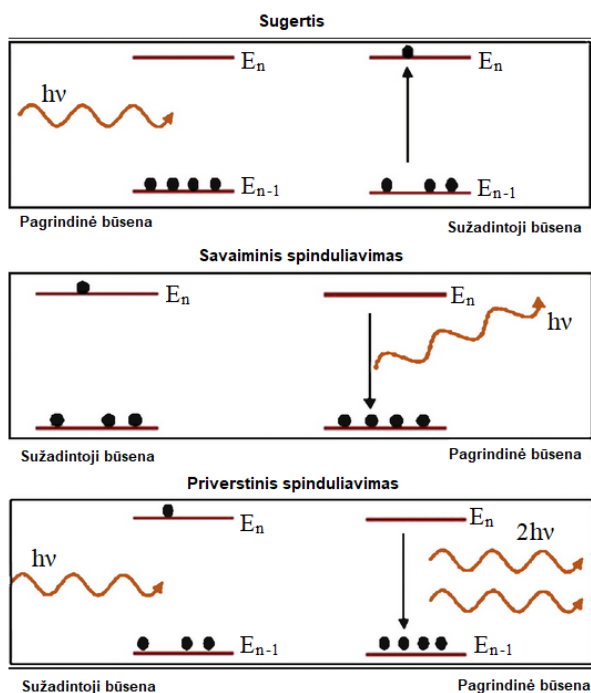
Lazerio komponentės: kaupimo šaltinis, rezonatorius su veidrodžiais, aktyvioji terpė (žr. 1.11 pav.).

Rezonatorių sudaro du veidrodžiai (pirmasis arba galinis veidrodis – visiškai atspindi šviesą, antrasis – dalinai pralaidus šviesai. Aktyvioji terpė gali būti sudaryta iš: kristalo (YAG), puslaidininkinės medžiagos (GaAs), dažiklio arba dujų (CO₂, Ar, Kr).



1.11 pav. Lazerio principinė schema (Fluorescencinė...2018)

Aktyvioji terpė – sudaryta iš atomų ar molekulių, kuriuos sužadinant sugeneruojami fotonai. Kai ši terpė sužadinama šviesa, jų nesužadinto lygmens E_{n-1} elektronai pereina į aukštesnius energijos lygmenis E_n (žr. 1.12 pav.).



1.12 pav. Spinduliavimo būdai (Bach 2012)

Rezonatoriuje esantys aktyviosios terpės atomai sužadunami išoriniu kaupimo šaltiniu. Sužadinti atomai grįždami į E_{n-1} lygmenį išspinduliuoja šviesos kvantus visomis kryptimis. Jeigu išorinio kaupimo šaltinio energija yra pakankama, tai aktyvioje terpėje prasideda priverstinis spinduliavimas, kuris rezonatoriuje yra sustiprinamas ir erdvėje atsiranda pagrindinė tokio spinduliavimo kryptis sutapdinta su pagrindine rezonatoriaus optine ašimi. Daug kartų įvykęs šviesos kvantų atspindys nuo rezonatoriaus veidrodžių, sukelia kryptingą, tokių kvantų pluoštą, toks pluoštas praleistas pro dalinai atspindintį rezonatoriaus veidrodį yra lazerinė spinduliuotė. Nuo lazerio aktyviosios terpės priklauso spinduliuojamų šviesos bangų dažnis bei galia. Pagal veikimo būdą lazeriai skirstomi į impulsinius ir nuolatinės veiklos lazerius.

Lyginant su natūraliąja šviesa, lazerio skleidžiama šviesa pasižymi ypatingomis savybėmis, tokia šviesa yra: monochromatinė, koherentiška, kolimuota, vienodai poliarizuota (Williams 2008). Kai kurių lazerių panaudojimo sritys pateiktos 1.3 lentelėje.

1.3 lentelė. Įvairių tipų lazerių parametrai ir jų panaudojimo sritys (Williams 2008).

Aktyvioji terpė	Aktyviosios terpės tipas	„Pompos“ šaltinis	Tipinio veikimo bangos ilgis	Panaudojimo sritis
CO₂	Dujinė	Elektros iškrova	Tolimojo IR 10600 nm	Medžiagų apdorojimas (pjaustymas, suvirinimas)
Ar	Dujinė	Elektros iškrova	Mėlyna-žalia 500 nm	Tinklainės terapija
He-Ne	Dujinė	Elektros iškrova	Raudona 630 nm	Holografija, barkodų skenavimas
Eksimeris (Ar:F)	Dujinė	Elektros iškrova	UV 193 nm	Ragenos korekcijos
Dažai	Skystoji	Kitas lazeris, blykstinė lempa	Geltona 390-640 nm	Apgamų šalinimas
Rubinas	Kietoji	Blykstinė lempa	Raudona 694 nm	Holografija, tatuiruočių šalinimas
Nd:YAG	Kietoji	Blykstinė lempa, lazerio diodas	Artimoji IR 1064 nm	Chirurgija
AlGaAs	Kietoji (puslaidininkis)	Elektros srovė	Raudona-IR 630-900 nm	Barkodų skenavimas, optiniai diskai, lazerinės rodyklės, informacijos perdavimas

Šiomis dienomis lazeriai naudojami labai plačiai: medicinoje, pramonėje, chemijoje, kompiuterinėse sistemose ir t.t.. Dėl lazerio šviesos ypatingų savybių ir parametrų stabilumo, juos naudosime baigiamojo darbo eksperimentiniams tyrimams atlikti.

1.5. Literatūros apžvalgos išvados

1. Atlikus šiam baigiamajam magistriniam darbui aktualios mokslinės literatūros analizę nustatyta, kad investicijos į PV energetiką kasmet didėja, o lyginant 2015 m. ir 2017 m. „Global Energy Statistical Yearbook“ pateiktas prognozes pastebėta, kad PV energetikos

vystymosi tendencijos viršijo lūkesčius.

2. Blykstiniai ir nuolatinės šviesos šaltiniai – neištirti dirbtiniai šviesos šaltiniai, tinkami SE parametrų tirti laboratorinėmis sąlygomis. Todėl reikia metodikų, taikant dirbtinius šviesos šaltinius, SE parametrų tirti.

3. Prieštaringų rezultatų rasta mokslinėje literatūroje apie skirtingus rinkoje naudojamus SE, todėl išnagrinėjus SE privalumus ir trūkumus, tyrimams su įvairiais SE reikia pasirinkti labiausiai tinkantį modelį, kuris aprašomas 2 skyriuje.

4. Singletinių būsenų skaidymas – daug žadanti SE technologija, leidžianti padidinti PV prietaisų efektyvumą, tuo pačiu leidžianti sumažinti lyginamąją elektros kainą.

2. EKSPERIMENTINIŲ TYRIMŲ METODIKA IR PRIETAISAI

Šiame skyriuje pateikiama SE parametrų, naudojant dirbtinius saulės šviesos šaltinius: saulės spektro simulatorių bei lazerį nustatymo metodika. Taip pat pateikiama pasirinktų tyrimui dirbtinių šviesos šaltinių poveikio skirtingiems SE nustatymo metodika ir įranga. Moksliniai SE charakteristikų, naudojant dirbtinius šviesos šaltinius, tyrimai atlikti: Vilniuje Perspektyviųjų technologijų taikomųjų tyrimų institute ir Berlyne Helmholtz'o centre (vok. *Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie*).

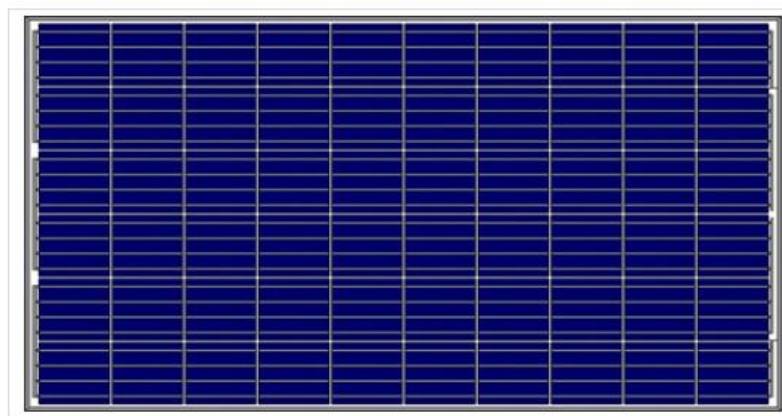
SE parametrų, taikant saulės spektro simulatorių, nustatymo metodika įranga.

Norint tarpusavyje lyginti SE parametrus, tyrimai lauko sąlygomis dėl nuolat kintančių meteorologinių ir klimatinių sąlygų negali būti atliekami,.

Eksperimentiniai tyrimai vykdyti Vilniuje Perspektyviųjų technologijų taikomųjų tyrimų institute. SE parametrų nustatymo eksperimentinis tyrimas buvo atliekamas laboratorinėmis sąlygomis. Laboratorijoje palaikoma pastovi temperatūra – 22 °C, santykinė oro drėgmė – 52 %, o oro judėjimo greitis – 0,15–0,25 m/s. Prieš pradėdant tyrimą SE turi būti tinkamai paruošti, t.y. jų paviršius nuvalomas butanoliu pašalinant paviršiaus nešvarumus, kurie gali šešėliuoti silicio SE. Paruoštas SE vertikaliai tvirtinamas saulės spektro simulatoriuje bei statmenai ksenono lempos skleidžiamo impulso kryptimi. Įtvirtintas SE su saulės spektro simulatoriumi sujungiamas MC4 jungtimis. Saulės spektro simulatoriaus ksenono lempa paduodamas vienas impulsas į SE, kuris registruojamas žemiau aprašyta programine įranga.

Kadangi šiame baigiamajame magistro darbe buvo siekiama įvertinti šviesos šaltinio įtaką įvairiems SE, todėl tyrimai atlikti pagal STC standartą (angl. *STC – Standard Testing Conditions*), naudojant impulsinį saulės spektro simulatorių Pasan A+.

Tyrimams parinktas polikristalinis Amerisolar AS-6P30-250W (toliau – Amerisolar) SE (žr. 2.1. pav.), kurio plotas 1,6 m², svoris 18,5 kg, o generuojama galia 250 W.



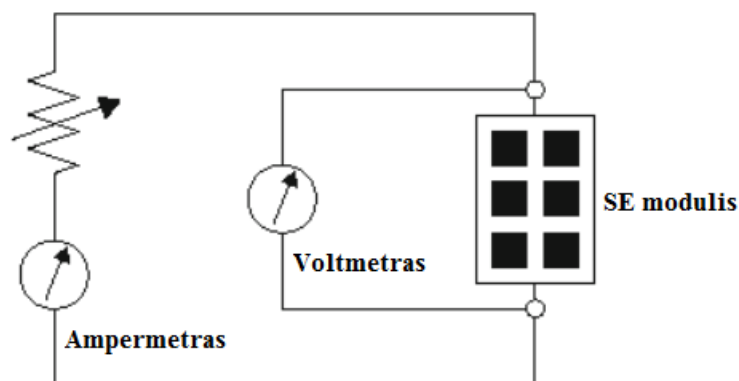
2.1 pav. Eksperimentui naudotas SE Amerisolar (Amerisolar...2013)

Šis SE pasirinktas kaip tinkantis eksploatuoti Lietuvoje vyraujančiomis klimato sąlygomis SE. SE Amerisolar techniniai parametrai pateikti 2.1 lentelėje.

2.1 lentelė. Amerisolar SE techniniai parametrai (Amerisolar...2013)

Parametras	Reikšmė
Nominali galia, W	250,00
Atviros grandinės įtampa, V_{oc} , V	38,00
Maksimali įtampa, V_m , V	30,30
Trumpo jungimo srovė I_{sc} , A	8,75
Maksimalios galios srovė, I_m , A	8,26
SE efektyvumas, %	15,73
Celių tipas, mm	156 x 156
Svoris, kg	18,50
Išmatavimai ($L \times P \times A$), mm	1640 x 992 x 40
Maksimali sistemos įtampa, V	DC 1000
Darbinė temperatūra, $^{\circ}C$	-40 ~ +85

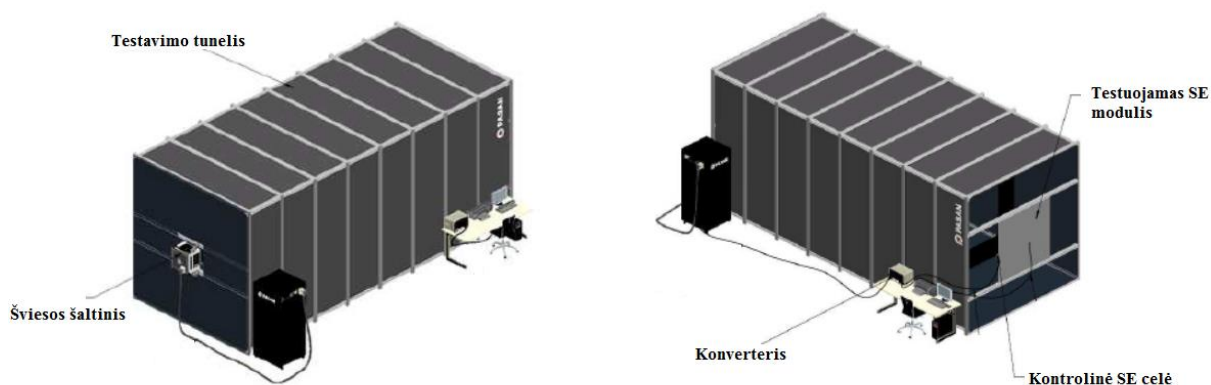
Jungiant SE į elektrinį bloką ne Kelvino metodu, suprastėja užpildymo faktorius (angl. *Fill Factor* – FF), todėl tiriamasis SE sujungtas keturių laidų Kelvino (angl. *four-wire Kelvin*) jungimo metodu (žr. 2.2 pav.).



2.2 pav. Elektrinio bloko principinė schema (Markvart 2013)

Toks testuojamo SE pajungimas leidžia registruoti įtampą elektriniame bloke, išvengiant srovės kritimo sistemoje. Testuojamą SE apšvietus, matuojama šio SE voltamperinė charakteristika. Visas procesas kontroliuojamas kompiuteriu.

Eksperimento metu registruotos parinkto SE voltamperinės charakteristikos.



2.3 pav. Saulės spektro simulatorius PASAN A+ (Bordogna 2013)

Kaip dirbtinis šviesos šaltinis naudotas impulsinis saulės spektro simulatorius Pasan A+, kurio schema pateikta 2.3 paveiksle, o techninės charakteristikos - 2.2 lentelėje.

