Vilniaus universitetas Fizikos fakultetas Fotonikos ir nanotechnologijų institutas

## Domantas Raudonius SAULĖS MODULIAMS SKIRTŲ APSAUGINIŲ DIODŲ TYRIMAS

Bakalauro studijų baigiamasis darbas

Moderniųjų technologijų fizikos ir vadybos studijų programa

StudentasDomantas RaudoniusDarbo vadovasdr. Vincas TamošiūnasKonsultantasJulius DenafasFNI vadovasdoc. Ramūnas Aleksiejūnas

Vilnius 2020

## Turinys

Įvadas			
1 Liter	atūros Apžvalga4		
1.1	Fotovoltinės technologijos4		
1.2	Kristalinio silicio fotovoltinio modulio struktūra6		
1.3	Saulės modulio apsauginio apėjimo diodo svarbiausi parametrai		
1.4	Pasitaikantys gedimai apėjimo diodams15		
1.5	Apėjimo diodų temperatūros nustatymo metodai		
2 Darb	o metodika		
2.1	Eksperimento schema		
3 Eksp	erimento metu gauti rezultatai		
3.1	Neįlaminuotų plokščiųjų apėjimo diodų įtampos priklausomybės tyrimas nuo		
temperatūros leidžiant tiesioginės krypties srovę			
3.2	Įlaminuotų plokščiųjų apėjimo diodų temperatūros nustatymas pagal išmatuotą		
įtampos pokyt	tį 29		
Išvados			
Literatūr	os sąrašas		
Summary			

## Įvadas

Žemės atmosferoje šiltnamio dujų kiekiui pasiekus kritinį lygį, energetika privalo sumažinti iškastinio kuro sunaudojimą ir plėtoti tik atsinaujinančių energijos šaltinių naudojimą. Šiuo metu Žemėje Saulės šviesos energija yra didžiausias neišnaudotas potencialus energijos šaltinis. Ši energija gali būti panaudota tiesiogiai šildymui arba konvertuojama į elektros energiją, panaudojant fotovoltinių modulių technologiją.

Fotovoltinė saulės energetika– tai yra atsinaujinančiųjų šaltinių energetikos šaka, kai iš Saulės šviesos energijos išgaunama elektros energija. Fotovoltinėje saulės energetikoje išgaunam elektros energiją naudojami fotovoltiniai saulės elementai. Pirmą kartą fotovoltinis reiškinys buvo užfiksuotas 1939-taisiais metais prancūzų fiziko Alexandre Edmond Becquerel [1]. Jis pastebėjo, jog saulės šviesą galima konvertuoti į elektros energiją. Praėjus dviem metams buvo sukurtas pirmasis saulės elementas iš kristalinio silicio. Šiuo metu tai dažniausiai naudojamas saulės elementų tipas. Siekiant padidinti įtampas ir sumažinti nuostolius, silicio saulės elementai dažniausiai yra nuosekliai sujungiami į saulės fotovoltinius modulius. Kai tik buvo išrastas kristalinio silicio saulės elementas, jo efektyvumas tesiekė vos vieną procentą, o apie 2000 - taisiais metais efektyvumas perkopė 25-ies procentų ribą. [2], [3].

Kristalinio silicio saulės modulyje esantys saulės elementai yra jungiami nuosekliai. Tai reiškia, jog saulės modulio įtampa bus atskirų saulės elementų įtampų suma, o srovės stipris priklausys nuo kiekvienos kristalinio silicio saulės elemento srovės stiprio vertės. Deja, tokiu nuoseklaus jungimo atveju, srovės stiprį apriboja prasčiausiai veikiantis saulės elementas. Dėl šios priežasties saulės modulių savybes labai pakeičia krentantys šešėliai. Šešėlis gali visiškai uždengti vieną ar kelis saulės modulio saulės elementus taip, jog jie nebegeneruotų elektros srovės. Norint išvengti šios problemos, yra naudojami diodai, kurie leidžia srovei apeiti šešėlyje esantį saulės elementą ir taip priversti saulės modulį dirbti efektyviau. Diodų būna įvairių tipų, nuo paprastų p-n sandūros ir Šotkio diodų iki plokščių p-n sandūros diodų, tiesiog įlaminuojamų į fotovoltinius saulės modulius. [4].

Šio darbo tikslas yra ištirti tiesiog į saulės modulius įlaminuojamų naujo dizaino plokščių apsauginių apėjimo diodų (angl. bypass diodes) savybes: nuolatinės srovės lemiamus temperatūros pokyčius ir galimybes šiuos pokyčius vertinti iš įtampų matavimų.

Dėkoju UAB Solitek R&D už suteiktą galimybę šiam darbui panaudoti apsauginių apėjimo diodų bandinius ir fotovoltinių modulių komponentus.

## 1 Literatūros Apžvalga

#### 1.1 Fotovoltinės technologijos

Literatūroje galime daug rasti informacijos apie kristalinio silicio saulės elementų technologijas. Taip yra, nes šiuo metu rinkoje kristalinio silicio saulės elementai yra labiausiai paplitę. Tačiau, tobulėjant technologijoms, populiarėja ir kitos fotovoltinės technologijos, tokios kaip plonasluoksniai saulės elementai. Fotovoltinės technologijos gali būti skirstomos į kartas pagal gamybos laikotarpį, technologijos efektyvumą, gamybos kaštus arba tiesiog pagal saulės fotovoltinio elemento sandarą. Skirstant pagal laikotarpį, yra išskiriamos trys fotovoltinių saulės elementų kartos. Pirmajai kartai priskiriami santykinai aukšto efektyvumo ir palyginus aukštos kainos kristalinio silicio saulės elementai. Antrajai kartai priklauso žemesnio efektyvumo, bet ir žemesnės kainos plonasluoksniai saulės elementai. Trečiosios kartos saulės elementai turėtų pasižymėti gana aukštu efektyvumu ir žemesniais gamybos kaštais, palyginus su ankstesnių kartų fotovoltinėms technologijomis. [5].

#### 1.1.1 Kristalinio silicio saulės elementai

Pirmosios kartos fotovoltiniai saulės moduliai yra sudaryti iš kristalinio silicio saulės elementų. Kristalinio silicio elementuose epitaksijos, difuzijos ar kitais būdais yra sudaromos p-n sandūros. Šiuo metu didžiausias pasiektas efektyvumas yra 26,7 % [3]. Išsamiau apie saulės modulius, kurių struktūroje yra kristalinio silicio saulės elementai aprašysiu tolimesniuose skyriuose.

#### 1.1.2 Plonasluoksniai saulės elementai

Tai yra antrosios kartos fotovoltinė technologija. Skirtingai nei kristalinio silicio saulės elementų moduliai, kuriuose kristalinio silicio saulės elementų grupės yra sulaminuojamos tarp dviejų plokščių, plonasluoksniai moduliai yra gaminami tiesiog ant stiklo, nerūdijančio plieno ar ant plastikinio paviršiaus, auginant sluoksnius iš puslaidininkinių medžiagų. Plonasluoksniai saulės elementai yra pranašesni tuo, jog puslaidininkinių sluoksnių storis gali būti vos keli mikronai (plonesni nei 10 mikronų), jei naudojami tiesiatarpiai puslaidininkiai. Dėl tokių mažų storių, galima sukurti ir lanksčius plonasluoksnius modulius. Kadangi plonasluoksniai saulės moduliai yra plonesni, nei kristalinio silicio saulės moduliai, jų gamybos kaštai gali būti mažesni, bet dėl to kenčia ir šių modulių efektyvumas, kuris yra mažesnis nei iš kristalinio silicio elementų sudaryto saulės modulio. Šiuo metu didžiausias efektyvumas naudojant plonasluoksnių elementų technologiją yra 23,4 % [3].

Labiausiai yra paplitę trys plonasluoksnių elementų tipai: amorfinio silicio, kadmio telūrido, vario indžio galio diselenido. [1], [6], [7].

Viena iš pirmųjų plonasluoksnių elementų medžiagų buvo amorfinis silicis (a-Si). Amorfinis silicis nuo kristalinio silicio skiriasi atomų išdėstymu. Kristaliniame silicyje atomai išsidėstę tvarkingai, na o amorfiniame silicyje jie yra išsidėstę netvarkingai. Dėl skirtingos atomų struktūros skiriasi amorfinio ir kristalinio silicio draustinės juostos plotis. Draustinės juostos plotis amorfiniam siliciui siekia 1.7 eV, kai kristalinio silicio draustinės juostos plotis siekia 1.1 eV. [1].

Plonasluoksnis saulės elementas iš kadmio telūrido (CdTe) yra žinomas kaip saulės elementas su idealiu draustinės juostos pločiu (1.45 eV) ir savo laiku buvo pripažintas kaip labai perspektyvi technologija. Iš kadmio telūrido pagamintas plonasluoksnis modulis yra lengvai pagaminamas, palyginus su kitomis plonasluoksnių saulės elementų technologijomis, tačiau dėl kadmio toksiškumo iškyla problemų tolimesniam šios technologijos vystymui. [1].

Vario indžio diselenido (CIS) plonasluoksniai saulės elementai irgi pasižymi aukštais naudingumo koeficientais, tačiau didžiausia šios technologijos problema yra riboti indžio resursai. Indis yra plačiai naudojamas gaminti plokštiems ekranams, tokiems kaip televizoriai ir kompiuterių monitoriai. [1].

