

VILNIAUS UNIVERSITETAS  
FIZINIŲ IR TECHNOLOGIJOS MOKSLŲ CENTRO  
FIZIKOS INSTITUTAS

Paulius Gečys

**PLONASLUOKSNIŲ SAULĖS ELEMENTŲ APDIRBIMAS ULTRATRUMPAIS  
LAZERIŲ IMPULSAIS**

Daktaro disertacijos santrauka  
Technologijos mokslai, Medžiagų inžinerija (08T)  
Lazerinė technologija (T165)

Vilnius, 2012

Disertacija rengta 2008-2012 metais Fizinių ir technologijos mokslų centro Fizikos institute.

**Mokslinis vadovas:**

Dr. Gediminas Račiukaitis (Fizinių ir technologijos mokslų centro Lazerinių technologijų skyrius, technologijos mokslai, medžiagų inžinerija -08T, lazerinė technologija -T165).

**Disertacija ginama Vilniaus Universiteto Medžiagų inžinerijos krypties taryboje:**

Doktorantūros komitetas:

**Pirmininkas:**

Prof. habil. dr. Valdas Sirutkaitis (Vilniaus universitetas, technologijos mokslai, medžiagų inžinerija – 08T, lazerinė technologija-T165).

**Nariai:**

1. Prof. habil. dr. Arūnas Krotkus (Fizinių ir technologijos mokslų centro Puslaidininkų fizikos institutas, technologijos mokslai, medžiagų inžinerija – 08T, lazerinė technologija - T165).
2. Doc. dr. Vincas Tamošiūnas (Vilniaus universitetas, technologijos mokslai, medžiagų inžinerija – 08T, medžiagų technologija - T150).
3. Prof. habil. dr. Eugenijus Šatkovskis (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, medžiagų inžinerija – 08T, lazerinė technologija - T165).
4. Dr. Mindaugas Andrulėvičius (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, medžiagų inžinerija – 08T, lazerinė technologija - T165).

**Oponentai:**

1. Doc. habil. dr. Irena Šimkienė (Fizinių ir technologijos mokslų centro Puslaidininkų fizikos institutas, technologijos mokslai, medžiagų inžinerija – 08T, medžiagų technologija - T150).
2. Dr. Liutauras Marcinauskas (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, medžiagų inžinerija – 08T, lazerinė technologija - T165).

Disertacija bus ginama viešame Medžiagų inžinerijos krypties tarybos posėdyje 2012 m. rugsėjo mėn. 20 d. 10 val. FMTC Fizikos instituto salėje, Savanorių pr. 231, LT-02300 Vilnius, Lietuva.

Disertacijos santrauka išsiuntinėta 2012 m. rugpjūčio mėn. 20 d.

Disertaciją galima peržiūrėti Vilniaus universiteto ir FTMC bibliotekose.

VILNIUS UNIVERSITY  
CENTER FOR PHYSICAL SCIENCES AND TECHNOLOGY  
INSTITUTE OF PHYSICS

Paulius Gečys

**ULTRASHORT PULSED LASER PROCESSING OF THIN-FILMS FOR  
SOLAR CELLS**

Summary of doctoral dissertation  
Technological Sciences, Material Engineering (08T)  
Laser Technology (T165)

Vilnius, 2012

The research was performed in the Institute of Physics of the Center for Physical Sciences and Technology (CPST) in 2008-2012.

**Scientific supervisor:**

Dr. Gediminas Račiukaitis (Department of Laser Technologies, the Center for Physical Sciences and Technology, technological sciences, material engineering – 08T, laser technology - T165).

**Doctoral thesis will be defended at the Center for Physical Sciences and Technology in the senate of Material engineering:**

**Chairman:**

Prof. Hab. Dr. Valdas Sirutkaitis (Vilnius University, technological sciences, material engineering - 08T, laser technologies - T165).

**Members:**

1. Prof. Hab. Dr. Arūnas Krotkus (Center for Physical Sciences and Technology Semiconductor physics institute, technological sciences, material engineering -08T, laser technologies - T165).
2. Ass. Prof. Dr. Vincas Tamošiūnas (Vilnius University, technological sciences, material engineering - 08T, material technology - T150).
3. Prof. Hab. Dr. Eugenijus Šatkovskis (Vilnius Gediminas Technical University, technological sciences, material engineering - 08T, laser technologies - T165).
4. Dr. Mindaugas Andrulevičius (Kaunas University of Technology, technological sciences, material engineering – 08T, laser technologies - T165).

**Opponents:**

1. Ass. Prof. Hab. Dr. Irena Šimkienė (Center for Physical Sciences and Technology Semiconductor physics institute, technological sciences, material engineering -08T, material technology - T150).
2. Dr. Liutauras Marcinauskas (Kaunas University of Technology, technological sciences, material engineering – 08T, laser technologies - T165).

This thesis will be under open consideration on the 20 of September, 2012 10 a.m. at the Hall of CPST Institute of physics, Savanoriu Ave. 231, LT-02300 Vilnius, Lithuania.

Summary of doctoral thesis has been distributed on 20 of August, 2012.

Doctoral thesis is available at libraries of CPST and Vilnius University.

## TURINYS

1	ĮVADAS.....	6
1.1	Disertacijos darbo tikslas.....	7
1.2	Darbo naujumas ir praktinė svarba.....	7
1.3	Ginamieji teiginiai.....	8
1.4	Aprobacija.....	8
1.5	Autoriaus ir bendraautorių indėlis.....	10
1.5.1	Autoriaus indėlis.....	10
1.5.2	Bendraautorių indėlis.....	10
2	LITERATŪROS APŽVALGA.....	11
2.1	CIGS saulės elemento struktūra.....	11
2.2	Vidinių kontaktų formavimas tarp atskirų celių didelio ploto Saulės elementuose.....	11
2.3	Dviejų temperatūrų modelis.....	12
3	EKSPERIMENTAS IR TYRIMO METODIKOS.....	13
3.1	Lazeriniai standai.....	13
3.2	Elektrinių savybių tyrimų metodikos.....	14
3.3	Vaizdinė ir cheminė analizė.....	15
4	BANDINIAI.....	15
5	TYRIMŲ REZULTATAI: CIGS SAULĖS ELEMENTŲ RAIŽYMAS LAZERIAIS.....	15
5.1	Lazerio energijos sugerties ir indukuotų įtempių modeliavimas.....	15
5.2	Raižymo su pikosekundiniu lazeriu eksperimentai, naudojant skirtingą bangos ilgį....	19
5.3	Raižymo pikosekundiniu ir femtosekundiniu lazeriu ypatumai.....	20
6	LAZERINIŲ RAIŽYMO PROCESŲ OPTIMIZAVIMAS.....	23
7	CIGS SAULĖS ELEMENTŲ CHARAKTERIZAVIMAS PO LAZERINIO APDIRBIMO.....	24
7.1	Ramano spektroskopija lazeriu paveiktose vietose.....	24
7.2	Lock-in termografijos matavimai.....	25
7.3	Lazerio spinduliu indukuotų srovių (LBIC) matavimai.....	25
7.4	Saulės elementų fotoelektrinio efektyvumo po lazerinio apdirbimo tyrimai.....	26
8	IŠVADOS.....	27
	LITERATŪRA.....	28
	SANTRAUKA ANGLŲ KALBA (SUMMARY).....	30
	TRUMPOS ŽINIOS APIE DOKTORANTĄ.....	31

## 1 ĮVADAS

Pasaulinis elektros energijos suvartojimas per metus siekia 10 teravatų (TW), tačiau 2050 metais prognozuojamas augimas iki 30 TW. Žemėje reikės 20 TW „žalios“ energijos, siekiant stabilizuoti CO<sub>2</sub> dujų koncentraciją iki 2050 metų. Vienas iš patrauklių metodų mažinant CO<sub>2</sub> emisiją galėtų būti fotovoltinių elementų generuojamos fotoelektros vartojimas [1]. Taigi Saulės energetika atliks svarbų vaidmenį ateities elektros energijos gamyboje [1,2].

Šiuo metu rinkoje dominuoja silicio pagrindu pagaminti fotovoltiniai elementai. Vis didėjantis fotovoltinių modulių bei pigios fotoelektros poreikis privedė prie šios technologijos galimybių ribos bei atskleidė kelis trūkumus. Pagrindinis iš jų būtų brangus gamybos procesas. Sumažinti gamybos kainą mažiau nei 1 \$/W yra sudėtinga, todėl tai riboja šių Saulės elementų panaudojimo galimybes [1].

Pastaruosiu metu populiarėja plonasluoksniai fotovoltiniai elementai [3]. Mažesnis medžiagų, reikalingų gamybos procese, suvartojimas, gamybos proceso sparta bei mažas modulių svoris skatina vis didesnę susidomėjimą šia technologija. Vieni iš perspektyviausių šiuo metu laikomi CuIn<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>Se<sub>2</sub> (CIGS) pagrindu gaminami plonasluoksniai Saulės elementai [4,5]. Šių elementų efektyvumas laboratorijos sąlygomis siekia 20.3 % [6], o masiniu būdu gaminamų modulių iki 15.7 % [7]. Platesniems CIGS technologijos taikymams yra būtinas gamybos proceso optimizavimas bei kaštų mažinimas. Ypač daug pastangų yra dedama, kuriant ekonomiškai patrauklius gamybos procesus plonasluoksnių CIGS Saulės elementų efektyvumui didinti. Lazerių panaudojimas gamybos procese yra vienas iš būdų šiems tikslams pasiekti.

Lazerinis apdirbimas yra bekontaktis metodas, naudojamas kristalinio silicio bei plonasluoksnių fotovoltinių elementų gamyboje [8]. Siekiant išlaikyti didelio ploto modulio efektyvumą, Saulės elementas turi būti padalinamas į mažesnio ploto celes, sujungtas nuosekliai. Taip yra sumažinama kontaktais tekanti fotosrovė bei padidinama modulio įtampa, taip sumažinant ominių nuostolius kontaktuose. Šis didelio ploto Saulės elemento padalinimas į mažesnes celes gali būti atliktas skirtingose fotovoltinio elemento gamybos vietose, taikant trijų etapų lazerinį raižymą. Pirmo etapo (P1) metu į celes padalinamas apatinis kontaktas. Antro etapo metu (P2) atliktas rėžis leidžia vėlesnio garinimo metu sujungti celės viršutinį kontaktą su kaimyninės celės apatiniu kontaktu. Celių izoliavimas po viršutinio kontakto užgarinimo yra atliekamas trečio lazerinio proceso metu (P3) [9].

CdTe bei a-Si/μ-Si pagrindu gaminamiems fotoelementams ant stiklo padėklo lazerinis raižymas gali būti atliktas iš stiklo pusės. Šiuo atveju sluoksniai yra pašalinami medžiagos atplėšimo proceso metu, smarkiai sumažinamas terminis poveikis [10]. Lankstaus polimerinio padėklo bei molibdeno apatinio kontakto naudojimas CIGS Saulės elementų gamyboje leidžia naudoti tik tiesioginio medžiagos garinimo lazerinius procesus. Pagrindiniai veiksniai, ribojantys šių procesų taikymą CIGS plonasluoksnių struktūrų apdirbimui, yra molibdeno ištaškymas ant rėžio sienelių bei CuInSe<sub>2</sub>

struktūriniai pokyčiai dėl terminio poveikio [11]. Abiem atvejais susidaro laidi sritis ties lazerio paveikta zona, krenta Saulės elemento efektyvumas. Įvairūs lazeriniai šaltiniai buvo bandomi plonasluoksnių struktūrų apdirbimui [11-14], tačiau nanosekundiniai lazeriai buvo pripažinti netinkamais CIGS plonų sluoksnių abliacijai dėl didelio terminio poveikio. Pagal teorinio modeliavimo rezultatus, mažą terminį poveikį CIGS struktūrai sukeliantis apdirbimas galimas, panaudojus ultratrumpųjų impulsų lazerius [13,15].

Šioje disertacijos santraukoje yra pristatomi svarbiausi CIGS fotovoltinių elementų P3 tipo lazerinio raižymo pikosekundiniais bei femtosekundiniais impulsais eksperimentinio tyrimo bei teorinio modeliavimo rezultatai. Pradžioje pristatomi teorinio lazerio spinduliuotės energijos pasiskirstymo bei šilumos pernašos plonasluoksnėje struktūroje modeliavimo rezultatai. Toliau pateikiami raižymo rezultatai, naudojant pikosekundinį lazerį su skirtingais bangos ilgiais. Taip pat palyginami lazerinio raižymo pikosekundiniais bei femtosekundiniais impulsais rezultatai. Galiausiai aprašomi raižymo procesų optimizavimo tyrimai bei lazerinio apdirbimo poveikio Saulės elementų fotoelektrinėms savybėms tyrimai.

