

FIZINIŲ IR TECHNOLOGIJOS MOKSLŲ CENTRAS  
VILNIAUS UNIVERSITETAS

Simonas Indrišiūnas

**ŠVIESOS PAGAVIMO STRUKTŪRŲ FORMAVIMAS FOTOVOLTINIAMS  
ELEMENTAMS, NAUDOJANT LAZERINĘ INTERFERENCINĘ ABLIACIJĄ**

Daktaro disertacija

Technologijos mokslai, Medžiagų inžinerija (08T)

Vilnius, 2018

Disertacija rengta 2013-2017 metais valstybinio mokslinių tyrimų instituto Fizinių ir technologijos mokslų centro Lazerinių technologijų skyriuje.

**Mokslinis vadovas:**

Dr. Gediminas Račiukaitis (Fizinių ir technologijos mokslų centras, technologijos mokslai, medžiagų inžinerija - 08T).

**Disertacija ginama viešame disertacijos Gynimo tarybos posėdyje:**

**Pirmininkas:** Prof. habil. dr. Valdas Sirutkaitis (Vilniaus universitetas, technologijos mokslai, medžiagų inžinerija – 08T).

**Nariai:**

1. Dr. Raimondas Petruškevičius (Fizinių ir technologijos mokslų centras, technologijos mokslai, medžiagų inžinerija – 08T);
2. Doc. Dr. Domas Paipulas (Vilniaus universitetas, technologijos mokslai, medžiagų inžinerija – 08T);
3. Dr. Tomas Tamulevičius (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, medžiagų inžinerija – 08T);
4. Dr. Santiago M. Olaizola (Gripuskojos studijų ir pramonės tyrimų centras, technologijos mokslai, medžiagų inžinerija – 08T).

Disertacija bus ginama viešame viešame disertacijos Gynimo tarybos posėdyje 2018 m. birželio 15 d. 10 val. Fizinių ir technologijos mokslų centro Fizikos instituto posėdžių salėje. Adresas: Savanorių pr. 231, Vilnius, Lietuva, LT-02300.

Disertacijos santrauka išsiuntinėta 2018 m. gegužės 14 d.

Disertaciją galima peržiūrėti Vilniaus universiteto bibliotekoje, Fizinių ir technologijos mokslų centro bibliotekoje ir VU interneto svetainėje adresu: <http://www.vu.lt/lt/naujienos/ivykiu-kalendorius>.

CENTER FOR PHYSICAL SCIENCES AND TECHNOLOGY  
VILNIUS UNIVERSITY

Simonas Indrišiūnas

**FORMATION OF LIGHT HARVESTING STRUCTURES FOR  
PHOTOVOLTAICS USING LASER INTERFERENCE ABLATION**

Doctoral dissertation

Technological Sciences, Materials Engineering (08T)

Vilnius, 2018

The research was performed in 2013-2017 in the Department of Laser Technologies of the Center for Physical Sciences and Technology.

**Scientific supervisor:**

Dr. Gediminas Račiukaitis (Center for Physical Sciences and Technology, Technological Sciences, Material Engineering – 08T).

**Doctoral dissertation will be defended at public session of the dissertation Defence board:**

**Chairman:**

Prof. Habil. Dr. Valdas Sirutkaitis (Vilnius University, Technological Sciences, Material Engineering – 08T).

**Members:**

5. Dr. Raimondas Petruškevičius (Center for Physical Sciences and Technology, Technological Sciences, Material Engineering – 08T);
6. Doc. Dr. Domas Paipulas (Vilnius University, Technological Sciences, Material Engineering – 08T);
7. Dr. Tomas Tamulevičius (Kaunas University of Technology, Technological Sciences, Material Engineering – 08T);
8. Dr. Santiago M. Olaizola (Centro de Estudios e Investigaciones Técnicas de Gipuzkoa, Technological Sciences, Material Engineering – 08T).

The dissertation will be defended under open consideration by the dissertation Defence board on 15th June, 2018, 10 a.m. at the Center for Physical Sciences and Technology, conference room of the Institute of Physics, address: Savanoriu Ave. 231, LT-02300 Vilnius, Lithuania.

The summary of the dissertation was distributed on 14th of May, 2018

The dissertation is available at Vilnius University Library, at the Center for Physical Sciences and Technology Library and on the Vilnius University website: [www.vu.lt/lt/naujienos/ivykiu-kalendorius](http://www.vu.lt/lt/naujienos/ivykiu-kalendorius).

## TURINYS

<b>1</b>	<b>ĮVADAS</b> .....	<b>6</b>
1.1	DISERTACIJOS DARBO TIKSLAI .....	7
1.2	DARBO NAUJUMAS IR PAKTINĖ SVARBA .....	7
1.3	GINAMIEJI TEIGINIAI .....	8
1.4	APROBACIJA .....	9
1.5	AUTORIAUS IR BENDRAAUTORIŲ INDĖLIS .....	12
1.6	DISERTACIJOS SANDARA .....	13
<b>2</b>	<b>LITERATŪROS APŽVAGA</b> .....	<b>13</b>
<b>3</b>	<b>TYRIMO METODAI</b> .....	<b>13</b>
<b>4</b>	<b>PERIODINĖS TEKSTŪROS FORMAVIMAS POLIKRISTALINIO SILICIO SAULĖS ELEMENTO ANTIREFLEKSIAME SLUOKSNIJE</b> .....	<b>16</b>
<b>5</b>	<b>INVERTUOTŲ PIRAMIDŽIŲ FORMAVIMAS KRISTALINIAME SILICYJE, NAUDOJANT APDIRBIMĄ INTERFERUOJANČIAIS LAZERIO PLUOŠTAIS IR CHEMINĮ ĖSDINIMĄ</b> .....	<b>20</b>
<b>6</b>	<b>PERIODINIŲ PAVIRŠIAUS STRUKTŪRŲ GAMYBA MULTIKRISTALINIAME SILICYJE, NAUDOJANT ABLIACIJĄ INTERFERUOJANČIAIS LAZERIO PLUOŠTAIS IR CHEMINĮ ĖSDINIMĄ</b> ...	<b>23</b>
<b>7</b>	<b>DLIP METODO TAIKYMAS STRUKTŪRŲ PLONUOSE METALO SLUOKSNIUOSE GAMYBAI</b> .....	<b>27</b>
7.1	APDIRBIMO TOLYGUMO DIDINIMAS DLIP METODE .....	27
7.2	INTERFERENCINIO SKIRSTINIO VALDYMAS ATSKIRŲ PLUOŠTŲ POLIARIZACIJA .....	29
7.3	DLIP OPTINĖS SISTEMOS PRITAIKYMAS DIDELĖS ENERGIJOS ULTRATRUMPIESiems IMPULSAMS .....	31
	<b>IŠVADŲ SĄRAŠAS</b> .....	<b>33</b>
	<b>LITERATŪROS SĄRAŠAS</b> .....	<b>35</b>
	<b>SANTRAUKA ANGLŲ KALBA (SUMMARY)</b> .....	<b>36</b>
	<b>TRUMPOS ŽINIOS APIE DOKTORANTĄ</b> .....	<b>37</b>

## 1 ĮVADAS

Vienas iš iššūkių, su kuriuo susiduriama fotovoltinių elementų gamyboje yra konkurencingumo, lyginant su tradiciniais elektros energijos gaminimo būdais, didinimas. Saulės energiją galima padaryti patrauklesne vartotojui, didinant saulės elementų efektyvumą ir mažinant jų kainą. Šviesos surinkimas yra svarbi kelio link didesnio efektyvumo fotovoltinių elementų dalis. Šviesos surinkimo struktūros yra reikalingos, norint padidinti spinduliuotės, krintančios į saulės elementą, sugertį jo aktyviajame sluoksnyje. Tai gali būti pasiekta sumažinant spinduliuotės dalį, atsispindinčią nuo elemento priekinio paviršiaus ir prailginant kelią, kurį spinduliuotė nusklinda elemento tūryje.

Šiuo metu komerciškai sėkmingiausiuose silicio saulės elementuose šviesos surinkimas didinamas, naudojant atspindį mažinančias dangas ir cheminiu ėsdinimu suformuojamas paviršiaus tekstūras. Mokslinėje literatūroje aprašoma nemažai kitų metodų, pavyzdžiui, viršutinio skaidraus kontakto ar pasyvuojančio sluoksnio tekstūravimas [1-3], plazmoninių struktūrų naudojimas [4, 5], plonasluoksnio elemento padėklo tekstūravimas [6].

Įvairių minėtų struktūrų gamyba turėtų būti sparti ir ekonomiškai pagrįsta. Mikroapdirbimas lazeriu patenka tarp galimų gamybos technologijų dėl savo lankstumo. Apdirbant lazeriu dažniausiai nenaudojamos pagalbinės medžiagos, nereikalingos brangiai kainuojančios litografijos kaukės ar liejimo formos. Tačiau sparti mikrometrinių matmenų struktūrų gamyba yra nemažas iššūkis. Šį iššūkį galima įveikti, naudojant lygiagretaus apdirbimo sistemą. Vienas iš lygiagretaus apdirbimo metodų yra abliacija interferuojančiais lazerio pluoštais (DLIP – *direct laser interference patterning*). DLIP metode keli interferuojantys lazerio pluoštai sudaro periodinį intensyvumo skirstinį [7, 8]. Paveikus medžiagą šiuo skirstiniu, galima išabliuoti mikrometro eilės dydžio periodines struktūras. DLIP leidžia pasiekti didesnę apdirbimo spartą, lyginant su apdirbimu vienu fokusuotu lazerio pluoštu.

Silicis išlieka pagrindine medžiaga saulės elementų gamyboje dėl savo sąlyginai žemos kainos, didelių išteklių ir gerai išvystytų apdirbimo technologijų. Šiame darbe DLIP metodas buvo išbandomas įvairių šviesos valdymo struktūrų gamybai silicio saulės elementams. Pirmame disertacijos rezultatų skyriuje aprašoma periodinės tekstūros

formavimas pasyvuojančiame silicio saulės elemento sluoksnyje. Kituose skyriuose aprašomi paviršiaus struktūrų gamybos silicyje naudojant DLIP ir cheminį ėsdinimą rezultatai. Paskutinis šio darbo skyrius skirtas plazmoninių struktūrų gamybai, naudojant DLIP metodą. Nemaža šio skyriaus dalis skirta DLIP metodo tobulinimui: būdams padidinti tolygiai apdirbamos srities plotą ir DLIP apdirbimo lankstumą.

## **1.1 Disertacijos darbo tikslai**

1. Ištirti galimybę panaudoti interferencinį apdirbimą saulės elementų efektyvumo didinimui, tekstūruojant antirefleksinį silicio saulės elemento sluoksnį.
2. Nustatyti optimalius lazerinio apdirbimo parametrus periodinių struktūrų monokristaliniame ir multikristaliniame silicyje gamybai bei ištirti gautų struktūrų skaidrinimo/šviesos pagavimo savybes.
3. Tobulinti interferencinio apdirbimo stendą, siekiant geriau pritaikyti šį apdirbimo metodą pramonei.

## **1.2 Darbo naujumas ir faktinė svarba**

### **1.2.1 Darbo naujumas**

1. Darbe pademonstruotas selektyvus silicio nitrido dangos pavertimas  $\text{SiO}_x\text{N}_y$  danga, ją paveikus 4 interferuojančiais lazerio pluoštais. Antirefleksiniame silicio saulės elemento silicio nitrido sluoksnyje buvo suformuota periodinė  $\text{SiO}_x\text{N}_y$  gardelė. Buvo ištirta tokios gardelės įtaka saulės elemento optinėms ir elektrinėms savybėms.
2. Buvo ištirta silicio oksido sluoksniu, suformuoto dėl apšvitinimo 4 interferuojančiais pluoštais, įtaka invertuotų piramidžių formavimui kristaliniame silicyje, naudojant DLIP ir anizotropinį cheminį ėsdinimą.
3. Buvo sukurtas mazgas, leidžiantis valdyti kiekvieno interferuojančio pluošto poliarizaciją, ištirta kampo tarp interferuojančių pluoštų įtaka interferenciniam skirstiniui, gaunamam naudojant atskirų pluoštų poliarizacijos valdymą.

### 1.2.2 Praktinė svarba

1. Buvo nustatyti optimalūs lazerinio apdirbimo interferuojančiais pluoštais parametrai atspindį mažinančios tekstūros multikristaliniame silicyje gamybai. Šis procesas gali būti naudojamas multikristalinio silicio saulės elementų našumui didinti.

2. Buvo nustatyta lazeriu suformuoto silicio oksido sluoksnio įtaka invertuotų piramidžių struktūrai, jos gamybai naudojant abliaciją interferuojančiais pluoštais ir anizotropinį cheminį ėsdinimą. Šis metodas gali būti naudojamas anizotropinio silicio tekstūravimo procesui supaprastinti.

3. Interferencinio apdirbimo metodo patobulinimai, leidžiantys padidinti tolygiai tekstūruojama plotą, valdyti gaunamų struktūrų formą gali būti pritaikyti komercinėse interferencinio apdirbimo staklėse.