#### 1.1.3 Kelių p-n sandūrų (tandeminiai) saulės elementai

Tai yra trečiosios kartos fotovoltinė technologija, kuri yra pritaikyta absorbuoti didžiąją dalį saulės šviesos spektro. Kelių *p-n* sandūrų saulės elementai (kitaip dar žinomi kaip tandeminiai saulės elementai) yra sudaryti iš kelių kristalinių sluoksnių, kurių kiekvienas turi skirtingą draustinės juostos plotį. Vienos *p-n* sandūros fotovoltinio elemento efektyvumas negali viršyti Shockley-Queisser ribos (33,7 % 1,1 eV draustinės juostos pločiui) [5], o kelių medžiagų ir kelių *p-n* sandūrų panaudojimas leidžia peržengti šią ribą. 1 pav. yra pavaizduota tipinė kelių sandūrų fotovoltinio elemento struktūra ir atskirų sluoksnių sugeriami fotonų spektrai. Pastebime, jog viršutinio sluoksnio p-n sandūroje bus absorbuojama trumpesnių bangų ilgių šviesa nei žemesniuose sluoksniuose, kur draustinės juostos plotis siauresnis. Kuo trumpesnis saulės ėlementai gali pasiekti 86 % efektyvumą [5], tačiau tuomet elementas būtų sudarytas iš begalinio kiekio *p-n* sandūrų. Kol kas vargu ar realybėje pavyktų pasiekti tokį saulės elemento efektyvumą. Taip pat, tokie fotovoltiniai elementai sudaryti iš keleto p-n sandūrų yra patvaresni, kai yra veikiami radiacijos, kuri sklinda iš kosmoso. Būtent dėl to ši technologija yra labiausiai pritaikoma tiekiant elektros energiją palydovams. [1].



1 pav. Kelių p-n sandūrų fotovoltinis elementas. [6].

#### 1.2 Kristalinio silicio fotovoltinio modulio struktūra

Kristalinio silicio elementų saulės modulių struktūra yra gana paprasta. Modulis susideda iš grūdinto stiklo, laminavimo plėvelės, nuosekliai sujungtų saulės elementų, galinės plokštės (stiklo arba plastmasės), kontaktų dėžutės su diodais ir (dažniausiai) rėmo. Paprastai kalbant, saulės modulis yra sudarytas iš serijos saulės elementų (celių), sujungtų nuosekliai, kurios yra apsaugotos priekinio stiklo ir galinės plastmasinės plokštės arba stiklo. Visos šios saulės modulio skirtingos dalys yra vakuume ilaminuojamos į viena visumą, panaudojant laminavimo plėvelę. Kristalinio silicio saulės moduliai būna dviejų tipų: polikristaliniai ir monokristaliniai. Toks saulės modulių skirstymas atsiranda dėl skirtingų naudojamų saulės elementų. Polikristaliniai silicio saulės moduliai dažniausiai būna ryškesnės mėlynos spalvos, o jo saulės elementu paviršiuje galima ižvelgti kiek netvarkinga spalvų pasiskirstymą, gaunamą ėsdinant skirtingų orientacijų kristalitus. Monokristalinių saulės elementų paviršių dažniausiai galima tvarkingiau struktūruoti, daugiau susilpninti atspindžius ir todėl jiems būdinga tamsiai mėlyna spalva (kartais net artima juodai spalvai). Taip pat monokristalinio silicio saulės modulio maksimali galia yra didesnė nei to paties ploto polikristalinio silicio saulės modulio, nes kiekvienas elementas generuoja daugiau elektros srovės ploto vienetui. Anksčiau polikristaliniai moduliai buvo pranašesni savo technologijos pigumu, lyginant su monokristalinio silicio moduliais, tačiau technologijos taip patobulėjo, jog polikristalinio ir monokristalinio silicio modulių kainos beveik susilygino, jei jas perskaičiuotume vienam instaliuotos galios vatui. [8].



2 pav. Saulės modulio struktūra su plastikine galine plokšte arba galine stiklo plokšte. [9].

#### 1.2.1 Stiklas

Stiklas yra sunkiausia saulės modulio dalis. Jis apsaugo modulį nuo išorinių fizinių veiksnių ir užtikrina saulės modulio tvirtumą. Saulės moduliui naudojamas grūdintas stiklas– tai toks stiklas, kurio kietumas, tvirtumas yra žymiai didesnis nei paprasto stiklo. Taip pat šiame stikle turi būti mažai geležies jonų, jog jis pasižymėtu aukštesniu šviesos pralaidumu, siekiant, kad būtų išgaunamas kuo didesnis saulės modulio efektyvumas. Tokie stiklai angliškai dar vadinami "solar glass". [10], [11].

#### 1.2.2 Galinė plokštė

Galinė plokštė saulės modulyje naudojama tam, jog elektriškai izoliuotų saulės elementus bei juos apsaugotų iš galinės saulės modulio pusės nuo oro sąlygų kitimo ir drėgmės. Dažniausiai naudojama balta plastmasinė plokštė, tačiau galinių plokščių gali būti skirtingų storių, spalvos ir medžiagos. Šiuo metu smarkiai plinta iš dviejų stiklų sulaminuoti saulės moduliai. Toks modulis dėl dvigubo stiklo pasižymi ilgaamžiškumu ir savo tvirtumu. [10], [11].

#### 1.2.3 Laminavimo plėvelė

Viena svarbiausių saulės modulio dalių yra laminavimo plėvelė. Laminavimo plėvelė suriša skirtingus saulės modulių sluoksnius į vieną visumą. Anksčiau dažniausiai būdavo naudojama EVA (Ethylene-vinyl acetate) plėvelė, bet šiuo metu smarkiai rinkoje plinta ir POE (Polyolefin Elastomeric) laminavimo plėvelės, kurios yra pranašesnės dėl atsparumo stiprių elektrinių laukų sukeltai PID degradacijai (angl. *potential-induced degradation*). Naudojant laminavimo aparatus, saulės elementai yra sulaminuojami tarp laminavimo plėvelių, kartu išsiurbiant tarp jų buvusį orą.

Skirtingoms laminavimo plėvelėms yra naudojama skirtinga laminavimo temperatūra. EVA plėvelę yra patariama laminuoti 140-145°C temperatūroje, kai POE rekomenduojama laminuoti 160°C temperatūroje. Laminavimo plėvelė užtikrina saulės modulio dalių ilgaamžiškumą. Jei saulės modulis yra nekokybiškai sulaminuojamas, į jį gali patekti oro, kas reikštų greitesnę modulio degradaciją. Pirminiai blogo sulaminavimo ženklai yra atsiradę oro burbulai tarp modulio sluoksnių, taip pat galimas EVA plėvelės pageltonavimas. [10], [11].

#### 1.2.4 Rėmas

Saulės modulio rėmas dažniausiai yra gaminamas iš aliuminio ir būna juodos arba sidabrinės spalvos. Rėmo funkcija yra sutvirtinti, apsaugoti ir leisti praktiškai panaudoti saulės modulį. Rėmas ant modulio yra uždedamas naudojant silikoną, kuris užtikrina, jog į saulės modulio vidų nepatektų oras ar drėgmė. Kaip jau minėjau anksčiau, saulės modulius galima gaminti ir berėmius, tada dažniausiai vietoj galinės plastikinės plokštės yra naudojamas stiklas. Kai yra naudojamas stiklas, kaip galinė plokštė saulės modulio, papildomai užpildomi silikonu ir berėmio modulio kraštai, taip apsaugant jį nuo fizinių pažeidimų, nes grūdinto stiklo silpniausia vieta yra jo kraštai. [10], [11].

#### 1.2.5 Kristalinio silicio saulės elementai

Tai yra pati svarbiausia kristalinio silicio saulės modulio sudedamoji dalis, kuri paverčia Saulės šviesos energiją į nuolatinę elektros srovę. Pirmiausia, kuo didesnė modulį pasiekiančios spinduliuotės dalis turi būti sugerta ir kuo platesniame spektro ruože. Saulės elementai veikia dėl vidinio fotoefekto reiškinio, kai sugeriant fotonus yra sukuriamos elektronų bei skylių poros. Šio proceso metu valentinis (sudarantis valentinį ryšį) elektronas yra "išlaisvinamas" ir gali dalyvauti pernešant krūvį. Į jo paliktą laisvą vietą gali ateiti kitas valentinis elektronas, tai atitiktų laisvos vietos, "skylės" judėjimą– tai fotolaidumo reiškinys. Jei laisvieji elektronai ir skylės difunduoja nevienodai, tai galima sudaryti sąlygas, kad krūvininkai atsiskirtų erdvėje tai vadinamasis Dembero efektas. Vis dėlto tokį efektą naudojantis saulės elementas būtų neefektyvus. Daug efektyviau krūvininkus atskiria vidinis elektrinis laukas, kurį galima sukurti skirtingai legiruojant puslaidininkio sritis, t.y. pagaminant diodą. Supaprastintai tariant, klasikiniu atveju saulės elementas yra tiesiog didelio ploto puslaidininkinis *p-n* diodas skaidriame korpuse. Standartiniai saulės elementai yra gaunami naudojant vieną iš dviejų p-tipo boru legiruotu silicio padėklų (polikristalinio arba monokristalinio silicio). [8], [12].

Saulės elementai dažniausiai būna gaminami kvadrato formos. Monokristaliniai saulės elementai yra gaunami iš silicio padėklų (angl. *wafers*), išpjautų iš monokristalinio luito, kuris yra išauginamas Czochralski (CZ) arba zoninio lydymo (FZ) procesų metu. Polikristaliniai saulės

elementai panašiai kaip ir monokristaliniai saulės elementai, yra gaminami iš kvadratinių silicio plokštelių, išpjaunamų iš polikristalinio luito. Polikristaliniai luitai gali būti pagaminami daug greičiau, pvz., kad ir iš likusių monokristalinių gabalėlių, juos perlydant kvarco tigliuose į gana tvarkingos formos luitus. Saulės elementų paviršiuose yra formuojamos mikrometrų eilės dydžių piramidinės struktūros, sumažinančios krintančios šviesos atspindžius. Kristalinio silicio elementuose suformuojama stipriai fosforu legiruota *n* (t.y. turinti daugiau elektronų) tipo sritis ant boru legiruotos *p*-tipo (t.y. turinčios daugiau skylių) saulės elemento padėklo, taip sudarant *p-n* sandūrą. Plokštelės pusėje, kuri nukreipta į šviesos šaltinį, sukuriamas siaurų krūvininkus surenkančių kontaktų tinklas (angl. "fingers"– pažodžiui verčiant "pirštai"). Ši pusė taip pat yra papildomai dengiama skaidriu dielektriniu šviesos atspindžius mažinančiu sluoksniu. Priešingoje plokštelės pusėje elektrodas paprastai yra ištisinis. Tipinė kristalinio silicio saulės elemento schema yra pavaizduota 3 pav. Siekiant mažinti krūvininkų rekombinaciją, dažnai prie šio kontakto puslaidininkis yra papildomai legiruojamas, dėl to sukuriamas vidinis elektrinis laukas (angl. *BSF – back surface field*), atstumiantis šalutinius krūvininkus toliau nuo paviršiaus. [8], [13].