2.2 lentelė. PASAN A+ techninės charakteristikos (Bordogna 2013)

Klasifikacija	Visų intervalų spektrinis atitikimas	Apšvietos netolygumas	Laikinas nestabilumas	
			Trumpalaikis apšvietos nestabilumas (STI)	Ilgalaikis apšvietos nestabilumas (LTI)
A	0,75-1,25	2,0 %	0,5 %	2,0 %
B	0,6-1,4	5,0 %	2,0 %	5,0 %
C	0,4-2,0	10,0 %	10,0 %	10,0 %
Pasan A+	0,875-1,125	1,0 %	0,0 %	1,0 %

Pasirinktas Pasan A+ simulatorius atitinka IEC 60904-9 standartą. Pagal ASTM E 927-05 standartą: šviesos sklaidimo kampas yra $< 15^\circ$; Pagal IEC 60904-1 standartą: srovės ir įtampos matavimų tikslumas turi būti $< 0.2 \%$

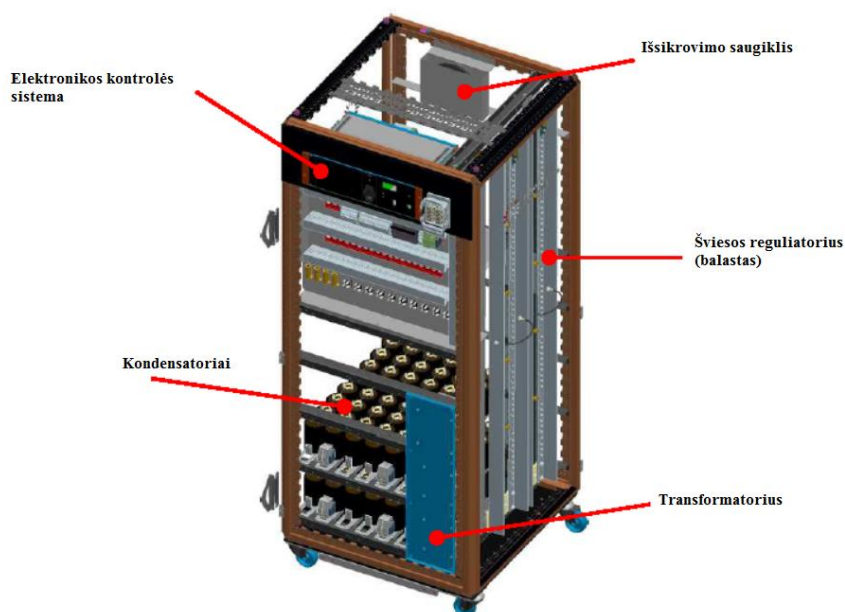
PASAN A+ saulės spektro simulatoriaus trumpalaikis apšvietos nestabilumas – *STI* apskaičiuojamas pagal formulę:

$$STI = \left(\frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} \right) \cdot 100 \% \quad (2.2)$$

čia: I_{max} – maksimali apšvieta (W/m^2); I_{min} – minimali apšvieta (W/m^2).

Šis saulės spektro simulatorius generuoja $100\text{--}1200 \text{ W/m}^2$ apšvietą. Saulės spektro simulatoriumi apšvietus SE, šis pradeda generuoti elektros srovę, todėl mes galime registruoti tiriamojo SE voltamperinę charakteristiką. Matavimai atlikti keičiant saulės simulatoriaus korekcijos režimus.

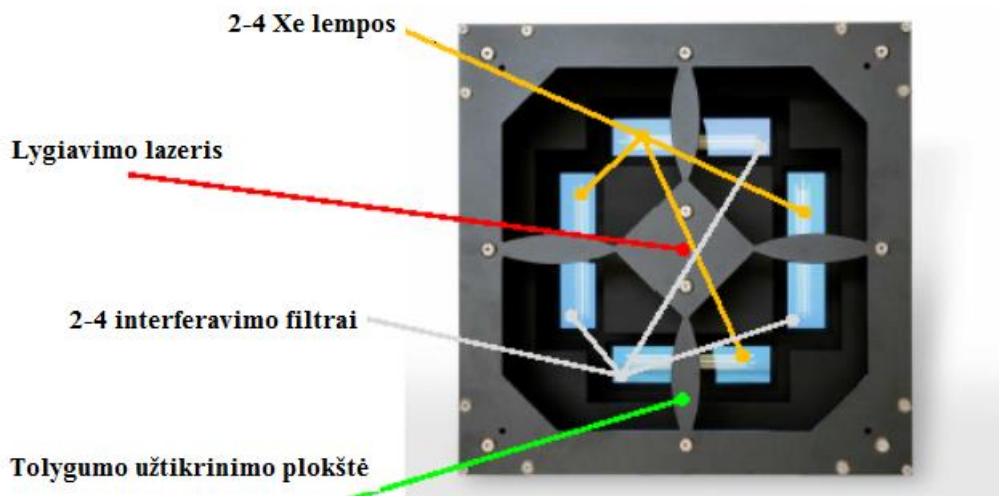
Saulės spektro simulatoriuje naudojamas BV85 šviesos impulso generatorius (žr. 2.4 pav.), kuris reguliuoja reikalingus šviesos impulso parametrus.



2.4 pav. Šviesos impulso generatorius BV85 (Bordogna 2013)

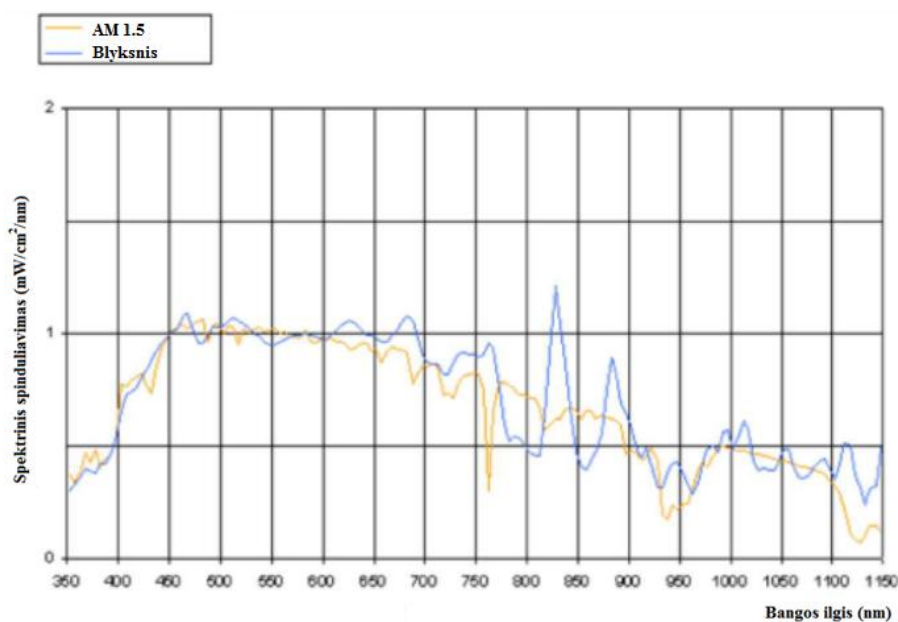
Jame esanti elektroninė kondensatoriaus saugos plokštė iškrauna kondensatorių, kai BV85 generatorius išjungiamas. Apšvietos reguliavimo plokštė, esant 10 ms impulsui ir 1 kW/m^2 blyksniui, užtikrina stabilią apšvietą, kurią galima keisti 50 W/m^2 intervalais.

PASAN A+ saulės šviesos simulatoriuje naudojama Xe (ksenono) lempa (žr. 2.5 pav.), kuri generuoja šviesą artimą saulės spektrui.



2.5 pav. Xe lempa

Naudojamos Xe lempos spektrinis atitikimas AM1.5 (oro masės koeficientas – 1.5) standartą pateiktas 2.6 paveiksle.



2.6 pav. Xe lempos skleidžiamas spektras (Bordogna 2013)

PASAN A+ saulės šviesos simulatoriuje naudojama kontrolinė SE celė (žr. 2.7 pav.), kurios paskirtis:

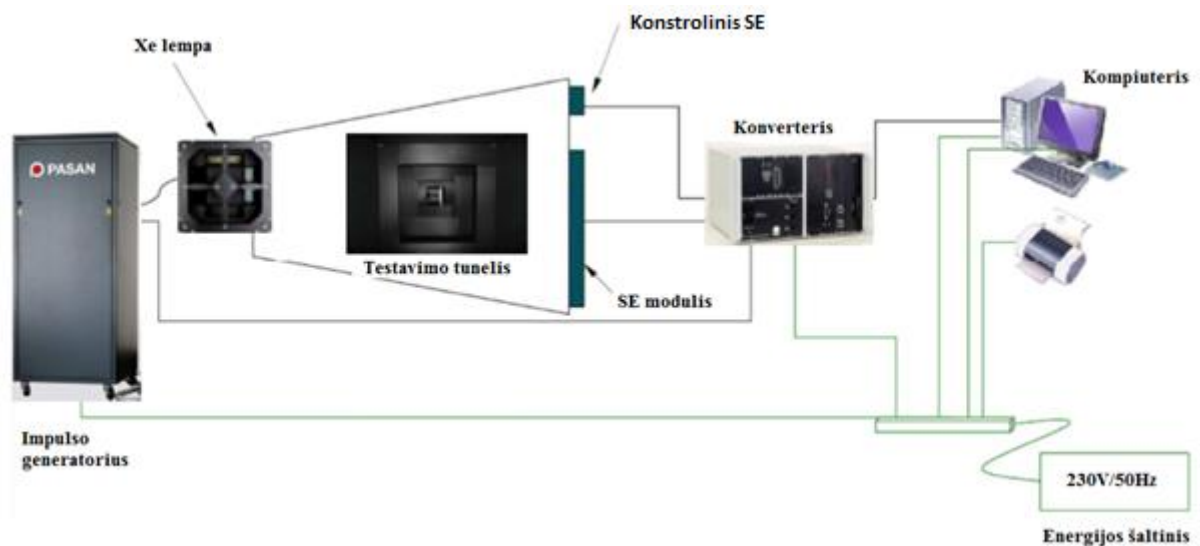
- matuoti Xe lempos skleidžiamą apšvietą;
- reguliuoti Xe lempos skleidžiamos šviesos intensyvumą;
- matuoti SE temperatūrą;

- matuoti interferencinio filtro praleidžiamos šviesos bangos ilgį.



2.7 pav. PASAN A+ saulės šviesos simulatoriaus kontrolinė celė (Bordogna 2013)

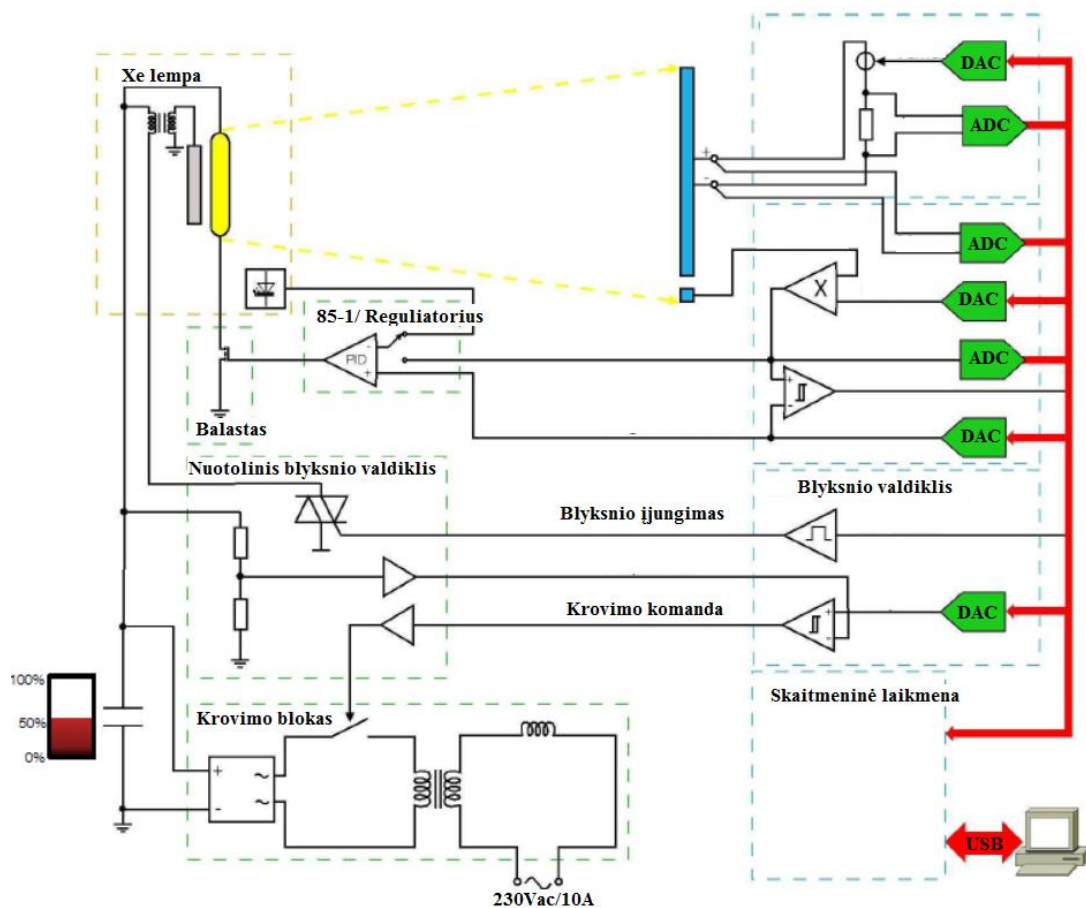
Tyrimui pasirinkto SE voltamperinių charakteristikų matavimui naudoti prietaisai pateikti 2.8 paveiksle.



2.8. pav. Tyrimui naudojamų prietaisų jungimo schema (Bordogna 2013)

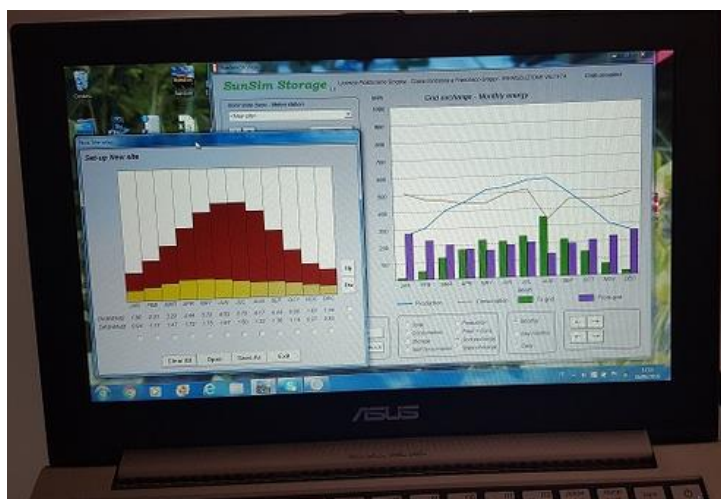
Konverteris šiame saulės spektro simulatoriuje registruojamą signalą konvertuoja į kompiuteriui suprantamus išvesties duomenis.

Naudojamų prietaisų elektrinė jungimo schema pateikta 2.9 paveiksle.



2.9. pav. Naudojamų prietaisų elektrinė jungimo schema (Bordogna 2013)

Eksperimento duomenys buvo automatiškai įrašomi į kompiuterį. Gautiems duomenis apdoroti naudota SunSim 8.0 Software kompiuterinė programinė įranga (žr. 2.10 pav.).