## **1.1 Disertacijos darbo tikslas**

Disertacinio darbo tikslas buvo ištirti galimybes panaudoti ultratrumpų impulsų lazerius integruotų jungčių CIGS Saulės elementuose formavimui. Šiam tikslui pasiekti buvo sprendžiami šie uždaviniai:

1. Teoriškai sumodeliuoti ir eksperimentiškai ištirti ultratrumpų impulsų abliacijos bei sukkelto terminio poveikio procesus daugiasluoksnėje CIGS Saulės elemento struktūroje.
2. Sukurti lazerinio raižymo procesus CIGS plonasluoksniams Saulės elementams, gaminamiems ant lankstaus polimerinio padėklo, bei pasiūlyti proceso industrializacijos galimybes.

## **1.2 Darbo naujumas ir praktinė svarba**

Daug mokslinių tyrimų yra vykdoma, siekiant sukurti pramonės taikymams tinkamus plonasluoksnių Saulės elementų lazerinio raižymo procesus. Tačiau kol kas nėra sukurti patikimi lazerinio apdirbimo procesai plonasluoksniams fotovoltiniams elementams, gaminamiems ant lankstaus polimerinio padėklo. Ultratrumpų impulsų taikymas lanksčių plonasluoksnių struktūrų raižyme yra perspektyvus, nes leidžia sumažinti terminį poveikį apdirbimo procesų metu.

Šiame darbe atlikti nauji abliacijos savybių tyrimai, panaudojant 1575 nm, 1064 nm, 532 nm, 355 nm ir 266 nm bangos ilgio pikosekundinio lazerio spinduliuotę. Taip pat buvo sukurtas teorinis lazerio spinduliuotės energijos pasiskirstymo bei šilumos pernašos plonasluoksnėje struktūroje modelis bei jis patvirtintas eksperimentiniais rezultatais. Buvo pasiūlytas naujas tiesioginis medžiagos raižymo procesas, pagrįstas medžiagos mechaniniu pašalinimu. Galiausiai, ultratrumpų impulsinių lazerių taikymas leido

pasiekti plonasluoksnių Saulės elementų raižymo procesų parametrus, priimtinus pramoniniams taikymams.

### 1.3 Ginamieji teiginiai

1. Tinkamo spinduliuotės bangos ilgio pasirinkimas yra itin svarbus, siekiant sukaupti lazerio impulso energiją pageidaujamuose struktūros tarp sluoksniuose, taip sukeltiant selektyvų medžiagos pašalinimą.
2. Dėl specifinių plonasluoksnės CIGS struktūros optinių savybių, 1064 nm bangos ilgio spinduliuotė yra optimali P3 tipo režimui formuoti, vykstant medžiagos termomechaniniam pašalinimo procesui.
3. Efektyvesnis sluoksnių pašalinimo procesas gautas naudojant pikosekundinius impulsus, tačiau liekamasis terminis poveikis ploniems sluoksniams buvo didesnis, lyginant su femtosekundiniais impulsais.
4. Abliacija plokščiojo profilio pluoštu leidžia sumažinti poveikio zoną bei lydalo formavimąsi abliuojamo kanalo kraštuose, lyginant su Gausinio erdvinio skirstinio pluoštu.
5. Lygiagretus apdirbimas, suskaidant pagrindinį lazerio pluoštą, yra patikimas ir efektyvus būdas padidinti CIGS saulės elementų raižymo greitį.

### 1.4 Aprobacija

Tyrimų rezultatai, pateikiami šioje disertacijos santraukoje, buvo publikuoti [A1-A8] periodiniuose moksliniuose leidiniuose, taip pat kartu su bendraautoriais buvo pristatyti mokslinėse konferencijose [C1-C25].

#### Publikacijos disertacijos tema (ISI WoS - su konferencijų medžiaga)

[A1] G. Račiukaitis, S. Grubinskas, P. Gečys, M. Gedvilas: Selectiveness of laser processing due to energy coupling localization: case of thin film solar cell scribing, *Applied Physics A*, 2012. (**priimta spausdinti**).

[A2] G. Račiukaitis, P. Gečys, M. Gedvilas and B. Voisiat: Structuring of functional thin films and surfaces with picosecond-pulsed lasers, *Proc. SPIE* **8243**, 824316, (2012).

[A3] P. Gečys, G. Račiukaitis, A. Wehrmann, K. Zimmer, A. Braun, S. Ragnow: Scribing of thin-film solar cells with picosecond and femtosecond lasers, *J. Laser Micro/Nanoengineering*, **7**, 33-37, (2012).

[A4] P. Gečys, G. Račiukaitis, E. Miltenis, A. Braun and S. Ragnow: Scribing of thin-film solar cells with picosecond laser pulses, *Physics Procedia* **12**, 141-148, (2011).

[A5] G. Račiukaitis, E. Stankevičius, P. Gečys, M. Gedvilas, C. Bischoff, E. Jäger, U. Umhofer, F. Völklein: Laser processing by using diffractive optical laser beam shaping technique, *J. Laser Micro/Nanoengineering* **6**, 37-43 (2011).



[A6] G. Račiukaitis and P. Gečys: Picosecond-laser structuring of thin films for CIGS solar cells, J. Laser Micro/Nanoengineering **5**, 10-15, (2010).

[A7] P. Gečys, G. Račiukaitis, M. Ehrhardt, K. Zimmer and M. Gedvilas: ps-laser scribing of CIGS films at different wavelengths, Applied Physics A: Materials Science & Processing **101**, 373-378, (2010).

[A8] P. Gečys, G. Račiukaitis, M. Gedvilas and A. Selskis: Laser structuring of thin-film solar cells on polymers, The European Physical Journal Applied Physics **46**, 12508, (2009).

Iš viso autoriaus publikacijų sąrašą sudaro 15 mokslinių straipsnių ISI WOS.

#### **Autoriaus pranešimai disertacijos tema mokslinėse konferencijose:**

[C1] P. Gečys, G. Račiukaitis: Ultrashort pulsed laser processing of thin-film CIGS solar cells, Photovoltaic Technical Conference - Thin Film & Advanced Silicon Solutions, Aix-en-Provence, France, June 6-8, 2012. (stendinis pranešimas).

[C2] P. Gečys, G. Račiukaitis: Ultrashort pulsed laser processing of thin-films for photovoltaics, 4-th Int. Conf. „Radiation interaction with material and its use in technologies 2012“, Kaunas, Lithuania, May 14-17, 2012. (žodinis pranešimas).

[C3] P. Gečys, G. Račiukaitis, A. Wehrmann, K. Zimmer, A. Braun, S. Ragnow, Scribing of thin-film solar cells with picosecond and femtosecond lasers, The 12th International Symposium on Laser Precision Microfabrication (LPM2011), Takamatsu, Japan, June 7-10, 2011. (žodinis pranešimas).

[C4] P. Gečys, G. Račiukaitis, E. Miltenis, A. Braun, S. Ragnow, Scribing of thin-film solar cells with picosecond laser pulses, Int. conf. Lasers in Manufacturing (LiM 2011), Munich, Germany, May 23-26, 2011. (žodinis pranešimas).

[C5] P. Gečys, G. Račiukaitis, A. Braun, S. Ragnow, Ultrashort pulse laser scribing of thin-film CIGS solar cells, E-MRS 2011 Spring Meeting, Symposium: J, Laser materials processing for micro and nano applications, Nice, France, May 9-13, 2011. (stendinis pranešimas).

[C6] P. Gečys, Ultrashort pulse laser scribing of thin-film CIGS solar cells, The 13th International Conference-School Advanced materials and technologies, Palanga, Lithuania, August 27-31, 2011. (stendinis pranešimas).

[C7] P. Gečys, G. Račiukaitis, A. Braun, S. Ragnow, Ps- laser scribing of CIGS at 1064 nm wavelength, Alexander von Humboldt forum „Science & Society in Modern Europe“, Vilnius, Lithuania, September 23-26, 2010. (stendinis pranešimas).

[C8] P. Gečys, G. Račiukaitis, A. Braun, S. Ragnow, Ps-laser scribing of CIGS at 1064 nm wavelength, 11th International Symposium on Laser Precision Microfabrication, Stuttgart, Germany, June 7-10, 2010. (stendinis pranešimas).

[C9] P. Gečys, G. Račiukaitis, M. Gedvilas, A. Selskis, Laser structuring of thin-film solar cells on polymers, 12th Nordic Conference in Laser Processing of Materials, NOLAMP, Copenhagen, August 24-26, 2009. (žodinis pranešimas).

[C10] P. Gečys, G. Račiukaitis, Scribing of a-Si thin-film Solar Cells with Picosecond Laser, 2nd International Symposium on Flexible Organic Electronics (IS-FOE09), Halkidiki, Greece, July 8-10, 2009. (žodinis pranešimas).

[C11] P. Gečys, G. Račiukaitis, M. Gedvilas, A. Selskis, Laser structuring of thin-film solar cells on polymers, 1st International Symposium on Flexible Organic Electronics (IS-FOE), Halkidiki, Greece, July 10-11, 2008. (stendinis pranešimas).

Iš viso kartu su bendraautoriais parengti 34 pranešimai mokslinėse konferencijose.

## **1.5 Autoriaus ir bendraautorių indėlis**

### **1.5.1 Autoriaus indėlis**

Visa eksperimentinių tyrimų dalis atlikta autoriaus, konsultuojantis su moksliniu vadovu:

1. Apdirbimo stendų su 1575 nm, 1064 nm, 532 nm, 355 nm, 266 nm lazerio bangos ilgiais surinkimas.
2. Eksperimentų planavimas ir įgyvendinimas.
3. Bandinių charakterizavimas po lazerinio apdirbimo, naudojant šias priemones: optinis mikroskopas, SEM+EDS (Skenuojančiu elektroniniu mikroskopu su rentgeno spindulių energijos dispersijos spektrometru), Ramano spektrometru, Saulės elementų fotoelektrinio efektyvumo matavimo stendu.
4. Eksperimentų duomenų analizė, mokslinių rezultatų publikavimas moksliniuose leidiniuose ir pristatymas mokslinėse konferencijose.

### **1.5.2 Bendraautorių indėlis**

Saulės elementų elektrinių savybių charakterizavimas LBIC( Lazerio pluoštu indukuotos srovės matavimai) bei LIT (Lock-in termografijos matavimai) metodikomis buvo atlikti elementų gamintojo Solarion AG personalo.

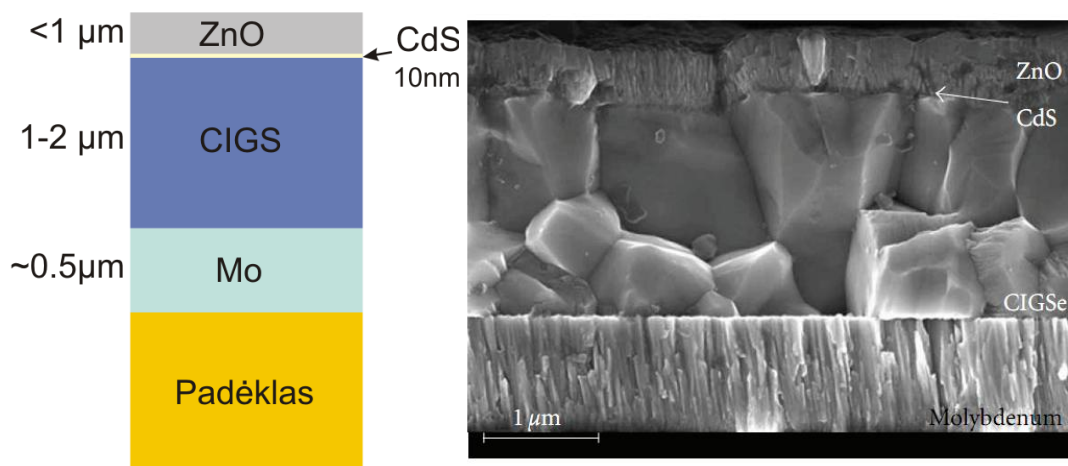
Pirmieji SEM +EDS (Skenuojančiu elektroniniu mikroskopu su rentgeno spindulių energijos dispersijos spektrometru) matavimai atlikti dr. A. Selskio Fizinių ir technologijos mokslų centro Chemijos institute.

Modeliavimo darbus, konsultuojantis su dr. M. Gedvilu ir disertacijos autoriumi, atliko S. Grubinskas.