Pagrindiniai kristalinio silicio saulės modulio elemento parametrai yra trumpojo jungimo srovė  $I_{sc}$ , atviros grandinės maksimali įtampa  $V_{oc}$ , užpildos daugiklis FF, maksimali generuojama galia  $P_{max}$  ir šviesos energijos vertimo elektra efektyvumas  $\eta$ . Trumpojo jungimo srovę  $I_{sc}$  gauname, kai saulės elemento įtampa yra lygi nuliui [6]:

$$I_{SC} = \mathbf{q} \cdot \mathbf{G} \cdot \left( L_n + L_p \right), \tag{1}$$

čia q – elektrono krūvis; G – krūvininkų generacijos sparta, cm<sup>-3</sup>/s; L<sub>s</sub> ir L<sub>e</sub> – atitinkamai skylių ir elektronų difuzijos nuotolis. Saulės elemento trumpojo jungimo srovė priklauso nuo ploto, nuo fotonų kiekio tenkančio saulės elemento plotui, šviesos spektro pločio ir krūvininkų gyvavimo trukmės. Esant atviros grandinės atveju gauname maksimalią saulės elemento įtampą [6]:

$$V_{OC} = \frac{n \cdot k \cdot T}{q} \cdot \ln\left(\frac{I_L}{I_0} + 1\right),\tag{2}$$

čia n – idealumo koeficientas, kuris įvertina, kaip saulės elemento darbo režimas nukrypsta nuo idealaus diodo veikimo,  $I_L$  – srovė, tekanti apšvietus elementą;  $I_0$  – tamsinė (nuotekio) srovė – srovė, kuri teka esant neapšviestam saulės elementui. Maksimalią saulės elemento galią gauname pagal tokią formulę [6]:

$$P_{max} = I_{SC} \cdot V_{OC} \cdot FF, \tag{3}$$

čia FF – užpildymo daugiklis. FF galima nustatyti iš voltamperinės charakteristikos. Tai yra didžiausias galimas stačiakampis plotas voltamperinėje charakteristikoje. Kadangi nuo jo priklauso maksimali generuojama fotovoltinio elemento galia, stengiamasi FF daugiklį padaryti kuo didesnį. Užpildymo daugiklis išreiškiamas taip [6]:

$$FF = \frac{I_{MP} \cdot V_{MP}}{V_{OC} \cdot I_{SC}},\tag{4}$$

Saulės fotovoltinio elemento Saulės šviesos energijos vertimo į elektros energiją efektyvumą galime apskaičiuoti pagal formulę [6]:

$$\eta = \frac{I_{SC} \cdot V_{OC} \cdot FF}{P_0},\tag{5}$$

kur P<sub>0</sub> – saulės elemento paviršiaus plotui tenkanti šviesos galia. [6], [8], [14].



3 pav. Tipinė kristalinio silicio saulės elemento schema.

#### 1.2.6 Kontaktų dėžutė

Kontaktų dėžutės funkcija yra apsaugoti apsauginius apėjimo diodus ir išvesti saulės modulio kontaktus į išorę tam, jog saulės moduliai galėtų būti jungiami į inverterį arba nuolatinės elektros srovės tiekimo sistemą. Išeinantys laidai galuose dažniausiai turi standartines MC4/MC5 jungtis. Ant

saulės fotovoltinių modulių montuojamų kontaktų dėžučių būna įvairių tipų. Keletą skirtingų tipų kontaktų dėžučių galime matyti 4 pav. Čia yra atvaizduota dažniausiai naudojama kontaktų dėžutė su 3 apėjimo diodais (centre) ir dvi mažos nestandartinės kontaktų dėžutės su vienu apsauginiu apėjimo diodu (dešinėje ir kairėje). [10], [11].



4 pav. SoliTeK kompanijoje saulės moduliams naudojamų kontaktų dėžučių nuotrauka. Centre– dažniausiai naudojama kontaktų dėžutė su 3 apėjimo diodais. Kraštuose– nestandartinės kontaktų dėžutės su vienu apsauginiu apėjimo diodu.

#### 1.2.7 Kristalinio Si saulės fotovoltiniuose moduliuose esantys apsauginiai diodai

Puslaidininkinis diodas yra dviejų elektrodų prietaisas, turintis vieną p-n sandūra. Kristaliniuose silicio saulės moduliuose ir modulių sistemose yra naudojami dviejų tipų diodai: apėjimo (angl. "bypass") ir blokuojantys (angl. "blocking") diodai [15]. Šie diodai skiriasi savo atliekama funkcija. Apėjimo diodai gali šuntuoti srovę aplink saulės elementus, kurie turi defektų arba yra šešėlyje. Kristalinio silicio (c-Si) fotovoltinių saulės modulių elementai yra jungiami nuosekliai, todėl visa fotovoltinio modulio galia priklauso nuo prasčiausiai veikiančio saulės elemento. Apsauginiai diodai, šuntuojantys srovę aplink prasčiau veikiantį saulės elementą, ne tik sumažina saulės modulių elektros galios praradimus, bet taip pat sumažina ir tikimybę atsirasti "karštiesiems" taškams (angl. "hot-spot"). "Karštieji" taškai - tai tokios vietos fotovoltinėse saulės elementuose, kurios labiau įkaista, lyginant su kitomis elementų vietomis. Pagrindinė problema atsiranda tuomet, kai dalis saulės modulio elementų atsiduria šešėlyje. Per fotovoltinius elementus, kurie yra veikiami šešėlio, teka silpnesnė srovė atgaline kryptimi. Dėl šios priežasties ir gerai apšviestųjų saulės elementų įtampų įtakos, fotovoltiniai elementai, esantys šešėlyje, kaista labiau nei elementai, esantys apšviestoje saulės modulio dalyje. Ypač greitai kaista saulės elementai, kurie turi mikro įtrūkimų. Mikro įtrūkimai gali atsirasti saulės modulių gamybos procese, netinkamai transportuojant ar instaliuojant saulės modulius [16]. Apėjimo diodai yra jungiami lygiagrečiai

atvirkščia kryptimi, nei yra sujungti saulės elementai, ir dažniausiai vienas toks diodas yra prijungiamas prie 12-24 elementų.

Blokuojantys diodai gali būti naudojami kitam tikslui– siekiant, kad tamsoje srovė netekėtų atgal į saulės modulį iš, pavyzdžiui, prijungtų akumuliatorių baterijų ar kitų įtampos šaltinių nuo tinklo atjungtuose saulės modulių sistemose. Naktį, kai saulės modulio įtampa nukrenta arti nulio, iš baterijos į saulės fotovoltinį modulį gali pradėti tekėti srovė, taip iškraunant sukauptą elektros energiją akumuliatorių baterijoje. Tačiau, šias laikais blokuojantys diodai naudojami rečiau, nes tokiose sistemose dabar jau naudojami krovimo jungikliai, kurie būtent ir neleidžia tekėti srovei iš baterijų ar kitų šaltinių į saulės modulį. [15]–[19].

Apsauginiai diodai dažniausiai yra montuojami kontaktų dėžutėje, taip apsaugant juos nuo aplinkos poveikio. Tačiau apėjimo diodus taip pat galima tiesiog įlaminuoti į saulės modulio struktūrą [4]. Toks apėjimo diodų montavimo būdas leistų panaudoti daugiau diodų mažesniam saulės elementų kiekiui, taip labiau sumažinant šešėliavimo poveikį saulės moduliui, bei gamybos kaštus, nes nebereikėtų montuoti kontaktų dėžutės ant fotovoltinio saulės modulio. Didžiausia problema atsiranda diodo gedimo atveju. Gedimų gali pasitaikyti dėl nepakankamos perteklinės šilumos šalinimo, veikiant apėjimo diodams. Tiesiog įlaminuojamų į saulės fotovoltinius modulius apėjimo diodų pakeisti nebūtų įmanoma, o įmontuotus kontaktų dėžutėje diodus pakeisti yra gana paprasta. Atliekama nemažai temperatūros matavimo tyrimų su įlaminuojamais apėjimo diodais, nes būtent nepakankamas šilumos laidumas ir perteklinės temperatūros šalinimas yra didžiausia pasitaikanti gedimo priežastis šiems diodams. Todėl yra keliami tam tikri reikalavimai apsauginiams apėjimo diodams, jog būtų kiek įmanoma labiau sumažinama jų gedimų rizikos tikimybė. [4], [20] [21].