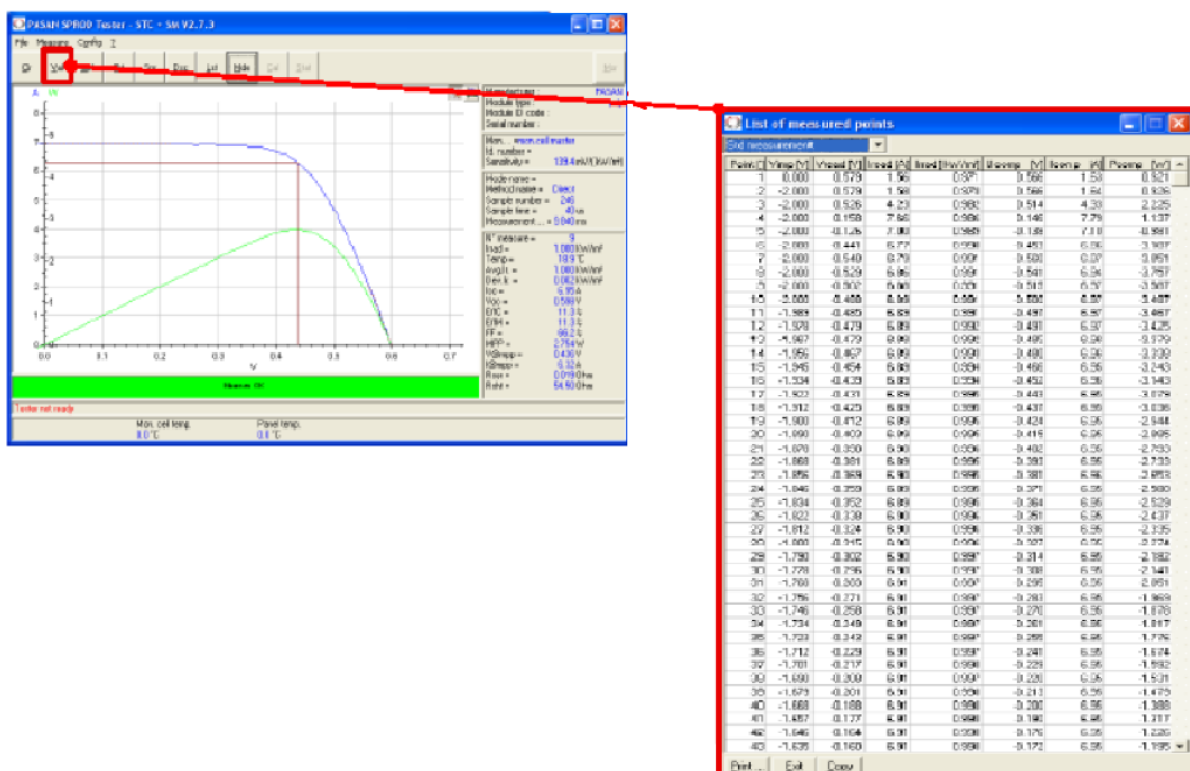
2.10 pav. Tipinė SunSim 8.0 Software darbo aplinka

Sunsim 8.0 Software programinė įranga pasirinkta kaip lengviausiai valdoma SE charakteristikoms vertinti įranga,.

SunSim 8.0 Software programinės įrangos matavimo rezultatai pateikiami pagrindiniuose languose: VAL ir GPH.

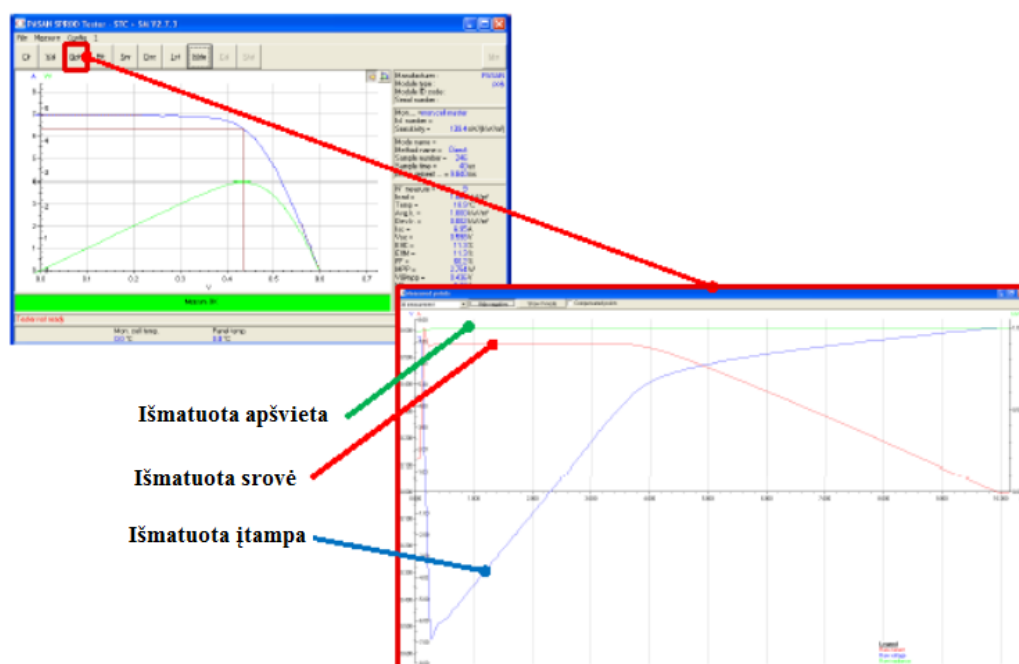
VAL lange pateikiama informacija apie (žr. 2.11 pav.):

- išmatuotą įtampą;
- išmatuotą srovę;
- išmatuotą apšvietą;
- kompensuotą srovę, įtampą ir galią.

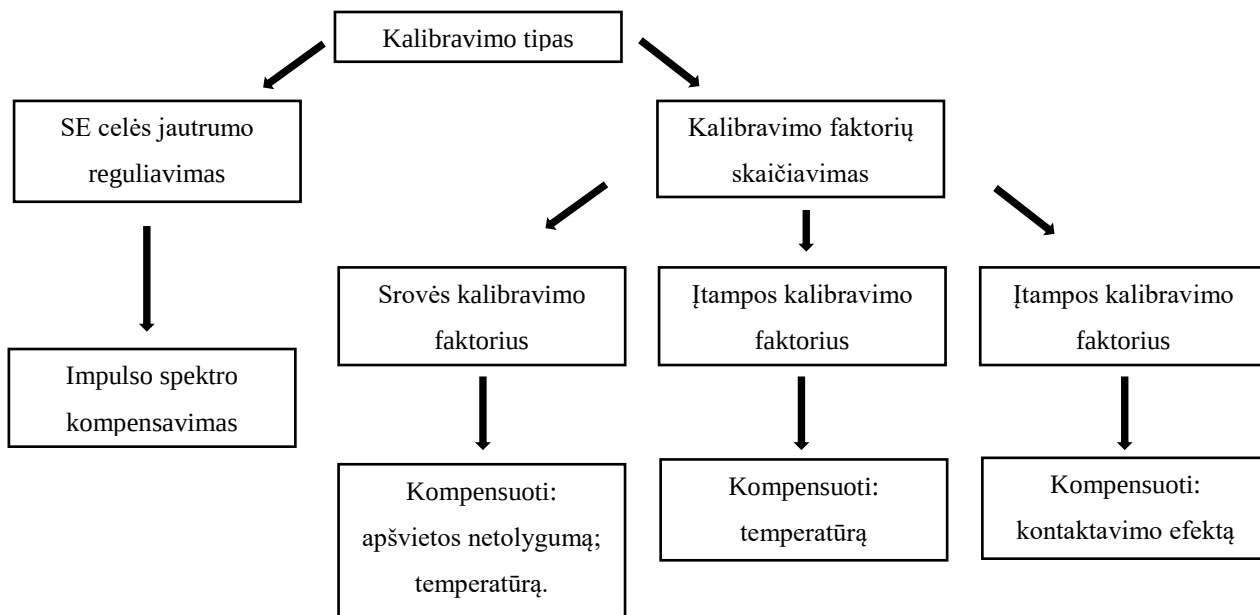


GPH lange grafiškai pateikiami duomenys apie (žr. 2.12 pav.):

- išmatuotą apšvietą;
- išmatuotą srovę;
- išmatuotą įtampą.



Norint gauti tikslius matavimų rezultatus atitinkančius IEC 60904-9 standartą, saulės spektro simulatorius PASAN A+ buvo kalibruojamas. (žr. 2.13 pav.).



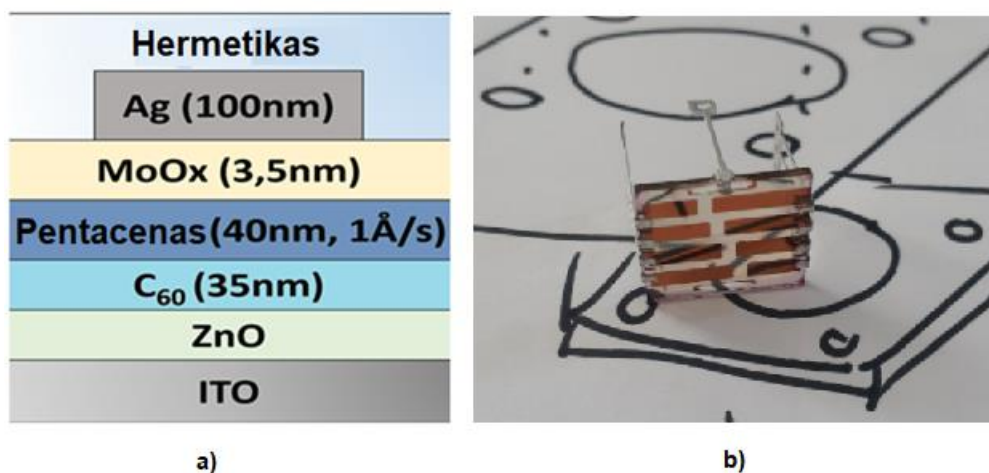
2.13 pav. Sistemos kalibravimo metodai

Sistemą galima kalibruoti tuo pačiu metu ir celės jautrumo reguliavimo metodu, ir kalibravimo faktorių skaičiavimu. Kalibravimo metodo parinkimas priklauso nuo kontrolinės celės ir matuojamo SE rodmenų skirtumo.

Lazerio šviesos poveikio SE parametrų nustatymo metodika ir įranga.

Siekiant įvertinti saulės įtaką SE charakteristikoms, tyrimui pasirinktas dirbtinės kilmės šviesos šaltinis – lazeris ir eksperimentiniai tyrimai vykdyti mokslinėje laboratorijoje. Šiuo tyrimu siekiau nustatyti lazerio šviesos įtaką naujos kartos SF SE bei parinkti optimaliausias sąlygas SF SE generuojamai fotosrovei registruoti.

Tyrimui pasirinktas AMOLF SE (žr. 2.14 pav.), kurio veikimas paremtas SF (Toliau – AMOLF SF) procesais.



2.14. pav. a) AMOLF SE struktūrinė schema; b) AMOLF SE

AMOLF SF SE hibridinis elementas, kuriame ITO (indžio alavo oksidas) ir ZnO sluoksniai pasirinkti, siekiant sumažinti rekombinacinius procesus, taip pat veikia kaip kontaktai. Pentacenas – SF sluosnis bei šviesos absorberis, o C_{60} – absorbcinis sluoksnis – elektronų akceptorius, kuris sugeria visą raudonojo spektro šviesą. MoOx (molibdeno oksidas) – skylėms selektyvus sluoksnis.

Eksperimento metu buvo registruojama pasirinkto SE generuojama fotosrovė. Sukurtas naujas metodas, leidžiantis registruoti fotosrovę atsirandančią dėl šviesos poveikio SE. Matavimai atlikti keičiant Brüker magneto generuojamą magnetinę indukciją.

Tyrimė naudojamas Brüker elektromagnetas, kuris valdomas BRÜKER ESP 300 konsole. Brüker elektromagneto magnetinė indukcija gali būti keičiama 0,01–1,4 T ribose. Kai magneto galios kontrolės sistema (angl. *Power Control System*) išjungžiama, magnetinis laukas stabilizuojasi per 10 s ties 0,5–2,5 mT riba.

Liekamoji magnetinė indukcija matuota Gauss/Teslameter FH51 (žr. 2.15 pav.)

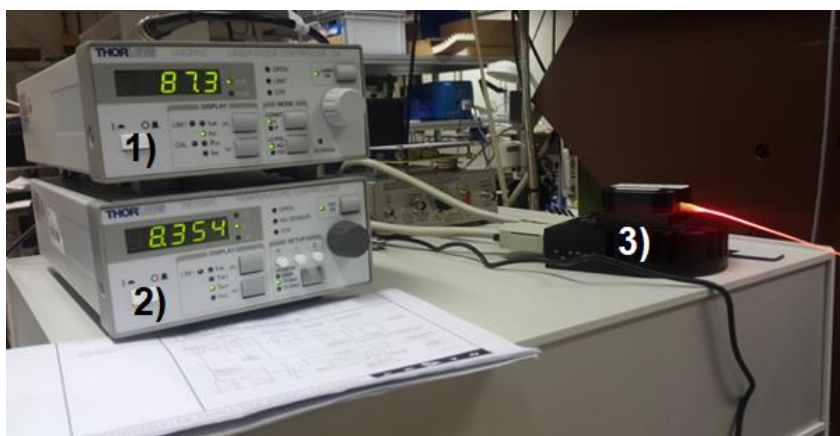


2.15. pav. Magnetinio lauko matavimo įrenginys Gauss/Teslameter F51

SE sužadinimui naudotas ThorLabs LP637-SP70 (žr. 2.16 pav.) lazeris, kuris spinduliuoja raudoną šviesą (637 nm). Lazerio bangos ilgis 632–637 nm, slenkstinė srovė – 70 mA, vardinė srovė – 220 mA, o įtampa – 2,7 V.

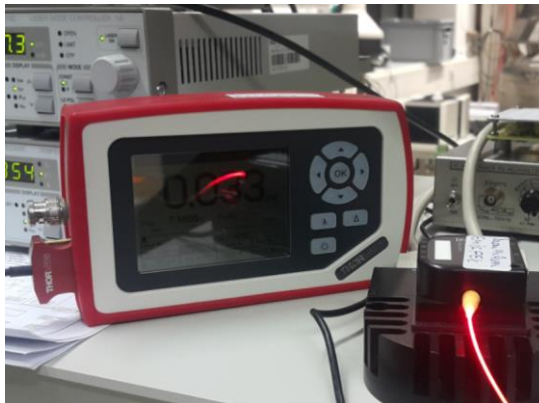
Šviesa iš šio lazerio išvedama šviesolaidžiu SM600 pritvirtintu prie ThorLabs LM1XY/M lęšio. Šiuo lęšiu buvo galima reguliuoti šviesos srauto kryptį.

Lazerio diodo galia reguliuota ThorLabs LDC200C įrenginiu (žr. 2.16 pav.) PSU galios tiekimo sistema (angl. *PSU* – *Power Supply Unit*), o šio lazerio diodo temperatūra reguliuojama ThorLabs TED200C (žr. 2.16 pav.) termoelektriniu temperatūros valdikliu.



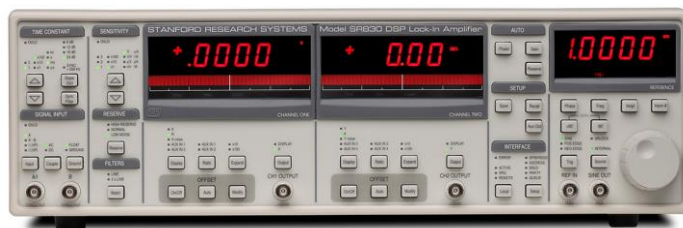
2.16. pav. 1) Lazerio galios valdiklis; 2) lazerio diodo temperatūros reguliavimo įrenginys;
3) ThorLabs lazeris

Šviesos intensyvumas nustatomas ThorLabs PM100D skaitikliu, sujungtu su didelio jautrio fotodiodu ThorLabs S120VC (žr. 2.17 pav.). Šviesos spinduliavimo galia buvo palaikomas ties 60 mW.