### 1.3 Ginamieji teiginiai

1. Pasyvuojantis ir skaidrinantis silicio nitrido sluoksnis, padengtas ant silicio, gali būti lokaliai paverčiamas  $\text{SiN}_x\text{O}_y$ , paveikus dėl interferencijos moduluotu lazerio pluoštu, kai energijos tankis interferencinio skirstinio smailėse neviršija slenkstinio silicio nitrido abliacijos energijos tankio. Tokiu būdu silicio nitride sluoksnyje susidaro periodinė lūžio rodiklio gardelė, dėl kurios vyksta krentančios spinduliuotės difrakcija į silicio padėklą.

2. Tekstūruojant kristalinį silicį interferuojančiais pluoštais ore, interferencinio lauko minimumuose suformuojamas silicio oksido sluoksnis. Šis sluoksnis anizotropinio cheminio ėsdinimo proceso metu veikia kaip ėsdinimo kaukė. Tokiu būdu interferencinę abliaciją galima panaudoti invertuotų piramidžių masyvų kristaliniame silicyje formavimui.

3. Interferencinės abliacijos būdu, naudojant subnanosekundinius lazerio impulsus, multikristaliniame silicyje pagaminti periodiniai duobučių masyvai pasižymi geriausiomis skaidrinimo savybėmis regimojoje ir artimojoje infraraudonojoje spektro srityse, kai struktūros periodas yra didesnis nei mikrometras. Naudojant šį metodą mažesnių nei vieno mikrometro periodo struktūrų formavimui, gaunama nedidelio gylio



arba netvarkinga struktūra dėl išlydytos medžiagos sluoksnio susidarymo ir lydalo tekėjimo.

4. Esant didesniai nei  $13^\circ$  puskampiui tarp interferuojančių pluoštų, reikia atsižvelgti į vertikalios elektrinio lauko komponentės įtaką interferenciniam skirstiniui. Vertikali elektrinio lauko komponentė daro įtaką interferencinio skirstinio formai ir moduliacijos gyliui, kai yra keičiamas kampas tarp interferuojančių pluoštų (struktūros periodas).

## 1.4 Aprobacija

Šioje disertacijoje pateikti rezultatai buvo publikuoti 5 recenzuotuose moksliniuose straipsniuose ir kartu su bendraautoriais pristatyti 13 tarptautinių mokslinių konferencijų.

### 1.4.1 Publikacijų sąrašas

**Publikacijos disertacijos tema žurnaluose, referuojamuose ISI WoS duomenų bazėje:**

[A1] A. Vinčiūnas, **S. Indrišiūnas**, B. Voisiat, G. Račiukaitis, I. Šimkienė, R. Suzanovičienė, A. Rėza, R. Mažeikienė, Effect of Laser Patterning on Properties of Crystalline Si Photovoltaic Cells and Substrates. *J. Laser Micro/Nanoeng* 8(3), 244-252 (2013).

[A2] B. Voisiat, **S. Indrišiūnas**, G. Račiukaitis, I. Šimkienė, A. Rėza, R. Suzanovičienė, Application of Laser Texturing in Silicon Solar Cell Technology. *Matter. Sci. (Medžiagotyra)* 20(2), 157-159 (2014).

[A3] **S. Indrišiūnas**, B. Voisiat, A. Rėza, I. Šimkienė, R. Mažeikienė, A. Selskis, G. Račiukaitis, Effect of laser-induced conversion of silicon nitride to silicon oxy-nitride on antireflective properties of passivation layer in polysilicon solar cells. *Opt. Mater. Express* 5, 1532-1542 (2015).

[A4] **S. Indrišiūnas**, B. Voisiat, M. Gedvilas, G. Račiukaitis, New opportunities for custom-shape patterning using polarization control in confocal laser beam interference setup. *J. Laser Appl.* 29, 011501 (2017).

[A5] M. Gedvilas, S. Indrišiūnas, B. Voisiat, E. Stankevičius, A. Selskis, G. Račiukaitis, Nanoscale thermal diffusion during the laser interference ablation using femto-, pico-, and nanosecond pulses in silicon. *Phys. Chem. Chem. Phys.* 20(17), 12166-12174 (2018).

**Kitos publikacijos periodiniuose leidiniuose disertacijos tema:**

[A6] S. Indrišiūnas, B. Voisiat, A. Žukauskas, G. Račiukaitis, Direct laser beam interference patterning technique for fast high aspect ratio surface structuring. *Proc. SPIE* 9350, 935003-935003-7 (2015).

[A7] S. Indrišiūnas, B. Voisiat, A. Rėza, I. Šimkienė, R. Mažeikienė, A. Selskis, G. Račiukaitis, Influence of surface modification by laser beam interference ablation on characteristics of p-Si solar cells, *Proc. SPIE* 9180, 918007 (2014).

[A8] B. Voisiat, S. Indrišiūnas, R. Suzanovičienė, I. Šimkienė, G. Račiukaitis, Formation of periodic structures on silicon by laser beam interference ablation technique for light control in solar cells. *Proc. SPIE* 9180, 918009 (2014).

**1.4.2 Pranešimų konferencijose sąrašas**

**Pranešimai disertacijos tema mokslinėse konferencijose:**

[C1] S. Indrišiūnas, G. Račiukaitis, *Modelling of periodical surface structures in silicon for efficient light absorption*, “Lazeriai ir optinis netiesiškumas” XX Lietuvos ir Baltarusijos seminaras, Vilnius, Lietuva, lapkričio 21–22, 2013.

[C2] S. Indrišiūnas, B. Voisiat, A. Rėza, I. Šimkienė, R. Mažeikienė, A. Selskis, G. Račiukaitis, *Influence of Surface Modification by Laser Beam Interference Ablation on Characteristics of p-Si Solar Cells*, LPM2014 The 15th International Symposium on Laser Precision Microfabrication, Vilnius, Lietuva, birželio 17–21, 2014.

[C3] B. Voisiat, S. Indrišiūnas, R. Suzanovičienė, I. Šimkienė, G. Račiukaitis, *Formation of Periodic Structures on Silicon by Laser Beam Interference Ablation Technique for Light Control in Solar Cells*, SPIE Solar Energy + Technology, San Diego, JAV, rugpjūčio 20 – 21, 2014.

[C4] S. Indrišiūnas, B. Voisiat, A. Rėza, I. Šimkienė, R. Mažeikienė, A. Selskis, G. Račiukaitis, *Influence of Surface Modification by Laser Beam Interference Ablation*

*on Characteristics of p-Si Solar Cells*, SPIE Solar Energy + Technology, San Diego, JAV, rugpjūčio 20 – 21, 2014.

[C5] **S. Indrišiūnas**, B. Voisiat, A. Rėza, I. Šimkienė, R. Mažeikienė, A. Selskis, G. Račiukaitis, *New Approaches for Texturing of Silicon Solar Cells Using Laser Beam Interference*, „29th European PV Solar Energy Conference and Exhibition” (EU PVSEC 2014), Amsterdamas, Nyderlandų Karalystė, rugsėjo 22–26, 2014.

[C6] **S. Indrišiūnas**, B. Voisiat, A. Rėza, I. Šimkienė, R. Mažeikienė, A. Selskis, G. Račiukaitis, *Light harvesting structures for photovoltaic elements using laser beam interference*, Laser Processing in Photovoltaics, Leipcigas, Vokietija, lapkričio 27–28, 2014.

[C7] **S. Indrišiūnas**, B. Voisiat, A. Žukauskas, G. Račiukaitis, *Direct laser beam interference patterning technique for fast high aspect ratio surface structuring*, Laser Applications in Microelectronic and Optoelectronic Manufacturing (LAMOM) XIX, San Franciskas, JAV, Vasario 7-12, 2015.

[C8] R. Mažeikienė, G. Niaura, B. Voisiat, **S. Indrišiūnas**, G. Račiukaitis, *Lazeriu tekstūruotų Si Saulės elementų tyrimas Ramano spektroskopijos metodu*, 41-oji Lietuvos Nacionalinė Fizikos Konferencija (LNFK-41), Vilnius, Lietuva, birželio 17–19, 2015.

[C9] **S. Indrišiūnas**, B. Voisiat, G. Račiukaitis, *Direct laser beam interference patterning for fabrication of plasmonic hole arrays*, Lasers in Manufacturing (LiM2015), Miunchenas, Vokietija, birželio 22-25, 2015.

[C10] **S. Indrišiūnas**, B. Voisiat, A. Rėza, I. Šimkienė, R. Mažeikienė, A. Selskis, G. Račiukaitis, *Direct Laser Beam Interference patterning combined with wet chemical etching as a tool to control surface morphology of multicrystalline silicon*, „30th European PV Solar Energy Conference and Exhibition” (EU PVSEC 2015), Hamburgas, Vokietija, rugsėjo 14 – 18, 2015.

[C11] B. Voisiat, **S. Indrišiūnas**, M. Gedvilas, G. Račiukaitis, *Direct Laser Interference Patterning of Thin Metal Films to Control the Flow of Electromagnetic Radiation*, International High Power Laser Ablation & Directed Energy Symposium (HPLA/DE), Santa Fe, JAV, balandžio 4–7, 2016.

[C12] **S. Indrišiūnas**, B. Voisiat, A. Žukauskas, V. Strazdienė, I. Šimkienė, A. Rėza, M. Gavutis, T. Rakickas, G. Račiukaitis, *Fabrication of periodic structures on silicon using direct laser interference ablation and wet chemical etching*, The 17th International

Symposium on Laser Precision Microfabrication (LPM 2016), Xi'an, Kinija, gegužės 23–27, 2016 (**Outstanding Student Paper Award (Oral)**).

[C13] S. Indrišiūnas, B. Voisiat, M. Gedvilas, G. Račiukaitis, *Polarisation Control in Direct Laser Interference Ablation Setup for Flexible Generation of Periodic Patterns*, The 18th International Symposium on Laser Precision Microfabrication (LPM 2017), Toyama, Japonija, birželio 5–8, 2017.

## 1.5 Autoriaus ir bendraautorių indėlis

### 1.5.1 Autoriaus asmeninis indėlis

Šios disertacijos autorius atliko didžiąją dalį eksperimentinių ir modeliavimo darbų. Autoriaus indėlį sudarė:

- Eksperimentinių stendų projektavimas ir surinkimas.
- Interferencinės abliacijos eksperimentai.
- Eksperimentiniai tyrimai interferencinės abliacijos metodo tobulinimui.
- Kompiuterio programų, reikalingų eksperimentams rašymas.
- Pagamintų darinių charakterizavimas, naudojant SEM, AFM mikroskopiją, Ramano spektroskopiją, EDS spektroskopiją, voltamperinių charakteristikų matavimo stendą.
- Šviesos valdymo struktūrų silicyje skaitmeninis modeliavimas.
- Interferencijos intensyvumo skirstinių modeliavimas, esant įvairiems lazerio pluoštų parametrams.
- Eksperimentinių rezultatų aprašymas, interpretavimas ir paruošimas publikavimui.
- Mokslinių publikacijų ir konferencijų pranešimų rengimas.

### 1.5.2 Bendraautorių indėlis

Šio darbo pradinę idėją pasiūlė ir jos įgyvendinimą prižiūrėjo Dr. Gediminas Račiukaitis ir Dr. Irena Šimkienė. Saulės elementų skaidrinančios dangos tekstūravimas ir voltamperinių charakteristikų matavimas buvo atliktas kartu su Dr. Bogdan Voisiat. Ramano spektroskopijos matavimus, aprašytus 4 skyriuje atliko Dr. Regina Mažeikienė.

XPS ir didelės skyros SEM matavimus atliko Dr. Algirdas Selskis. Difuzinio ir pilno atspindžio matavimus atliko Dr. Alfonsas Rėza. Dalį cheminio ėsdinimo (6 skyrius) atliko Dr. Martynas Gavutis. Dalį interferencinės abliacijos eksperimentų 5 skyriui atliko bakalauro studentas Airidas Žukauskas, praktikos pas Dr. Bogdan Voisiat metu. Aukštos skyros AFM matavimus 5 ir 6 skyriams atliko Tomas Rakickas. Izotropinis cheminis ėsdinimas buvo atliktas Dr. Viktorijos Strazdienės. Temperatūros skirstinių, veikiant medžiagą dėl interferencijos moduluotu lazerio pluoštu, modeliavimą atliko Dr. Mindaugas Gedvilas. Atspindžio matavimai, pateikti 7 skyriuje, buvo atlikti Dr. Irmanto Kašalyno laboratorijoje. Poliarizacijos valdymo stendas (7 skyrius) buvo sukonstruotas, bendradarbiaujant su Dr. Bogdan Voisiat. Lazerio impulso charakteristikų matavimus FROG metodu (7 skyrius) atliko Dr. Edgar Kaskis iš Vienos Technologijos Universiteto.

## **1.6 Disertacijos sandara**

Daktaro disertacija, kurios apimtis 122 puslapiai, 5 lentelės, 65 paveikslai ir 144 literatūros šaltiniai yra parašyta anglų kalba. Disertaciją sudaro 7 skyriai, padėka, sutrumpinimų, išvadų ir literatūros sąrašai bei priedas. Kiekvieno skyriaus, pradedant nuo ketvirto, pabaigoje pateikiamos iš gautų rezultatų suformuluotos išvados.