#### 1.2.8 Kristalinio silicio saulės modulio gamybos procesas

Kristalinio silicio moduliai yra gaminami surinkimo linijoje, ši linija gali būti sudaryta iš atskirų mašinų skirtingiems procesams, arba pati surinkimo linija yra pilnai automatizuota. Viskas prasideda nuo saulės elementų paruošimo. Pirma kiekvienas kristalinio silicio saulės elementas yra atrūšiuojamas pagal elektrines savybes, kurios buvo išmatuotos Saulės šviesos imitatoriaus pagalba. Tuomet, automatizuota gamybos mašina sujungia saulės elementus sulituodama plokščius metalinius laidus prie saulės elementų kontaktų. Ant stiklo sudėliojus tam tikras saulės elementų konfigūracijas (6x10; 4x8 ir t.t), dedama termoplastinė plėvelė, kuri laminatoriaus pagalba sulaminuoja ir užsandarina saulės elementus tarp dviejų plokščių. Laminavimo įrenginio apdorojimo kamera turi temperatūros, vakuumo ir atmosferos slėgio kitimo galimybes, kurios yra nepriklausomai kontroliuojamos tam, kad būtų sudarytos optimalios laminavimo sąlygos tam tikroms medžiagoms ir konfigūracijoms. Gamybos pabaigoje yra išmatuojamos kiekvieno saulės modulio savybės su Saulės šviesos imitatoriumi. [22], [23].

Taigi, saulės modulio gamybos procesą sudaro šie etapai:

- 1. Saulės elementų rūšiavimas pagal jų elektrines savybes.
- 2. Kruopščiai nuvalomas stiklas.
- 3. Sukarpoma termoplastinė (laminavimo) plėvelė, kuri dedama ant stiklo.
- 4. Išdėliojama saulės elementų matrica ant termoplastinės laminavimo plėvelės ir stiklo.
- 5. Kai saulės elementai išdėliojami ant stiklo ir termoplastinės laminavimo plėvelės, elementų eilutės kontaktais sulituojamos į sistemą ir kontaktai paruošiami išvesti į išorę.
- Tuomet gamybos darbuotojas patikrina modulio srovę ir įtampą neapšviečiant jo, dažniausiai tai atliekama paprastu multimetru.
- Atlikus tarpinį patikrinimą, vėl dedamas sluoksnis termoplastinės laminavimo plėvelės ir stiklo, arba plastikinės plokštės.
- 8. Toks sluoksnių "sumuštinis" yra sulaminuojamas laminatoriuje.
- Saulės modulio gamyba užbaigiama uždedant kontaktų dėžutę su diodais ir rėmą. Taip pat prieš supakuojant saulės modulį atliekamas saulės imitatoriaus testas, kurio metu sužinome saulės modulio elektrines savybes. [22].

#### 1.3 Saulės modulio apsauginio apėjimo diodo svarbiausi parametrai

Fotovoltiniuose saulės moduliuose yra naudojami p-n sandūros silicio arba Šotkio (angl. Schottky) apsauginiai apėjimo diodai. Silicio p-n sandūros diodai suformuojami sujungus p tipo ir n tipo puslaidininkines medžiagas. Šotkio diodas yra gaminamas kiek kitaip, jį sudaro metalinis elektrodas ir puslaidininkis. Kai yra suformuojami p-n sandūros ar Šotkio diodai, susidaro nuskurdinta sritis. Diodų su p-n sandūra nuskurdinta sritis yra platesnė palyginus su Šotkio diodu. Tai atsispindi, kai diodai veikia tiesiogine kryptimi. Šotkio diodo tiesioginės krypties "atsidarymo" įtampa yra mažesnė nei p-n silicio diodo ir siekia apie 0,4 V, kai p-n diodo atsidarymo įtampa yra apie 0.7 V [24]. Tačiau kai diodai veikia atgaline kryptimi, p-n diodas tampa pranašesnis tuo, jog jo atgalinė nuotėkio srovė yra mažesnė nei Šotkio diodo. Kuo didesnė nuotėkio srovė, tuo didesnius elektros galios nuostolius patiria fotovoltinis saulės modulis [25]. Taip pat, naudojant apėjimo diodą nepataisomai. Svarbi yra ir atgalinės krypties pramušimo įtampos vertė, ties kuria diodo nuotėkio srovė pradeda kilti eksponentiškai, tačiau ši reikšmė priklauso nuo gamintojo. Paprastai Šotkio diodo atgalinės krypties pramušimo įtampos būna mažesnės nei p-n tipo apėjimo diodo. [17], [26], [27].

Apsauginiai apėjimo diodai turi atitikti tam tikrus kriterijus tam, kad juos būtų galima pritaikyti saulės moduliuose. Apėjimo diodų pagrindinė funkcija yra "šuntuoti" srovę aplink nuosekliai sujungtų saulės elementų grupę, kurioje yra prasčiau veikiančių saulės elementų dėl šešėliavimo ar kitų priežasčių. Saulės moduliuose dažniausiai yra naudojami trys apsauginiai diodai. Įprastai vienas toks diodas yra prijungtas prie 20-ties nuosekliai sujungtų saulės elementų grupės, kai silicio kristalinį modulį sudaro 60 elementų ir prie 24-ių saulės elementų grupės, kai modulį sudaro 72 kristalinio silicio saulės elementai. Šis skaičius yra gautas, atsižvelgus į tai, jog diodas pradeda "šuntuoti" srovę, jei bent vienas saulės elementas atsidurs šešėlyje. Maksimalų saulės elementų skaičių, tenkantį vienam diodui, galime apskaičiuoti, žinodami saulės elemento atgalinės įtampos pramušimo įtampos reikšmę ir diodo atviros grandinės įtampos reikšmę pagal formulę [28]:

$$V_{bypass} = V_S - (n-1) \cdot V_{OC}, \tag{6}$$

čia  $V_{bypass}$  – diodo atsidarymo įtampa,  $V_S$  – saulės elemento atgalinė pramušimo įtampa, n maksimalus saulės elementų skaičius atitenkantis vienam apsauginiam apėjimo diodui, o  $V_{OC}$  – saulės elemento atviros grandinės įtampa. Polikristalinio silicio elementų pramušimo įtampa yra tarp 12 V ir 20 V, o monokristalinio silicio elementams ši įtampa siekia iki 30 V [27]. Kristalinio silicio saulės elementų atviros grandinės įtampa priklauso nuo gamintojo, bet ši reikšmė apytiksliai būna apie 0,5 V. Šiek tiek patvarkę (6) formulę, gauname n<sub>max</sub> diodui tenkančių saulės elementų skaičių [28]:

$$n_{max} < \frac{V_s - V_{bypass}}{0.50} + 1.$$
 (7)

Jei turėtume Šotkio diodą, kurio atsidarymo įtampa apie 0.4 V ir saulės modulį, sudarytą iš polikristalinio silicio elementų, kurių minimali pramušimo įtampa yra 12 V, o atviros grandinės įtampa apie 0.5 V, gautume, jog apėjimo Šotkio diodui saugiai galime prijungti 24-is polikristalinio silicio tipo elementus.

Itin svarbu yra numatyti diodo veikimo temperatūrą. Apsauginių diodų gamintojų būna numatyta, jog apsauginių apėjimo diodų maksimali galima veikimo temperatūra neviršytų tam tikros nustatytos temperatūros ribos. Norint užtikrinti ilgalaikį apsauginio diodo veikimą, yra reikalaujama, jog diodo veikimo temperatūra būtų 50°C žemesnė už maksimalią leistiną diodo veikimo temperatūrą. Pagal temperatūrinius reikalavimus apėjimo diodams, *p-n* silicio tipo apsauginių diodų maksimali leistina temperatūra yra 175 °C. Šotkio diodui įprastai yra taikoma maksimali 125 °C temperatūra. Visi temperatūriniai ir kiti parametrai, kuriuos turi atitikti apėjimo apsauginiai diodai yra pateikti pirmoje lentelėje. [19].

Visi šie reikalavimai taip pat yra taikomi ir tiesiog į saulės modulį įlaminuojamiems apėjimo diodams. Šiuos kriterijus tampa sunku įgyvendinti, nes aplink įlaminuojamus apėjimo diodo esančių medžiagų šiluminis laidumas yra mažesnis nei standartinių diodų, kurie yra montuojami kontaktų dėžutėje. Kontaktų dėžutė paprastai yra pritaikoma tam, kad perteklinė šiluma nuo šylančių diodų būtų lengviau pašalinama. Kuriant plokščiuosius įlaminuojamus diodus yra atsižvelgiama, jog jų veikimo temperatūra būtų kuo mažesnė, o medžiagos, iš kurių susideda pats įlaminuojamas diodas, turėtų kuo didesnes savitojo šilumos laidumo vertes, jog būtų kuo efektyviau pašalinama perteklinė veikiančio diodo šiluma. [27].

	Diodų temperatūros reikalavimai		
	Maksimali leistina	Ilgo termino veikimo	
	temperatūros riba	temperatūra	
Sąlygos, kuriomis	1000 W/m2 apšvieta	1000 W/m2 apšvieta	
veikiant diodai	40 °C lauko temperatūra	40 °C lauko temperatūra	
neturėtų viršyti	Esant 1.5 saulės modulio	Esant 1.0 saulės modulio	
temperatūros ribų	trumpojo jungimo srovė	trumpjo jungimo srovės vertė	
p-n diodai	175 °C	125 °C	
Šotkio diodai	125 °C	75 °C	

1 lentelė. Apėjimo diodų temperatūriniai reikalavimai. [19].

#### 1.4 Pasitaikantys gedimai apėjimo diodams

Neveikiantis apsauginis apėjimo diodas apibūdinimas kaip diodas, kuris nebegali "šuntuoti" srovės aplink grupę nuosekliai sujungtų saulės elementų, kurioje bent vienas elementas yra šešėliuojamas, ar kaip nors kitaip paveiktas. Diodų gedimo atveju yra galimi du režimai: esant trumpajam jungimui ir esant atvirajai grandinei. Apėjimo diodui sugedus ir esant trumpajam jungimui, visa saulės elementų grupė, kuri buvo prijungta prie diodo, yra užtrumpinta. Tokiu atveju fotovoltinis saulės modulis praranda labai daug galios. Nepaisant to, kad saulės modulis praranda nemažai galios, nekyla didesnės rizikos saugumui ir gaisro pavojaus [21], [29].