2.17. pav. ThorLabs šviesos spinduliavimo galios skaitiklis

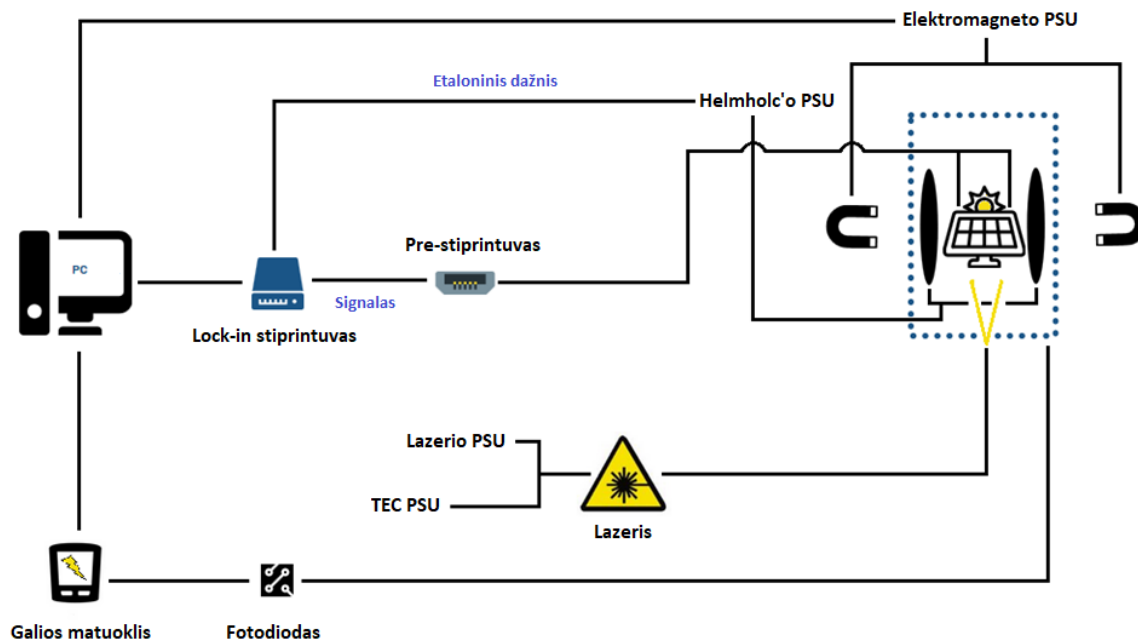
Sinusoidinis referencinis (etaloninis) signalas siunčiamas į lazerio galios šaltinį, naudojant „built-in“ signalo generatorių Stanford Research Systems SR830 DSP (žr. 2.18 pav.) sinchroninį „lock-in“ stiprintuvą, tokia sistema naudojama norint moduluoti šviesą arba magnetinį lauką Helmholtz'o ritesė.



2.18. pav. Signalų generatorius SR830 DSP (Stanford...2011)

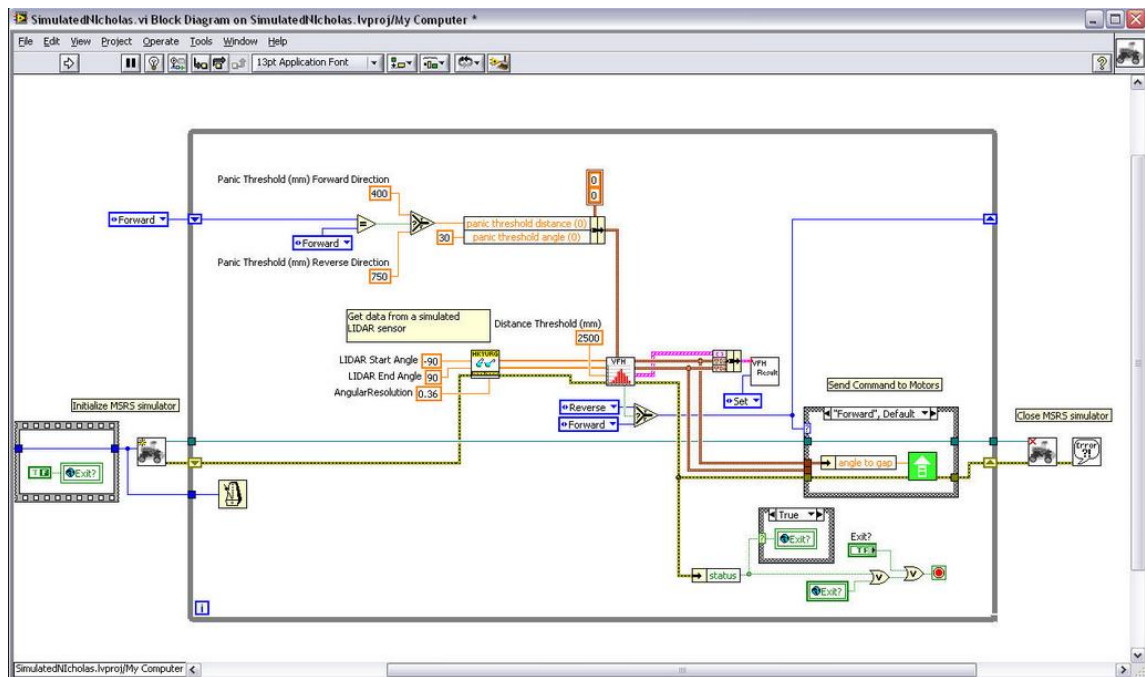
Srovė atsiradusi saulės elemente tiesiogiai siunčiamas į sinchroninio stiprintuvo signalo įvestį.

Eksperimentui naudotų prietaisų schema pateikta 2.19 pav.



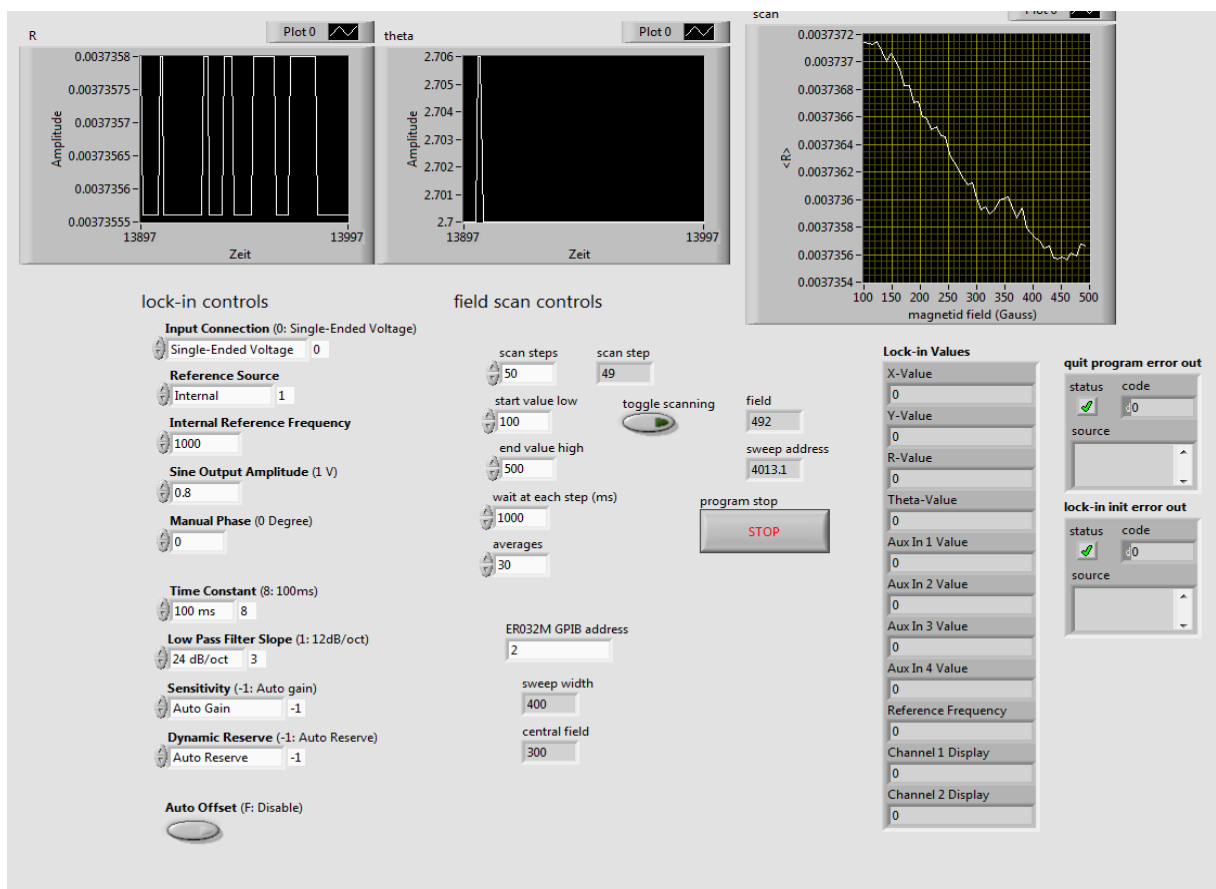
2.19. pav. Lazerio šviesos poveikio SE parametrams tyrimo naudotų prietaisų jungimo principinė schema

Tyrimo duomenų registravimui naudota LabView operacinė sistema, kuri supaprastina naudojamų įrenginių tarpusavio programinį sujungimą, kad būtų galima kaupti duomenis iš visos naudojamos įrangos. LabView sumažina programavimo sudėtingumą, todėl galime sutelkti dėmesį į savo atliekamą tyrimą. LabView leidžia nedelsiant vizualizuoti rezultatus naudojant integruotą, „pull-push“ vartotojo sąsają ir gautus duomenis. Norint konvertuoti gautus duomenis realiais rezultatais, su šia programine įranga galime kurti algoritmus duomenų analizei ir pažangiajai kontrolei, įtraukdami matematikos ir signalų apdorojimo IP arba pakartotinai naudodami savo bibliotekas iš įvairių įrankių. LabView naudojama siekiant užtikrinti suderinamumą su kitomis inžinerinėmis priemonėmis.



2.20. pav. LabView programinės įrangos programavimo darbalaukis

LabView gali sąveikauti su kitomis programomis ir naudoti atviro kodo kalbų bibliotekas. (National 2018)



2.21. pav. LabView programinės įranga registruojamas signalo darbalaukis

Visi LabView programinės įrangos sąsajos langai gali būti nepriklausomai keičiami.

2.1. Eksperimentinių tyrimų metodikos ir prietaisų skyriaus išvados

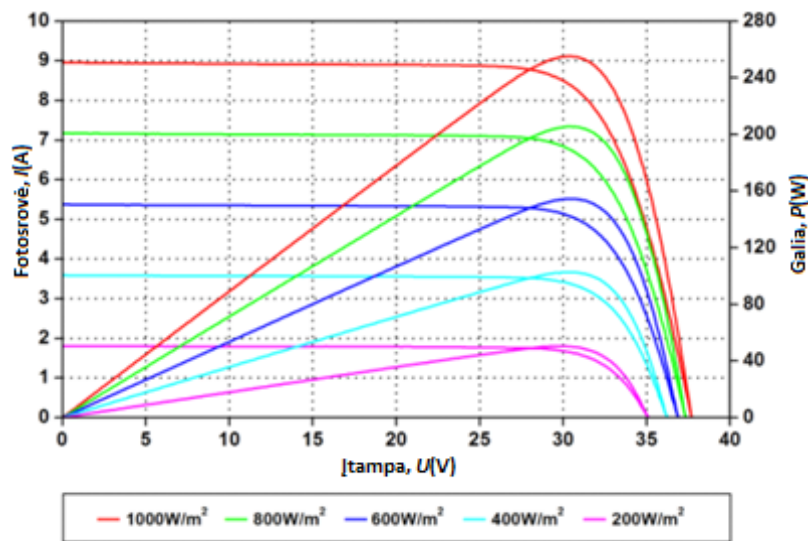
1. Siekiant ištirti SE voltamperines charakteristikas, parametrų kitimo laboratorinėmis sąlygomis ypatumui, analizei pasirinkti skirtingi dirbtiniai šviesos šaltiniai, saulės spektro simulatorius ir lazeris.
2. Baigiamojo darbo metu, buvo atlikti du tyrimai laboratorinėmis sąlygomis:
 - SE parametrų, taikant saulės spektro simulatorių tyrimas – vykdytas Vilniuje Perspektyviųjų technologijų tyrimų institute;
 - lazerio šviesos poveikio SE parametrams tyrimas – vykdytas Berlyne Helmholtz–Zentrum Berlin für Materialien und Energie institute.
3. SE parametrų, naudojant impulsinį saulės spektro simulatorių tyrimus nuspręsta atlikti naudojant Pasan A+ saulės spektro simulatorių dėl jo skleidžiamos šviesos panašumo saulės spektrui. Amerisolar SE naudojami ir Lietuvoje įrengtose saulės jėgainėse, todėl tokie SE pasirinkti ir mūsų atliekamuose tyrimuose, siekiant ištirti jų voltamperines charakteristikas bei nustatyti joms darančius įtakos veiksnius. Standartizavus tyrimą kai parenkamos tos pačios testavimo sąlygos (temperatūra ir apšvieta) gautus rezultatus galima tarpusavyje lyginti.
4. Tyrimui su naujos kartos Amolf SF SE kaip dirbtinis šviesos šaltinis pasirinktas 637 nm bangos ilgio šviesą skleidžiantis lazeris dėl monochromatinės, vienodai poliarizuotos bei koherentiškos šviesos. Tyrimai kartojami kol parenktos optimalios sąlygos fotosrovei registruoti.

3. EKSPERIMENTINIŲ TYRIMŲ REZULTATAI IR ANALIZĖ

3.1. Impulsinio simulatoriaus šviesos įtaka polikristalinio silicio saulės elementams

Atlikus mokslinės literatūros analizę, pastebėta, kad didelę įtaką SE nuostolių susidarymui turi šviesos kvantų energija.

Amerisolar SE voltamperinės charakteristikos pateiktos 3.1 pav.