## **2 LITERATŪROS APŽVAGA**

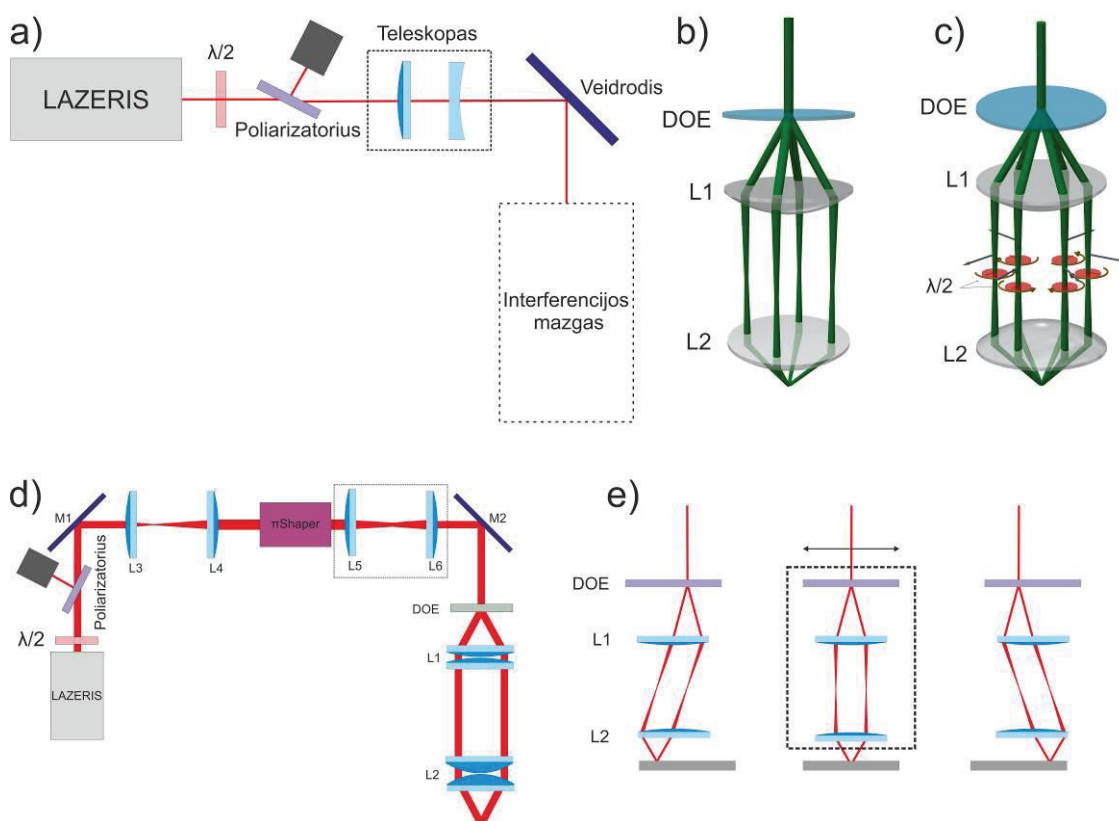
Šiame skyriuje, remiantis moksline literatūra, trumpai aprašomas saulės elementų veikimo principas, pagrindiniai saulės elementų tipai. Apžvelgiamos įvairios literatūroje minimos šviesos valdymo struktūros, skirtos silicio ir plonasluoksniams saulės elementams. Trumpai aprašomi lazerio spinduliuotės sąveikos su medžiaga ir medžiagų apdirbimo lazerio pluoštu pagrindai. Pristatomas medžiagų apdirbimo interferuojančiais lazerio pluoštais metodas ir dažniausiai literatūroje minimos eksperimentinės šio metodo sistemos.

## **3 TYRIMO METODAI**

Svarbiausios interferencinio apdirbimo eksperimentinės schemas yra pateiktos 1 pav. Lazerio pluoštas yra dalinamas į kelis, naudojant difrakcinį optinį elementą

(DOE). Pluoštai suvedami ant bandinio naudojant vaizdo perkėlimo sistemą, sudarytą iš dviejų lęšių L1 ir L2. Nulinė difrakcijos eilė buvo užblokuojama, naudojant metalinę kaukę.

Poliarizacijos valdymo eksperimentuose buvo naudojamas papildomas modulis su pusės bangos ilgio plokštelėmis, įstatomas tarp lęšių L1 ir L2 (1 c pav.). Dalyje eksperimentų prieš DOE buvo įstatomas plokščios viršūnės pluošto formuotuvas (1 d pav.). Atliekant eksperimentus su didelės impulso energijos femtosekundiniu lazeriu, tarp lęšių L1 ir L2 buvo sudaromas vakuumas.



1 pav. Eksperimento schemas. a) Spinduliuotės kelias iki interferencinio mazgo; b) 4 pluoštų interferencinis mazgas; c) 6 pluoštų interferencinis mazgas su poliarizacijos valdymu; d) interferencinė sistema su plokščios viršūnės pluošto formuotuvu; e) interferuojančių pluoštų skenavimas.

Eksperimentuose naudotų difrakcinių optinių elementų parametrai yra pateikti 1 lentelėje.

1 lentelė. Difrakcinių optinių elementų parametrai.

DOE	Pluoštų skaičius	Bangos ilgis	Gamintojas	Pilnas kampas
H4_532	4+1	532 nm	HOLOEYE Photonics AG	10 deg
H6_532	6+1	532 nm	HOLOEYE Photonics AG	10 deg
H4_355	4+1	355 nm	HOLOEYE Photonics AG	10 deg
MS-546-J-Y-A	4	1030 nm	HOLO/OR	7.71 deg

Eksperimentuose buvo naudojami įvairūs lazeriai, jų parametrai pateikti 2 lentelėje.

Lazeriu tekstūruoto silicio papildomam apdirbimui buvo naudojamas izotropinis arba anizotropinis cheminis ėsdinimas. Anizotropinis kristalinio silicio ėsdinimas buvo atliekamas, naudojant 10% KOH tirpalą kambario temperatūroje. Izotropinis ėsdinimas buvo atliekamas, naudojant azoto rūgšties (HNO<sub>3</sub>), vandenilio fluorida rūgšties (HF) ir acto rūgšties (CH<sub>3</sub>COOH) mišinį. Multikristalinio silicio bandiniai buvo ėsdinami du kartus: prieš apdirbimą lazeriu ir po jo.

2 lentelė. Eksperimentuose naudotų lazerių parametrai.

Lazeris	Bangos ilgis (fundamentinė harmonika (IH))	Impulso trukmė	Impulsų pasikartojimo dažnis	maksimali IH impulso energija	Harmonikos
NL220 (Ekspla)	1064 nm	35 ns	0.5 kHz	1.2 mJ	IH, IHH
Atlantic HE (Ekspla)	1064 nm	300 ps	1 kHz	2.7 mJ	IH, IHH, IIHH
Foxtrot (Ekspla)	1064 nm	60 ps	4 kHz	1 mJ	IH, IHH
Pharos (Light Conversion)	1030 nm	300 fs	10-500 kHz	0.2 mJ @ 10kHz	IH, IHH
Amplight didelės impulso energijos femtosekundinis lazeris	1030 nm	200 fs (optimaliai suspaudus impulsą)	1000 Hz	15 mJ	IH

Bandinių atspindžio spektrai buvo matuojami, naudojant Shimadzu UV-VIS-NIR UV-3600 spektrofotometrą su MPC-3100 priedėliu bei integruojančia sfera.

Voltamperinės saulės elementų charakteristikos buvo matuojamos naudojant Keithley 2602A matuoklį ir Saulės simulatorių, sudarytą iš šviesos šaltinio (halogeninių lempų), laidaus pagrindo ir šviesai nepralaidaus korpuso.

Bandinių paviršius buvo tiriamas, naudojant optinį mikroskopą, skenuojantį elektroninį mikroskopą JSM-6490LV JEOL (*scanning electron microscope* – SEM),

optinį ir adatinį profilometrų ir atominės jėgos mikroskopą (AFM). Elementinė sudėtis buvo tiriama, naudojant EDS (*energy-dispersive X-ray spectroscopy*) ir XPS (*X-ray photoelectron spectroscopy*) metodus.

Cheminė ir silicio kristališkumo analizė buvo atliekama, naudojant Ramano spektroskopiją. Tyrimai buvo atliekami, naudojant mikro-Ramano mikroskopą (nVia Renishaw) su 633 nm ir 532 nm lazeriniais šaltiniais. Lazero pluošto skersmuo sąmaukoje buvo 2  $\mu\text{m}$ , lazero galia 1 mW. Kristalinę silicio struktūrą rodo Ramano spektro linijos ties 520 ir 500  $\text{cm}^{-1}$ . Amorfinę silicio fazę rodo linija ties 480  $\text{cm}^{-1}$ . Kristalinio silicio dalis  $x_C^{\text{RS}}$  gali būti įvertinta, iš kristalinio ir amorfinio silicio Ramano linijų intensyvumų santykio [9].

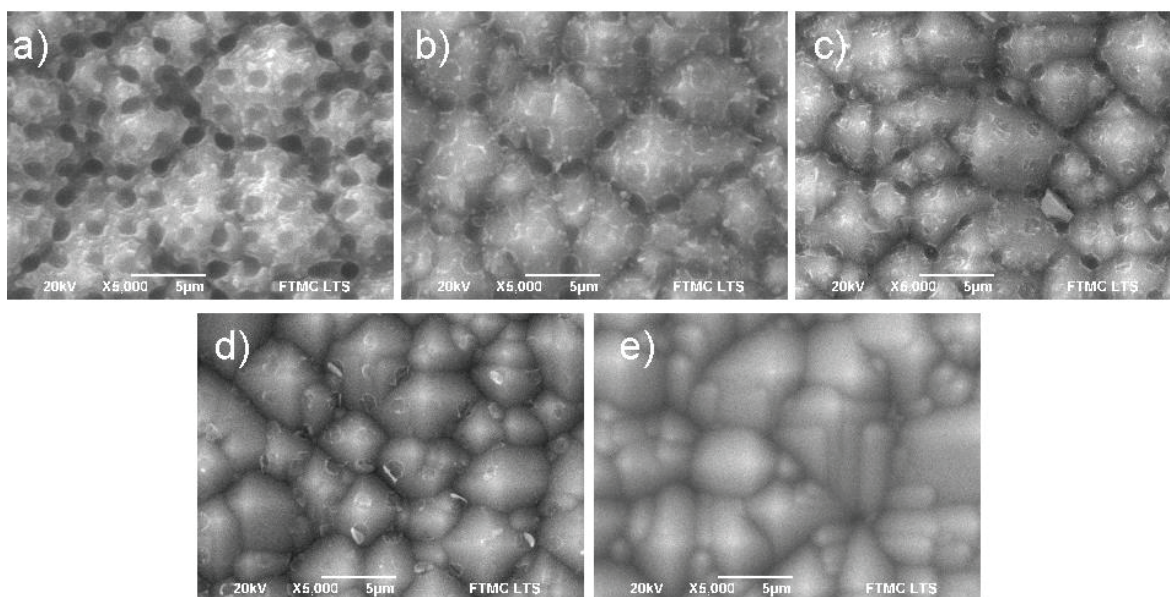
#### **4 PERIODINĖS TEKSTŪROS FORMAVIMAS POLIKRISTALINIO SILICIO SAULĖS ELEMENTO ANTIREFLEKSIINIAME SLUOKSNIJE**

**Šiame skyriuje pateikta medžiaga buvo publikuota straipsniuose [A1], [A2], [A3], [A7] ir konferencijų pranešimuose [C2], [C4], [C6], [C8].**

Šiame skyriuje aprašomi polikristalinio silicio saulės elementų pasyvuojančio  $\text{SiN}_x$  sluoksnio tektūravimo DLIP metodu tyrimai. Didžioji dalis eksperimentų buvo atlikta, naudojant antrą (532 nm) pikosekundinio lazero Foxtrot harmoniką. Buvo naudojamas 1 d pav. parodytas eksperimento stendas su H4\_532 difrakciniu elementu. Interferuojant 4 pluoštams, buvo gaunama 2.5  $\mu\text{m}$  periodo lazero pluošto moduliacija. Tyrimai buvo atliekami su komerciniais polikristalinio silicio saulės elementais. Pilno elemento dydis buvo 15 x 15  $\text{cm}^2$ , storis 0.25 mm, efektyvumas 11 %. Bandinių atspindžio ir sugerties charakteristikos buvo įvertintos iš difuzinio atspindžio spektrų. Cheminė ir elementinė sudėtis, tirta naudojant EDS, XPS ir Ramano spektroskopijos metodus.

Bandiniai buvo tekstūruoti, naudojant įvairias energijos tankio ir impulsų kiekio į vieną vietą vertes. Tarp viršutinių kontaktų buvo skenuojamos keletas linijų, taip, kad kontaktai liktų nepažeisti. Tokiu būdu buvo tekstūruojama maždaug 70% fotovoltinio elemento ploto. Tekstūruotų bandinių SEM nuotraukos pateiktos 2 pav.