## 2 LITERATŪROS APŽVALGA

### 2.1 CIGS saulės elemento struktūra

Labiausiai paplitusi CIGS Saulės elemento struktūra pavaizduota 1 pav. Šios struktūros dažniausiai gaminamos ant kelių milimetrų storio stiklo padėklo, tačiau ieškoma galimybių naudoti plonesnius bei lanksčius poliamido ar metalinės folijos padėklus [16]. Galinis kontaktas dažniausiai gaminamas iš  $0.5 \mu\text{m}$  storio molibdeno sluoksnio. Absorbuojantis p-tipo  $\text{CuIn}_x\text{Ga}_{1-x}\text{Se}_2$  sluoksnis dažniausiai siekia  $1-2 \mu\text{m}$  su  $10-50 \text{ nm}$  n-tipo CdS buferiniu sluoksniu viršuje, skirtu suformuoti p-n sandūrą. Mažiau nei  $1 \mu\text{m}$  storio ZnO:Al arba ITO (Indžio-alavo oksidas) sluoksnis naudojamas kaip skaidrus viršutinis kontaktas.



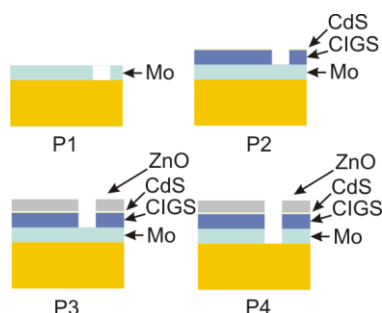
1 pav. CIGS Saulės elemento struktūra [5].

### 2.2 Vidinių kontaktų formavimas tarp atskirų celių didelio ploto Saulės elementuose

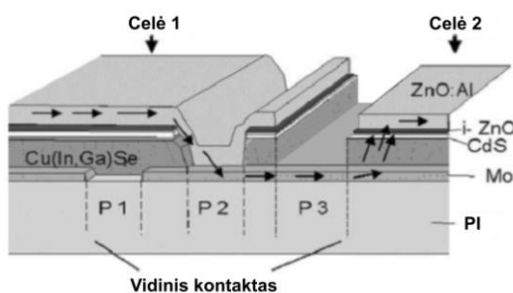
Siekiant išvengti fotosrovės energijos nuostolių dėl plonų kontaktų varžos, fotovoltinis elementas turi būti padalinamas į mažesnes celes, sujungtas nuosekliai. Tokiu būdu generuojama įtampa yra pakeliama bei sumažinama fotosrovė, tačiau galia išlieka nepakitusi. Trys izoliuojantys rėžiai skirtingais Saulės elemento gamybos etapais turi būti įrėžti, norint padalinti didelio ploto elementą į mažesnes celes ir suformuoti integruotą jungtį. Šios celės formuojamos per visą modulio plotį ( $1-2 \text{ m}$ )  $5-10 \text{ mm}$  periodiškumu [10]. Nuoseklaus jungimo sritis dažniausiai formuojama  $100-500 \mu\text{m}$  pločio, o atskirų rėžių plotis siekia  $50 \mu\text{m}$  [10].

Integruotos jungties formavimo metu atliekami trys izoliuojantys rėžiai. P1 tipo procesas padalina apatinį molibdeno kontaktą į mažas celes. P2 proceso metu yra pašalinama dalis absorbuojančio CIGS sluoksnio mechaniškai arba lazeriu, tokiu būdu užgarinus ZnO:Al sluoksnį yra sujungiamas celės viršutinis kontaktas su kaimyninės celės apatiniu kontaktu. P3 tipo procesas naudojamas celių izoliavimui, kai atliekamas izoliuojantis

rėžis per visą struktūrą iki molibdeno sluoksnio [9]. P4 procesas naudojamas kraštų atskirymui. Proceso metu atliekamas izoliuojantis rėžis per visą struktūrą iki padėklo. Žemiau pateigtos visų išvardintų procesų iliustracijos.



**2 pav.** P1, P2, P3, P4 procesų iliustracija.



**3 pav.** Integruota jungtis, suformuota standartiniais P1, P2, P3 procesais.

Lankstaus polimerinio padėklo bei molibdeno apatinio kontakto naudojimas CIGS Saulės elementų gamyboje leidžia naudoti tik tiesioginio medžiagos garinimo lazerinius procesus. P1 procese dažniausiai naudojami nanosekundiniai lazeriai. Šiuo atveju pagrindinis proceso reikalavimas yra suformuoti izoliuojantį rėžį su didele varža. Terminis poveikis apatiniam kontaktui nėra itin svarbus, todėl šis procesas jau yra taikomas pramoninėje fotovoltinių modulių gamyboje ant stiklo padėklų. P2 bei P3 tipo lazeriniai procesai CIGS Saulės elementams šiuo metu pramonėje nėra naudojami.

### 2.3 Dviejų temperatūrų modelis

Dviejų temperatūrų modelis (TTM) [17-21] naudojamas tada, kai lazerio impulso trukmė yra mažesnė už medžiagos elektronų-fononų sąveikos laiką (metalų atveju 1-50 ps) [22,23]. Elektronai dėl tarpusavio sąveikos greitai termalizuoja. Energijos perdavimas gardelei vyksta tarpusavio sąveikos metu. Šis procesas aprašomas dviejų temperatūrų modeliu. Elektronų šilumos pernašos lygtis:

$$C_e \frac{\partial T_e}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} K_e \frac{\partial T_e}{\partial z} - g(T_e - T_l) + q, \quad (1)$$

kur  $C_e = A_e T_e$  - elektronų šiluminė talpa,  $T_e$  - elektronų temperatūra,  $K_e = K_{e,0} T_e / T_l$  - elektronų šiluminis laidumas,  $g$  - elektronų-gardelės sąveikos koeficientas,  $q$  - išorinio šaltinio galia, absorbuota vienetiniame tūryje [24]. Gardelės šilumos pernašos lygtis:

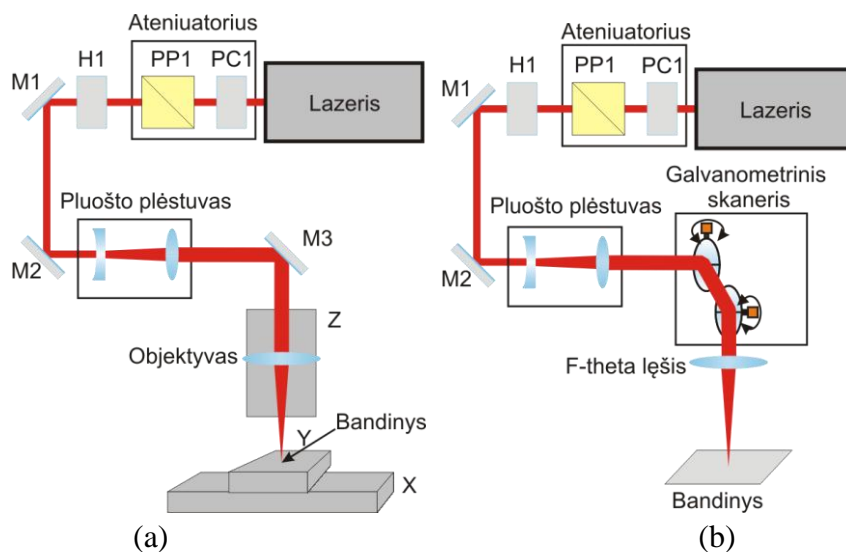
$$\left( C_l + L_m \delta(T_l - T_m) + L_v \delta(T_l - T_v) \right) \frac{\partial T_l}{\partial t} = g(T_e - T_l), \quad (2)$$

$C_l$  - gardelės šiluminė talpa,  $L_m$  ir  $L_v$  - gardelės lydimosi bei garavimo šiluma,  $\delta$  - Dirako delta funkcija,  $T_l$  - gardelės temperatūra.

### 3 EKSPERIMENTAS IR TYRIMO METODIKOS

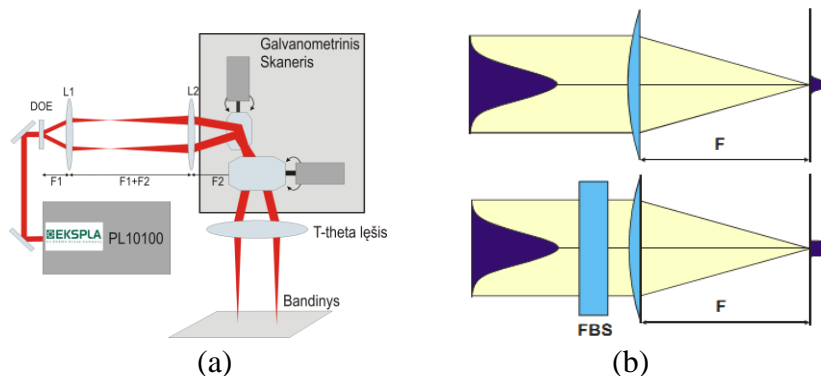
#### 3.1 Lazeriniai standai

Du lazerinio apdirbimo standai su pikosekundiniu lazeriu EKSPLA (PL10100, 10 ps, 100 kHz) bei femtosekundiniu lazeriu Clark-MXR (CPA 2001, 300 fs, 1 kHz) buvo panaudoti CIGS saulės elementų raižymo eksperimentams atlikti. Išorinių netiesinių kristalų pagalba buvo realizuota pikosekundinio lazerio fundamentalios harmonikos (1064 nm) konversija į 532 nm, 355 nm, ir 266 nm bangos ilgius. Lazerio bangos ilgio konversijai į 1572 nm bangos ilgį buvo panaudotas nederinamas optinis parametrinis generatorius. Eksperimentai femtosekundiniu lazeriu buvo atliekami fundamentine harmonika (775 nm). Pikosekundinio bei femtosekundinio lazerių pluošto valdymas erdvėje buvo realizuotas pozicionavimo stalais (1572 nm, 1064 nm, 355 nm ir 266 nm) kartu su 50 mm židinio nuotolio objektyvu. 532 nm spinduliuotė buvo valdoma galvanometriniu skaneri su 100 mm židinio nuotolio f-theta telecentrinu objektyvu. Impulsų persiklojimas buvo kontroliuojamas, keičiant pozicionavimo greitį ir išlaikant pastovų dažnį. Keičiant įvairius sistemos parametrus (impulso energiją, impulsų persiklojimą, bangos ilgį), buvo ieškoma optimalių plonų sluoksnių nugarinimo sąlygų.



**4 pav.** Lazerinių stendų principinės schemos: (a) stendas su tiesiniais XYZ pozicionavimo stalais; (b) stendas su galvanometriniu skaneriu. PP1-polarizatorius, H1-harmonikų modulis.

Siekiant optimizuoti lazerinius raižymo procesus, buvo atliekami eksperimentai su lygiagrečių pluoštų apdirbimo stendu (žiūrėti 5 pav. a). Prieš galvanometrinių skanerių buvo įstatomas difrakcinis optinis elementas, kuris dalino lazerio pluoštą į keturis pluoštus. 4F sistemoje lęšiais L1 ir L2 buvo kontroliuojamas pluoštų tarpusavio skėsties kampas bei atstumas tarp pluoštų apdirbimo plokštumoje.



**5 pav.** Lazerinių procesų optimizavimo schemas: (a) Lygiagrečių spindulių raižymo stendas; (b) Gausinio pluošto formavimas į plokščiojo profilio pluoštą.

Tolesni lazerinių procesų optimizavimo darbai buvo atliekami formuojant Gausinio skirstinio pluoštą į plokščiąjį. Lazeriniame stende (4 pav.b) prieš galvanometrinių skenerių buvo įdėtas difrakcinis optinis elementas, skirtas pluošto formavimui (FBS). Toliau, fokusuojant skenerio objektyvu šiuo būdu modifikuotą pluoštą, tam tikrame atstume nuo židinio plokštumos formavosi plokščios viršūnės skirstinys.

### 3.2 Elektrinių savybių tyrimų metodikos

Fotovoltinių elementų efektyvumo tyrimų metu yra matuojamos Saulės elemento voltamperinės  $I(V)$  charakteristikos. Naudojant šių matavimų ketvirtojo kvadranto duomenis buvo apskaičiuojama Saulės elemento generuojamos fotosrovės galia bei, lyginant su kritusios šviesos galia, elemento fotoelektrinis efektyvumas. Eksperimentų metu į pilnai veikiančias Saulės elementų celes buvo įrežiami P3 tipo rėžiai bei matuojami efektyvumo pokyčiai prieš ir po lazerio poveikio. Matavimai atlikti fotovoltinių elementų gamintojo Solarion AG stende standartinėmis sąlygomis.

Lazerio spinduliuotės sukelti defektai buvo tiriami sinchroninės termografijos metodu. Į tiriamą fotoelementą buvo paduodamas srovės impulsas bei elemento paviršius stebimas sinchronizuota infraraudonųjų spindulių kamera. Esant defektams, tose vietose ima tekėti srovė, paviršius įšyla ir vaizdas yra fiksuojamas IR kamera [25].

Lazerio spinduliu indukuotų srovių matavimo metodika yra neardantis būdas puslaidininkio defektams detektuoti [26]. Šiuo atveju puslaidininkio paviršius yra veikiamas fokusuotu lazerio pluoštu bei matuojamas lokaliai generuojamos fotosrovės stipris. Skenuojant lazerio pluoštą per bandinį, sudaromas fotosrovės stiprių žemėlapis.