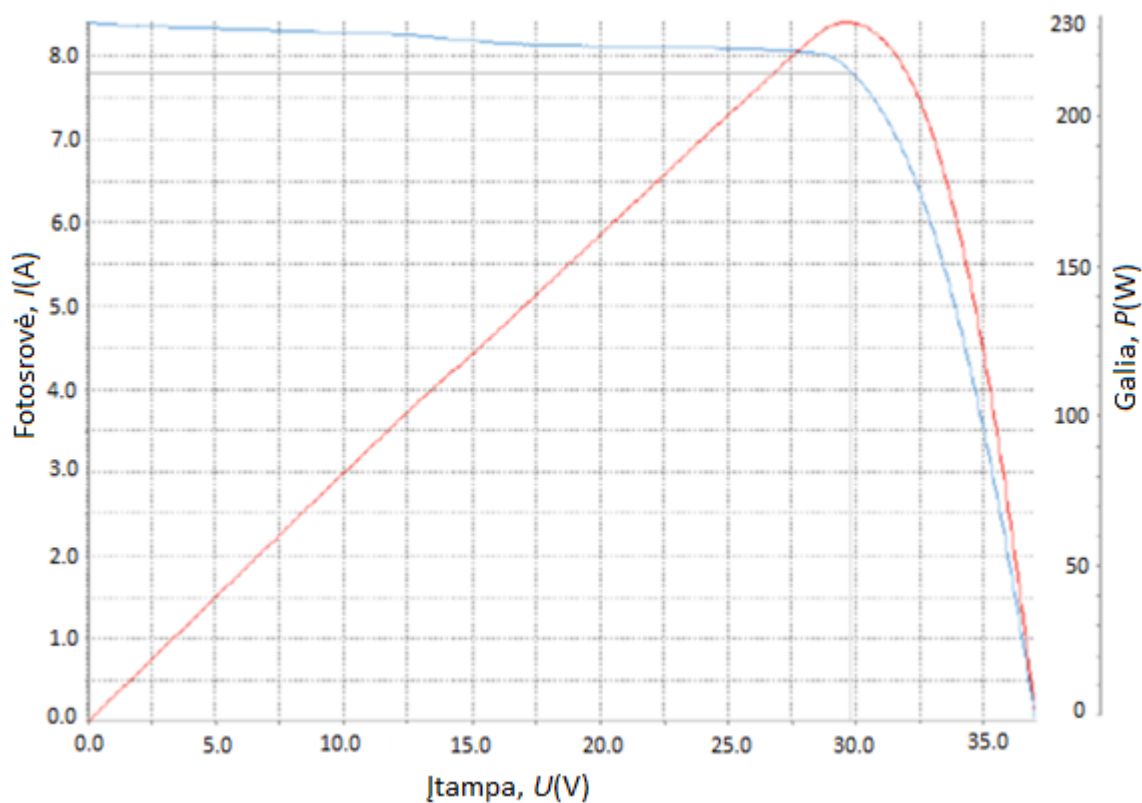
3.1. pav. Idealiuojo Amerisolar SE voltamperinė charakteristika (New...2013)

Iš voltamperinės charakteristikos matome, kad SE generuojama galia esant $200 W/m^2$ energinei apšvietai siekia 42 W, o padidėjus energinei apšvietai iki $1000 W/m^2$ SE generuojama galia didėja iki 250 W. Analogiškų voltamperinių charakteristikų tikimasi ir su saulės spektro simulatoriumi paveiktu tiriamu SE.

Testavimo sąlygų neatitikimus (tokius kaip temperatūros svyravimai, apšvietos nepastovumas) saulės spektro simulatoriaus programinė įranga algoritmais perskaičiuoja į standartines sąlygas:

- temperatūra – $25 ^\circ C$;
- atmosferos oro masė – AM1,5G (žr. 1.4.2.2. poskyrį);
- energinė apšvieta – $1000 W/m^2$.

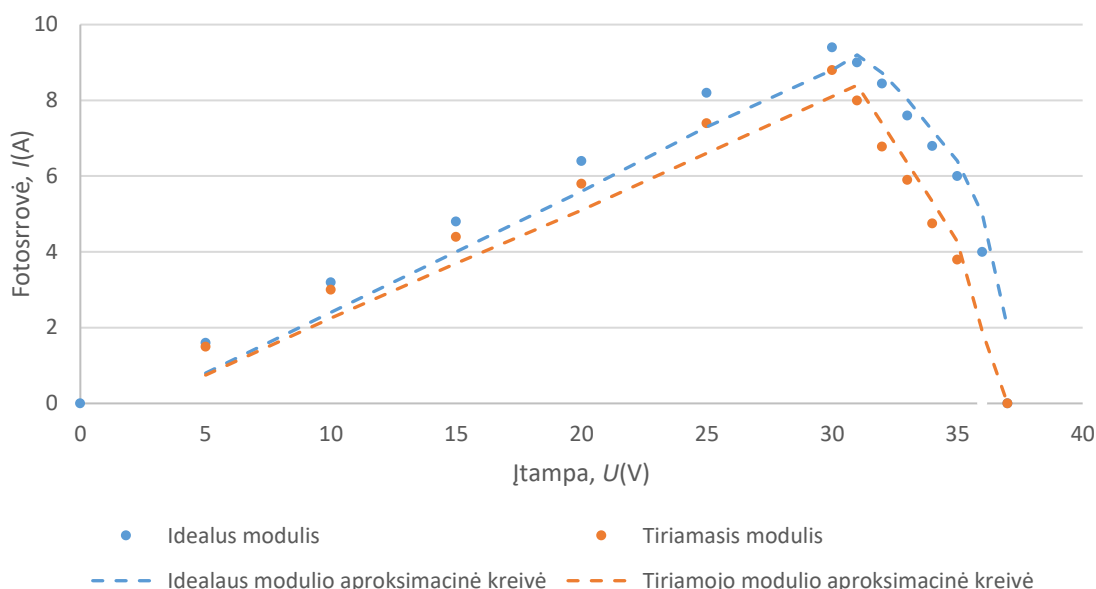
Algoritmais perskaičiuojamos sąlygos leidžia gauti standartizuotus rezultatus, kuriuos galima tarpusavyje lyginti.



3.2. pav. Pasan A+ impulsiniu simulatoriumi apšviesto Amerisolar SE voltamperinė charakteristika (raudonas langelis – galia, mėlynas langelis – srovės stipris $I(A)$)

Atliktas tyrimas rodo, kad tiriamojo SE galia pasiekia savo nominalią vertę kai įtampa – 28 V, įtampai didėjant tiriamojo SE galiai palaipsniui pradeda mažėti, o įtampai pasiekus 37 V SE galia nukrenta iki 0W.

Kadangi Pasan A+ saulės spektro simulatoriaus programinė įranga gautus rezultatus pateikia nekoreguojamu formatu, todėl rezultatams palyginti nuspręsta (3.2 paveiksle) išmatuoti įtampos priklausomybę nuo srovės ir jas palyginti su idealiuoju SE (žr. 3.3 pav.).



3.3 pav. Idealaus ir tiriamojo SE srovė prilausomybės nuo įtampos palyginimas

Palyginus tirto ir idealaus SE srovės nuo įtampos priklausomybę, pastebėta, kad tiriamojo SE parametrai neatitinka idealiojo SE (žr. 3.1 lentelę).

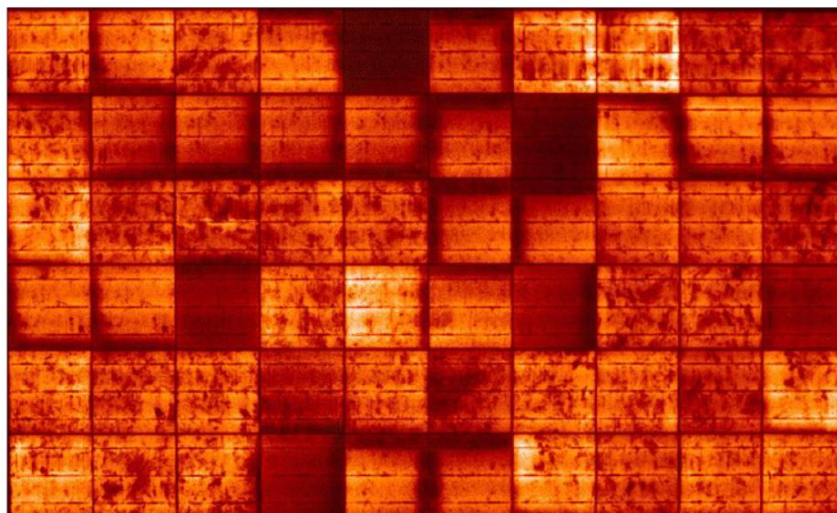
3.1 lentelė. Idealaus ir tiriamojo SE parametrų palyginimas

Parametras	Tiriamasis SE	Idealusis SE	Skirtumas, %
Nominali galia, W	232,68	250,00	-7,44
Trumpo jungimo srovė I_{sc} , A	8,395	8,75	-4,23
Atviros grandinės įtampa, V_{oc} , V	37,07	38,00	-2,51
Maksimalios galios srovė, I_m , A	7,80	8,26	-5,90
Maksimali įtampa, V_m , V	29,83	30,30	-1,58

Įtakos tiriamojo SE parametrų nukrypimui idealiojo SE charakteristikų turi SE pažeidimai bei neatitinkančios standartų matavimų sąlygos:

- priemaišos SE integruotuose elementuose;
- SE mikro įtrūkimai ir lūžiai (žr. 3.3 pav.);
- kontaktų formavimo/integravimo klaidos;
- dengiamojo stiklo netobulumai (įbrėžimai ir t.t.);
- tiriamojo SE temperatūros neatitikimai (kai SE temperatūra kinta ir nepalaikoma ties 25 °C riba).

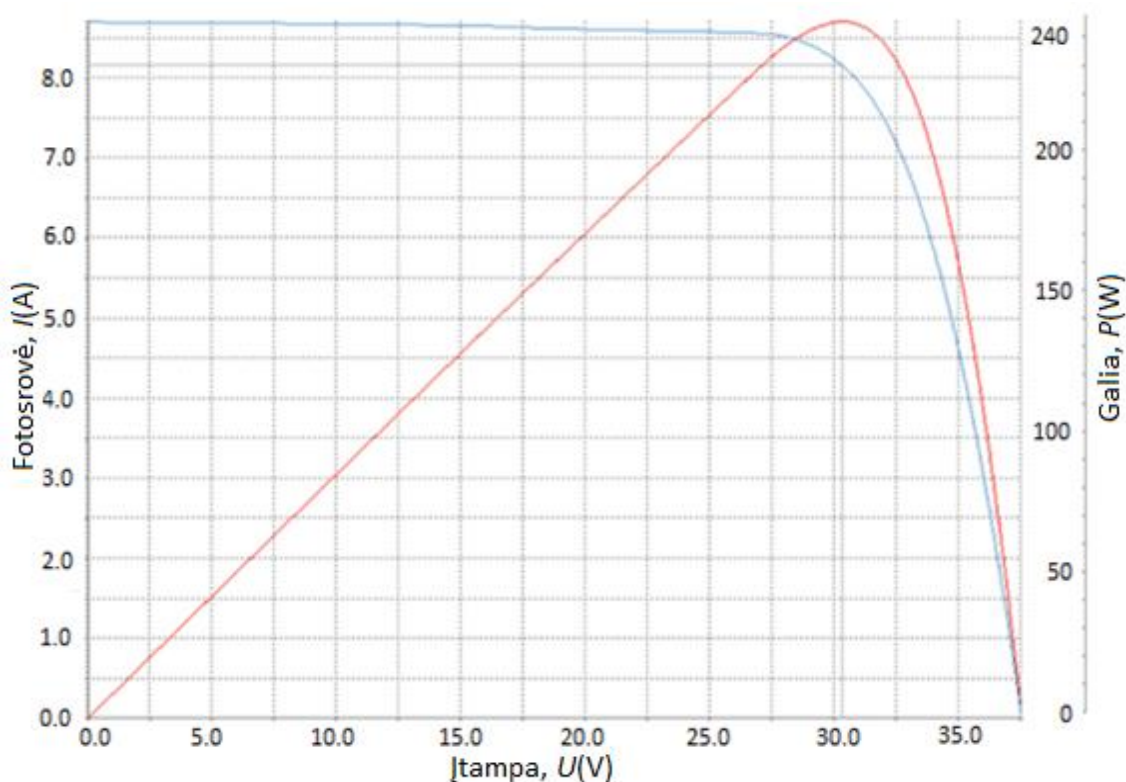
Siekiant nustatyti veiksnius, kurie galėjo lemti tiriamojo ir idealaus SE parametrų neatitikimą, nuspręsta atlikti elektroliuminescencijos tyrimą. Elektroliuminescencijos būdu pastebėti tyrimui pasirinkto polikristalinio SE paviršiaus struktūros netobulumai. (žr. 3.4 pav.)



3.4. pav. Elektroliuminescencijos būdu aptikti SE netobulumai

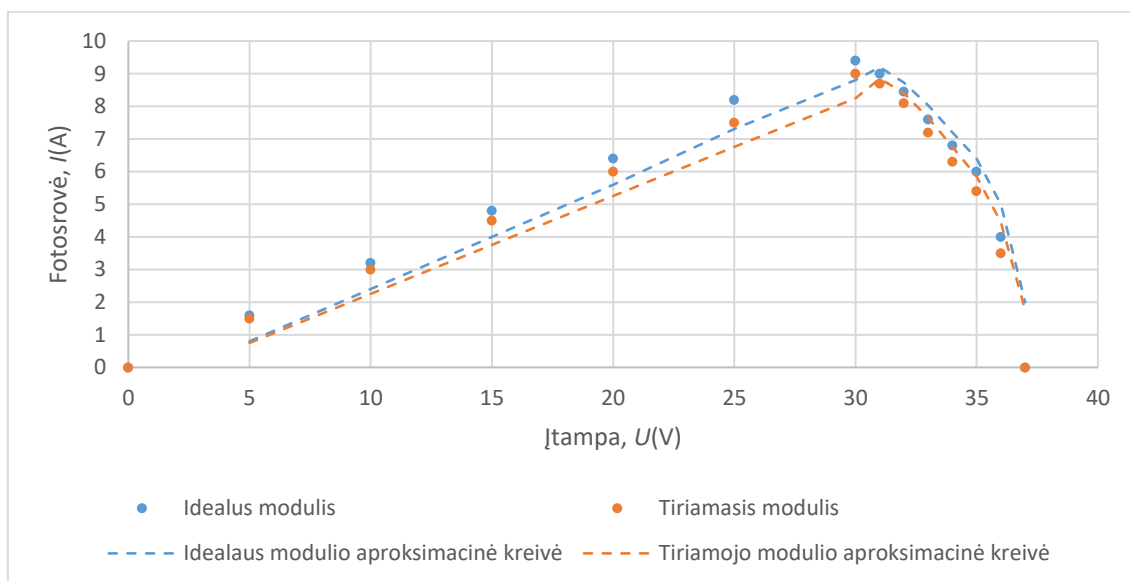
Atlikus elektroliuminescencijos tyrimą pastebėta, kad dalis celių yra tamsesnės, taip yra dėl gamybos metu atsiradusių mikro įtrūkimų, kontaktų netobulumo ir kitų faktorių.

Naudojant blykstinį saulės spektro simulatorių Pasan A+ nuspręsta tyrimą kartoti, su kitu Amerisolar SE, norint nustatyti jo voltamperinę charakteristiką bei palyginti ją su idealiojo SE I–V charakteristika.



3.5 pav. Pasan A+ impulsiniu simulatoriumi apšviesto antrojo Amerisolar SE voltamperinė charakteristika

Siekiant nustatyti idealaus ir tiriamojo SE srovės nuo įtampos priklausomybes tarpusavyje, 3.5 ir 3.1 pav. išmatuotas priklausomybes palyginome (žr. 3.6 pav).



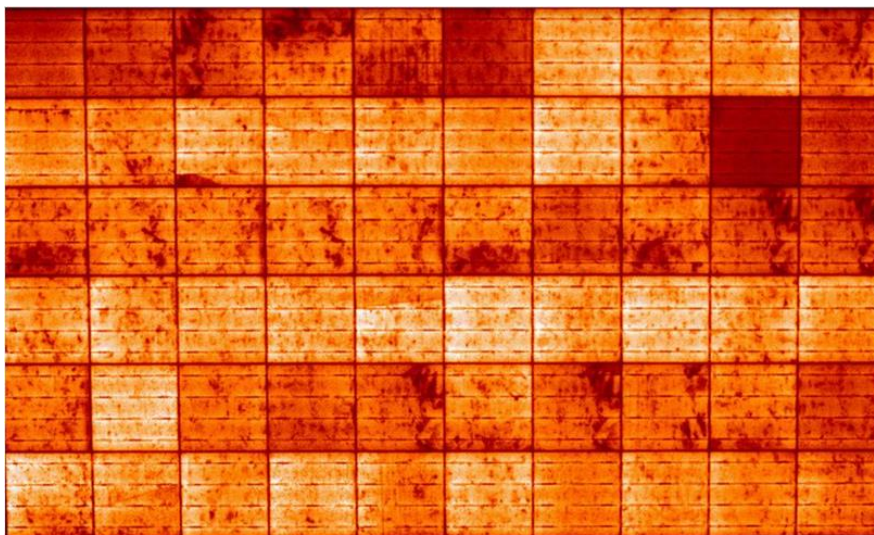
3.6 pav. Teorinio ir antro tiriamojo SE įtampos nuo srovės priklausomybės palyginimas

Pastebėta kad, tirta polikristalinio SE voltamperinė charakteristika taip pat neatitinka idealiojo SE parametrų (žr. 3.2 lentelę).