**2 pav. Saulės elementų, tekstūruotų naudojant 4 interferuojančius pluoštus, SEM nuotraukos. a) – 1.5 J/cm<sup>2</sup> 4 impulsai; b) – 1.5 J/cm<sup>2</sup> 1 impulsas; c) – 0.65 J/cm<sup>2</sup> 3 impulsai; d) – 0.65 J/cm<sup>2</sup> 1 impulsas; e) – 0.14 J/cm<sup>2</sup> 100 impulsų.**

Siekiant įvertinti apdirbimo lazeriu poveikį saulės elementų veikai, buvo išmatuotos tekstūruotų elementų voltamperinės charakteristikos. Jos buvo lyginamos su atraminių (netekstūruotų) bandinių charakteristikomis. Dalyje tyrimų buvo apdirbtos pilnos plokštelės ir jų voltamperinės charakteristikos buvo matuojamos komerciniu saulės imitatoriumi. Kita tyrimų dalis buvo atlikta, padalinus plokšteles į mažesnius (60 x 40 mm<sup>2</sup>) bandinius (išsaugant viršutinius ir apatinius kontaktus). Tokių bandinių savybes buvo galima tirti laboratorijoje (FTMC Lazerinio mikroapdirbimo technologijų laboratorijoje pagamintu Saulės imitatoriumi) iš karto prieš ir po lazerinio apdirbimo, taip palengvinant optimalių apdirbimo parametrų suradimą. Voltamperinių charakteristikų matavimo rezultatai yra pateikti 3 lentelėje.

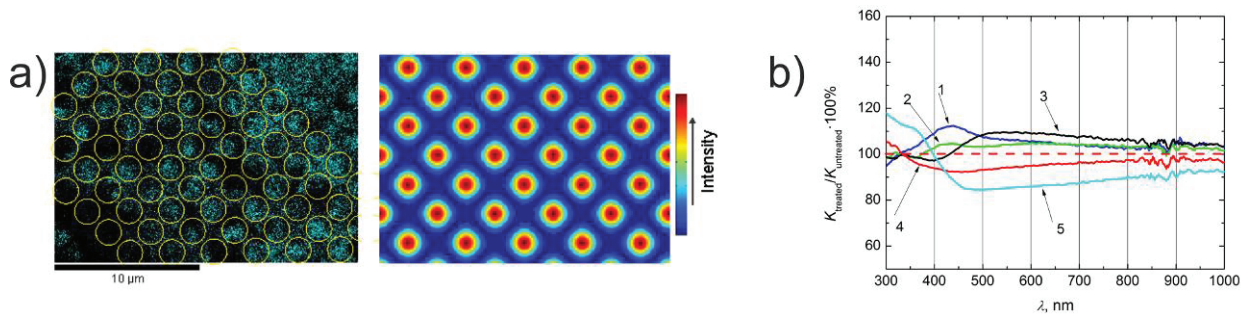
3 lentelė. Tekstūruotų saulės elementų voltamperinių charakteristikų matavimo rezultatai.  $J_{SC}$  – trumpojo jungimo srovės tankis,  $V_{OC}$  – atviros grandinės įtampa,  $J_m$  – srovės tankis saulės elemento maksimalios galios taške,  $V_m$  – įtampa saulės elemento maksimalios galios taške,  $P_{max}$  – galia saulės elemento maksimalios galios taške, FF – saulės elemento užpildos faktorius,  $\eta$  – saulės elemento efektyvumas.

Energijos tankis, J/cm <sup>2</sup>	Impulsų skaičius	$J_{sc\_Tekstūruoto}/J_{sc\_Netekstūruoto}$	$V_{oc\_Tekstūruoto}/V_{oc\_Netekstūruoto}$	$J_m\_Tekstūruoto/J_m\_Netekstūruoto$	$V_m\_Tekstūruoto/V_m\_Netekstūruoto$	$P_{max\_Tekstūruoto}/P_{max\_Netekstūruoto}$	FF ekstūruoto/FF Netekstūruoto	$\eta$ Tekstūruoto/ $\eta$ Netekstūruoto-100%
0,65	50	0,89	0,38	0,26	0,66	0,17	0,53	17,76
0,65	100	0,88	0,37	0,26	0,62	0,16	0,50	16,14
0,65	250	0,86	0,43	0,31	0,62	0,19	0,53	19,43
0,65	500	0,86	0,52	0,39	0,65	0,26	0,58	25,97

0,35	1	0,99	1,00	0,98	1,00	0,98	0,99	98,20
0,35	5	0,99	0,89	0,84	0,79	0,66	0,75	66,24
0,35	10	1,00	0,80	0,81	0,68	0,55	0,68	54,65
0,24	10	1,01	1,00	1,00	1,01	1,01	1,00	100,58
0,24	25	0,99	0,97	0,96	0,92	0,88	0,92	88,30
0,14	25	1,01	1,00	1,00	1,01	1,01	1,00	101,14
0,14	100	1,00	1,00	0,99	1,01	1,00	1,00	99,73

Saulės elementuose, tekstūruotuose naudojant energijos tankį, viršijantį slenkstinį silicio nitrido pašalinimo energijos tankį (0,34 J/cm<sup>2</sup>, nustatytas Liu metodu [10]) buvo stebimas žymus elektrinių charakteristikų pablogėjimas. Smarkus atviros grandinės įtampos  $V_{OC}$  sumažėjimas gali būti siejamas su padidėjusia paviršine krūvininkų rekombinacijos sparta dėl pasyvuojančio sluoksnio pašalinimo ir defektų kiekio silicio padėkle padidėjimo dėl lazerio spinduliuotės poveikio. Tuo tarpu saulės elementuose, tekstūruotuose naudojant energijos tankį, mažesnę nei 0,34 J/cm<sup>2</sup>,  $V_{OC}$  išliko praktiškai nepakitusi, o trumpojo jungimo srovė  $I_{SC}$  išaugo. Tai galima paaiškinti padidėjusiu sugertos Saulės imitatoriaus spinduliuotės kiekiu.

Ištyrus bandinius, apdirbtus naudojant žemesnius nei slenkstinis energijos tankis, buvo rastas deguonies koncentracijos padidėjimas iki 4% lyginant su netekstūruotu bandiniu. Atlikus elementų analizę EDS metodu, buvo pastebėtos periodiškai išsidėsčiusios deguonies sankaupos, kurių išsidėstymas gana gerai atitinka naudotą lazerio pluošto intensyvumo maksimumų pasiskirstymą (3 a pav.).



3 pav. a) Deguonies pasiskirstymo žemėlapis interferuojančiais pluoštais paveiktame bandinyje ( $0.14 \text{ J/cm}^2$ , 1 impulsas) palygintas su sumodeliuotu interferencijos intensyvumo skirstiniu; b) lazeriu tekstūruotų saulės elementų sugerties koeficientų santykio su neapdirbto elemento sugerties koeficientu priklausomybė nuo bangos ilgio. Naudotas energijos tankis: 1 –  $0.08 \text{ J/cm}^2$ ; 2 –  $0.14 \text{ J/cm}^2$ ; 3 –  $0.28 \text{ J/cm}^2$ ; 4 –  $0.57 \text{ J/cm}^2$ ; 5 –  $0.84 \text{ J/cm}^2$ . Visi bandiniai tekstūruoti, naudojant vieną impulsą į vieną vietą.

Buvo išmatuoti lazeriu tekstūruotų saulės elementų difuzinio atspindžio spektrai ir iš jų, naudojant Kubelka-Munk transformaciją [11], įvertinti sugerties koeficientai (3 b pav.). Viršijus silicio nitrido abliacijos slenkstį, buvo stebimas sugerties sumažėjimas beveik visoje matuoto spektro srityje. Tuo tarpu apdirbimas lazeriu žemiau abliacijos slenkščio lėmė sugerties išaugimą 400 – 1000 nm spektro srityje.

## Išvados

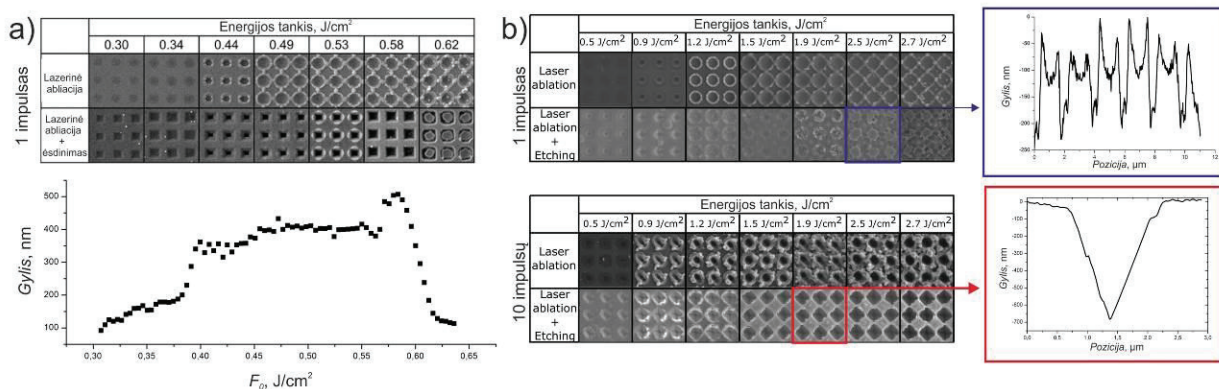
1. Silicio nitrido sluoksnio apdirbimas interferuojančiais lazerio pluoštais, neviršijant silicio nitrido abliacijos slenkščio, lemia periodiškai išdėstytų silicio oksido/oksinitrido salelių susidarymą šiame sluoksnyje.
2. Tokios salelės dėl skirtingo lūžio rodiklio sudaro difrakcinę gardelę, padidinančią šviesos sugertį saulės elemente.
3. Tokiu būdu lazeriu apdirbto saulės elemento efektyvumas išauga iki  $1 \pm 0.6\%$ .

## 5 INVERTUOTŲ PIRAMIDŽIŲ FORMAVIMAS KRISTALINIAME SILICYJE, NAUDOJANT APDIRBIMĄ INTERFERUOJANČIAIS LAZERIO PLUOŠTAIS IR CHEMINĮ ĖSDINIMĄ

Šiame skyriuje pateikta medžiaga buvo publikuota straipsnyje [A8] ir konferencijų pranešimuose [C3], [C5], [C12].

Šiame skyriuje yra aprašomi lazerio spinduliuotės parametų įtakos invertuotų piramidžių masyvų formavimui kristaliniame silicyje, naudojant interferencinę abliaciją ir cheminį ėsdinimą, tyrimai. Aptariamas dėl lazerio spinduliuotės įtakos susidarančių amorfinio silicio ir silicio oksido sluoksnių vaidmuo ėsdinimo procese.

Periodiniai invertuotų piramidžių masyvai kristaliniame silicyje buvo formuojami, naudojant 4 interferuojančių pluoštų stendą ir H4\_532 difrakcinį optinį elementą (1 b pav.). Buvo naudojamas 2  $\mu\text{m}$  interferencijos periodas. Naudojant subnanosekundinio lazerio Atlantic HE I ir II harmonikas (532 nm ir 355 nm), (100) kristalinės orientacijos silicio plokštelės paviršiuje buvo formuojami periodiniai pažeidimų masyvai. Buvo keičiamas spinduliuotės energijos tankis bei impulsų kiekis į vieną vietą. Tekstūravimas buvo atliekamas kambario temperatūroje ore. Po apdirbimo lazeriu plokštelės buvo ėsdinamos 10% KOH tirpale kambario temperatūroje 3 valandas. 4 pav. pateiktos tekstūruotų silicio plokštelių SEM nuotraukos prieš ir po ėsdinimo bei gautų struktūrų gyliai išmatuoti, naudojant AFM.



4 pav. Tekstūruotų bandinių SEM nuotraukos prieš ir po ėsdinimo žingsnio ir pagamintų invertuotų piramidžių gyliai. a) naudotas 532 nm bangos ilgis, b) 355 nm bangos ilgis.