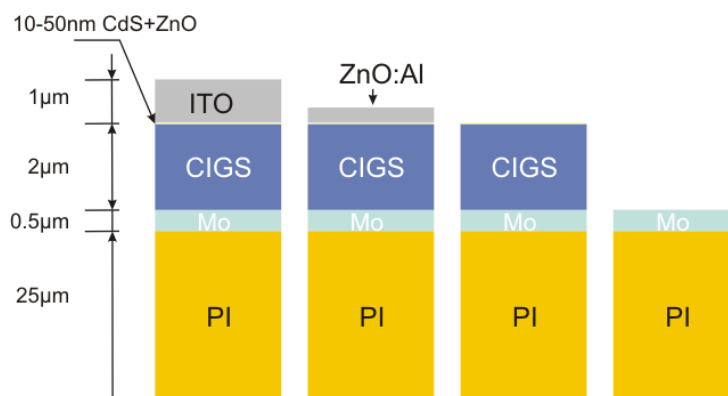
Ramano spektroskopija yra puiki metodika medžiagos struktūriniais pokyčiams tirti. Šis metodas remiasi monochromatinės šviesos (mūsų atveju 632.8 nm He-Ne lazerio) Ramano sklaida medžiagoje dėl molekulių rotacinių bei vibracinių modų sąveikos su šviesos fotonais. Tokiu būdu, tiriant Ramano sklaidos spektrą, gaunama informacija apie medžiagos struktūrą.

### 3.3 Vaizdinė ir cheminė analizė

Vaizdinė bandinių analizė buvo atliekama optiniu (Olympus BX51) bei skenuojančiu elektroniniu (JEOL JSM-6490LV) mikroskopais. Bandinių cheminė analizė atlikta rentgeno spindulių energijos dispersijos spektrometru kartu su SEM matavimais.

## 4 BANDINIAI

Buvo tiriamos trys plonasluoksnės Saulės elementų struktūros su skirtingais viršutiniais kontaktais. Pirmosios struktūros viršutinį kontaktą sudarė 1  $\mu\text{m}$  storio ITO sluoksnis. Antros struktūros viršutinį kontaktą sudarė 350 nm storio ZnO:Al sluoksnis. Trečia struktūra buvo be viršutinio elektrai laidaus kontakto. Kaip absorbuojantis sluoksnis buvo naudojama 2  $\mu\text{m}$  storio  $\text{CuIn}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{Se}_2$  struktūra kartu su ZnO bei CdS buferiniais sluoksniais, užgarintais ant viršaus. Apatinis kontaktas buvo pagamintas iš 0.5  $\mu\text{m}$  storio molibdeno sluoksnio. Struktūros pagrindą sudarė 25  $\mu\text{m}$  storio PI padėklas. Visos struktūros buvo pagamintos Solarion AG, Vokietijoje.



6 pav. Fotovoltinių elementų bandiniai.

## 5 TYRIMŲ REZULTATAI: CIGS SAULĖS ELEMENTŲ RAIŽYMAS LAZERIAIS

Tyrimų metu didžiausias dėmesys buvo skiriamas sudėtingam bei pramonėje netaikomam lazeriniam P3 tipo procesui. Šio proceso metu yra nugarinamas viršutinis kontaktas kartu su absorbuojančiu CIGS sluoksniu bei atidengiamas apatinis molibdeno sluoksnis. Siekiant sumažinti lazerio pluošto terminį poveikį aplinkiniams sluoksniams, eksperimentuose buvo naudojami pikosekundinis bei femtosekundinis lazeriai.

### 5.1 Lazerio energijos sugerties ir indukuotų įtempių modeliavimas

Tinkamas bangos ilgio parinkimas yra itin svarbus siekiant lazerio pluošto energiją sukaupti pageidaujame tarp sluoksnyje. Programinis modeliavimo paketas COMSOL Multiphysics, naudojantis baigtinių elementų skaičiavimo metodiką, buvo panaudotas

šių procesų modeliavimui. Pagal Lamberto-Bero dėsnį spinduliuotės intensyvumas eksponentiškai mažėja sklindant terpe priklausomai nuo medžiagos sugerties koeficiento  $\alpha$ :

$$I = (1 - R_\lambda) I_0 e^{-\alpha z} \quad (3)$$

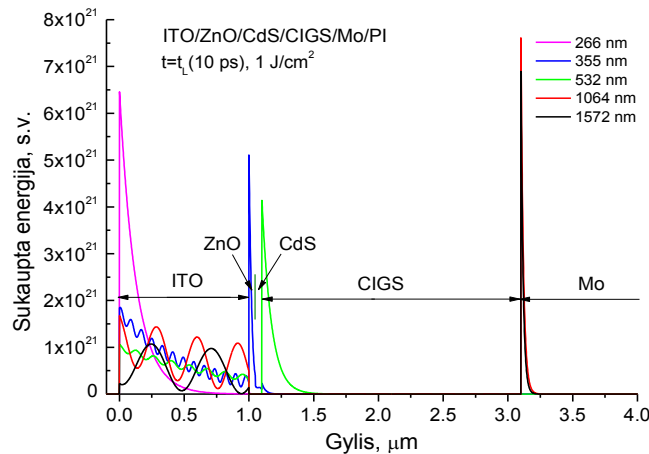
Kadangi turime daugiasluoksnę struktūrą su keliais skirtingų optinių savybių sluoksniais, turi būti įskaitomi atspindžiai tarp sluoksnių. Absorbicija ir refrakcija aprašomi medžiagos kompleksiniu lūžio rodikliu:

$$\bar{n} = n + ik_{ext}, \quad (4)$$

kur  $n$  yra medžiagos lūžio rodiklis, o  $k_{ext}$  – ekstinkcijos koeficientas. Spinduliuotės atspindys tarp dviejų sluoksnių priklauso nuo šių parametrų ir yra išreiškiamas:

$$R_\lambda = \left| \frac{\bar{n} - 1}{\bar{n} + 1} \right|^2 = \frac{(n - 1)^2 + k_{ext}^2}{(n + 1)^2 + k_{ext}^2} \quad (5)$$

Pasitelkus matricinį skaičiavimo metodą bei užrašius pralaidumo matricas kiekvienam sluoksniui, buvo ieškomas elektrinio lauko intensyvumo skirstinys plonasluoknėje struktūroje. Spinduliuotės energijos kaupimosi (sugerties) CIGS struktūroje su ITO viršutiniu kontaktu modeliavimo rezultatai pateikti 7 pav.



**7 pav.** Sukauptos energijos pasiskirstymas CIGS struktūroje, veikiant skirtingo bangos ilgio impulsais. Impulso trukmė 10 ps, energijos tankis 1 J/cm<sup>2</sup>.

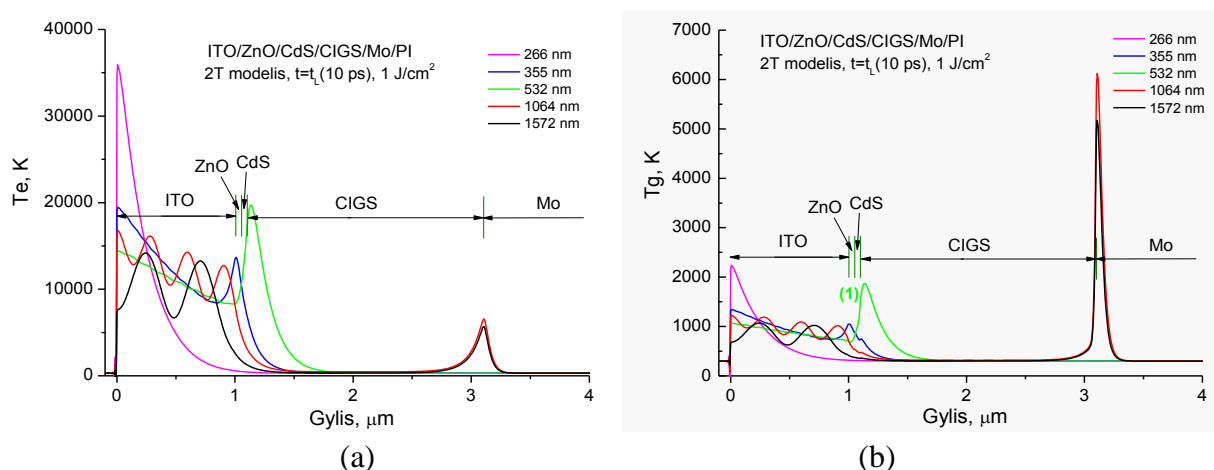
Vidinių tarpsluoksnių sukelti atspindžiai sąlygoja moduliūtą sukauptos energijos medžiagoje pasiskirstymą. Ultravioletinė 266 nm bangos ilgio spinduliuotė buvo sugerama netoli ITO paviršiaus, todėl sluoksnių nugarinimo selektyvumas buvo blogas. Ilgesnio bangos ilgio spinduliuotė (355 nm) perėjo ITO kontaktą, bet buvo sugerama CdS buferiniame sluoksnyje. 532 nm spinduliuotė buvo sugerama CIGS absorbuojančiame sluoksnyje. Tik infraraudona spinduliuotė pasiekė apatinį molibdeno kontaktą ir sugerta energija kaupėsi CIGS/Mo tarpsluoksnyje, todėl buvo galima tikėtis selektyvaus P3 proceso.

Skaitinis temperatūros skirtingo modeliavimas, abliuojant CIGS Saulės elemento struktūrą skirtingų bangos ilgių impulsais buvo atliktas, siekiant išsiaiškinti medžiagos

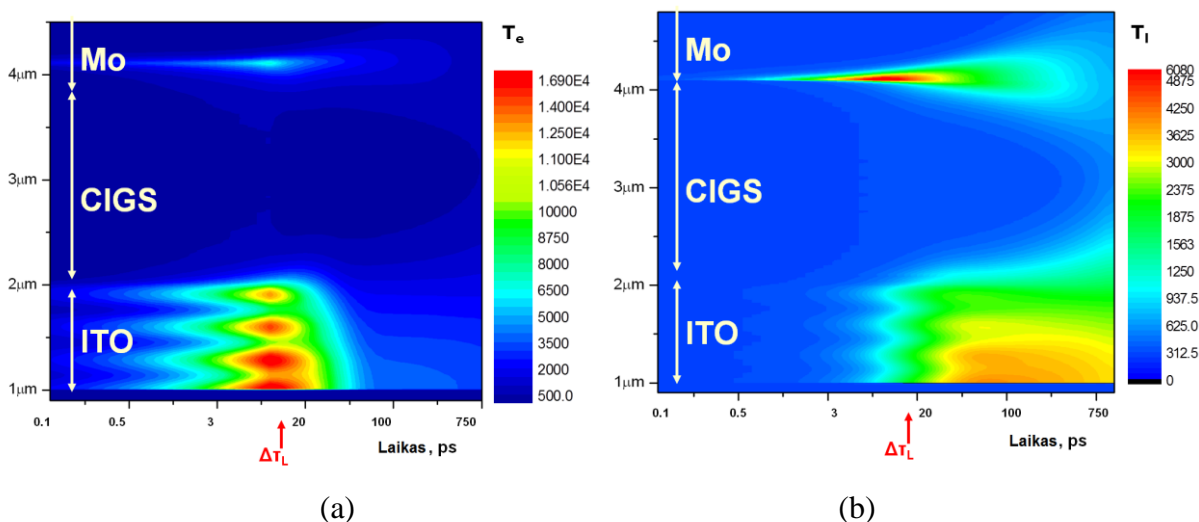


pašalinimo mechanizmus. Naudojantis sugertos energijos skirtiniu, elektronų bei gardelės temperatūrų skirstinys laike ir per struktūros gylį buvo skaičiuojamas dviejų temperatūrų modelių [27].

Išilginiai elektronų bei gardelės temperatūrų skirstiniai ITO/ZnO/CdS/CIGS/Mo/Pi struktūroje, naudojant skirtingų bangos ilgių spinduliuotę, tuojau pat po 10 ps lazerio impulso pavaizduoti 8 pav. Tuo metu elektronai perduoda dalį savo energijos gardelei ir ji kaista. Kaip matyti, 355 nm ir 532 nm lazerio spinduliuotė yra sugerama tarp ITO viršutinio kontakto ar CIGS sluoksnio, kas sąlygoja selektyvų medžiagos mechaninį išmetimą dėl tarpsluoksnyje susidariusių garų slėgio. 266 nm spinduliuotė yra sugerama ITO sluoksnio, vyksta tiesioginis medžiagos garinimas, selektyvumas mažėja.