3.2 lentelė. Teorinio ir antrojo tiriamojo SE parametrų palyginimas

Parametras	Tiriamasis SE	Idealusis SE	Skirtumas, %
Nominali galia, W	247,77	250,00	-0,89
Trumpo jungimo srovė I_{sc} , A	8,703	8,75	-0,54
Atviros grandinės įtampa, V_{oc} , V	37,57	38,00	-1,13
Maksimalios galios srovė, I_m , A	8,17	8,26	-1,09
Maksimali įtampa, V_m , V	30,33	30,30	+0,09

Tokius tiriamo SE parametrų neatitikimus lėmė SE pažeidimai, kurie nustatyti elektroluinescencijos būdu (žr. 3.5 pav.).



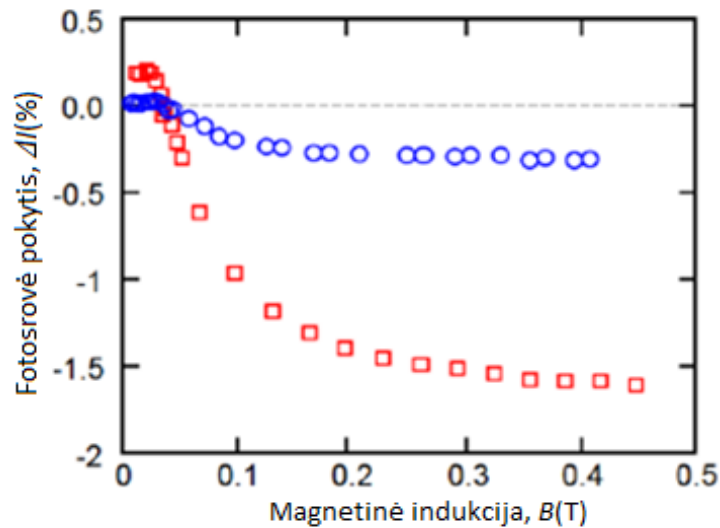
3.7 pav. Elektroliuminescencijos būdu aptikti antrajame SE netobulumai

Atlikus antrojo SE elektroliuminescencijos tyrimą pastebėta, kad šis SE turi mažiau netobulumų (mažiau tamsių celių), todėl jo techniniai parametrai yra artimesni gamintojo nurodomoms techninėms charakteristikoms. Nors abiejų tirtų SE techninės charakteristikos neatitiko gamintojo pateikto idealaus SE parametru, tačiau yra tinkami eksploatuoti tiek mažos galios, tiek ir didelės galios PV jėgainėse.

3.2. Lazerio šviesos poveikis SF saulės elementams

Dalį šilumos nuostolių galima sumažinti, sukuriant mechanizmą – vieno fotono energiją (kurio energija dvigubai didesnė nei puslaidininkinės medžiagos draustinės juostos plotis) panaudojant dviejų eksitonų (elektronas – skylė pora) kūrimui.

Toliau pateikiami rezultatai, gauti moduliuojant Helmholtz'o ričių magnetinę indukciją. Moduliuojant magnetinę indukciją siekta gauti maksimalias fotosroves (ties 0,2–0,3 T verte) (žr. 3.8 pav.). Tokią fotosrovės kitimo tendenciją vadiname idealiuoju moduliu, prie kurio šiais metodiniais tyrimais siekta priartėti.



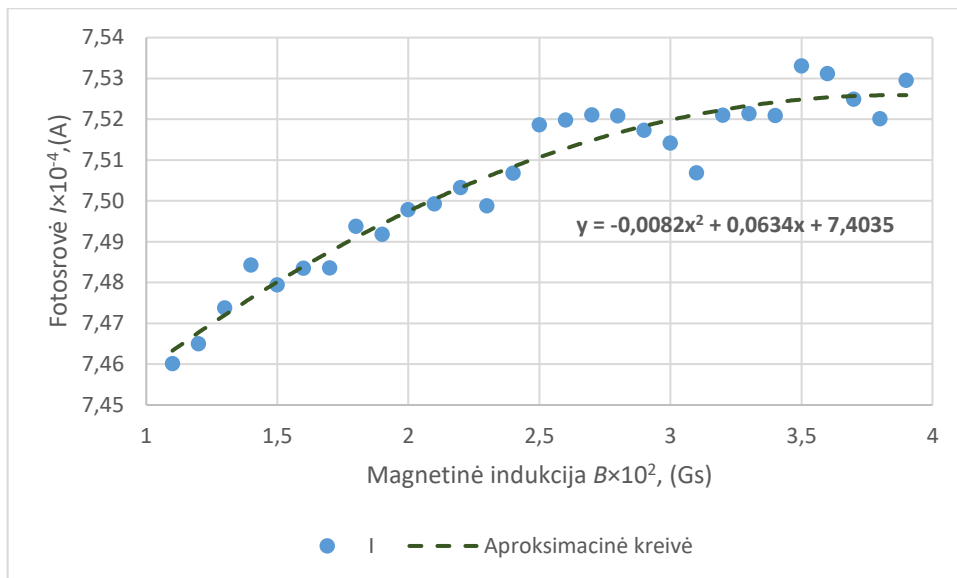
3.8. pav. Nuo magnetinės indukcijos priklausanti generuojama fotosrovė Amolf SF SE (mėlyni apskritimai); nuo lazerio šviesos moduliavimo priklausanti fotosrovė (raudoni kvadratai).

Klaidų šaltiniai. Kadangi naudojamos įrangos jautris moduliuojamam magnetiniam laukui yra pakankamai didelis, todėl net ir menkiausias triukšmas gali žymiai iškraipyti idealiojo modulio kreivę (žr. 3.8 pav.) prie kurio buvo siekiama priartėti.

Pagrindiniai veiksniai, kurie turi įtakos tyrimų tikslumui ir atsirandančiam triukšmui signalė:

- magneto varža (angl. *Magnetoresistance*);
- lazerio šviesos intensyvumo fluktuacijos;
- lazerio galios svyravimai;
- temperatūros svyravimai laboratorijoje.

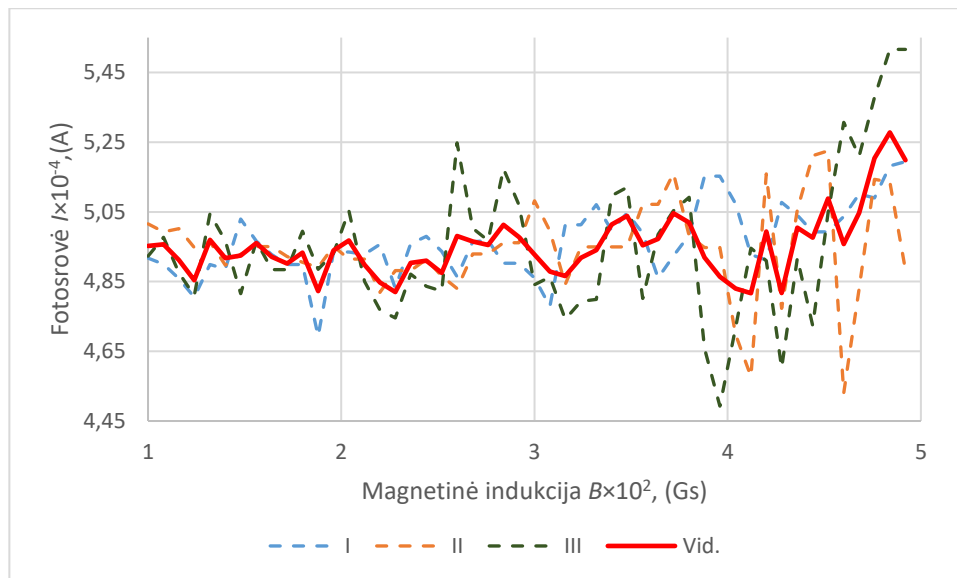
Nors naudojamas Amolf SF SE ir buvo izoliuotas nuo aplinkos poveikio, įdedant jį į aliuminio dėžutę, tačiau atliekant eksperimentinius matavimus (žr. 3.9 pav.) pastebėta, kad fotosrovės priklausomybė nuo magnetinės indukcijos kreivė neatitinka idealiojo modulio prie kurio siekta priartėti (3.8 pav.), kai fotosrovė pasiskirsto pagal Gauso skirstinį (su piku ties ~ 250 Gs) (3.9 pav. kreivė – II).



3.9. pav. Fotosrovės priklausomybė nuo magnetinės indukcijos esant lazerio šviesos ir galios fluktuacijai

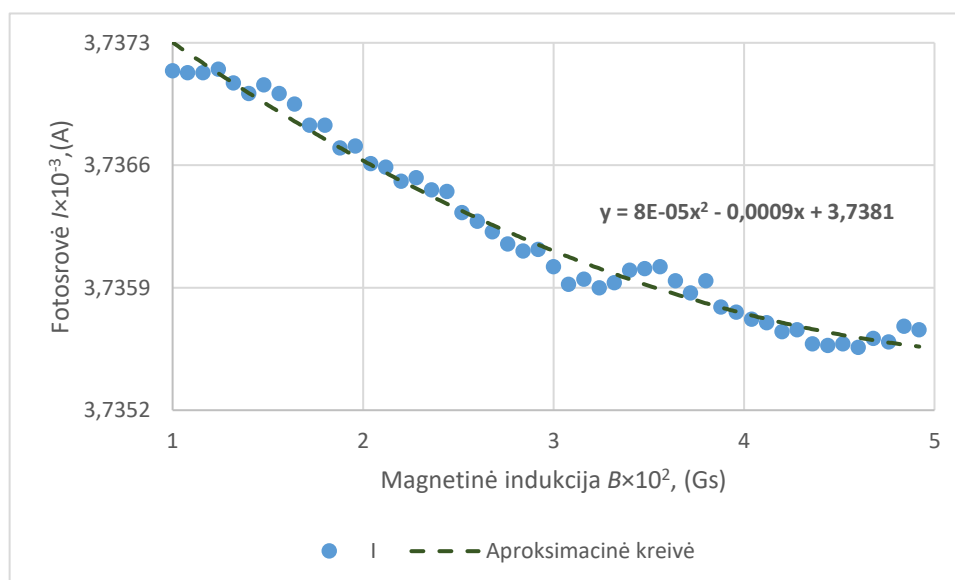
Magnetinė indukcija grafikuose pateikiama – Gaussais, siekiant, kad grafikai būtų lengviau skaitomi.

Atlikus eksperimentą pastebėta, jog dėl atsiradusio triukšmo signale – registruojamas fotosrovės didėjimas, atsiradęs dėl lazerio šviesos ir galios fluktuacijų. Registruotos fotosrovės pikas registruotas ties 250 Gs, todėl stabilizavus lazerio valdymo sistemą atliktas fotosrovės priklausomybės nuo magnetinės indukcijos tyrimas, siekiant priartėti prie idealiojo modulio kreivės, kur fotosrovės pikas stebimas ~ 250 Gs.



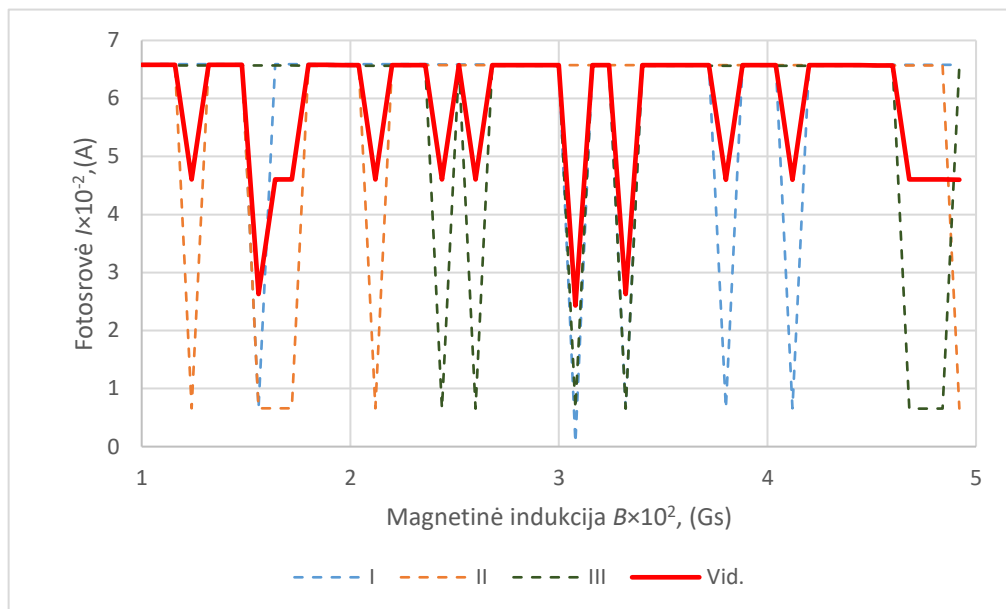
3.10. pav. Fotosrovės priklausomybė nuo magnetinės indukcijos, kurią lemia mažas sinchroninio stiprintuvo jautris

Atlikus tyrimą pastebėta, kad fotosrovė stiprėja (3.10 pav.). Fotosrovės priklausomybės nuo generuojamo magnetinio lauko idealiojo modulio neatitikimą (žr. 3.8 pav.) galėjo lemti nustatytas mažas sinchroninio stiprintuvo jautris, todėl registruojamame signale, triukšmas daro didelę įtaką matavimų patikimumui ir tikslumui. Kadangi nepavyko pašalinti visų triukšmo šaltinių, kurie trukdo priartėti prie idealiojo modulio, juos palaipsniui šalinant, tyrimai tęsiami.