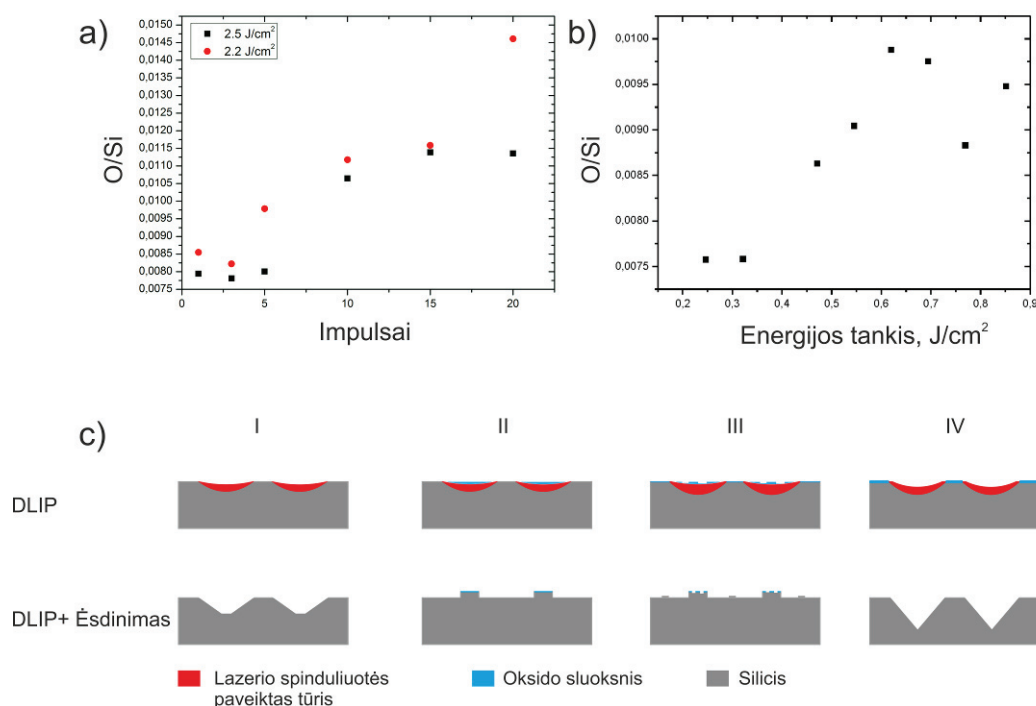
Atlikus eksperimentus su abiem bangos ilgiais, buvo pastebėta, kad naudojant sąlyginai mažą lazerio spinduliuotės energijos tankį, išabliuota duobutė po ėsdinimo pavirsta į nedidelės pagrindo kraštinės ir gylio invertuotą piramidę. Naudojant 532 nm bangos ilgį, didinant energijos tankį piramidės pagrindo plotis ir piramidės gylis auga. Naudojant vieną impulsą į vietą, maksimalus gylis pasiekiamas naudojant  $0.58 \text{ J/cm}^2$  energijos tankį. Ties šia energijos tankio verte paviršiaus tarp piramidžių šiurkštumas sumažėjo, lyginant su šiurkštumu, gautu su mažesnėmis energijos tankio vertėmis. Toliau didinant energijos tankį piramidės centre susiformuoja kūginis stulpelis. 355 nm bangos ilgio atveju, atliekant tekstūravimą 1 impulsu, stulpelių susidarymas buvo stebimas plačioje energijos tankio srityje. Padidinus impulsų skaičių į vieną vietą, buvo formuojamos gilos taisyklingos formos piramidės, o paviršiaus šiurkštumas tarp piramidžių tapo nedideliu. Buvo padaryta išvada, kad, esant tinkamiems apdirbimo parametrams, dėl lazerio spinduliuotės poveikio silicio paviršiuje yra suformuojamas tam tikras sluoksnis, kurio ėsdinimo sparta KOH tirpale yra žymiai mažesnė nei silicio. Yra žinoma, kad naudojant lazerio spinduliuotę silicio paviršiuje galima formuoti silicio oksido [12] arba amorfinio silicio [13] sluoksnius. Abi šios medžiagos pasižymi lėtesne ėsdinimo sparta KOH tirpale nei silicio (100) kristalinė plokštuma.

Ištirus tekstūruotus bandinius Ramano spektroskopijos metodu, nebuvo pastebėta būdingos amorfiniam siliciui juostos. Be to, atlikus papildomus amorfinio silicio formavimo eksperimentus su Atlantic HE II harmonikos vienu lazerio pluoštu, buvo nustatytos amorfinio silicio susidarymo ir pašalinimo sekančiu impulsu slenkstinės energijos tankio vertės ( $0.19 \text{ J/cm}^2$  suformavimui ir  $0.26 \text{ J/cm}^2$  pašalinimui, naudojant 3 impulsus į vieną vietą). Kadangi amorfinio silicio pašalinimo sekančiu impulsu slenkstinė energijos tankio vertė yra mažesnė, nei invertuotų piramidžių formavimui naudotas energijos tankis, buvo padaryta išvada, kad amorfinio silicio susidarymas neturi įtakos invertuotų piramidžių gamybos procesui.

Silicio oksido įtaka buvo įvertinta atlikus tekstūruotų bandinių elementinę EDS analizę. Tekstūruotuose bandiniuose buvo pastebėtas deguonies koncentracijos augimas, didinant spinduliuotės energijos tankį (5 a pav.) ir impulsų skaičių (5 b pav.).

Įvertinus gautų piramidžių kokybę (gylio ir pagrindo kraštinės santykį) buvo nustatyta, kad geriausios kokybės struktūra gaunama, kai vyksta silicio oksido sluoksnio

susidarymas. Kadangi kampas tarp piramidės pagrindo ir briaunos yra nulemtas silicio kristalo savybių, gylio ir pločio santykis turi maksimalią vertę, kurią pasiekus, gaunamos piramidės su smailia viršūne.



5 pav. a) Deguonies ir silicio elementų koncentracijų santykių tekstūruotoje silicio plokštelėje priklausomybė nuo impulsų skaičiaus; b) deguonies ir silicio elementų koncentracijų santykių tekstūruotoje silicio plokštelėje priklausomybė nuo spinduliuotės energijos tankio; c) invertuotų piramidžių formavimas naudojant skirtingus apdirbimo parametrus.

Buvo suformuluotas invertuotų piramidžių susidarymo proceso modelis (5 c pav.):

- Esant sąlyginai mažam spinduliuotės energijos tankiui, suformuojamos seklūs piramidės, kurių gylio ir pločio santykis yra toli nuo ribinio (5 c pav. I).
- Padidinus energijos tankį, intensyvumo smailių paveiktoje zonoje suformuojamos silicio oksido salelės (5 c pav. II).
- Toliau didinant energijos tankį, formuojamas netolygus oksido sluoksnis intensyvumo smailių paveiktose zonose, o silicio oksidacija pradeda vykti ir intensyvumo minimumuose (5 c pav. III).
- Naudojant kelis impulsus į vieną vietą, silicio oksido sluoksnis intensyvumo smailėmis paveiktose zonose pašalinamas, o plotas tarp šių zonų oksiduojamas. Tokiu būdu suformuotas silicio oksido sluoksnis ėsdinimo metu veikia kaip kaukė (5 c pav. IV).

## **Išvados**

1. Naudojant abliaciją interferuojančiais lazerio pluoštais ore ir cheminį ėsdinimą, silicyje galima suformuoti periodinį invertuotų piramidžių masyvą. Silicio paviršiaus oksidacija dėl lazerio spinduliuotės poveikio, yra svarbi piramidžių ėsdinimo procesui.

2. Dėl lazerio spinduliuotės poveikio susidaręs silicio oksido sluoksnis yra suformuojamas tik didžiausio spinduliuotės intensyvumo srityse arba visoje eksponuotoje srityje, priklausomai nuo apdirbimo lazerio spinduliuote sąlygų. Esant tam tikroms apdirbimo sąlygoms (keli lazerio impulsai į vieną vietą), apdirbant lazeriu maksimalaus intensyvumo srityse silicio oksidas yra pašalinamas.

3. Jei silicio oksido sluoksnis suformuojamas visoje eksponuotoje srityje, išskyrus maksimalaus intensyvumo zonas, jis ėsdinimo metu atlieka ėsdinimo kaukės vaidmenį ir leidžia gauti geros kokybės invertuotų piramidžių struktūras. Nustatytas geriausiai tinkantis invertuotų piramidžių formavimui apdirbimo režimas, kai į vieną vietą tenka ne mažiau nei 10 lazerio impulsų.

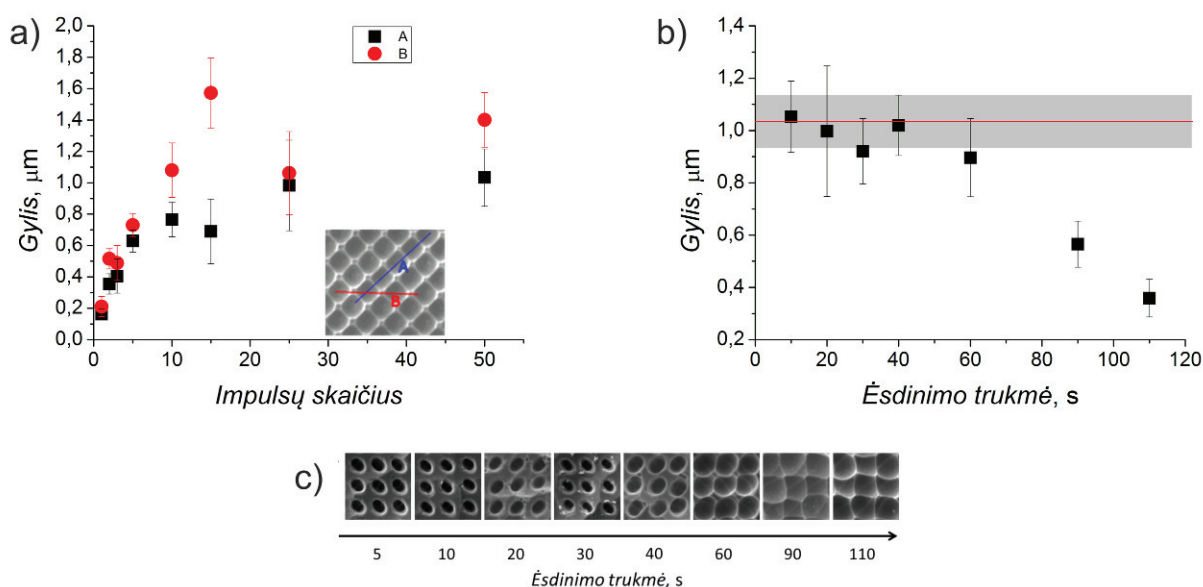
## **6 PERIODINIŲ PAVIRŠIAUS STRUKTŪRŲ GAMYBA MULTIKRISTALINIAME SILICYJE, NAUDOJANT ABLIACIJĄ INTERFERUOJANČIAIS LAZERIO PLUOŠTAIS IR CHEMINĮ ĖSDINIMĄ**

**Šiame skyriuje pateikta medžiaga buvo publikuota straipsniuose [A5], [A8] ir konferencijų pranešimuose [C1], [C5], [C6], [C10], [C12].**

Tyrimams buvo naudojamos multikristalinio silicio plokštelės, kaip pradinė medžiaga fotovoltinių elementų gamybai. Pradžioje jos buvo ėsdinamos, naudojant izotropinio arba anizotropinio ėsdinimo tirpalą, siekiant pašalinti viršutinį plokštelės sluoksnį su defektais, atsiradusiais plokštelės atplovimo metu. Tokiu būdu nupoliruotos plokštelės buvo tekstūruojamos, naudojant 4 pluoštų interferencijos standą (1 b pav.). Naudojant sub-nanosekundinį lazerį Atlantic HE ir difrakcinius optinius elementus H4\_532 ir H4\_355 buvo atlikti skirtingo periodo duobučių masyvų formavimo eksperimentai: 2  $\mu\text{m}$ , 1  $\mu\text{m}$ , 0.6  $\mu\text{m}$  ir 0.4  $\mu\text{m}$ . 0.4  $\mu\text{m}$  periodo struktūroms buvo naudojamas 355 nm bangos ilgis, o visų kitų periodų struktūroms 532 nm bangos ilgis.

Po apdirbimo lazeriu multikristalinio silicio plokštelės buvo dar kartą ėsdinamos izotropinio ėsdinimo tirpale, siekiant pašalinti apdirbimo lazeriu metu susidariusį oksidą ir viršutinį silicio sluoksnį, kuriame dėl spinduliuotės poveikio išaugo defektų koncentracija.

Buvo ištirta impulsų skaičiaus į vieną vietą ir ėsdinimo trukmės įtaka gaunamų duobučių matmenims. 2 μm periodo duobučių masyvo duobučių gylis augo, didinant impulsų skaičių į vieną vietą iki 25 impulsų (6 a pav.). Esant didesniems impulsų skaičiams, duobučių gylis nebeauga, tačiau sumažėja sienelių aukštis, dėl ko sumažėja ir tikimybė krintančiam šviesos spinduliui patirti kelis atspindžius nuo struktūros sienelių. Duobučių gylio priklausomybė nuo ėsdinimo trukmės, abliuojant 25 impulsais į vieną vietą pateikta 6 b pav. Didėjant ėsdinimo trukmei, duobučių gylis mažėja, tačiau mažėja ir plokštumos tarp duobučių plotas (6 c pav).



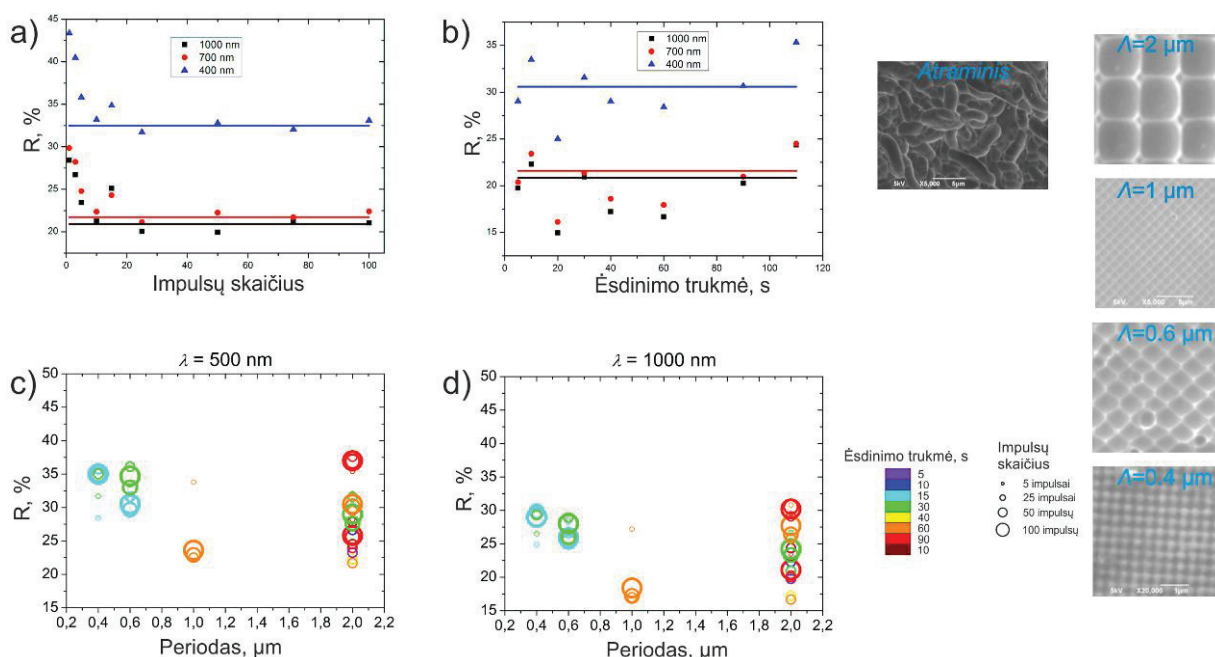
6 pav. a) Struktūros gylio priklausomybė nuo impulsų skaičiaus į vieną vietą (energijos tankis 2.67 J/cm<sup>2</sup>, ėsdinimo trukmė 90 s); b) struktūros gylio priklausomybė nuo ėsdinimo trukmės (energijos tankis 2.67 J/cm<sup>2</sup>, 25 impulsai į vieną vietą); c) struktūrų, ėsdintų skirtingą trukmę SEM nuotraukos (energijos tankis 2.67 J/cm<sup>2</sup>, 25 impulsai į vieną vietą).