Kai apėjimo diodo du gnybtai po gedimo lieka elektriškai izoliuoti, tuomet yra sakoma, jog diodas sugedo atviroje grandinėje. Tokiu atveju saulės modulio galia nesumažėja, nes jis tiesiog pradeda veikti lyg nebūtų prijungto apėjimo diodo, bet atsiranda kitų rizikų. Kai nebėra veikiančio diodo, prijungto prie tam tikros saulės elementų grupės, atsiranda galimybė, jog fotovoltiniams elementams, kurie atsiduria šešėlyje, teks aukšta įtampa atgaline kryptimi. Tai gali lemti "karštųjų taškų" (angl. hot spots) atsiradimą, o dėl to labai padidėja gaisro pavojus, ypač jei saulės modulio struktūra yra sudaryta iš priekinio stiklo ir galinės plastmasinės plokštės. [21].

Yra keli dažniausiai pasitaikantys atvejai, kurie nulemia apėjimo diodų gedimus. Diodų gedimai dažniausiai pasireiškia arba esant elektrostatinei iškrovai, arba nepakankamai sparčiam diodo šilumos pašalinimui, kuris priveda prie šiluminio diodo pramušimo.

#### 1.4.1 Elektrostatinė iškrova

Elektrostatinės iškrovos metu labai aukštos įtampos impulsai sukelia didelius srovės šuolius dioduose per labai trumpą laiką. Labai dažnai pasitaiko diodų pažeidimų dėl elektrostatinės iškrovos ir pačiose saulės modulių gamybos patalpose. Impulsiniai Saulės šviesos imitatoriai (angl. flash testers), kurie naudojami nustatyti elektrinius fotovoltinių saulės modulių parametrus esant STC (1000W/m<sup>2</sup> apšvieta, 25°C ir 1,5 oro masės vertė) sąlygomis, gali sukelti didelius srovės šuolius dioduose. Atvejų, kai diodai yra sugadinami dėl saulės imitatoriaus pasitaiko retai, tačiau labai dažnai pasitaiko gedimų atvejų esant žaibavimui. Tiesioginis žaibo pataikymas į saulės modulį būna katastrofiškas, tačiau apsauginius apėjimo diodus dėl elektromagnetinės indukcijos gali sugadinti ir netoliese trenkęs žaibas. [21], [30].

#### 1.4.2 Šiluminis pramušimas

Šiluminis pramušimas yra viena iš dažniausiai pasitaikančių priežasčių, dėl kurios apėjimo diodai gali sugesti. Šiluminis pramušimas gali įvykti tuomet, kai diodas yra nepakankamai aušinamas. Pasinaudosiu 5 pav. aiškinant šiluminį pramušimą apėjimo dioduose. Šiluminis pramušimas dioduose dažniausiai atsitinka tuomet, kai srovės kryptis diode keičiasi iš tiesioginės į atgalinę. Persijungimas įvyksta, kai nuo saulės modulio staiga pašalinamas šešėlis ir diodas nebeatlieka "šuntavimo" funkcijos. Kai diodu teka srovė tiesiogine kryptimi, jame išsiskirianti šiluminė galia po truputį krenta, nes diodo įtampa krenta didėjant diodo temperatūrai. Tam tikru metu, diodo temperatūra gali nusistovėti, jei kontaktų dėžutei ir pačiam saulės moduliui (kai diodas yra tiesiog įlaminuojamas į saulės modulius) perduodama šiluminė galia susilygina su generuojama diode. 5 pav. matome, jog kuo sistemos, kurioje yra apėjimo diodas, šiluminė varža yra mažesnė, tuo ir pati diodo darbinė temperatūra yra mažesnė. Šiluminė varža nusako kaip gerai tam tikra medžiaga nepraleidžia šilumos. Diodui temperatūra išlieka tokia pati, kai diodas persijungia iš tiesioginės į atgalinės krypties veikimą. Jei persijungimo atveju diodo generuojama galia tiesioginės krypties veikimo atveju yra didesnė už atgalinės krypties veikimo generuojamą galią, tuomet diodo temperatūra pradeda kristi ir nusistovi ties žymiai mažesne temperatūros verte. Tačiau, kai apsauginio apėjimo diodo tiesioginės krypties veikimo metu buvo generuojama mažesnė galia, nei galia generuojama pasikeitus diodui į atgalinę krypti, tuomet diodo temperatūra pradeda kilti. Kylant temperatūrai didėja ir atgalinės srovės vertė.

16

Tai yra negrįžtamas procesas ir temperatūra didės tol, kol įvyks šiluminis pramušimas ir diodas suges. [21], [29], [30].



5 pav. Kritinės temperatūros dioduose grafinis atvaizdavimas. [29].

#### 1.5 Apėjimo diodų temperatūros nustatymo metodai.

Ankstesniame skyriuje apie apėjimo diodų parametrus minėjau, jog diodai turi atitikti tam tikrus temperatūrinius reikalavimus, jog juos būtų galima pritaikyti saulės fotovoltiniuose moduliuose. Yra keletas būdų, kaip būtų galima nustatyti diodų veikimo temperatūrą. Vienas iš galimų būdų išmatuoti diodo temperatūrą yra naudojant infraraudonųjų spindulių kamerą. Šiuo metodu diodų temperatūra nebūtų matuojama tiesioginiu sąlyčiu, kas leistų taip pat išmatuoti ir įlaminuojamų apėjimo diodų temperatūrą [31]. Tačiau itin tikslios infraraudonųjų spindulių kameros yra gana brangios ir toks metodas nebūtinai būtų itin tikslus, nes duomenys gali būti iškraipomi dėl šalia šylančių kitų fotovoltinių elementų. IEC (Tarptautinė elektrotechnikos komisija) aprašė, kaip reikėtų įvertinti ir nustatyti, ar diodo darbinė temperatūra neviršija nustatytos maksimalios gamintojo reikšmės [32]. Bet dėl skirtingų kontaktų dėžučių tipo, diodo montavimo vietos saulės moduliuose ir naudojamos įrangos, šis metodas tampa sunkiai pritaikomas. Todėl, buvo sukurtas dar vienas metodas, kuris naudoja diodų įtampos priklausomybę nuo temperatūros. Kylant diodo temperatūrai,

jo įtampos reikšme krenta. Žinant šią priklausomybę galime įsivertinti diodo temperatūrą pagal įtampos pokyti. [19], [33].

#### 1.5.1 diodų testavimo metodas pagal IEC 61215 standartą

Šis IEC sukurtas temperatūros nustatymo metodas yra skirtas nustatyti apsauginių apėjimo diodų darbinės temperatūros ribą sąlygomis, kurios atitiktų žiauriausias galimas aplinkos sąlygas pasitaikančias kontaktų dėžutėse. IEC temperatūros matavimo metodą nebūtų galimybės panaudoti tiesiog įlaminuotiems į saulės modulius apėjimo diodams. Testavimo procedūra yra atliekama, kai apėjimo diodu teka trumpojo jungimo saulės modulio srovė, esant 75 °C aplinkos temperatūrai. Tai atliekama naudojant tam tikras krosneles, specialiai skirtas tokiems eksperimentiniams tyrimams. Norint nustatyti kontaktų dėžutėje esančią temperatūrą, reikia atsižvelgti į kontaktų dėžutės gamintojo nurodytą šiluminę varžą. Kontaktų dėžutės temperatūra gali būti nustatyta naudojant šia formulę [33]:

$$V_{KD} = T_A + R_{KD} \cdot U_D \cdot I_D, \tag{7}$$

čia  $V_{\rm KD}$  – kontaktų dėžutės temperatūra,  $T_{\rm A}$  – aplinkos temperatūra krosnelėje,  $R_{\rm KD}$  – kontaktų dėžutės šiluminė varžą,  $U_{\rm D}$  – diodo įtampa ir  $I_{\rm D}$  – diodu tekanti srovė. Šio testavimo metu diodas turi būti veikiamas saulės modulio trumpojo jungimo srovės vieną valandą. Po valandos yra išmatuojama diodo temperatūra ir įtampa. Jei diodo temperatūra būna žemesnė nei gamintojo nurodyta maksimali vertė, laikoma, jog diodas yra tinkamas naudoti saulės modulyje. IEC testavimo metodo tipinė schema yra pavaizduotas 6 pav. [33].



6 pav. Diodų testavimo schema pagal IEC 61215 standartą. [32]

#### 1.5.2 Temperatūros matavimas naudojant diodo įtampos priklausomybę nuo temperatūros

Šiuo metodu nustatant diodo galimą veikimo temperatūrą, reikia žinoti tiriamojo diodo įtampos priklausomybę nuo temperatūros. Todėl pats testas susideda iš dviejų dalių.

Pirmoje testavimo dalyje yra nustatoma diodo įtampos priklausomybė nuo temperatūros. Tam reikalingas vienas identiškas eksperimentinis diodas, su kuriuo bus nustatyta diodo įtampos priklausomybė nuo temperatūros. Įtampos priklausomybės nustatymui, diodu yra paleidžiama silpna srovė ir pats diodas yra pastatomas eksperimentinėje krosnelėje, kurioje temperatūra kils nuo 50 iki 200 °C. Diodo įtampos pokytis fiksuojamas kas 10 °C. Ties kiekviena temperatūros reikšme laukiama, kol nusistovės apėjimo diodo įtampos reikšmė ir bus pasiekta šiluminė pusiausvyra. Tokie žingsniai yra atliekami iki pat 200 °C temperatūros. Iš surinktų duomenų galime įvertinti diodo įtampos priklausomybę nuo temperatūros, kuria pasinaudodami galime nustatyti apėjimo diodo temperatūrą. Kad priklausomybė būtų gauta kuo tikslesnė, reiktų ši eksperimentą atlikti su keliais tokio pačio tipo diodais ir iš gautų duomenų išvesti vidurkį. [33].