3.11. pav. Fotosrovės priklausomybė nuo magnetinės indukcijos, kai padidinama lazerio galia

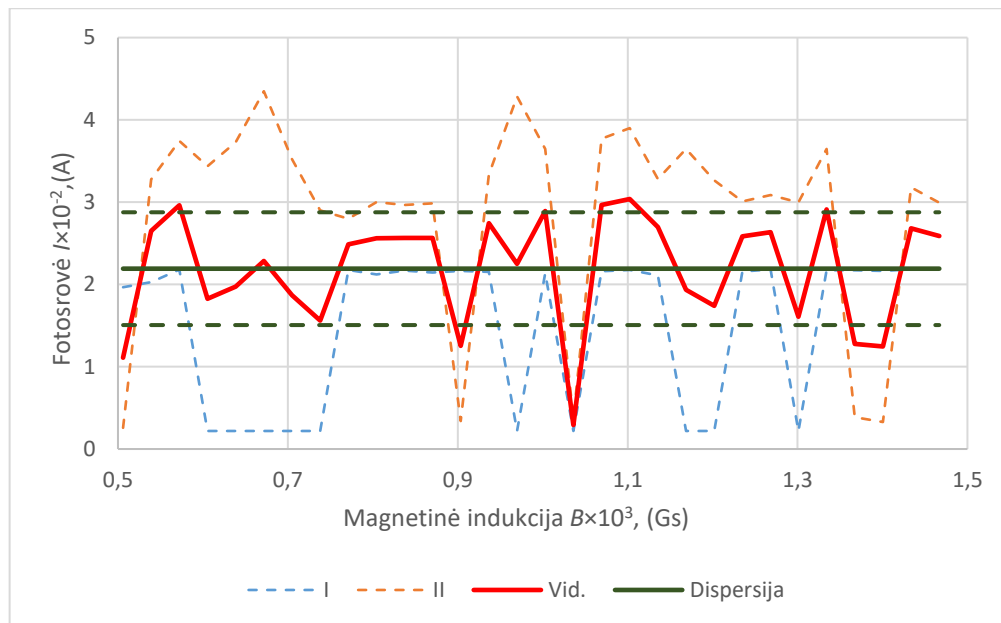
Padidinus sinchroninio stiprintuvo jautrį bei lazerio galią pastebėta, kad generuojama fotosrovė pradėjo staigiai kristi (žr. 3.11 pav.). Fotosrovės kritimą galėjo lemti nustatyta per didelė lazerio galia. Dėl naudojamo Amolf SF SE nestabilumo, paveikus jį 150 mW lazerio šviesa elementas degradavo (sudegė). Nėra tikslinga tokių SE naudoti tolimesniuose tyrimuose, todėl pakeitus jį nauju Amolf SF SE, fotosrovės priklausomybės nuo magnetinės indukcijos tyrimas tęsiamas.



3.12. pav. Fotosrovės priklausomybė nuo magnetinės indukcijos, kai nestabilios Helmholtz'o ritės

Pakeitus tyrime naudojamą SE nauju pastebėta, kad sinchroniniu stiprintuvu registruojamas signalas monotoniškai kartojasi (žr. 3.12 pav.) o tokį neatitikimą idealiajam SE galėjo lemti nestabilios Helmholtz'o ritės galios tiekimo sistema, naudojamos sistemos kontaktai nebuvo tvirtai pritvirtinti.

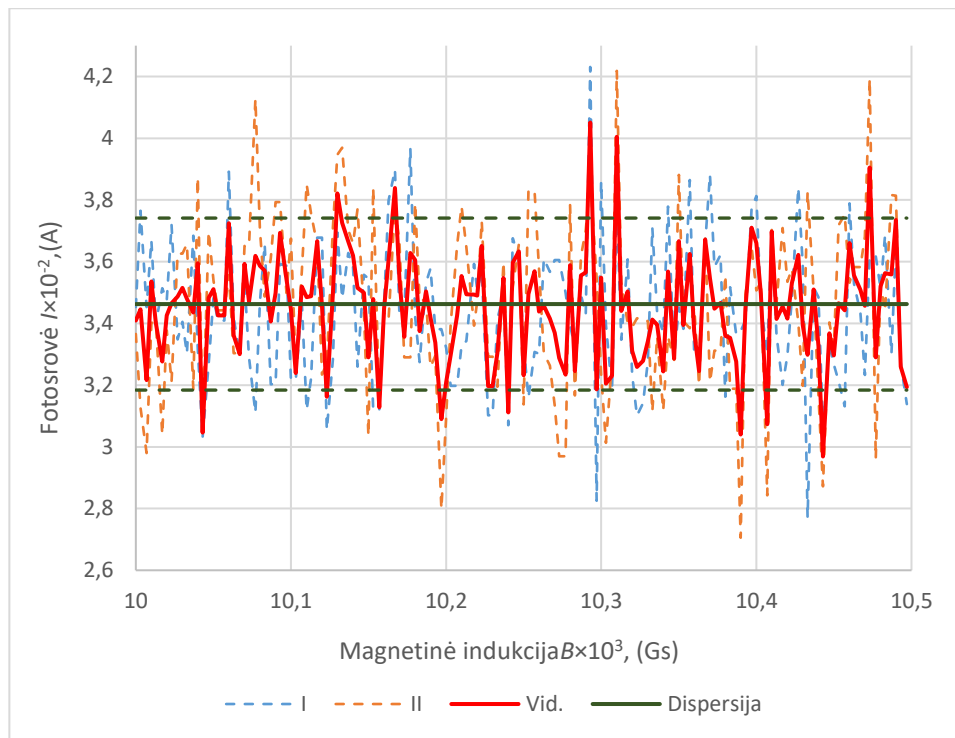
Bandymų – klaidų metodu nustatyti pagrindiniai veiksniai darantys įtaką matavimų tikslumui. Atsižvelgus į padarytas klaidas, atlikti papildomi esminiai pakeitimai naudojamoje matavimų sistemoje: pervyniotos ir sutvirtintos Helmholtz'o ritės; stabilizuotas lazerio galios tiekimas; pradedamas vykdyti realiu laiku lazerio šviesos intensyvumo matavimas; naudojami nauji Amolf SF SE (išvengiant senėjimo faktoriaus), taip pat nuspręsta pasirinkti mažą moduliacijos dažnį 437 Hz, tokį dažnį tolimesniems tyrimams pasirinkti siekiant išvengti 50 Hz įrangos dažnių interferencijos. Moduliavimo amplitudė – 100 mV, o fazė visą laiką pasirenkama, kad viena iš dviejų sinchroninio stiprintuvo signalo kompleksinių komponentių būtų maksimali, o kita – lygi 0. Sinchroninio stiprintuvo jautrį keičiant 2 fA – 1 μA ribose, priklausomai nuo nustatomo šviesos intensyvumo, nuo kurio priklauso SF SE generuojamas įvesties signalo stipris.



3.13 pav. Fotosrovės priklausomybė nuo magnetinės indukcijos kai sincroninio stiprintuvo jautris per didelis

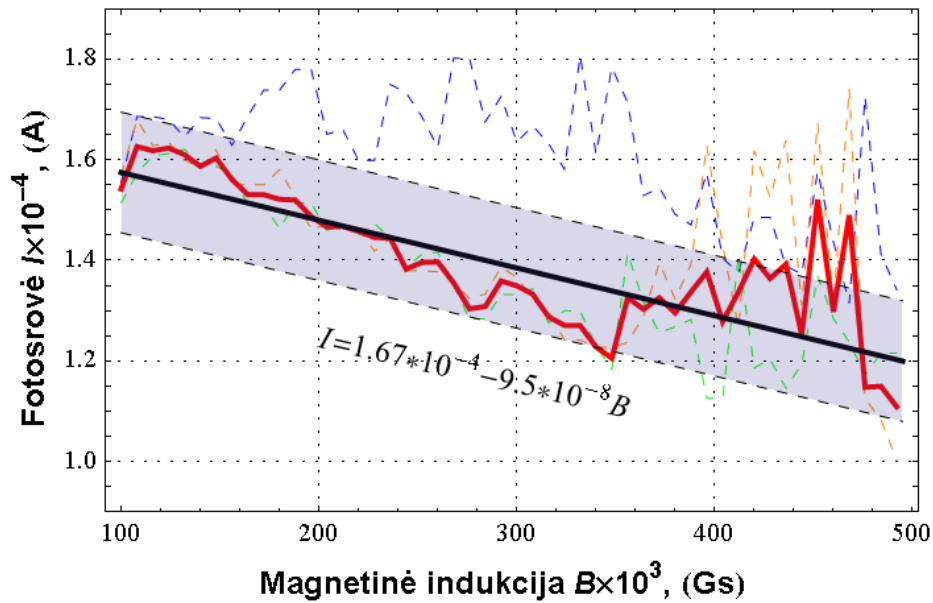
Tolimesniais eksperimentais nuspręsta patikrinti kokią įtaką generuojamai fotosrovei turi didesnė magnetinė indukcija, todėl atlikti papildomi eksperimentai kai magnetinė indukcija moduluojama aukštesnėse (>500 Gs) ribose. Manoma, kad nuo didesnės magnetinės indukcijos (>500 Gs) generuojama fotosrovė kils pagal pageidaujamą idealųjį modulį (žr. 3.8 pav.), t.y., kad generuojama fotosrovė kils pagal Gauso skirstinį.

Atlikus eksperimentą, kai magnetinė indukcija moduluota 500–1470 Gs ribose, pastebėta (žr. 3.13), kad generuojamos fotosrovės chaotišką kitimą galėjo lemti per didelis sinchroninio stiprintuvo jautris, tačiau cikliškai atkartotos eksperimento sąlygos patvirtino, kad keičiamas stiprintuvo jautris neturi įtakos generuojamos fotosrovės generacijai.



3.14 pav. Fotosrovės priklausomybė nuo magnetinės indukcijos, keičiant magnetinę indukciją 10000–10500 Gs ribose

Fotosrovės priklausomybės nuo magnetinės indukcijos grafike, kai magnetinė indukcija keičiama 10000–15000 Gs ribose, stebimas chaotiškas fotosrovės kitimas. Fotosrovės priklausomybės nuo magnetinės indukcijos idealiojo modulio (žr. 3.8 pav.) neatitikimą galėjo lemti nustatytas stiprus magnetinis laukas (10000–10500 Gs), o tokio signalo sinchroninis stiprintuvas neregistruoja. Todėl nuspręsta nustatyti kokią įtaką galėjo daryti aukšta magnetinė indukcija tiriamam SE. Tuo tikslu buvo atlikti eksperimentai, nustatyti fotosrovės priklausomybę nuo magnetinės indukcijos keičiant magnetinę indukciją 100–500 Gs ribose.

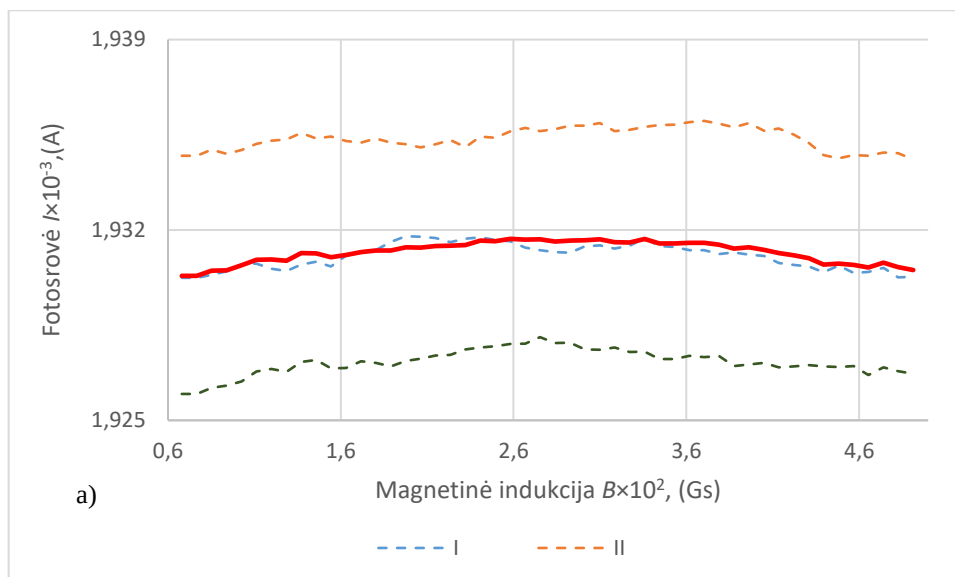


3.15 pav. Saulės elemento degradavimas, stebint fotosrovės priklausomybę nuo magnetinės indukcijos

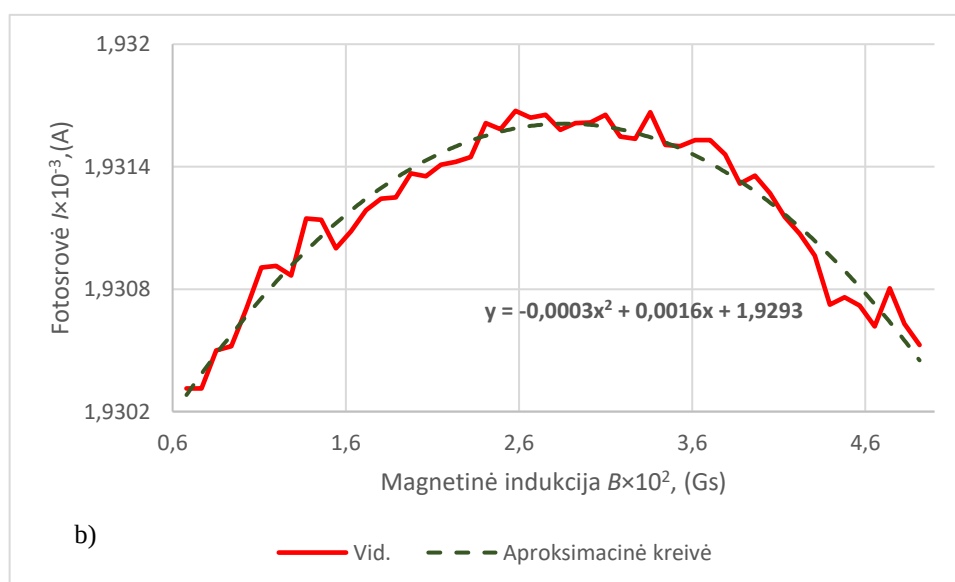
Atlikus SE degradavimo nustatymo tyrimą (žr. 3.15 pav.) pastebėta, kad didinant magnetinę indukciją generuojama fotosrovė mažėja iki kol cikliška kartojant tyrimus generuojama fotosrovė neberegistruojama, tai leidžia manyti, kad toks SE degradavo, jį patalpinus į stiprų magnetinį lauką. Dar kartą pakeitus SE nauju, tyrimai kartojami.

Esant idealioms sąlygoms, t.y. kai nėra lazerio šviesos fluktuacijų; SE su laiku nekeičia savo savybių (nedegraduojama), kai laboratorijoje temperatūra yra pastovi gautume kiekvienu skenavimu identiškus rezultatus, tačiau realiomis sąlygomis išvengti šių veiksnių įtakos beveik neįmanoma. Todėl atsižvelgus į ankstesnių tyrimų metu nustatytus veiksnius, darančius įtaką tyrimų rezultatams, nuspręsta parinkti kiek įmanoma optimaliausias eksperimento sąlygas, su kuriomis galima būtų priartėti prie idealiojo modulio.

3.16 paveiksle pateikti tiriamo SE fotosrovės priklausomybės nuo magnetinės indukcijos tyrimo rezultatai, pašalinus anksčiau nustatytas galimas klaidas ir jų įtaką matavimų tikslumui.