Norint įvertinti pagamintų struktūrų skaidrinimo savybes, buvo išmatuotas pilnas (difuzinis ir veidrodinis) pagamintų tekstūrų atspindys, naudojant integruojančią sferą. Atspindžio vertės buvo lyginamos su atraminio bandinio (izotropiškai ėsdintos multikristalinio silicio plokštelės) atspindžio vertėmis. 2 μm periodo struktūrų atspindžio koeficiento priklausomybės nuo impulsų skaičiaus į vieną vietą ir ėsdinimo trukmės yra



pateiktos 7 pav. Gauti duomenys rodo, kad atspindžio koeficientas mažėja, didinant impulsų skaičių į vieną vietą iki 25, o toliau didinant impulsų skaičių praktiškai lieka pastovus (7 a pav.). Keičiant ėsdinimo trukmę, buvo stebimas atspindžio koeficiento minimumas ties 40-60 s ėsdinimo trukme (7 b pav.), kadangi naudojant trumpą ėsdinimą gaunamos gilesnės duobutės, tačiau lieka didelis atstumas tarp duobučių. Tuo tarpu naudojant ilgas ėsdinimo trukmes sumažėja duobučių gylis, bet išauga jų skersmuo. Esant optimaliai ėsdinimo trukmei, 700-1000 nm srityje gautas 17.5% atspindžio koeficientas, kuris yra mažesnis nei atraminio bandinio.

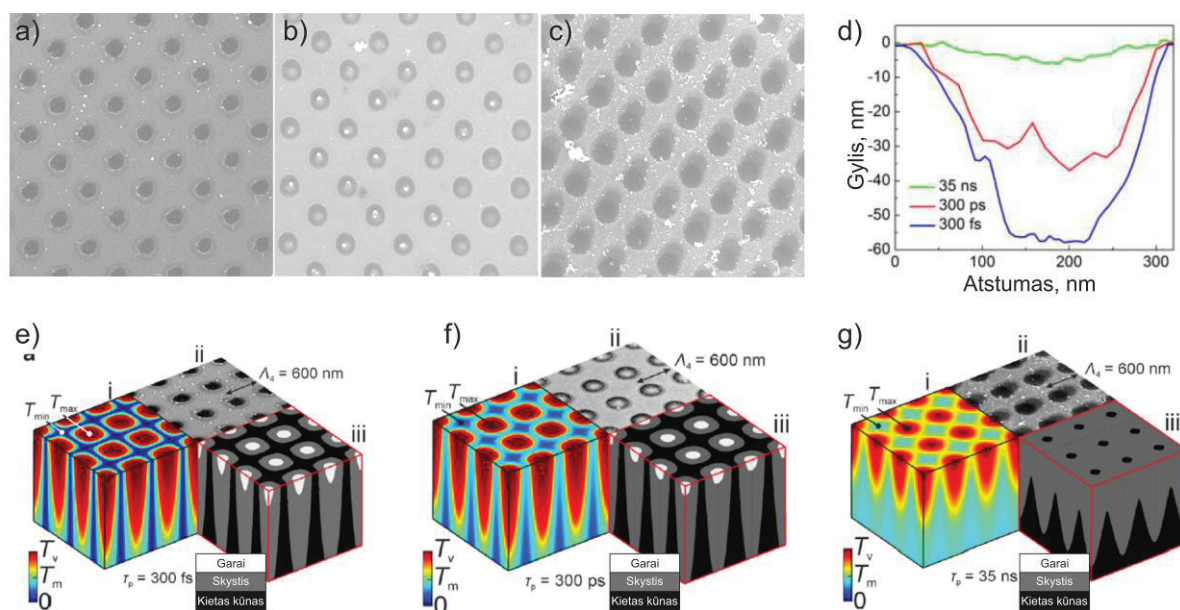
Tolimesniuose eksperimentuose buvo palygintos įvairių periodų struktūrų atspindžio savybės (7 c,d pav.). 2  $\mu\text{m}$  ir 1  $\mu\text{m}$  periodo tekstūros pasižymėjo žymiai geresnėmis atspindį mažinančiomis savybėmis, nei mažo periodo (0.6  $\mu\text{m}$  ir 0.4  $\mu\text{m}$ ) tekstūros.



7 pav. Atspindžio koeficiento  $R$  priklausomybės nuo pagamintų struktūrų parametrų. a) Atspindžio koeficiento priklausomybė nuo lazerio impulsų skaičiaus 400, 700, ir 1000 nm bangos ilgiams; b) atspindžio koeficiento priklausomybė nuo ėsdinimo trukmės 400, 700, ir 1000 nm bangos ilgiams; c), d) atspindžio koeficiento priklausomybė nuo gamybos parametrų ir struktūros periodo atitinkamai 500 nm ir 1000 nm bangos ilgiams.

Šis rezultatas nesutampa su 6 disertacijos skyriuje pateiktais periodinių struktūrų atspindžio modeliavimo rezultatais. Šį nesutapimą galima paaiškinti skirtumu tarp interferencinio skirtinio poveikio medžiagai, naudojant skirtingo periodo skirstinius.

Esant mažam interferencinio skirstinio periodui, atstumai tarp interferencijos intensyvumo smailių tampa palyginami su šilumos difuzijos nuotoliu medžiagoje. Todėl, naudojant mažus periodus su santykinai ilgais 300 ps trukmės lazerio impulsais, sumažėja išabliuotos struktūros gylis. Esant nedideliam energijos tankiui arba impulsų kiekiui į vietą gaunama sąlyginai mažo gylio struktūra. Išabliuotų duobučių centre dėl išlydytos medžiagos tekėjimo susiformuoja stulpeliai (8 b pav.). Esant dideliam energijos tankiui ar impulsų kiekiui į vieną vietą lydoma medžiaga tarp intensyvumo smailių. Tokiu atveju gaunama netvarkinga tekstūra.



8 pav. Išabliuotų kristaliniame silicyje 600 nm periodo struktūrų, naudojant skirtingas (300 fs, 300 ps, 35 ns) lazerio impulso trukmes palyginimas. a) – c) Duobučių išabliuotų su atitinkamai 300 fs, 300 ps ir 35 ns trukmės impulsais SEM nuotraukos; d) AFM mikroskopu išmatuoti duobučių gyliai; e) – g) sumodeliuotas temperatūros pasiskirstymas silicio tūryje lazerio impulso pabaigoje, atitinkamai 300 fs, 300 ps ir 35 ns trukmės impulsams.

8 pav. pateiktas struktūrų, išabliuotų kristaliniame silicyje, naudojant 600 nm interferencijos periodą ir skirtingos trukmės lazerio impulsus, palyginimas. Esant vienodam išabliuotų duobučių skersmeniui (8 a–c pav.), duobučių gylis priklauso nuo lazerio impulso trukmės (8 d pav.). Tai išplaukia iš skirtingų šilumos pasiskirstymų, esant įvairioms lazerio impulso trukmėms. Sumodeliuoti šilumos pasiskirstymo silicio tūryje pasibaigus lazerio impulsui duomenys yra pateikti 8 e–g pav. Modeliavimas detaliau aprašytas disertacijos A priede. Kaip matyti iš modeliavimo rezultatų, didėjant

lazerio impulso trukmei, išlydytos medžiagos tūris išauga, o išgarintos sumažėja. Tai lemia sąlyginai mažą išabliuotą gylį, naudojant ilgas lazerio impulso trukmes.

### **Išvados**

1. Duobučių tekstūra multikristaliniame silicyje, pagaminta naudojant abliaciją interferuojančiais pluoštais su 300 ps trukmės lazerio impulsais, ir izotropinį cheminį ėsdinimą, leidžia pasiekti 17.5 % multikristalinio silicio atspindžio koeficientą 700 – 1000 nm spektro srityje.

2. Mažesnio nei vienas mikrometras periodo duobučių tekstūros pasižymėjo didesniais atspindžio koeficientais nei 1  $\mu\text{m}$  ar 2  $\mu\text{m}$  periodo tekstūros. Šis rezultatas gali būti paaiškintas nedideliu išabliuotų duobučių gyliu (esant tokiems apdirbimo lazeriu parametrams, kai dar išlaikoma tvarkinga struktūra) dėl sąlyginai ilgų (300 ps) lazerio impulsų sąlygoto lydalo susidarymo.

3. Eksperimentai ir kompiuterinis modeliavimas rodo, kad norint padidinti mažesnio nei 1  $\mu\text{m}$  periodo periodinių tekstūrų gylį, reikalingi femtosekundiniai arba subpikosekundiniai lazerio impulsai. DLIP metodu išabliuotos 600 nm periodo struktūros gylis (išlaikant tą patį duobutės skersmenį) gali būti padidintas 2 kartus, sumtrumpinus impulso trukmę nuo 300 ps iki 300 fs.

## **7 DLIP METODO TAIKYMAS STRUKTŪRŲ PLONUOSE METALO SLUOKSNIUOSE GAMYBAI**

**Šiame skyriuje pateikta medžiaga buvo publikuota straipsniuose [A4], [A6] ir konferencijų pranešimuose [C7], [C9], [C11], [C13]**

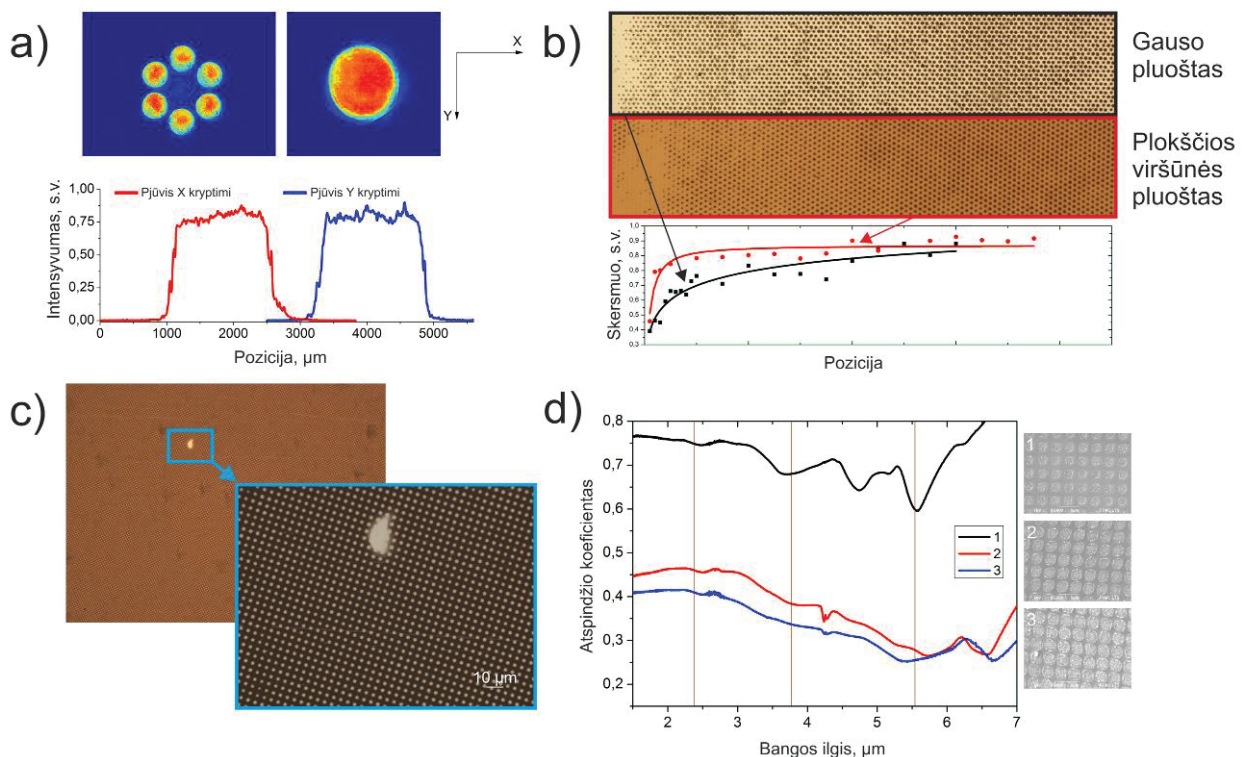
### **7.1 Apdirbimo tolygumo didinimas DLIP metode**

Šiame skyriuje aprašomi interferencinės abliacijos metodo taikymo plazmoninių metalo struktūrų gamybai tyrimai. Tokių struktūrų gamyba yra nemenkas iššūkis dėl reikalingos didelės apdirbimo spartos tuo pačiu išlaikant aukštą apdirbimo tikslumą. Interferencinės abliacijos metodas šiam tikslui yra patrauklus dėl savo paprastumo ir galimybės apdirbti sąlyginai didelius plotus vienos ekspozicijos metu. Vis dėlto, naudojant DLIP metodą, susiduriama su keletu iššūkių, tokių kaip išabliuotos struktūros tolygumas dideliame plote ir struktūros formos valdymas.