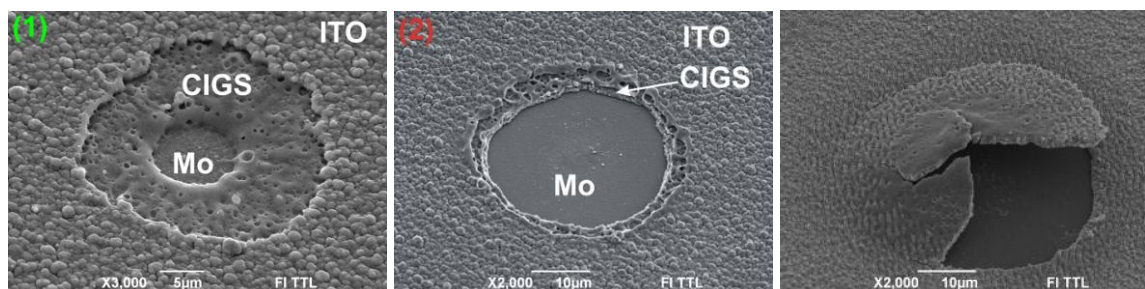
**8 pav.** Elektronų (a) bei gardelės (b) temperatūros skirstiniai skirtingiems bangos ilgiams CIGS plonasluoksnyje struktūroje. Impulso trukmė 10 ps, energijos tankis  $1 \text{ J/cm}^2$ .



**9 pav.** Elektronų (a) bei gardelės (b) temperatūros skirstinio dinamika CIGS plonasluoksnyje struktūroje po 10 ps trukmės impulso, energijos tankis  $1 \text{ J/cm}^2$ , 1064 nm bangos ilgis.

Paveikus daugiasluoksnę struktūrą infraraudona 1064 nm ar 1572 nm bangos ilgio spinduliuote, didžiausia temperatūra fiksuojama ties apatiniu molibdeno kontaktu (8 pav.). Viršutiniai struktūros sluoksniai yra skaidrūs šioms bangos ilgiams, todėl šviesos impulsai be didelių nuostolių pasiekia apatinį kontaktą. Aukšta temperatūra

CIGS-molibdenas tarp sluoksnyje išsilaiko keliasdešimt pikosekundžių, tačiau absorbuojantis CIGS sluoksniu išlieka žemos temperatūros (9 pav.). Taigi taikant pikosekundinius 1064 nm bangos ilgio lazerio impulsus galima apsaugoti CIGS sluoksniu nuo nepageidaujamo terminio modifikavimo.



(a) 45 μJ, 2 impulsai,  
532 nm

(b) 25 μJ, 2 impulsai,  
1064 nm

(c) 18 J, 5 impulsai,  
1572 nm

**10 pav.** Lazeriu išabliuoti krateriai ITO/ZnO/CdS/CIGS/Mo/PI (a,b) ir ZnO:Al/ZnO/CIGS/Mo/PI (c) struktūrose, iliustruojantys spinduliuotės energijos sankaupas skirtinguose sluoksniuose. ITO gali būti švariai pašalinamas 532 nm spinduliuote, o CIGS sluoksniu 1064 arba 1572 nm spinduliuote.

CIGS daugiasluoksnių struktūrų abliacijos 532 nm, 1064 nm ir 1572 nm bangos ilgiais SEM nuotraukos pavaizduotos 10 pav. Abliacijos metu 532 nm bangos ilgio impulsas nuplėšia viršutinį ITO kontaktą, atidengdamas CIGS sluoksniu. Tuo tarpu CIGS sluoksniu garinamas tiesiogiai, todėl atsiranda pažeidimas centre dėl Gausinio pluošto profilio (10 pav a). Infraraudona 1064 nm spinduliuotė buvo absorbuojama CIGS-Mo tarp sluoksnyje, medžiaga buvo švariai pašalinama, atlupant sluoksnius mechaniškai dėl susidariusio garų slėgio tarp sluoksnyje (10 pav b). 1572 nm lazerio impulso energijos nepakako sluoksniu pašalinimui, tačiau SEM nuotraukose aiškiai matyti medžiagos termo-mechaninio atplėšimo procesas (10 pav c).

Siekiant įvertinti terminių gradientų sukeltus mechaninius įtempimus, gali būti taikomas apytikslis apvalios plokštelės su įtvirtintais kraštais termo-elastinės lygties sprendinys [28]:

$$\sigma_{r_{\max}} = \frac{E\alpha_l\Delta T}{2(1-\nu)}, \quad (6)$$

kur  $E$  - Jungo modulis,  $\alpha_l$  - tiesinis šiluminis plėtimasis,  $\nu$  - Puasono koeficientas.

Staigus temperatūros augimas sukelia lokalius įtempimus. Modeliavimai rodo, kad temperatūros augimas  $\Delta T$  gali siekti 6000 K per 10 ps. Šis staigus temperatūros pokytis skirtinguose daugiasluoksnių struktūrų sluoksniuose gali sukelti iki dešimties GPa įtempimus. Šie įtempiai yra daug didesni nei medžiagos mechaninis atsparumas. Lazero apšviesta zona patiria plastines deformacijas ir gali būti suardoma terminių įtempimų. Panašus modelis buvo taikomas vertinant a-Si plonasluoksnių Saulės elementų raižymo nanosekundiniais lazeriais procesus [29].

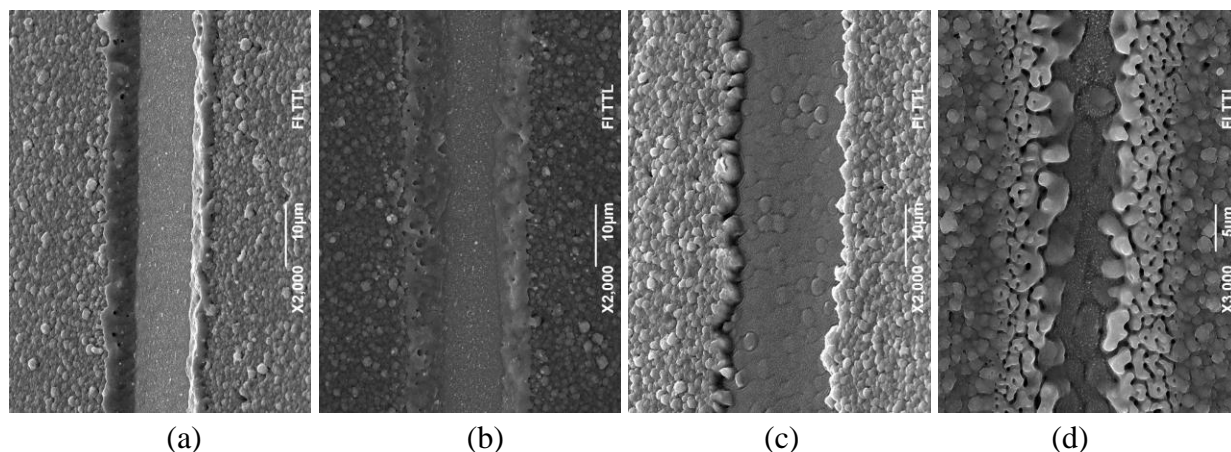
ITO ir ZnO:Al viršutiniai kontaktai pasižymi panašiomis optinėmis savybėmis, tačiau lazerio impulso sukelti abliacijos procesai skiriasi. ZnO mechaninis atsparumas tempimui siekia 415 MPa [30], tuo tarpu ITO medžiagai - tik 130 MPa [31]. Lazerio spinduliuotės sukelti terminiai įtempiai buvo pakankami ITO kontakto nuplėšimui, tačiau yra per maži ZnO:Al sluoksnio pašalinimui. Švarus sluoksnių pašalinimas iki molibdeno apatinio kontakto yra itin svarbus P3 tipo procesui. Didžioji dalis infraraudonos spinduliuotės yra sugerama CIGS-Mo tarp sluoksnyje ir vyksta lokalus tarp sluoksnio kaitimas. Jei temperatūros gradientų sukelti įtempiai viršija viršutinių sluoksnių mechaninį atsparumą, galimas mechaninis sluoksnių pašalinimas (10 pav.b). 1064 nm bangos ilgio spinduliuotė yra iš dalies sugerama ir viršutiniuose Saulės elemento sluoksniuose, dėl to yra stebimas medžiagos lydymasis kanalų kraštuose. 1572 nm bangos ilgio spinduliuotė sklinda visa struktūra be nuostolių, kol yra sugerama CIGS-Mo tarp sluoksnyje, vyksta mechaninis medžiagos pašalinimas (10 pav.c).

## **5.2 Raižymo su pikosekundiniu lazeriu eksperimentai, naudojant skirtingą bangos ilgį**

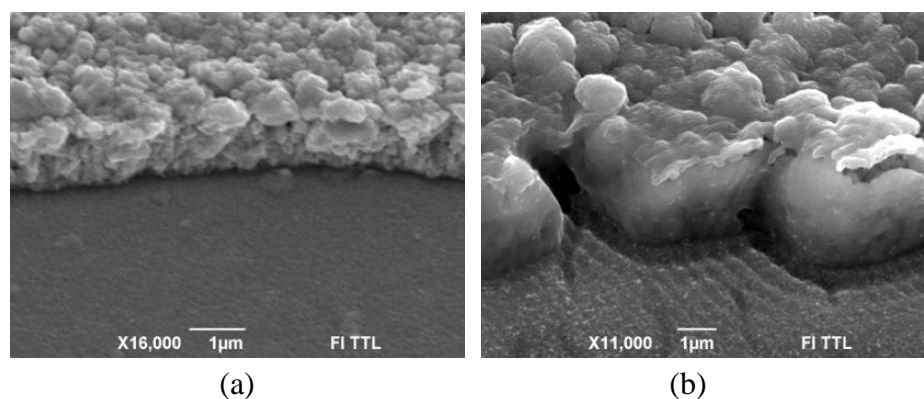
CIGS saulės elementų su ITO viršutiniu kontaktu raižymo eksperimentai buvo atlikti, panaudojant pikosekundinį lazerį su skirtingais bangos ilgiais. Suformuoti P3 tipo režiai ZnO:Al/ZnO/CIGS/Mo/PI struktūrose pavaizduoti 11 pav. Švarus apatinio kontakto atidengimas buvo pasiektas 1064 nm bangos ilgio spinduliuote dėl termo-mechaninio pašalinimo mechanizmo. Lazeriu paveiktos zonos plotis kanalo krašte siekė 5.7 μm, o abiejuose kraštuose išlydytų zonų plotis siekė 51 % kanalo pločio. Raižant 532 nm spinduliuote, buvo stebimas 6.2 μm pločio lydalo formavimasis kanalo krašte dėl pakankamai didelės sugerties CdS-CIGS tarp sluoksnyje. Šiuo atveju abiejuose kraštuose išlydytų zonų plotis siekė 61 % kanalo pločio. Medžiaga buvo pašalinama tiesioginio garinimo būdu, todėl sluoksnių selektyvumas mažėjo. Ultravioletinė 355 nm bangos ilgio spinduliuotė buvo absorbuojama netoli viršutinio kontakto paviršiaus, vyko tiesioginis medžiagos garinimo procesas, todėl palaiptas sluoksnių nugarinimas buvo realizuojamas keliais skenavimais. Ultravioletinės 266 nm spinduliuotės abliacija taip pat nepasižymėjo sluoksnių selektyvumu dėl aukštos spinduliuotės sugerties sluoksniuose, be to buvo pažeidžiamas molibdeno apatinis kontaktas. Infraraudonos 1572 nm spinduliuotės galios neužteko sluoksnių pašalinimui inicijuoti struktūrose su viršutiniaisiais kontaktais. ZnO/CdS/CIGS/Mo/PI struktūroje, 1572 nm bangos ilgio impulsų energijos pakako medžiagos termo-mechaniniam pašalinimui inicijuoti. Šiuo atveju termiškai paveikta medžiaga buvo pašalinta mechaniškai, todėl lazerio spinduliuotės poveikis Saulės elementui buvo minimalus (žiūrėti 12 pav.a). Vis dėlto, 1572 nm bangos ilgio panaudojimas yra komplikotas dėl komercinių lazerinių šaltinių, kurie dirbtų šiame bangos ilgių diapazone, nebuvimo.

Tyrimų metu nustatyta, kad 1064 nm bangos ilgio lazerio spinduliuotė buvo optimali P3 tipo režiu formuoti CIGS plonasluoksnyje struktūroje. Taigi fundamentinės kietakūnio

pikosekundinio lazerio harmonikos naudojimas P3 tipo procesui yra itin patrauklus pramoniniams taikymams dėl paprastesnio lazerinės sistemos dizaino bei patikimumo.



**11 pav.** P3 lazerio režiai ZnO:Al/ZnO/CIGS/Mo/PI struktūroje, naudojant skirtingo bangos ilgio lazerio spinduliuotę: (a) 1064 nm 600 mW, 100 kHz, 6  $\mu$ J, 200 mm/s vienas skenavimas; (b) 532 nm, 500 mW, 100 kHz, 5  $\mu$ J, 200 mm/s vienas skenavimas; (c) 355 nm, 100 mW, 50 kHz, 2  $\mu$ J, 300 mm/s, 20 skenavimų; (d) 266 nm, 100 mW, 10kHz, 10  $\mu$ J, 30 mm/s, 2 skenavimai.