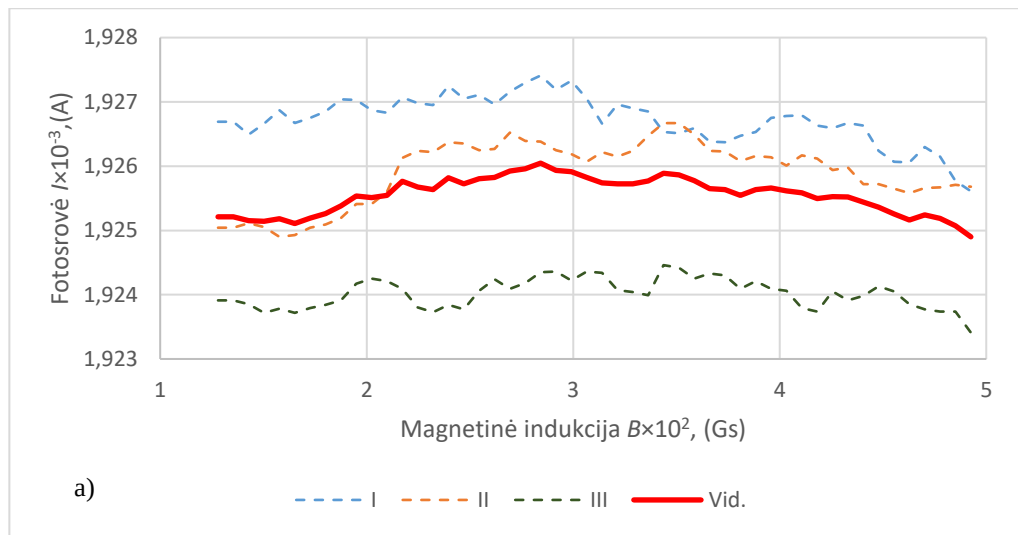
3.16a pav. Fotosrovės priklausomybė nuo magnetinės indukcijos pašalinus nustatytas klaidas



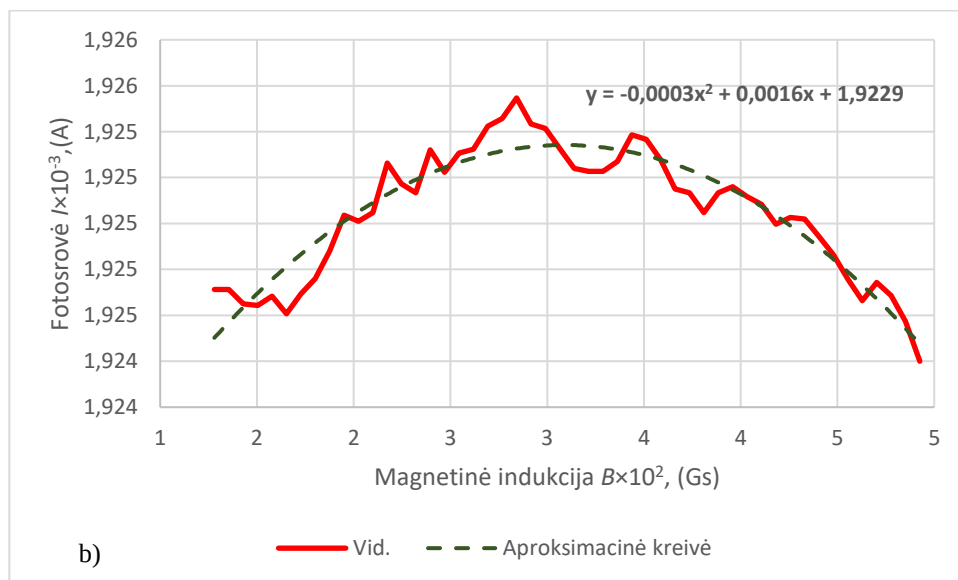
3.16b. pav. Vidutinės fotosrovės priklausomybė nuo magnetinės indukcijos, pašalinus nustatytas klaidas

Pašalinus anksčiau nustatytas klaidas stebima, kad magnetinei indukcijai esant <260 Gs, generuojama fotosrovė išauga, o magnetinei indukcijai pasiekus 260 Gs stebimas fotosrovės generavimo pikas. Magnetinei indukcijai viršijus 260 Gs, fotosrovės generavimas mažėja. Tokia generuojamos fotosrovės priklausomybės nuo magnetinės indukcijos kitimo tendencija pakankamai artima idealiajam moduliui, kad galėtume teigti, jog tyrimui taikytas Amolf SF SE naudoja singletinių būsenų skaidymo procesus fotosrovei generuoti (žr. 1.3 poskyrį).

Siekiant įsitikinti, kad tyrimams pasirinktas SE naudoja SF procesus, o parinktos optimaliausios tyrimo sąlygos daro nedidelę įtaką tyrimų rezultatams, tyrimas kartojamas.



3.17a pav. Kartojamas fotosrovės priklausomybės nuo magnetinės indukcijos tyrimas pašalinus nustatytas klaidas



3.17b pav. Kartoto fotosrovės priklausomybės nuo magnetinės indukcijos tyrimo vidutinės reikšmės

Kartotame tyrime, buvo stebima laukta tendencija, kai generuojamos fotosrovės generacija kyla kai didiname magnetinę indukciją iki 280 Gs ir pasiekia piką, peržengus šią ribą fotosrovės generacija pradeda mažėti kaip ir buvo tikėtasi. Taip pat duomenų palyginimui kiekviename grafike yra pateikta ir aproksimacinė kreivė su ja apibrėžiančia formule. Atliktuose eksperimentuose kai buvo parinktos optimalios sąlygos matome, kad aproksimacinės kreivės kinta pagal tą pačią priklausomybę ($y = -3E-11x^2 + 2E-08x + 0,0019$).

Tai gi mes stebime lauktą tendenciją, nors triukšmas signale vis dar yra reikšmingas. Sugebėję priartėti prie idealiojo modelio ir gavę tas pačias aproksimacinių kreivių priklausomybes galime teigti, kad mūsų sukurta įranga yra pakankamai jautri fotosrovei registruoti naujos kartos SF SE, todėl naujai kuriami elementai, kur fullerenas galėtų būti

keičiamas stabilesniais ir pigesniais elementais taip pat gali būti tiriami šia įranga. Tai leistų paspartinti naujos kartos SE tyrimus.

3.3 Eksperimentinių tyrimų rezultatų ir analizės skyriaus išvados

1. Nustatytas neatitikimas tarp nominalių ir deklaruojamų tirtų SE parametrų: vieno SE nominali galia 7,44 % ir trumpojo jungimo srovė 4,23 % mažesnė, o kito, – nominali galia 0,89 % mažesnė, o trumpojo jungimo srovė 0,54 % didesnė nei nurodyta techninėse gamintojo specifikacijose.

2. Nustatyta, kad, taikant saulės spektro simulatorių, vieni iš svarbiausių veiksnių, lemiančių SE volamperinių charakteristikų nesutapimą su gamintojo nurodomomis charakteristikomis, yra temperatūros svyravimai, SE mikro įtrūkimai, lūžiai bei priemaišos.

3. Lazerio šviesos poveikio SE tyrimui atlikti sukurta nauja matavimų sistema, skirta generuojamos fotosrovės nuo magnetinės indukcijos priklausomybei nustatyti. Nustatyta, kad matavimų tikslumui labiausiai įtakos turėję veiksniai: lazerio galios fluktuacijos, temperatūros svyravimai laboratorijoje, magneto varža, sinchroninio stiprintuvo jautris, Helmholtz'o ričių virpesiai.

4. Metodiškai nustačius ir pašalinus matavimo įrangos trūkumus, sukurta jautri ir patikima įranga SE generuojamos fotosrovės matavimams atlikti, o jos taikymas išplečia SE fotovoltinių savybių ir jas lemiančių veiksnių tyrimus.

5. Pastebėta, kad tirtas naujos kartos hibridinis SE generuoja fotosrovę dėl singletinių būsenų skaidymo, o patobulinta matavimo įranga gali būti taikoma singletinių būsenų skaidymo procesams SE tirti

REKOMENDACIJOS

Siekiant įvertinti saulės spektro simulatoriaus skleidžiamos šviesos poveikį SE, rekomenduojama išplėsti tyrimus, ekranuojant ksenono lempą skirtingų spalvų filtrais, tai padėtų ištirti skirtingų bangos ilgių spektro įtaką SE.

Nustatant lazerio šviesos įtaką naujos kartos hibridiniui SE, kuris fotosrovę generuoja singletinių būsenų skaidymo procesu, rekomenduojama moduluoti ne tik magnetinę indukciją, bet ir lazerio šviesą, siekiant tikslesnių ir patikimesnių duomenų.

LITERATŪRA

About Pulse Solar Simulation [interaktyvus]. 2016. Žiūrėta 2017 m. sausio 04 d. Prieiga per internetą: < <http://www.bergerlichttechnik.de/FAQS/About-Pulsed-Solar-Simulation.html/>>

Adomavičius, V.; Kaminickas, M. 2014. *Analysis of PV power future development possibilities*. Vilnius: Lietuvos mokslų akademija. T.60, 233-248 p.

Bach, T.; Mushter, R.; Sroka, R.; Gravas, S.; Skolarikos, A.; Herrmann, T, W, R.; Bayer, T.; Knoll, T.; Abbou, C, C.; Janetschek, G.; Bachmann, A.; Rassweiler, J, J. 2012. *Laser Treatment of Benign Prostatic Obstruction; Basic and Physical Differences*. European Urology, Vol.61, Issue 2. 317-325 p.

Bliss, M.; Betts, T, R.; Gottschalg, R. 2009. *An LED-based photovoltaic measurement system with variable spectrum and flash speed*. Amsterdam: Elsevier. Journal of Solar Energy Materials and Solar Cells, 93 (6-7). 825-830 p.

Bordogna, G. 2013. *Number one in Accuracy and Reliability. Pasaun Training Hardware*. Mokomosios medžiagos pristatymo skaidrės.

BP. 2016. *BP Statistical Review of World Energy 2016* workbook. 48 p.

Commission Electrotechnique Internationale. 1995. *Exigences pour le fonctionnement des simulateurs solaires*. Geneve: Bureau Central de la Commission Electrotechnique Internationale. IEC 904-9, 4 p.

Congreve, D, N.; Lee, J.; Thompson, J, N.; Hontz, S, Y.; Reuswig, D.; Bahlke, M, E.; Reineke, S.; Voorhis, von T.; Baldo, M, A. 2013. *External quantum efficiency above 100 % in singlet-fission-based organic photovoltaic cell*. Science, 340(6130):334-337

EEA Report. *Renewable Energy in Europe 2016*. Luxembourg: Publications Office of the European Union. 78 p.

Fluorescencinė diagnostika biomedicinoje [interaktyvus]. 2018. Žiūrėta 2018 m. sausio 5 d. Prieiga per internetą: <http://www.biofotonika.ff.vu.lt/mokomoji-medziaga/fluorescencine-diagnostika-biomedicinoje/>

Gersmann C., Lips K. *Multi-Exciton Generation via Singlet Fission at Tetracene/c-Si Hybrid Devices*. Physics Department of Freie Universität Berlin, 2017, Master's Thesis.

Global Energy Statistical Yearbook 2016 [interaktyvus]. 2016. Žiūrėta 2016 m. lapkričio 23 d. Prieiga per internetą: <https://yearbook.enerdata.net/>

Global Market Outlook for Solar Power [interaktyvus]. 2015. Žiūrėta 2017 m. sausio 2 d. Prieiga per internetą: <http://resources.solarbusinesshub.com/solar-industry-reports/item/global-market-outlook-for-solar-power-2015-2019>

Global Market Outlook for Solar Power [interaktyvus]. 2017. Žiūrėta 2018 m. kovo 12 d. Prieiga per internetą: <https://resources.solarbusinesshub.com/solar-industry-reports/item/global-market-outlook-2017-2021>

Granek, F.; Zdanowicz, T. 2004. *Advanced system for calibration and characterization of solar cells*. Opto-Electronics Review 12(1). 57-67 p.

Jungtinių Tautų Bendroji klimato kaitos konvencija ir Kioto protokolas [interaktyvus]. 2017. Žiūrėta 2017 m. sausio 5 d. Prieiga per internetą: <http://www.laaif.lt/lt/klausimaiatsakymai/sesd-registras/jungtiniu-tautu-bendroji-klimato-kaitos-konvencija-ir-kioto-protokolas/>

Krotkus, A. 2008. *Puslaidininkų optoelektronikos sistemos ir prietaisai*. Vilnius: Progrektus poligrafijos centras. 192 p.

Laser Technology. How Laser Work [interaktyvus]. 2018. Žiūrėta 2018 m. sausio 04 d. Prieiga per internetą: <http://www.lasertech.com/How-Lasers-Work.aspx>

National Instruments. LabView [interaktyvus]. 2018. Žiūrėta 2018 m. sausio 03 d. Prieiga per internetą: <http://www.ni.com/en-us/shop/labview/buy-labview.html>

New energy new world. Amerisolar [interaktyvus]. 2013. Žiūrėta 2018 m. sausio 5 d. Prieiga per internetą: <http://www.weamerisolar.com/product1.html?page=1>

Petrauskas, G.; Adomavičius, V. 2012. *Saulės energijos naudojimas elektrai gaminti*. Kaunas: Technologija. 120 p.

Poškus, A. 2013. *Fotoefekto tyrimas ir Planko konstantos matavimas*. Vilnius. 18 p.

Novičkovas, A.; Baguckis, A.; Vaitkūnas, A.; Mekys, A.; Tamošiūnas, V. 2014. *Investigation of Solar Simulator based on High-Power Light-Emitting Diodes*. Vilnius: Lietuvos mokslų akademija. Lithuanian Journal of Physics, Vol. 54, No. 2. 114-119 p.

Novičkovas, A.; Mekys, A.; Baguckis, A.; Tamošiūnas, V. 2014. *Saulės šviesos simulatorius*. Vilnius: Lietuvos Respublikos Valstybinis patentų biuras. LT 2014 149 A. 9 p.

Sampling air pollution [interaktyvus]. 2016. Žiūrėta 2017 m. gegužės 27 d. Prieiga per internetą:< <http://www.environment.nsw.gov.au/AQMS/sampling.htm>>

Saulės elemento tyrimas [interaktyvus]. 2006. Žiūrėta 2016 m. lapkričio 27 d. Prieiga per internetą:<http://gamta.vdu.lt/bakalaurai/lab_darbai/apl_fiz/ESF%20AF%20LD%201%20Saulės.pdf>

Solar Energy Pros and Cons [interaktyvus]. 2014. Žiūrėta 2016 m. gruodžio 27 d. Prieiga per internetą:< <http://energyinformative.org/solar-energy-pros-and-cons/>>

Stanford Research Systems. *Model SR830 DSP Lock-In Amplifier*. 2011. Sunnyvale, California. Revision 2.5 (10/2011)

Tamulaitis, G.; Juška, G. 2008. *Energijų taupančios puslaidininkinės technologijos*. Vilnius: Progretus poligrafijos centras. 126 p.

Technical Note: Solar Simulator Definitions of Characteristics [interaktyvus]. 2017. Žiūrėta 2017 m. sausio 03 d. Prieiga per internetą:< <https://www.newport.com/n/solar-simulator-definitions-of-characteristics>>

Technical Papers [interaktyvus]. 2015. Žiūrėta 2016 m. sausio 03 d. Prieiga per internetą:< <http://www.photoemission.com/techpapers.html>>

Valiulis, A. V. 2012. *Pažangios inžinerinės medžiagos: savybės, gamyba ir taikymas*. Vilnius: Technika. 524 p.

Vasarevičius, D. 2011. *Atsinaujinačių šaltinių panaudojimo ir perspektyvų Lietuvoje analizė*. Mokslas Lietuvos ateitis 3(1): 73 – 77.

Williams, D. 2008. *Laser basics*. Anaesthesia & Intensive Care Medicine., Vol.9, Issue 12. 550-552 p.

World Energy Council. 2016. *World Energy Resources Report*. London. 1028 p.

Würfel, P. 2005. *Physics of Solar Cells*. Darmstadt: Betz-druck GmbH. 186 p.

Žukauskas, A. 2008. *Puslaidininkiniai šviestukai*. Vilnius: Progretus poligrafijos centras. 231 p.