Siekiant padidinti abliuojamos struktūros tolygumą buvo išbandyti keli būdai:

- Pluošto formavimas plokščios viršūnės pluošto formuotuvu **GTH-5-250-4** (Topag Lasertechnik GmbH).
- Pluošto formavimas plokščios viršūnės pluošto formuotuvu  **$\pi$ Shaper 6\_6\_532** (AdlOptica GmbH).
- Pluošto skenavimas per interferencijos optinę sistemą.

Naudojant abu pluošto formuotuvus, plokščios viršūnės pluoštas buvo suformuojamas ant DOE paviršiaus (1 d pav.). **GTH-5-250-4** formuotuvus plokščios viršūnės pluoštą (kvadrato formos skerspjūvio) suformuoja tik vienoje plokštumoje, o  **$\pi$ Shaper 6\_6\_532** leidžia gauti kolimuotą plokščios viršūnės (skritulio formos skerspjūvio, 9 a pav.) pluoštą. Atstumas, kurį neiškraipytas nusklinda šiuo elementu suformuotas pluoštas palyginamas su interferencinės sistemos ilgiu. Dėl šios savybės šis elementas leido gauti geresnį rezultatą nei **GTH-5-250-4**. Gauso pluoštu ir  **$\pi$ Shaper 6\_6\_532 suformuotu** pluoštu išabliuotos struktūros yra palygintos 9 b pav.

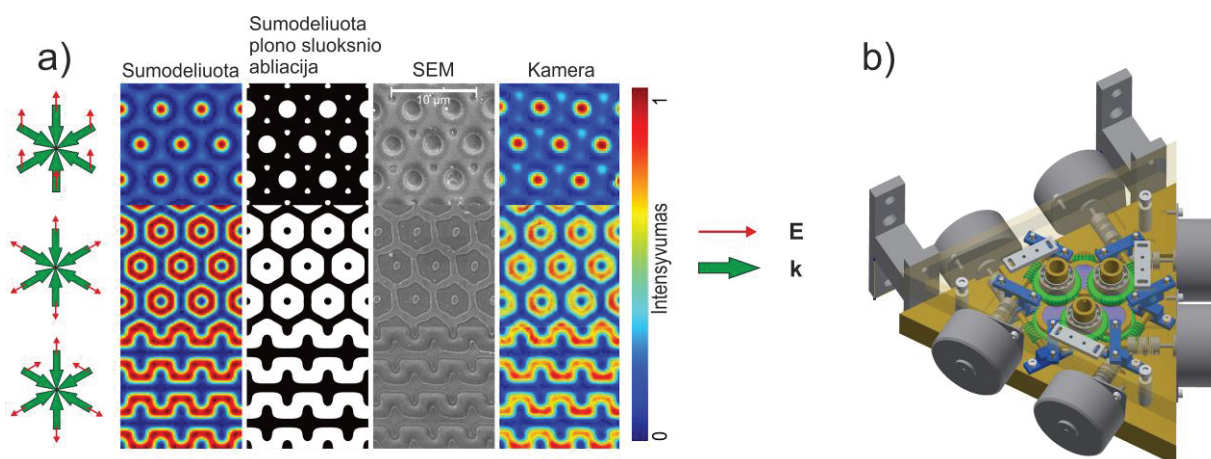


9 pav. a) 6 interferuojančių plokščios viršūnės pluoštų intensyvumo pasiskirstymas, užfiksuotas kamera; b) skylių, išabliuotų chromo dangoje naudojant Gauso ir plokščios viršūnės pluoštus, sunormuoto skersmens pasiskirstymas atstume nuo abliacijos dėmės krašto iki centro; c) didelio ploto chromo dangos tekstūravimas naudojant pluošto skenavimą per interferencinę sistemą; d) periodinių apertūrų masivių aliuminio dangoje ant safyro padėklo atspindžio koeficiento spektrai.

$\pi$ Shaper 6\_6\_532 pluošto formuotuvo panaudojimas leidžia padidinti išabliuojamos struktūros tolygumą vienos lazerio ekspozicijos metu tekstūruojamame plote. Tačiau praktiniams taikymams tokio ploto dažniausiai nepakanka. Tolygus didelio ploto tekstūravimas ( $5 \times 5 \text{ mm}^2$   $3.4 \mu\text{m}$  interferencijos periodui) buvo pasiektas, skenuojant pluoštą per interferencijos optinę sistemą (1 e pav.). Tokiu būdu buvo pasiektas tikslus skirtingų ekspozicijų metu išabliuojamų formų persiklojimas. Šiuo metodu buvo suformuotos plazmoninės struktūros IR sričiai (9 d pav.).

## 7.2 Interferencinio skirstinio valdymas atskirų pluoštų poliarizacija

Šiame skyriuje aprašoma eksperimentinė 6 interferuojančių pluoštų valdymo sistemos realizacija ir kampo tarp interferuojančių pluoštų įtaka interferenciniam skirstiniui, esant įvairioms pluoštų poliarizacijos būsenoms. Eksperimentai buvo atlikti naudojant 1 c pav. parodytą optinę sistemą ir II Atlantic HE lazerio harmoniką. Eksperimento rezultatai buvo lyginami su modeliavimu. Gautas geras atitikimas tarp eksperimento ir modeliavimo (10 pav.). Taip pat buvo įvertinta kampo tarp pluoštų (kuris daro įtaką interferencinio skirstinio periodui) įtaka interferencijos intensyvumo skirstiniui, skirtingoms pluoštų poliarizacijos būsenoms.



10 pav. Pluoštų poliarizacijos valdymas 6 interferuojančių pluoštų sistemoje. a) Eksperimento ir modeliavimo palyginimas, naudojant 7.5 deg puskampį tarp interferuojančių pluoštų; b) motorizuotas 6 pluoštų poliarizacijos valdymo mazgas.

Kelių pluoštų interferencijos intensyvumo pasiskirstymas buvo modeliuojamas naudojant išraišką [14]:

$$|\mathbf{E}|^2(x, y, z) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N |\mathbf{E}_{i0}|^2 + \sum_{j>i=1}^N \sum_{i=1}^N \mathbf{E}_{i0} \mathbf{E}_{j0} \cdot \cos((\mathbf{k}_i - \mathbf{k}_j) \mathbf{r} + \varphi_i - \varphi_j). \quad (1)$$

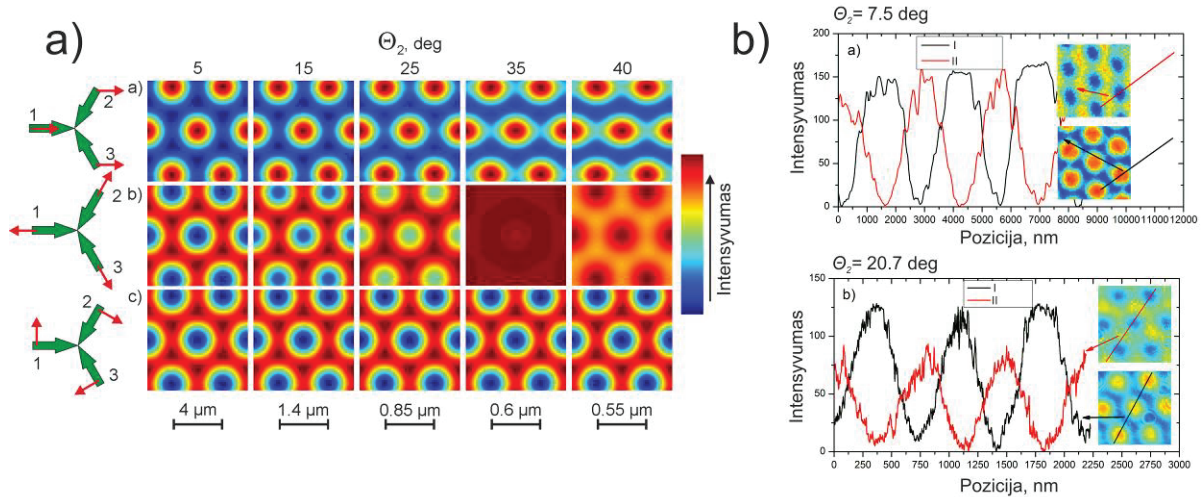
Šioje išraiškoje,  $\mathbf{E}_{i0}$  yra  $i$ -tojo pluošto elektrinio lauko amplitudė,  $\mathbf{k}_i$  yra bangos vektoriai,  $\varphi_i$  yra pluošto optinė fazė,  $\mathbf{r}$  yra spindulys vektorius,  $N$  yra pluoštų skaičius. Naudojant (1) išraišką, buvo įvertinta, kokią įtaką vertikali elektrinio lauko komponentė daro interferencijos intensyvumo skirstiniui ir moduliacijos gyliui. Pavyzdžiui, jei trys interferuojantys pluoštai yra poliarizuoti viena kryptimi, (11 a pav. pirma eilutė), (1) išraiška tampa:

$$I(x, y, z) \cong 1 \frac{1}{2} E_x^2 + \frac{3}{4} E_z^2 + \left( E_x^2 - \frac{1}{2} E_z^2 \right) \cdot \cos((\mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_2) \mathbf{r}) + \left( E_x^2 - \frac{1}{2} E_z^2 \right) \cdot \cos((\mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_3) \mathbf{r}) + \left( E_x^2 + \frac{1}{4} E_z^2 \right) \cdot \cos((\mathbf{k}_2 - \mathbf{k}_3) \mathbf{r}); \quad (2)$$

$$E_x = E \cos \Theta_2;$$

$$E_z = E \sin \Theta_2;$$

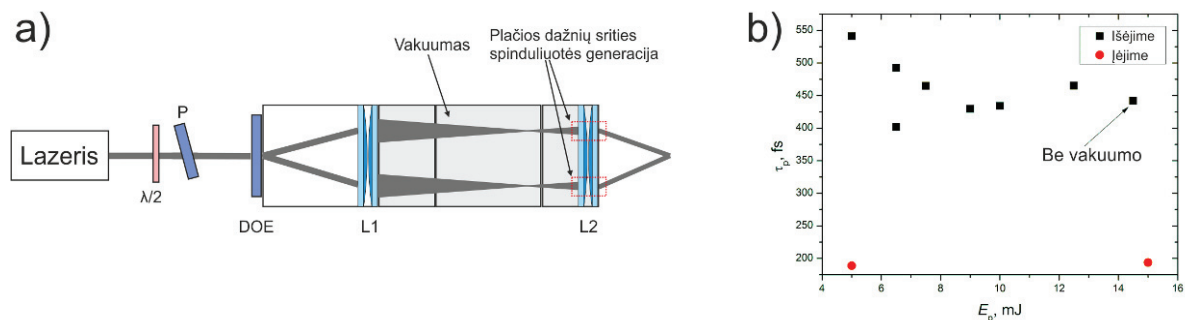
Didėjant puskampui tarp pluoštų  $\Theta_2$ , auga vertikalios elektrinio lauko komponentės  $E_z$  įtaka. Ši įtaka stebima kaip moduliacijos gylio sumažėjimas ir pakitimai intensyvumo skirstinio formoje. To kai kuriais atvejais galima išvengti, parenkant poliarizacijos vektorių kryptis (11 a pav.). Galima apibrėžti, kad į vertikalią elektrinio lauko komponentę reikia atsižvelgti, kai kampas  $\Theta_2$  viršija  $13^\circ$ . Interferuojant dviems p poliarizacijos pluoštams, kampui  $\Theta_2$  viršijus šią vertę, moduliacijos gylis sumažėja 10 %, lyginant su atveju, kai  $\Theta_2=0$ .



11 pav. a) Trijų pluoštų interferencijos intensyvumo skirstiniai esant įvairioms pluoštų poliarizacijoms ir puskampiams tarp pluoštų  $\Theta_2$ ; b) kamera užfiksuoti 3 pluoštų intensyvumo skirstiniai esant skirtingoms pluoštų poliarizacijos kryptims ir kampams  $\Theta_2$  (I atitinka a) paveikslą pirmą eilutę, II atitinka a) paveikslą antrą eilutę).