**12 pav.** P3 režio krašto CIGS struktūroje SEM vaizdai: (a) 1572 nm, 800 mW, 50 kHz, 200 mm/s, vienas skenavimas; ZnO/CdS/CIGS/Mo/PI; (b) 355 nm, 100 mW, 50 kHz, 2  $\mu$ J, 300 mm/s, 20 skenavimų; ZnO:Al/ZnO/CdS/CIGS/Mo/PI.

Bandinių tyrimai optiniu mikroskopu bei profilometru neparodė defektų formavimosi po lazerinio apdirbimo lazerio paveiktose zonos. Skenuojančio elektroninio mikroskopo nuotraukos atskleidė trūkių bei išlydytų zonų formavimąsi kanalų kraštuose, kas galėjo turėti įtaką Saulės elemento fotoelektrinėms charakteristikoms.

### 5.3 Raižymo pikosekundiniu ir femtosekundiniu lazeriu ypatumai

Šių eksperimentų metu buvo abliuojamos CIGS Saulės elemento struktūros pikosekundiniu bei femtosekundiniu lazeriais, siekiant atidengti molibdeno sluoksnį. Zonos, išabliuotos dešimties impulsų vora, diametro priklausomybė nuo lazerio impulso

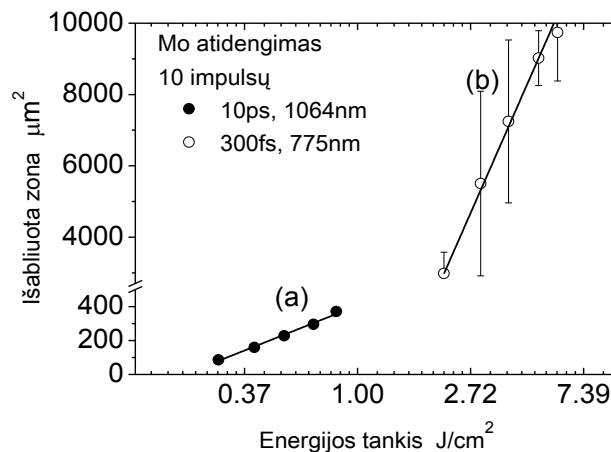
energijos pateikta 13 pav., o Mo atidengimo slenksčių, bei apskaičiuotų pluošto diametrų vertės pateiktos 1 lentelėje.

**Lentelė 1** Molibdeno atidengimo slenksčiai bei apskaičiuoti lazerio pluošto diametrai židinio plokštumoje.

Impulso trukmė	Mo atidengimo slenkstis	Gausinio pluošto diametras
10 ps	0.22 J/cm <sup>2</sup>	11.6 μm
300 fs	1.3 J/cm <sup>2</sup>	62 μm

Mažesnė molibdeno sluoksnio atidengimo slenksčio vertė buvo užfiksuota pikosekundiniams impulsams, tuo tarpu abliacijos slenkstis femtosekundiniais impulsais buvo 1.08 J/cm<sup>2</sup> didesnis. Taigi abliacija pikosekundiniais impulsais buvo šešis kartus efektyvesnė. Tokį rezultatą galėjo lemti keletas priežasčių:

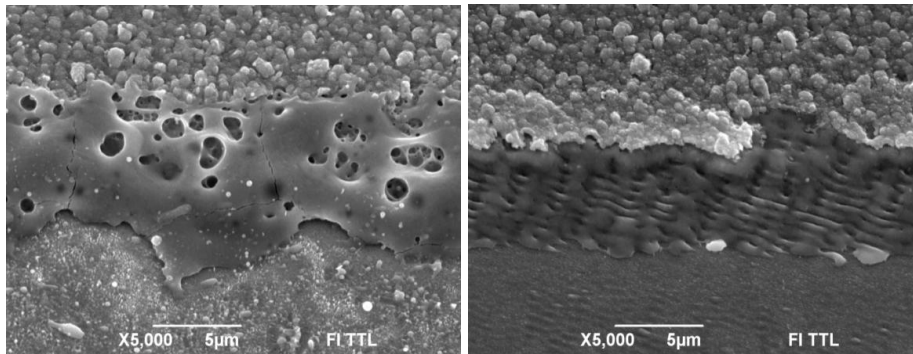
- Tiesioginė 775 nm bangos ilgio femtosekundinio lazerio spinduliuotės sugertis CIGS sluoksnyje.
- 1064 nm bangos ilgio pikosekundinio lazerio spinduliuotė buvo sugerta CIGS/Mo tarp sluoksnyje, tokiu atveju vyko medžiagos termo-mechaninis pašalinimas, kuris yra efektyvesnis, lyginant su tiesiogine abliacija.
- Šilumos difuzijos gylis buvo didesnis ilgesnio pikosekundinio lazerio impulso sąveikos su daugiasluoksne struktūra metu, todėl didesnis medžiagos tūris buvo įkaitinamas bei išgarinamas.



**13 pav.** Molibdeno sluoksnio, atidengto 10 impulsų vora, zonos diametro priklausomybė nuo lazerio pluošto energijos tankio: (a) 10 ps, 100 kHz, 1064 nm bangos ilgis; (b) 300 fs, 1 kHz, 775 nm bangos ilgis.

Abliuojant P3 tipo kanalus didelėmis lazerių impulsų energijomis, nepavyko pasiekti selektyvaus sluoksnių pašalinimo proceso. Sumažinus lazerių impulsų energiją bei padidinus impulsų persiklojimą buvo sumažintas terminis poveikis plonasluoksnei Saulės elemento struktūrai, tačiau lazeriu modifikuota zona formuojamo režio kraštuose išliko. Taip pat tyrimai atskleidė, kad sluoksnių abliacija pikosekundiniais impulsais

sukėlė didesnę terminę poveikį daugiasluoksnei struktūrai lyginant su femtosekundiniais impulsais.

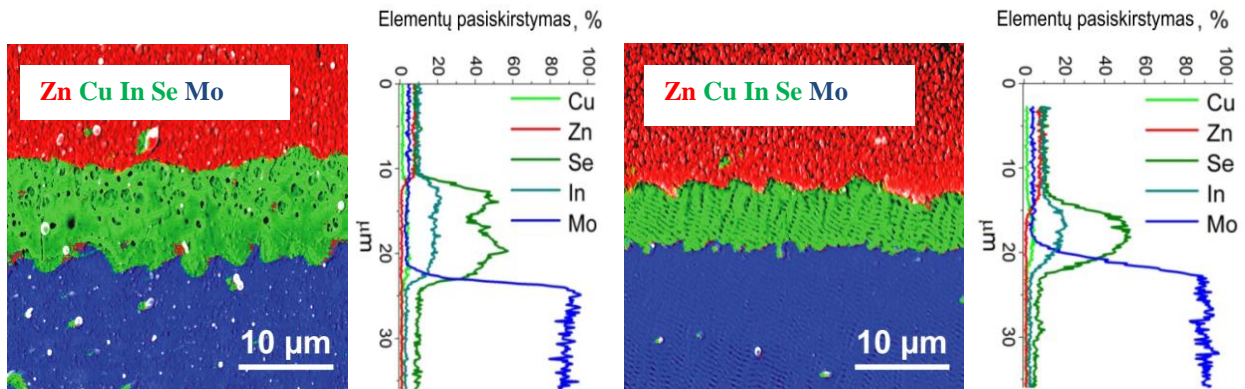


(a) 10 ps, 1.2 m/s režimo greitis.

(b) 300 fs, 4mm/s režimo greitis.

**14 pav.** P3 tipo režio, išabliuoto pikosekundiniu bei femtosekundiniu lazeriu, SEM nuotraukos: (a) 10 ps, 3.5 W, 200 kHz, 17.5 μJ, 1064 nm bangos ilgis, 1.2 m/s režimo greitis; (b) 300 fs, 35 mW, 1 kHz, 35 μJ, 755 nm bangos ilgis, 4 mm/s režimo greitis.

Abiem atvejais visiškai išvengti apsilydžiusių kanalų kraštų nepavyko dėl Gausinio pikosekundinio ir femtosekundinio lazerių pluoštų profilio. Pikosekundiniu lazeriu paveiktos zonos plotis kanalo krašte siekė 8.1 μm, o abiejuose kraštuose išlydytų zonų plotis sudarė 51 % kanalo pločio. Raižant Saulės elementą femtosekundiniais impulsais, išlydyta zona kanalo krašte buvo sumažinta iki 5.8 μm, o abiejuose kraštuose išlydytų zonų plotis siekė 23 % viso kanalo pločio. EDS analizė neparodė sluoksnių tarpusavio persilydymo kanalo kraštuose formuojant P3 tipo kanalus pikosekundiniais bei femtosekundiniais impulsais, buvo aiškiai matyti sluoksnių ribos. Cheminių elementų pasiskirstymo žemėlapiai pavaizduoti 15 pav.



(a) 10 ps, 1.2 m/s režimo greitis.

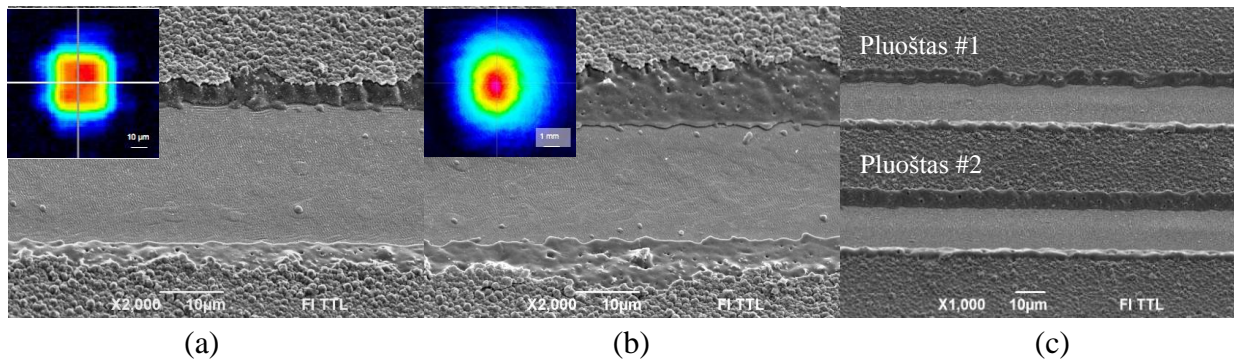
(b) 300 fs, 4mm/s režimo greitis.

**15 pav.** Kanalų, įrėžtų pikosekundiniais ir femtosekundiniais impulsais, kraštų EDS cheminių elementų analizė. Spektrometro erdvinė skyra ~1 μm.

## 6 LAZERINIŲ RAIŽYMO PROCESŲ OPTIMIZAVIMAS

Lazerio impulso trukmė turi didelę įtaką abliacijos kokybei formuojant kanalus plonasluoksneje CIGS struktūroje. Tačiau naudojant net ir itin trumpus 300 fs impulsus apsilydžiusi zona kanalų kraštuose išlieka. Absorbuojantis CIGS sluoksnis yra termiškai jautrus, todėl šiose lazeriu paveiktose zonose gali būti inicijuojami defektai, kurie mažina Saulės elemento efektyvumą. Todėl reikia ieškoti būdų kaip minimizuoti lazerio poveikio zonas kanalų kraštuose. Lazerio Gausinio profilio pluošto formavimas į plokščiojo profilio pluoštą yra vienas iš būdų tai pasiekti.

Žemiau pateikti suformuoto P3 tipo kanalų vaizdai, panaudojant Gausinį bei plokščiojo skirstinio pluoštą. Iš SEM nuotraukų matyti, kad abliuojant kanalą plokščiojo profilio pluoštu, pavyksta sumažinti lazeriu paveiktos zonos kanalų kraštuose plotį iki 7.1  $\mu\text{m}$ , o abiejuose kraštuose išlydytų zonų pločio santykį su kanalo pločiu - iki 33 %. Tuo tarpu raižant Gausinio profilio pluoštu, išlydytos zonos plotis kanalo krašte siekė 12.3  $\mu\text{m}$ , o santykis su kanalo pločiu buvo 50 %.



**16 pav.** Suformuotas ZnO:Al/ZnO/CIGS/MO/PI struktūroje P3 tipo režis: (a) 10 ps, 532 nm, 370 mW, 100 kHz, 60 mm/s režimo greitis, plokščiojo profilio pluoštas, (b) 10 ps, 532 nm, 370 mW, 100 kHz, 60 mm/s režimo greitis, plokščiojo profilio pluoštas Gausinio profilio pluoštas, (c) 10 ps, 1064 nm, 2x600 mW, 100 kHz, 200 mm/s, du lygiagrečius pluoštai.