Antroje tyrimo dalyje, turėdami diodo įtampos priklausomybę nuo temperatūros galime nustatyti diodo temperatūrą. Tai atliekama paleidžiant saulės modulio trumpojo jungimo srovę diodu maždaug vieną valandą. Po valandos reikia atjungti trumpojo jungimo srovę. Srovės staigus atjungimas sukelia staigų įtampos kritimą. Nustačius diodo įtampos pokytį atjungus saulės modulio trumpojo jungimo srovę, sužinome diodo darbinę temperatūrą. [19], [33].

### 2 Darbo metodika

#### 2.1 Eksperimento schema

Eksperimento metu buvo tiriami tiesiog į saulės modulius įlaminuojamų apėjimo diodų temperatūros, veikiant juos tiesiogine srove. Šio eksperimento schema yra pavaizduota 7 pav. Pavaizduotoje schemoje srovė yra prijungta iš srovės šaltinio (SŠ) tiesiogine kryptimi, tai atspindi prijungtų laidų pavaizduotos spalvos. Įtampos matavimui tiesiogine kryptimi yra prijungtas multimetras (M), iš multimetro išeinantys laidai prijungti tokiu pačiu poliškumu, kaip ir srovės šaltinio, jog gautos reikšmės būtų teigiamos. Apėjimo diodo temperatūrą matuosime naudojant dvi termoporas, kurios išeina iš temperatūros matavimo prietaiso (T), kuris būtent ir fiksuoja temperatūrą. Dvi termoporos buvo naudojamos tam, jog matytume, ar tolygiai pasiskirsto temperatūra įlaminuojamų apėjimo diodų plote. Iš multimetro ir temperatūros matavimo prietaiso duomenys tiesiogiai siunčiami į kompiuterį per USB jungtį ir gali būti eksportuojami į Microsoft Excel bylas.



7. pav. Eksperimento schema. Čia M – multimetras, SŠ – srovės šaltinis, K – kompiuteris, D
– tiriamasis diodas, T- temperatūros matavimo prietaisas su termoporomis.

Eksperimentu metu buvo naudojamas Tenma 72-7732A multimetras, kuris matuoja nuolatinę įtampą iki 1000 V ir nuolatinę srovę iki 10 A. Šio multimetro išmatuoti duomenis siunčiami į kompiuterį per USB jungtį, kur įsirašius pritaikyta multimetrui programą įtampos vertes galėjome fiksuoti kas sekundę 0,0001 V tikslumu.

Temperatūros fiksavimui buvo naudojamas Almemo 2490 prietaisas, kuris taip pat gautus duomenis siųsdavo į kompiuterį per USB jungtį. Taip pat, kaip ir su multimetru, naudojant pritaikytą programą, temperatūros duomenys iš dviejų termoporų buvo fiksuojami kas 3 sekundes 0,1 °C tikslumu.

## 3 Eksperimento metu gauti rezultatai

Šiame darbe buvo numatyta atlikti tyrimus tiesiog į saulės modulį įlaminuojamų plokščiųjų apėjimo diodų savybėms nustatyti. Tyrimais buvo siekiama apibendrinti:

- 1. Kiek patikimai galima susieti įlaminuojamų apėjimo diodų elektrinių savybių pokyčius su jų temperatūra?
- 2. Nustatyti galimas įlaminuojamų diodų temperatūras saulės moduliuose.
- 3. Įvertinti plokščiųjų apėjimo diodų pritaikomumą iš tyrimo rezultatų.

Deja, bet visų numatytų tyrimų atlikti nepavyko. Darbo rašymo laikotarpiu pasaulį sukrėtė COVID-19 viruso plitimas, dėl ko visame pasaulyje įsigaliojo pandemija. Ne išimtis ir Lietuva, kurioje dėl pandemijos buvo paskelbtas karantino režimas visoje šalyje. Dėl šios priežasties buvo uždarytos visos įstaigos ir teko atšaukti beveik visus numatytus tyrimus susijusius su šiuo darbu. Iki pandemijos paskelbimo buvo pradėti tik pirmieji matavimai, kurie buvo labiau susipažinimas su tiriamaisiais diodais. Vis dėlto, iš šių matavimų pavyko gauti tam tikrus duomenis ir išvadas.

Šio darbo metu buvo ištirti išviso penki tiesiog įlaminuojami *p-n* sandūros silicio apėjimo diodai. Vienas iš šių diodų buvo įlaminuotas tarp dviejų stiklų ir EVA laminavimo plėvelių. Keli tiriamieji diodai pavaizduoti 10 pav.



10 pav. Įlaminuoti ir neįlaminuotas apėjimo plokštieji tiriamieji diodai, kur (a) įlaminuotas tiriamasis apėjimo diodas ir (b) neįlaminuotas apėjimo tiriamasis diodas.



11 pav. Įlaminuoto tiriamojo apėjimo diodo tipinė struktūrinė schema, kur (a) tiriamojo bandinio stiklas, (b) EVA laminavimo plėvelės sluoksnis, (c) viršutinis apėjimo diodo kontaktas, (d) saulės elemento gabalėlis, (e) apatinis apėjimo diodo kontaktas, (f) EVA laminavimo plėvelės sluoksnis ir (g) stiklas.

Saulės modulio atskiri komponentai turi tam tikrą šiluminį laidumą. Todėl buvo įlaminuoti keli apėjimo diodai, taip atkuriant realaus iš dviejų stiklų sudaryto saulės modulio struktūrą be silicio kristalinių fotovoltinių elementų. Įlaminuoto diodo temperatūra priklauso nuo atskirų saulės modulio komponentų šiluminio laidumo, dėl tos priežasties svarbu turėti įlaminuotus diodus su išvestais kontaktais, jog galėtume palyginti rezultatus gautus tiriant neįlaminuotų ir įlaminuotų plokščiųjų apėjimo diodų parametrus.

Bandymai buvo atlikti kambario temperatūroje (22 °C), esant normaliam aplinkos slėgiui. Tiriamųjų diodų struktūra buvo sudaryta iš kristalinio silicio elemento gabalėlio prie kurių buvo prilituoti variniai kontaktai. Tiriamojo įlaminuoto apėjimo diodo tipinė struktūra atvaizduota 11 pav. Iš 11 pav. matome, jog įlaminuojamo apėjimo diodo struktūra susideda iš (c) ir (e) pažymėtų prilituotų varinių kontaktų ir (d) pažymėto saulės elemento gabalėlio. Šių tiriamųjų diodų struktūroje buvo naudojami monokristalinio silicio saulės elementų gabalėliai. Saulės elementas turi atitinkamai p ir nsritis, vienas iš kontaktų yra prilituotas prie p saulės elemento srities, kol kitas prie n srities. Naudojami kontaktai apėjimo diodo struktūroje yra pagaminti iš vario. Tai tokie patys kontaktai, kokie yra naudojami saulės modulio struktūroje jungiant saulės modulio kristalinio silicio elementus. Visuose tiriamųjų diodų struktūroje esančių p-n kristalinio monokristalinio silicio elementų gabaliuko matmenys buvo 4x28 mm. Kiekvienam neįlaminuotam diodui buvo atliekami du tyrimai, esant prijungtai 0,5 A ir 2 A nuolatinei srovei tiesiogine kryptimi. Šiais bandymais buvo matuojamos diodų tiesioginės krypties įtampos ir temperatūros kitimas per tam tikrą laiko tarpą iki tol kol vertės nusistovėjo. Plokščiųjų apėjimo diodų įtampos buvo fiksuojamos su Tenma 72-7732A multimetru, o diodų išorės temperatūra buvo matuojama naudojant Almemo 2490 prietaisą, kuris duomenis fiksavo iš termoporų, priliestų prie diodo paviršiaus. Įlaminuotam diodui buvo atliktas tik įtampos tyrimas, nes negalėjome fiksuoti įlaminuoto apėjimo diodo temperatūros tiesiogiai, kaip tai darėme su neįlaminuotais diodais. Apėjimo diodui, įlaminuotam tarp dviejų stiklų ir EVA plėvelių, buvo atliktas tyrimas esant 2 A nuolatinei tiesioginiai srovei. Tuo pačiu multimetru buvo matuojamas įlaminuoto apsauginio apėjimo p-n sandūros diodo tiesioginės įtampos pokytis per tam tikrą laiko tarpą, kol nusistovėjo diodo įtampos vertė.

# 3.1 Neįlaminuotų plokščiųjų apėjimo diodų įtampos priklausomybės tyrimas nuo temperatūros leidžiant tiesioginės krypties srovę

Šio tyrimo dalies metu buvo ištirti keturi skirtingi neįlaminuoti apėjimo p-n sandūros silicio diodai, kurie atitinkamai buvo sužymėti skaičiais. Šių diodų struktūra ir matmenys nesiskyrė, tai nominaliai buvo tokie patys diodai. Šių matavimų pagrindinis tikslas buvo išmatuoti tiesioginės įtampos priklausomybę nuo temperatūros, tikintis, jog šių duomenų pagalba būtų galima įvertinti įlaminuoto p-n diodo temperatūrą pagal įtampos pokyti.