### 7.3 DLIP optinės sistemos pritaikymas didelės energijos ultratrumpiesiems impulsams

Norint išnaudoti DLIP sistemos potencialą, reikalingas didelės impulso energijos lazerinis šaltinis. Jei tuo pačiu norima išlaikyti aukštą mažesnių nei 1 mikrometras struktūrų gamybos kokybę, reikalinga ir maža impulso trukmė. Todėl interferencinio apdirbimo sistema buvo išbandyta su didelės impulso energijos (15 mJ @1030 nm) 200 fs impulso trukmės lazeriu (gamintojas Amplitude KG). Buvo naudojama 4 pluoštų interferencijos sistema su MS-546-J-Y-A difrakciniu elementu, skirtu 1030 nm bangos ilgiui ir lydyto kvarco objektyvais. Lazerio impulso charakteristikos sistemos įėjime ir išėjime buvo matuojamos, naudojant FROG (*Frequency Resolved Optical Gating*) metodą. Siekiant išvengti plazmos sužadinimo ore, tarp interferencinės sistemos lęšių, kur lazerio pluoštai yra fokusuojami, buvo sudarytas vakuumas (200 mBar). Lėšiai taip atliko vakuumo kameros langelių vaidmenį (12 a pav.).



12 pav. a) DLIP sistema, skirta darbui su didelės impulso energijos ultratrumpiais impulsais; b) impulso trukmės  $\tau_p$  priklausomybė nuo impulso energijos  $E_p$ .

Pluošto skersmuo sistemos įėjime buvo 4 mm, tačiau lęšį L2 pasiekė mažesnio skersmens pluoštai. Todėl lęšyje L2 buvo stebimas plačios spektro srities spinduliuotės generavimas dėl netiesinių reiškinių. Taip pat buvo stebimas maždaug dvigubas impulso trukmės pailgėjimas sistemos išėjime (12 b pav.). Stiprus netiesinis efektas nebebuvo stebimas, pailginus įeinančio į sistemą impulso trukmę iki 400 fs. Sistema buvo išbandyta ją išvakuumavus ir be vakuomo. Ženklios vakuomo įtakos impulso charakteristikoms nebuvo nustatyta, tačiau vakuumas reikalingas, norint išvengti galimų impulso energijos svyravimų dėl plazmos sužadinimo ore.

## **Išvados**

1. Interferencinio apdirbimo sistema gali būti naudojama sąlyginai didelių plotų apdirbimui, naudojant pluošto formavimą arba pluošto skenavimą per interferencinę sistemą.
2. Galimybė keisti interferencijos intensyvumo skirstinį valdant atskirų pluoštų poliarizaciją leidžia priderinti gaunamą periodinę struktūrą norimam taikymui.
3. Interferencijos intensyvumo skirstiniai, gauti naudojant vienodą poliarizaciją visiems pluoštams keičiant kampą tarp pluoštų kinta nesmarkiai. Žymiausi pakitimai buvo stebimi naudojant pluoštus su įvairiomis poliarizacijos kryptimis. Kampo tarp pluoštų įtakos intensyvumo pasiskirstymui galima išvengti, jei visi pluoštai yra s poliarizuoti.
4. Naudojant 4 pluoštų interferencijos sistemą su 15 mJ energijos ir 200 fs trukmės impulsais, lazerio impulso trukmė praėjus interferencijos optinę sistemą pailgėjo du kartus iki 400 fs dėl netiesinių efektų viename iš naudotų lydyto kvarco objektyvų. Šių efektų buvo galima išvengti pailginus įeinančio impulso trukmę iki 400 fs. Netiesinių efektų būtų galima išvengti naudojant kitokio optinio stiklo (su mažesniu netiesiniu lūžio rodikliu) optiką.



## IŠVADŲ SĄRAŠAS

1. Silicio nitrido sluoksnio apdirbimas interferuojančiais lazerio pluoštais, neviršijant silicio nitrido abliacijos slenksčio, lemia periodiškai išdėstytų silicio oksido/oksinitrido salelių susidarymą šiame sluoksnyje.

2. Tokios salelės dėl skirtingo lūžio rodiklio sudaro difrakcinę gardelę, padidinančią šviesos sugertį saulės elemente.

3. Tokiu būdu lazeriu apdirbto saulės elemento efektyvumas išauga iki  $1 \pm 0.6\%$ .

4. Naudojant abliaciją interferuojančiais lazerio pluoštais ore ir cheminį ėsdinimą, silicyje galima suformuoti periodinį invertuotų piramidžių masyvą. Silicio paviršiaus oksidacija dėl lazerio spinduliuotės poveikio, yra svarbi piramidžių ėsdinimo procesui.

5. Dėl lazerio spinduliuotės poveikio susidaręs silicio oksido sluoksnis yra suformuojamas tik didžiausio spinduliuotės intensyvumo srityse arba visoje eksponuotoje srityje, priklausomai nuo apdirbimo lazerio spinduliuote sąlygų. Esant tam tikroms apdirbimo sąlygoms (keli lazerio impulsai į vieną vietą), apdirbant lazeriu maksimalaus intensyvumo srityse silicio oksidas yra pašalinamas.

6. Jei silicio oksido sluoksnis suformuojamas visoje eksponuotoje srityje, išskyrus maksimalaus intensyvumo zonas, jis ėsdinimo metu atlieka ėsdinimo kaukės vaidmenį ir leidžia gauti geros kokybės invertuotų piramidžių struktūras. Nustatytas geriausiai tinkantis invertuotų piramidžių formavimui apdirbimo režimas, kai į vieną vietą tenka ne mažiau nei 10 lazerio impulsų.

7. Duobučių tekstūra multikristaliniame silicyje, pagaminta naudojant abliaciją interferuojančiais pluoštais su 300 ps trukmės lazerio impulsais, ir izotropinį cheminį ėsdinimą, leidžia pasiekti 17.5 % multikristalinio silicio atspindžio koeficientą 700 – 1000 nm spektro srityje.

8. Mažesnio nei vienas mikrometras periodo duobučių tekstūros pasižymėjo didesniais atspindžio koeficientais nei 1  $\mu\text{m}$  ar 2  $\mu\text{m}$  periodo tekstūros. Šis rezultatas gali būti paaiškintas nedideliu išabliuotų duobučių gyliu (esant tokiems apdirbimo lazeriu

parametrams, kai dar išlaikoma tvarkinga struktūra) dėl sąlyginai ilgų (300 ps) lazerio impulsų sąlygoto lydalo susidarymo.

9. Eksperimentai ir kompiuterinis modeliavimas rodo, kad norint padidinti mažesnio nei 1  $\mu\text{m}$  periodo periodinių tekstūrų gylį, reikalingi femtosekundiniai arba subpikosekundiniai lazerio impulsai. DLIP metodu išabliuotos 600 nm periodo struktūros gylis (išlaikant tą patį duobutės skersmenį) gali būti padidintas 2 kartus, sumtrumpinus impulso trukmę nuo 300 ps iki 300 fs.

10. Interferencinio apdirbimo sistema gali būti naudojama sąlyginai didelių plotų apdirbimui, naudojant pluošto formavimą arba pluošto skenavimą per interferencinę sistemą.

11. Galimybė keisti interferencijos intensyvumo skirstinį valdant atskirų pluoštų poliarizaciją leidžia priderinti gaunamą periodinę struktūrą norimam taikymui.

12. Interferencijos intensyvumo skirstiniai, gauti naudojant vienodą poliarizaciją visiems pluoštams keičiant kampą tarp pluoštų kinta nesmarkiai. Žymiausi pakitimai buvo stebimi naudojant pluoštus su įvairiomis poliarizacijos kryptimis. Kampo tarp pluoštų įtakos intensyvumo pasiskirstymui galima išvengti, jei visi pluoštai yra s poliarizuoti.

13. Naudojant 4 pluoštų interferencijos sistemą su 15 mJ energijos ir 200 fs trukmės impulsais, lazerio impulso trukmė praėjus interferencijos optinę sistemą pailgėjo du kartus iki 400 fs dėl netiesinių efektų viename iš naudotų lydyto kvarco objektyvų. Šių efektų buvo galima išvengti pailginus įeinančio impulso trukmę iki 400 fs. Netiesinių efektų būtų galima išvengti naudojant kitokio optinio stiklo (su mažesniu netiesiniu lūžio rodikliu) optiką.

## LITERATŪROS SARAŠAS

- [1]. G. Gomard, R. Peretti, E. Drouard, X. Meng and C. Seassal, Photonic crystals and optical mode engineering for thin film photovoltaics. *Opt. Express* **21**, A515-A527 (2013).
- [2]. K. S. Cho, P. Mandal, K. Kim, et al., Improved efficiency in GaAs solar cells by 1D and 2D nanopatterns fabricated by laser interference lithography. *Opt. Commun.* **284**, 2608-2612 (2011).
- [3]. N. Wang, Y. Zhu, W. Wei, J. Chen, P. Li and Y. Wen, Conversion efficiency enhanced photovoltaic device with nanohole arrays in antireflection coating layer. *Opt. Commun.* **284**, 4773-4777 (2011).
- [4]. H. A. Atwater and A. Polman, Plasmonics for improved photovoltaic devices. *Nat Mater* **9**, 205-213 (2010).
- [5]. P. Spinelli, V. E. Ferry, J. van de Groep, et al., Plasmonic light trapping in thin-film Si solar cells. *J. Opt.* **14**, 024002 (2012).
- [6]. H. Sai, T. Matsui, K. Matsubara, M. Kondo and I. Yoshida, 11.0%-Efficient Thin-Film Microcrystalline Silicon Solar Cells with Honeycomb Textured Substrates. *IEEE J. Photovolt.* **4**, 1349-1353 (2014).
- [7]. L. Müller-Meskamp, Y. H. Kim, T. Roch, et al., Efficiency Enhancement of Organic Solar Cells by Fabricating Periodic Surface Textures using Direct Laser Interference Patterning. *Adv. Mater.* **24**, 906-910 (2012).
- [8]. Y. Nakata, Interference laser processing. *Advanced Optical Technologies* **5**, 29-38 (2016).
- [9]. A. Shah, *Thin-Film Silicon Solar Cells*. (EFPL Press, 2010).
- [10]. J. M. Liu, Simple technique for measurements of pulsed Gaussian-beam spot sizes. *Opt. Lett.* **7**, 196-8 (1982).
- [11]. H. G. Hecht, The Interpretation of Diffuse Reflectance Spectra. *J. Res. Natl. Bur. Stand., Sect. A* **80A**, 567-583 (1976).
- [12]. F. Micheli and I. W. Boyd, Photon-controlled oxidation of silicon. *Appl. Phys. Lett.* **51**, 1149-1151 (1987).
- [13]. A. Kiani, K. Venkatakrisnan and B. Tan, Micro/nano scale amorphization of silicon by femtosecond laser irradiation. *Opt. Express* **17**, 16518-16526 (2009).
- [14]. S. Indrišiūnas, B. Voisiat, M. Gedvilas and G. Račiukaitis, Two complementary ways of thin-metal-film patterning using laser beam interference and direct ablation. *J. Micromech. Microeng.* **23**, 095034 (2013).

## SANTRAUKA ANGLŲ KALBA (SUMMARY)

In this thesis research results on the application of the direct laser interference patterning (DLIP) method for the fabrication of light management structures for photovoltaics are presented.

In chapter 4 fabrication of periodical grating in the silicon solar cell silicon nitride passivation/antireflective layer using DLIP is investigated. It was shown that when patterning is performed with the energy density below the ablation threshold, silicon nitride layer is periodically modified to form silicon nitride/oxy-nitride grating. Such grating can be used to achieve 1% efficiency increase of the patterned solar cell due to increased light absorption.

In chapter 5 results on fabrication of inverted pyramid pattern in crystalline silicon using DLIP and anisotropic wet chemical etching are presented. It was found that morphology of the fabricated structure strongly depends on the irradiation fluence and number of laser pulses per spot. This dependence is mainly caused by the formation of silicon oxide layer as the result of irradiation with laser beam in air. Fabrication parameters allowing growth of this layer in the entire irradiated area, except the interference ablation spots, were found. Such regime provided fabrication of good quality inverted pyramid structures.

In chapter 6 formation of periodical dimple arrays in multicrystalline silicon using DLIP and isotropic wet chemical etching are presented. Optimal fabrication conditions to minimise reflectance of the sample using 2  $\mu\text{m}$  pattern period was found. It was shown that 2  $\mu\text{m}$  period structure provided better antireflective properties than sub-micrometre structures. However, the cause of such result is low quality of the sub-micrometre structures due to heat diffusion from the interference intensity peaks. It was shown, that the ultrashort laser pulses are required for quality fabrication of sub-micrometre patterns.

In chapter 7 possibility to use interference patterning for the fabrication of plasmonic structures in thin metal films is investigated. In this chapter various techniques for increasing DLIP uniform patterning area and patterning flexibility are presented. Results concerning application of DLIP setup with high pulse energy femtosecond laser are provided.

## TRUMPOS ŽINIOS APIE DOKTORANTĄ

**Vardas:** Simonas  
**Pavardė:** Indrišiūnas  
**Gimimo data:** 1987 10 01  
**Gimimo vieta:** Vilnius  
**El. paštas:** simonas.indrasiunas@ftmc.lt  
**Telefono Nr.:** +37067176466

**Išsilavinimas:**

1995 – 2007 Vilniaus Šeškinės vidurinė mokykla  
2007 – 2011 Fizikos bakalauro diplomas (Kompiuterinė fizika), Vilniaus Universitetas  
2011 – 2013 Fizikos magistro diplomas (Lazerinė fizika ir optinės technologijos), Vilniaus Universitetas  
2013 – 2017 Doktorantūros studijos, Fizinių ir technologijos mokslų centras ir Vilniaus Universitetas

**Darbo patirtis:** Nuo 2013 Fizinių ir technologijos mokslų centre