Rėžių formavimo procesuose dažniausiai naudojama nedidelė lazerio galios dalis, o ir procesas nėra pakankamai greitas. Optimalios P3 tipo rėžio formavimo sąlygos pikosekundiniu PL10100 lazeriu buvo: vidutinė galia 600 mW, pasikartojimo dažnis 100 kHz, 200 mm/s raižymo greitis. Tačiau lazerio vidutinė galia siekia 10 W. Vienas iš proceso optimizavimo būdų gali būti lazerio pluošto skaidymas į kelis bei kanalų rėžimas lygiagrečiais pluoštais. P3 tipo rėžių, suformuotų CIGS plonasluoksneje struktūroje lygiagrečiais pluoštais, SEM nuotrauka pateikta 16 pav c.

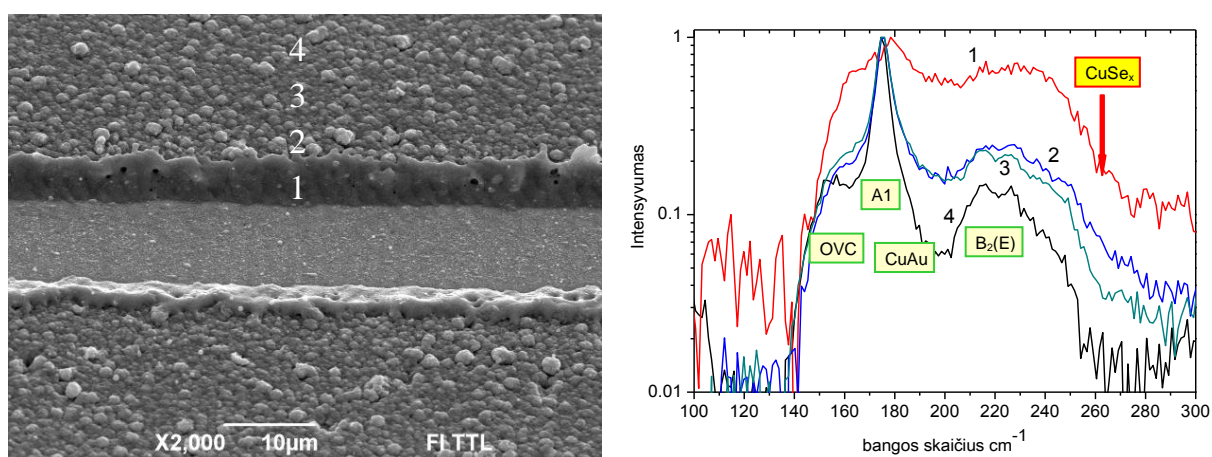
Raižymo proceso metu pavyko išlaikyti vienodus lygiagrečių pluoštų parametrus (židinio padėtį, impulso energiją), todėl buvo įmanoma suformuoti vienodo pločio bei kokybės kanalus. Šis eksperimentas demonstruoja proceso optimizavimo galimybes, kai vienu metu galima įrėžti keletą rėžių lygiagrečiais pluoštais, optimaliai išnaudojant lazerio galią bei didinant bendrą proceso greitį.

## 7 CIGS SAULĖS ELEMENTŲ CHARAKTERIZAVIMAS PO LAZERINIO APDIRBIMO

### 7.1 Ramano spektroskopija lazeriu paveiktose vietose

Ramano spektroskopija yra puiki metodika medžiagos struktūriniam pokyčiams tirti. Ši metodika buvo panaudota CIGS sluoksnio tyrimams po pikosekundinio lazerio raižymo. Tyrimams buvo naudoti bandiniai su lazeriu suformuotais P3 tipo rėžiais. Medžiagos Ramano spektras buvo nuskaitomas 2  $\mu\text{m}$  skiriamąja geba skirtingose bandinio vietose kanalo atžvilgiu, kaip parodyta 17 pav.

CIGS absorbuojantis sluoksnis yra termiškai jautrus, todėl lazerinė abliacija gali sukelti struktūrinius pokyčius modifikuotose zonose ir  $\text{CuSe}_x$  metališkujų fazių formavimąsi, smarkiai padidindamas sluoksnio elektrinį laidumą bei mažindamas Saulės elemento efektyvumą [32]. Šie struktūriniai pokyčiai gali būti užfiksuoti Ramano spektre.



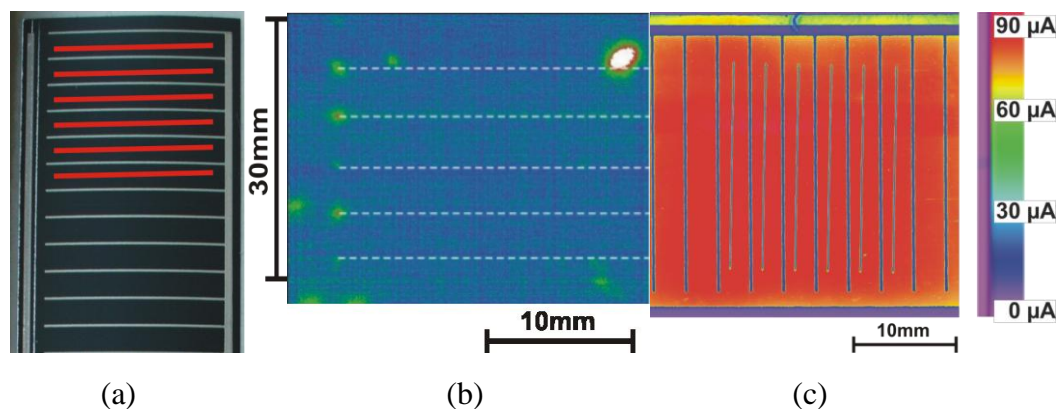
**17 pav.** P3 rėžio ZnO(60 nm)/CdS/CIGS/Mo/PI struktūroje (1064 nm, 600 mW, 100 kHz, 6  $\mu\text{J}$ , 200 mm/s, vienas skenavimas) SEM vaizdas ir Ramano sklaidos spektrai, išmatuoti skirtingose vietose rėžio krašto atžvilgiu (pažymėta skaičiais).

Suraižius plonasluoksne struktūrą 1064 nm ir 532 nm bangos ilgio pikosekundiniais impulsais, Ramano spektras buvo matuojamas keturiose kanalo vietose, pradedant nuo rėžio krašto, kaip parodyta 17 pav. Pagrindinė  $\text{CuInSe}_2$  Ramano spektro vibracinė  $A_1$  smailė yra ties 174  $\text{cm}^{-1}$  bei ji slenkasi į didesnių bangos skaičių pusę CIGS medžiagai [33]. Po lazerinio proceso buvo matomas pagrindinės smailės petys 150-160  $\text{cm}^{-1}$ , kuris parodo CIGS sluoksnio struktūros pokyčius. Plati smailė ties 210-230  $\text{cm}^{-1}$  taip pat yra būdinga CIGS. Ramano spektro pokytis buvo puikiai matomas ties aplydytų sienelių kraštais, tačiau nebuvo matyti  $\text{CuSe}_x$  metališkajai fazei būdingos smailės ties 262  $\text{cm}^{-1}$  [34]. Tyrimai parodė, kad pikosekundiniais lazeriais galima abliuoti CIGS Saulės elementus be ryškaus terminio poveikio absorbuojančiam sluoksniui.



## 7.2 Lock-in termografijos matavimai

Eksperimentų metu buvo tiriami veikiantys  $32 \text{ cm}^2$  ploto Saulės elementai. P3 tipo režiai buvo formuojami tarp elemento viršutinio kontaktų tinklelio, kaip parodyta 18 pav a. Raudonos linijos rodo raižymo vietą, o suminis kanalų ilgis siekė 360 mm. Tyrimų tikslas buvo įvertinti Saulės elemento elektrinių savybių pokyčius po lazerinio raižymo. Tipinės LIT nuotraukos pateiktos 18 pav.



**18 pav.** (a) Lazerinių rėžių padėtis CIGS Saulės elemente. Raudonos linijos žymi lazeriu padarytus rėžius, pilka – metaliniai kontaktai; (b) LIT vaizdas CIGS Saulės elemento su lazeriu padarytais rėžiais, išmatuotas lock-in termografijos būdu. Ryškūs taškai – sluoksnių dengimo defektai; mėlynos linijos – metalo kontaktai. Lazeriu daryti rėžiai yra tarp horizontalių kontaktų linijų; (c) Foto- indukuotos srovės (LBIC) žemėlapis lazeriu suraižytame CIGS Saulės elemente.

LIT nuotraukose puikiai matyti Saulės elemento gamybos proceso metu susiformavę defektai, kurie neturi nieko bendra su lazeriniu raižymu. Atidžiau ištyrus pikosekundiniu lazeriu raižytas zonas, buvo pastebėti temperatūros pokyčiai kanalų pradžioje. Šie defektai buvo sukelti dėl nepakankamo lazerinės sistemos suderinimo. Pradedant formuoti rėžių impulsų persiklojimas būdavo didesnis, kol skeneris pasiekdavo nustatytą greitį. Tose vietose kur lazerio pluoštas judėjo pastoviu greičiu, jokių temperatūros pokyčių neužfiksuota. Bandinių LIT tyrimai suraižytų femtosekundiniu lazeriu taip pat neparodė temperatūros pokyčių. Abiem atvejais LIT metodika neužfiksavo modifikuotų zonų, kurios gali sukelti Saulės elemento degradaciją. Vis dėlto nedideli temperatūros pokyčiai galėjo būti neužfiksuoti dėl per mažos IR kameros skiriamosios gebos, norint pamatuoti kelių mikronų pločio zonas P3 kanalų kraštuose.

## 7.3 Lazerio spinduliu indukuotų srovių (LBIC) matavimai

Saulės elementų tyrimų metu diodinio lazerio spindulys buvo fokusuojamas į  $50 \mu\text{m}$  dėmę. Tai lėmė maksimalią skiriamąją metodikos gebą. Zonų šalia lazeriu išabliuotų kanalų LBIC matavimų žemėlapis pateiktas 18 pav. (c). P3 tipo kanalai buvo įrėžiami tarp viršutinio kontakto tinklelio. LBIC žemėlapyje buvo matyti vienalytis fotosrovių pasiskirstymas visame Saulės elemento plote, įskaitant zonas arti P3 tipo rėžių, tačiau

metodikos skiriamoji geba galėjo būti nepakankama degradavusiai zonai aptikti šalia 10-15  $\mu\text{m}$  pločio kanalo kraštų.

#### 7.4 Saulės elementų fotoelektrinio efektyvumo po lazerinio apdirbimo tyrimai

Fotoelektrinio efektyvumo matavimo eksperimentuose buvo tirti optimaliomis sąlygomis pikosekundiniu bei femtosekundiniu lazeriais suraižyti pilnai veikiantys  $32\text{ cm}^2$  ploto Saulės elementai, kurių vidutinis efektyvumas prieš lazerinį procesą siekė 10.7 %. Rėžiai buvo formuojami tarp Saulės elemento metalinio kontakto tinklelio, kaip parodyta 18 pav. (a). Suminis rėžių ilgis siekė 360 mm. Elementų efektyvumo matavimai buvo atlikti prieš ir po lazerinio proceso standartinėmis matavimo sąlygomis (standartinis globalus saulės spektras AM 1.5, apšvita  $1000\text{ W/cm}^2$ ). Taip pat buvo matuojami nemodifikuoti lazeriniu procesu etaloniniai elementai siekiant įvertinti savaiminę elementų degradaciją tarp matavimų. Tiriama elementai neturėjo apsauginių sluoksnių, todėl laipsniškai degraduodavo dėl aplinkos poveikio.

**Lentelė 2** CIGS Saulės elementų efektyvumo matavimų lentelė po lazerinio apdirbimo, (+) efektyvumo sumažėjimas, (-) efektyvumo padidėjimas.

	Ef, prieš laz. apdirbimą, %	Ef. po laz. apdirbimo, %	Savaiminis pokytis, %	Absoliutus ef. pokytis, %	Absoliutus $R_{\text{parallel}}$ pokytis, Ohm
10 ps					
#1	10.6	10.41		0.03	7.09
#2	9.99	9.18	0.16	0.57	-0.46
#3	9.7	9.1		0.44	
	Vidurkis			<b>0.35</b>	<b>3.3</b>
300 fs					
#4	10.19	9.25		0.78	-1.36
#5	9.59	9.42	0.16	0.01	-0.75
#6	9.96	9.88		-0.08	26.49
	Vidurkis			<b>0.24</b>	<b>8.13</b>

Elementų elektrinių savybių modifikacija po lazerinio proceso buvo nusakoma vidutiniu absoliučiu efektyvumo pokyčiu, įskaitant savaiminę degradaciją. Matavimai parodė minimalų Saulės elementų efektyvumo bei šunto varžos sumažėjimą po pikosekundinio bei femtosekundinio lazerinio proceso. Vidutinis absoliutus efektyvumo sumažėjimas siekė 0.24 % po femtosekundinio lazerinio apdirbimo ir 0.35 % po pikosekundinio lazerinio apdirbimo, įskaitant aktyvios zonos ploto sumažėjimą. Tikėtina, kad mažesnis terminis poveikis po femtosekundinių impulsų poveikio lėmė mažesnę Saulės elemento efektyvumo sumažėjimą, tačiau reikalingi tyrimai su didesniu kiekiu Saulės elementų, siekiant tiksliau įvertinti efektyvumo pokyčius po lazerinio proceso.