Kiekvienas puslaidininkinis prietaisas yra jautrus temperatūrai. Didėjant puslaidininkinių medžiagų temperatūrai mažėja draudžiamosios energijos juostos plotis, dėl to ir pakinta puslaidininkio parametrai. Dioduose ir saulės elementuose labiausiai nuo temperatūros kinta įtampa. Įtampos vertė dioduose ar saulės elementuose krenta kylant temperatūrai, dėl temperatūros priklausomybės tekančia srove diodu. Pasinaudojus keliomis formulėmis, galime nustatyti teorinį saulės elemento atviros grandinės įtampos pokytį nuo temperatūros. Saulės elementu tekančią srovę galime apskaičiuoti pagal formulę [34]:

$$I = \mathbf{B} \cdot T^3 \cdot \exp\left(\frac{E_{G0}}{\mathbf{k}\mathbf{T}}\right),\tag{8}$$

kur B – koeficientas nepriklausantis nuo temperatūros,  $E_{G0}$  – draudžiamosios juostos plotis ir k – Bolcmano konstanta. Saulės elemento atviros grandinės įtampą apskaičiuojame pagal [34]:

$$V_{OC} = \frac{\mathrm{kT}}{\mathrm{q}} \cdot \ln(\frac{l_{SC}}{\mathrm{I}}),\tag{9}$$

Čia I<sub>SC</sub> – saulės elemento trumpojo jungimo srovė. Įstačius (8) formulę į (9) gauname [34]:

$$V_{OC} = \frac{kT}{q} (\ln I_{SC} - \ln B - 3lnT + \frac{qV_{G0}}{kT}),$$
(10)

čia  $E_{G0} = gV_{G0}$ . Tuomet atliekame (10) formulės diferencialą pagal temperatūrą ir galiausiai gauname [34]:

$$\frac{V_{OC}}{dT} = -\frac{V_{G0} - V_{OC} + 3\frac{kT}{q}}{T},$$
 (11)

pagal (11) formulę galime apskaičiuoti teoriškai, kiek kinta įtampos vertė priklausomai nuo temperatūros. Ta pati formulė galioja ir puslaidininkiniam diodui. Iš silicio pagamintam diodui įtampa kas 1 °C nukrenta apie 2,2 mV. [34].

Pradėjus apėjimo diodų eksperimentus, pirma buvo išmatuotas diodų temperatūros pokytis veikiant diodus 0,5 A ir 2 A tiesioginės krypties nuolatine srove tam tikrą laiką. Iš pateiktų 12 ir 13 pav. grafikų pastebime, jog veikiant apėjimo diodus 2 A tiesiogine srove, temperatūra nusistovėjo aukštesnė. Taip pat, diodai šilo staigiau veikiant juos 2 A srove, nei 0,5 A. Iš 13 pav. grafiko matome, jog diodų temperatūra po 50 s veikiant 2 A srove jau siekė apie 70 °C, tuo tarpu iš 12 pav. grafiko galime pastebėti, jog po tokio pat praėjusio laiko tarpo diodų temperatūra siekė apie 36 °C. Grafikuose labiausiai išsiskyrė 9 tiriamasis apėjimo diodas. 9 diodo temperatūra 0,5 A ir 2 A tiesioginės srovės veikimo metu užfiksuota mažesnė nei kitų tiriamųjų diodų.



12 pav. Neįlaminuotų apėjimo diodų temperatūros priklausomybė nuo laiko leidžiant 0,5 A tiesiogine kryptimi srovę.



13 pav. Neįlaminuotų apėjimo diodų temperatūros priklausomybė nuo laiko leidžiant 2 A tiesiogine kryptimi srovę.

Po diodų temperatūros matavimų sekė įtampos matavimai per tam tikrą laiką, veikiant apėjimo diodus 0,5 A ir 2 A nuolatine tiesioginės krypties srove. Gauti įtampos matavimo rezultatai atvaizduoti 14 ir 15 pav. grafikuose. Įtampos priklausomybės nuo laiko grafikuose galime įžvelgti panašius dėsningumus, kaip ir temperatūros priklausomybės nuo laiko grafikuose. Taip yra dėl to, nes diodų įtampa priklauso nuo temperatūros. Didėjant temperatūrai, diodų įtampos vertė mažėja. Todėl, veikiant diodus 2 A tiesiogine srove, įtampa nusistovėjo žemesnės vertės nei ji nusistovėjo veikiant diodus 0,5 A srove. Taip pat, pats įtampos kritimas veikiant apėjimo diodus 2 A srove buvo staigesnis. Įtampos matavimo eksperimentinėje dalyje labiausiai išsiskyrė 4 diodas. Iš 14 pav. grafiko galime matyti, jog jo įtampa nukrito iki mažiausios vertės.



14 pav. Neįlaminuotų apėjimo diodų įtampos priklausomybė nuo laiko leidžiant 0,5 A tiesiogine kryptimi srovę.



15 pav. Neįlaminuotų apėjimo diodų įtampos priklausomybė nuo laiko leidžiant 2 A tiesiogine kryptimi srovę.

Apjungus diodų įtampos ir temperatūros matavimus, esant skirtingoms tiesioginės srovės vertėms, gauname diodų įtampos priklausomybę nuo temperatūros. Gautos įtampos priklausomybės nuo temperatūros apėjimo dioduose atvaizduotos 16 ir 17 pav. grafikuose. Iš pateiktų 16 ir 17 pav. grafikų matome, jog nors ir diodų struktūra vienoda, gauti duomenys kiekvienam diodui išsiskyrė. Iš pateikto 16 pav. grafiko, kai diodai buvo veikiami 0,5 A tiesioginės srovės, matosi, jog 4-ojo apėjimo plokščiojo *p-n* diodo įtampa ties 26 °C buvo žemesnė nei kitų dviejų diodų. Gauti netikslumai galėjo atsitikti dėl šiek tiek skirtingos multimetro gnybtų prijungimo vietos prie diodų varinių kontaktų. Patys variniai kontaktai turi tam tikrą varžos vertę, todėl gnybtų atstumas ant kontaktų iki pačio diodo galėjo turėti įtakos rezultatams. 17 pav. grafike pastebime, jog kai buvo atliekamas tyrimas su 2 A tiesiogine srove, skirtumas tarp tiesioginės krypties įtampų gautas mažesnis, nei jis buvo matuojant diodus prijungiant 0,5 A tiesioginės krypties srovę. Iš šių grafikų matome, jog tiesioginės įtampos pokytis kiekvienam diodui nuo temperatūros priklauso tiesiškai.



16 pav. Neįlaminuotų apėjimo diodų įtampos priklausomybė nuo temperatūros leidžiant 0,5 A tiesiogine kryptimi srovę.



17 pav. Neįlaminuotų apėjimo diodų įtampos priklausomybė nuo temperatūros leidžiant 2 A tiesiogine kryptimi srovę.

Atliekant šį eksperimentą buvo apskaičiuotas skirtingų diodų tiesioginės įtampos pokytis didėjant temperatūrai per 1 °C. Visos gautos reikšmės yra pateiktos 2 ir 3 lentelėje. Išvedus šių reikšmių vidurkius kiekvienam diodui gauta, jog įlaminuojamo *p-n* silicio apėjimo diodo įtampa krenta per 1,8 mV/°C (teorinė vertė apie 2,2 mV/°C [34]) didėjant apėjimo diodo temperatūrai. Gautas suvidurkintas įtampos pokyčio koeficientas bus naudojama nustatinėjant įlaminuoto apėjimo diodo temperatūrą įlaminuotam tarp dviejų stiklų.

Veikiant 0,5 A tiesiogine srove	Temperatūros pokytis, °C	Įtampos pokytis, V	Įtampos pokyčio koef., V/°C
4 apėjimo diodas	14.9	0.0281	0.0019
6 apėjimo diodas	14.6	0.0276	0.0019
7 apėjimo diodas	7.5	0.0161	0.0021
9 apėjimo diodas	14.3	0.0271	0.0019

2 lentelė. Rezultatai gauti veikiant diodus 0.5 A tiesioginės krypties srove.

Veikiant 2 A tiesiogine srove	Temperatūros pokytis, °C	Įtampos pokytis, V	Įtampos pokyčio koef., V/°C
4 apėjimo diodas	44.9	0.0895	0.0020
6 apėjimo diodas	44.9	0.1041	0.0023
7 apėjimo diodas	55.9	0.0973	0.0017
9 apėjimo diodas	48.1	0.0957	0.0020

3 lentelė. Rezultatai gauti veikiant diodus 2 A tiesioginės krypties srove.

## 3.2 Įlaminuotų plokščiųjų apėjimo diodų temperatūros nustatymas pagal išmatuotą įtampos pokytį

Šioje tyrimo dalyje buvo atliekami tyrimai su ilaminuotu apėjimo *p-n* sandūros diodu, kai jis buvo veikiamas 2 A tiesioginės krypties nuolatine srove. Diodas veikiamas tiesioginės krypties srove per laiką šyla ir dėl to pradeda kristi jo tiesioginės įtampos reikšmė. Žinodami pradinę temperatūrą, ties kuria buvo pradėtas atlikti tyrimas su įlaminuotu p-n sandūros apėjimo diodu ir žinodami įtampos pokytį, galime įsivertinti diodo temperatūrą, kurią diodas galimai pasiekė veikiamas tam tikra laiką tiesioginės krypties srovės. Iš 18 pav. grafiko matome, jog diodo tiesioginės įtampos pokytis gautas 0,032 V. Šis pokytis gautas atėmus tiesioginės krypties įtampą esant kambario temperatūroje iš įtampos, kuri nusistovėjo veikiant diodą 2 A tiesioginės krypties srove. Iš šio įtampos pokyčio ir gauto įtampos pokyčio koeficiento praeitame tyrime su neilaminuotais diodais gauname išvada, jog diodo įtampa pakito apie18 °C. Gautą temperatūros pokytį pridėję prie kambario temperatūros (22 °C) gauname, kad diodas įšilo iki apie 40 °C. Praeito tyrimo metu, neįlaminuotas apėjimo p-n sandūros diodas įšilo iki 80 °C. Pastebime, jog tarp apskaičiuoto įlaminuoto diodo temperatūros ir išmatuotos neilaminuoto diodo temperatūros, veikiant juos 2 A tiesiogine srove, skirtumas vra labai didelis. Šis skirtuma sudarė net 40 °C. Tokį didelį skirtuma būtų galima paaiškinti gan ilgų kontaktinių juostelių teigiamo temperatūrinio varžos koeficiento įtaka. Deja, dėl Covid-19 pandemijos, nebuvo galimybių pagaminti papildomų bandinių keturių kontaktų matavimams ir šios itakos eliminavimui.



18 pav. Įlaminuoto apėjimo diodo įtampos kitimas laike esant 2 A srovei tiesiogine kryptimi.

## Išvados

- Tirtieji apsauginiais apėjimo diodai gali būti naudojami ir gerokai stipresnėms nei 2 A srovėms, nes matavimų metu pasiekta 80 °C temperatūra yra gerokai žemesnė nei standartais nustatyta 175°C veikimo temperatūros riba.
- Nuo –1,7 mV/°C iki –2,3 mV/°C kitusios įtampų vertės keturiems ištirtiems plokštiesiems p-n sandūros silicio įlaminuojamiems apėjimo diodams yra artimos literatūroje pateiktai –2,2 mV/°C vertei. Tai parodo, kad tirtuose dioduose nėra defektų, kurie keistų diodų idealumo faktorių.
- Matavimų ir skaičiavimų rezultatai, rodantys, kad įlaminuoto diodo temperatūra yra 40°C žemesnė nei neįlaminuoto, nėra patikimi, bet parodo, kad tokio tipo matavimuose reikia geriau įvertinti galimą jungiamųjų kontaktų varžos įtaką.

## Literatūros sąrašas

- L. El Chaar, L. A. lamont, ir N. El Zein, "Review of photovoltaic technologies", Renew. Sustain. Energy Rev., t. 15, nr. 5, p. 2165–2175, birž. 2011, doi: 10.1016/j.rser.2011.01.004.
- M. A. Green, "The path to 25% silicon solar cell efficiency: History of silicon cell evolution", Prog. Photovolt. Res. Appl., t. 17, nr. 3, p. 183–189, geg. 2009, doi: 10.1002/pip.892.
- [3] "Best Research-Cell Efficiency Chart", <u>https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html</u>, žr. (2020-03-15)
- [4] Fraunhofer Center for Silicon Photovoltaics, "One-third cell module with in-laminated solar wafer as bypass diode", <u>https://www.csp.fraunhofer.de/content/dam/imws/csp/en/documents/Module-</u> Technology/Third-Cell-Module/FhG-CSP\_One-Third\_Cell\_Module\_EN.pdf, žr. (2020-03-15)
- [5] M. A. Green, Third generation photovoltaics: advanced solar energy conversion. Berlin; New York: Springer, 2006.
- [6] K. Kiela, "Fotovoltiniai Elementai", Moksl. Liet. Ateitis, t. 4, nr. 1, p. 56–62, bal. 2012, doi: 10.3846/mla.2011.13.
- M. A. Green, "Thin-film solar cells: review of materials, technologies and commercial status", J. Mater. Sci. Mater. Electron., t. 18, nr. S1, p. 15–19, spal. 2007, doi: 10.1007/s10854-007-9177-9.
- [8] T. Saga, "Advances in crystalline silicon solar cell technology for industrial mass production", NPG Asia Mater., t. 2, nr. 3, p. 96–102, liep. 2010, doi: 10.1038/asiamat.2010.82.
- [9] "Stiklas/Stiklas modulio komponentai", <u>https://metsolar.eu/products/met-glass-glass/#</u>!, (2020-03-15)
- [10] "Module Materials", <u>https://www.pveducation.org/pvcdrom/modules-and-arrays/module-materials</u>, žr. (2020-03-15)
- [11] D. E. Franklin, "Demystifying The Solar Module", p. 5.
- [12] "The photovoltaic effect", <u>https://www.pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/the-photovoltaic-effect</u>, žr. (2020-03-15)
- [13] "Silicon Wafers and Substrates". https://www.pveducation.org/node/255. (2020-03-15)
- [14] "Solar Cell Parameters", <u>https://www.pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/solar-cell-parameters</u>, žr. (2020-03-15)
- [15] "Blocking and Bypass diodes in a solar panel system", <u>https://couleenergy.com/bypass-diodes-in-solar-panels/</u>, žr (2020-03-15)
- [16] W. Herrmann, W. Wiesner, ir W. Vaassen, "Hot spot investigations on PV modules-new concepts for a test standard and consequences for module design with respect to bypass diodes", Conference Record of the Twenty Sixth IEEE Photovoltaic Specialists Conference - 1997, Anaheim, CA, USA, 1997, p. 1129–1132, doi: 10.1109/PVSC.1997.654287.
- [17] H. Ziar, E. Afjei, ir M. Kazemi, "Bypass diode characteristic effect on the behavior of solar PV array at shadow condition".
- [18] "Bypass Diodes", <u>https://www.pveducation.org/pvcdrom/modules-and-arrays/bypass-diodes</u>, žr. (2020-03-15)
- [19] D. H. Otth, R. S. Sugimura, ir R. G. Ross, "development of design criteria and qualification tests for bypass diodes in photovoltaic applications".
- [20] B. Danwen, G. Zhiyan, Z. Jingbing, ir S. Shuji, "A Solar Cell Module with Internal Independent Bypass Diodes", Proceedings of ISES World Congress 2007 (Vol. I – Vol. V), D. Y. Goswami ir Y. Zhao, Sud. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008, p. 1514– 1516
- [21] N. G. Dhere, N. Shiradkar, E. Schneller, ir V. Gade, "The reliability of bypass diodes in PV modules", pristatytas SPIE Solar Energy + Technology, San Diego, California, United States, rugs. 2013, p. 88250I, doi: 10.1117/12.2026782.

- [22] J. N. Roy ir D. N. Bose, Photovoltaic Science and Technology:, 1-asis leid. Cambridge University Press, 2017.
- [23] "What Goes Into Making A Solar Module?", <u>https://www.solarpowerworldonline.com/2013/04/what-goes-into-making-a-solar-module/</u>, žr. (2020-03-15)
- [24] "Bypass Diodes in Solar Panels", <u>https://www.electronics-tutorials.ws/diode/bypass-diodes.html</u>, žr. (2020-03-15)
- [25] W. Shin, S. Ko, H. Song, Y. Ju, H. Hwang, ir G. Kang, "Origin of Bypass Diode Fault in c-Si Photovoltaic Modules: Leakage Current under High Surrounding Temperature", Energies, t. 11, nr. 9, p. 2416, rugs. 2018, doi: 10.3390/en11092416.
- [26] S. A. Fahrenbruch, "Solar Bypass Diodes: Then and Now", p. 12.
- [27] N. F. S. Jr, "Diodes in Photovoltaic Modules and Arrays", p. 84.
- [28] "How to choose a bypass diode for a silicon panel junction box", <u>https://www.st.com/resource/en/application\_note/dm00034029-how-to-choose-a-bypass-diode-for-silicon-panel-junction-box-stmicroelectronics.pdf</u>, žr. (2020-03-15)
- [29] N. S. Shiradkar, E. Schneller, N. G. Dhere, ir V. Gade, "Predicting thermal runaway in bypass diodes in photovoltaic modules", 2014 IEEE 40th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC), Denver, CO, USA, birž. 2014, p. 3585–3588, doi: 10.1109/PVSC.2014.6924881.
- [30] N. Shiradkar, V. Gade, ir K. Sundaram, "Predicting service life of bypass diodes in photovoltaic modules", 2015 IEEE 42nd Photovoltaic Specialist Conference (PVSC), New Orleans, LA, birž. 2015, p. 1–5, doi: 10.1109/PVSC.2015.7355606.
- [31] S. Nishikawa, C. Nagao, ir R. Kase, "Experimental study on detection technology of pv modules with shorten bypass diode", p. 4.
- [32] "Antžeminiai fotovoltiniai moduliai. Kvalifikacinis projektavimo įvertinimas ir tipo patvirtinimas. 1 dalis. Bandymų reikalavimai (IEC 61215-1:2016)", Liet. Stand. Dep., p. 20, 2017.
- [33] M. Förster, T. Wernicke, H. Hoehne, M. Totzek, S. Se, ir A. Studio, "New method for improved bypass diode junction temperature measurement in a solar junction box", p. 4, 2010.
- [34] "Effect of Temperature", <u>https://www.pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/effect-of-temperature</u>, žr. (2020-03-15)

Raudonius, Domantas. Saulės moduliams skirtų apsauginių diodų tyrimas: Moderniųjų technologijų fizikos ir vadybos bakalauro studijų programos baigiamasis darbas. Vad. dr. Vincas Tamošiūnas. Vilnius: Vilniaus universitetas, Fizikos fakultetas, 2020, 34 p.

Baigiamajame bakalauro darbe tiriamos į saulės fotovoltinius modulius įlaminuojamų diodų savybės. Pristatoma metodika šių diodų temperatūros pokyčių netiesioginiams vertinimui ir keturių bandomųjų diodų eksperimentinio tyrimo rezultatai. Teorijos ir eksperimentinių duomenų sutapimas patvirtina, kad dioduose nėra reikšmingų nuotėkio srovių. Įlaminuotų ir neįlaminuotų diodų tyrimų rezultatų palyginimas atskleidžia iššūkius, atsirandančius vertinant temperatūras pagal diodų įtampos pokyčius.

## **Summary**

In this paper, the properties of flat integrable bypass diodes for solar photovoltaic modules are investigated. Bypass diodes prevent a power loss of photovoltaic modules once one or more serially interconnected cells are covered with shadow. In addition, these diodes also prevent occurring problems of overheating and destructive "hot-spots" in case of high voltage solar cell strings covered with shadows. Flat bypass diodes could potentially be laminated nearby protected solar cells thus enabling more flexibility once selecting the module circuit layout or even elimination of a junction boxes on modules.

The aim of this paper was to investigate temperature and voltage changes of newly designed integrable bypass diodes under the influence of direct current. During the experiment, five bypass pn junction silicon diodes integrable directly in the solar module were investigated and peculiarities of their voltage and temperature changes were revealed. Dependences of voltage on temperature matched theoretical predictions, thus confirming the quality of diodes. One of these diodes was laminated between two glass panes, thus reproducing the conditions of a real solar photovoltaic module. Measurements with this device revealed the influence of contact wire resistance changes, which has to be better taken into account in future measurements.