## 8 IŠVADOS

1. Tinkamo bangos ilgio parinkimas yra itin svarbus, siekiant sukaupti lazerio energiją pageidaujame sluoksnyje ir tai yra vienas iš būdų pasiekti sluoksnių abliacijos selektyvumą.
2. Optimaliausios CIGS Saulės elemento raižymo sąlygos buvo gautos, naudojant pikosekundinio lazerio 1064 nm bangos ilgio spinduliuotę, vykstant medžiagos termo-mechaniniam pašalinimui. Lazериu paveiktų zonų plotis abiejuose kanalo kraštuose siekė 51 % kanalo pločio.
3. Šešis kartus spartesnis sluoksnių pašalinimo procesas vyko abliuojant struktūrą pikosekundiniais impulsais, tačiau formavosi 2 kartus platesnės lazериu paveiktos zonos kanalo kraštuose lyginant su femtosekundiniais impulsais.
4. Apdirbant plonus sluoksnius plokščiojo profilio lazериu pluoštu, 34 % sumažėjo išsilydžiusios zonos plotis kanalo kraštuose.
5. Yra įmanoma optimizuoti raižymo proceso kokybę bei spartą taikant apdirbimą lygiagrečiais plokščiojo skirstinio pluoštais.
6. Ramano spektroskopija bei turimos erdvinės skiriamosios gebos lock-in termografijos ir lazериu indukuotų lokalių fotosrovių matavimai neužfiksavo defektų generacijos lazериu paveiktose zonose.
7. Saulės elementų efektyvumo matavimai fiksavo 0.24-0.35 % fotoelementų efektyvumo sumažėjimą po lazerinio apdirbimo. Net ir naudojant ultratrumpus impulsus, buvo stebima lazериu paveikta, perlydyta zona kanalų kraštuose dėl Gausinio lazериu pluošto profilio bei tikėtina šiose zonose formavosi defektai, kurie lėmė Saulės elemento elektrinių savybių degradaciją.

## LITERATŪRA

- [1] T. M. Razykov, C. S. Ferekides, D. Morel *et al.*: Solar photovoltaic electricity: Current status and future prospects, *Solar Energy* 85, 1580-1608, (2011).
- [2] M. Kaelin, D. Rudmann and A. N. Tiwari: Low cost processing of CIGS thin film solar cells, *Solar Energy* 77, 749-756, (2004).
- [3] D. Graham-Rowe: Solar cells get flexible, *Nat Photon* 1, 433-435, (2007).
- [4] F. Long and et al.: CIS(CIGS) thin films prepared for solar cells by one-step electrodeposition in alcohol solution, *Journal of Physics: Conference Series* 152, 012074, (2009).
- [5] U. P. Singh and S. P. Patra: Progress in Polycrystalline Thin-Film Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> Solar Cells, *International Journal of Photoenergy* 2010, (2010).
- [6] P. Jackson, D. Hariskos, E. Lotter *et al.*: New world record efficiency for Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> thin-film solar cells beyond 20%, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 894-897, (2011).
- [7] A. Jeager-Waldau: Photovoltaic Status Report 2011 - Research, Solar Cell Production and Market Implementation of Photovoltaics, European Commission, (2011).
- [8] F. Colville, C. Dunskey and J. Hopkins: Existing and emerging laser applications within PV manufacturing, *Photovoltaics International* 1, 72, (2008).
- [9] F. Kessler and D. Rudmann: Technological aspects of flexible CIGS solar cells and modules, *Solar Energy* 77, 685-695, (2004).
- [10] C. Dunskey and F. Colville: Solid state laser applications in photovoltaics manufacturing, *Proceedings of SPIE* 6871, (2008).
- [11] A. D. Compaan, I. Matulionis and S. Nakade: Laser scribing of polycrystalline thin films, *Optics and Lasers in Engineering* 34, 15-45, (2000).
- [12] R. Tanaka, T. Takaoka, H. Mizukami, T. Arai and Y. Iwai: Laser etching of indium tin oxide thin films by ultra-short pulsed laser, *SPIE*, 5063, 370-373, (2003).
- [13] J. Hermann, M. Benfarah, S. Bruneau *et al.*: Comparative investigation of solar cell thin film processing using nanosecond and femtosecond lasers, *Journal of Physics D: Applied Physics* 39, 453, (2006).
- [14] C. Molpeceres and et al.: Microprocessing of ITO and a-Si thin films using ns laser sources, *Journal of Micromechanics and Microengineering* 15, 1271, (2005).
- [15] J. Hermann, M. Benfarah, G. Coustillier *et al.*: Selective ablation of thin films with short and ultrashort laser pulses, *Applied Surface Science* 252, 4814-4818, (2006).
- [16] D. Neelkanth G: Toward GW/year of CIGS production within the next decade, *Solar Energy Materials and Solar Cells* 91, 1376-1382, (2007).
- [17] L. Jiang and H.-L. Tsai: Improved Two-Temperature Model and Its Application in Ultrashort Laser Heating of Metal Films, *Journal of Heat Transfer* 127, 1167-1173, (2005).
- [18] Y. Zhang and J. K. Chen: Ultrafast melting and resolidification of gold particle irradiated by pico- to femtosecond lasers, *Journal of Applied Physics* 104, 054910-054919, (2008).

- [19] S. I. Anisimov, B. L. Kapeliovich and T. L. Perelman: Electron emission from metal surfaces exposed to ultrashort laser pulses, *Sov. Phys. JETP* 39, 375-377, (1974).
- [20] J. K. Chen, D. Y. Tzou and J. E. Beraun: A semiclassical two-temperature model for ultrafast laser heating, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 49, 307-316, (2006).
- [21] B. H. Christensen, K. Vestentoft and P. Balling: Short-pulse ablation rates and the two-temperature model, *Applied Surface Science* 253, 6347-6352, (2007).
- [22] H. Hirori, T. Tachizaki, O. Matsuda and O. B. Wright: Electron dynamics in chromium probed with 20-fs optical pulses, *Physical Review B* 68, 113102, (2003).
- [23] S. D. Brorson, A. Kazeroonian, J. S. Moodera *et al.*: Femtosecond room-temperature measurement of the electron-phonon coupling constant  $\gamma$  in metallic superconductors, *Physical Review Letters* 64, 2172, (1990).
- [24] Y. P. Meshcheryakov and N. M. Bulgakova: Thermoelastic modeling of microbump and nanojet formation on nanosize gold films under femtosecond laser irradiation, *Applied Physics A: Materials Science & Processing* 82, 363-368, (2006).
- [25] D. Shvydka, J. P. Rakotoniaina and O. Breitenstein: Lock-in thermography and nonuniformity modeling of thin-film CdTe solar cells, *Applied Physics Letters* 84, 729-731, (2004).
- [26] W. Fang and K. Ito: Reconstruction of Semiconductor Doping Profile from Laser-Beam-Induced Current Image, *SIAM Journal on Applied Mathematics* 54, 1067-1082, (1994).
- [27] S. I. Anisimov, B. L. Kapeliovich and T. L. Perelman: Electron emission from metal surfaces exposed to ultrashort laser pulses, *Soviet Physics - JETP* 39, 375-377, (1974).
- [28] Y. P. Meshcheryakov and N. M. Bulgakova: Thermoelastic modeling of microbump and nanojet formation on nanosize gold films under femtosecond laser irradiation, *Applied Physics A: Materials Science & Processing* 82, 363-368, (2006).
- [29] J. Bovatsek, A. Tamhankar, R. S. Patel, N. M. Bulgakova and J. Bonse: Thin film removal mechanisms in ns-laser processing of photovoltaic materials, *Thin Solid Films* 518, 2897-2904, (2010).
- [30] C. W. Ong, D. G. Zong, M. Aravind, C. L. Choy and D. R. Lu: Tensile strength of zinc oxide films measured by a microbridge method, *Journal of Materials Research* 18, 2464-2472, (2003).
- [31] *Oxford Indium, Biz Esp Ltd., technical bulletin.*
- [32] H. Miyazaki, R. Mikami, A. Yamada and M. Konagai: Cu(InGa)Se<sub>2</sub> thin film absorber with high Ga contents and its application to the solar cells, *Journal of Physics and Chemistry of Solids* 64, 2055-2058, (2003).
- [33] C.-M. Xu, X.-L. Xu, J. Xu *et al.*: Composition dependence of the Raman A<sub>1</sub> mode and additional mode in tetragonal Cu-In-Se thin films, *Semiconductor Science and Technology* 19, 1201, (2004).
- [34] X. Fontane, V. Izquierdo-Roca, L. Calvo-Barrio *et al.*: In-depth resolved Raman scattering analysis of secondary phases in Cu-poor CuInSe<sub>2</sub> based thin films, *Applied Physics Letters* 95, 121907, (2009).

## **SANTRAUKA ANGLŲ KALBA (SUMMARY)**

Present PhD thesis is the experimental and theoretical analysis of thin layer ablation processes for photovoltaic devices. The picosecond (10 ps) and femtosecond (300 fs) lasers were used in the ablation and scribing experiments. Flexible CIGS solar cell samples with different top-contact structures were investigated. Laser scribing was performed using different wavelengths including: 1575 nm, 1064 nm, 775 nm, 532 nm, 355 nm and 266 nm. Laser scribed areas were investigated with optical and Scanning electron microscopes together with EDS (X-ray energy dispersion) and Raman spectrometers. Electrical characterization was obtained with LIT (Lock-in thermography), LBIC (Laser beam induced current measurements) techniques. Efficiency of the solar cells after laser scribing was also investigated.

Experimental work was supported by modeling and simulation of energy coupling and dissipation inside the layers. Selectiveness of the ablation process is defined by optical and mechanical properties of the materials, and selection of the laser wavelength facilitated control of the structuring process.

The 1064 nm wavelength was found optimal for the CIGS solar cell scribing in terms of quality and process speed. It is very positive result for industrial applications as the cost and system complexity are decreased.

The solar cell efficiency test revealed minor degradation in photo-electrical efficiency after the laser scribing was applied to the solar cell samples. Lock-in thermography measurements did not revealed any internal shunt formation during laser scribing with picosecond pulse duration.

Picosecond lasers with fundamental harmonics and high repetition rates can be used to accomplish efficient and fast scribing process which is able to fit the demands for industrial solar cell scribing applications.

## TRUMPOS ŽINIOS APIE DOKTORANTĄ

**Gimimo data:** 1983 m. gruodžio 6 d.  
**Vardas pavardė:** Paulius Gečys  
**Tautybė:** Lietuvos Respublikos  
**Gyvenamoji vieta:** Gelvonų 22-3, 07148 Vilnius  
**Telefono numeris:** +370 60004346  
**Elektroninio pašto adresas:** p.gecys@ar.fi.lt  
**Šeimyninė padėtis:** vedęs

### **Išsilavinimas ir kvalifikacija:**

2008 m – 2012 m. Doktorantūros studijos (technologijos mokslai, medžiagų inžinerija – 08T, lazerinė technologija-T165), Vilniaus universitetas, Fizinių ir technologijos mokslų centro Fizikos institutas, Savanorių pr. 231, 02300 Vilnius

2006 m. – 2008 m. Fizikos magistro diplomą (Lazerinė fizika ir optinės technologijos) Vilniaus universitetas, Saulėtekio al. 9, III rūmai, LT-10222, Vilnius

2002 m. – 2006 m. Fizikos bakalauro diplomą (Taikomoji fizika) Vilniaus universitetas, Saulėtekio al. 9, III rūmai, LT-10222, Vilnius

1990 m. – 2002 m. Vilniaus Simono Stanevičiaus vidurinė mokykla, S. Stanevičiaus g. 25, LT-07102

### **Darbo patirtis:**

2011m. Fizinių ir technologijos mokslų centro Fizikos institutas, Lazerinių technologijų skyrius, Savanorių pr. 231, LT-02300, Vilnius, Lietuva

*Pareigos:* Jaunesnysis mokslo darbuotojas

2006 m. – 2011 m. Fizinių ir technologijos mokslų centro Fizikos institutas, Taikomųjų tyrimų laboratorija, Savanorių pr. 231, LT-02300, Vilnius, Lietuva

*Pareigos:* Inžinierius