https://doi.org/10.15388/vu.thesis.965
https://orcid.org/0009-0006-8184-7810

VILNIAUS UNIVERSITETAS
FIZINIŲ IR TECHNOLOGIJOS MOKSLŲ CENTRAS

Laimis Zubauskas

Optinių paviršių formavimas skaidriose medžiagose lazeriniu frezavimu

DAKTARO DISERTACIJA

Technologijos mokslai,
Medžiagų inžinerija (T 008)

VILNIUS 2026

Disertacija rengta 2021–2026 metais Fizinių ir technologijos mokslų centre.

Mokslinis vadovas – dr. Paulius Gečys (Fizinių ir technologijos mokslų centras, technologijos mokslai, medžiagų inžinerija, T 008).

Gynimo taryba:
Pirmininkas – prof. dr. Domas Paipulas (Vilniaus universitetas, gamtos mokslai, fizika, N 002).
Nariai:
dr. Lina Grinevičiūtė (Fizinių ir technologijos mokslų centras, technologijos mokslai, medžiagų inžinerija, T 008),
prof. dr. Vygantas Mizeikis (Shizuoka universitetas, Japonija, technologijos mokslai, medžiagų inžinerija, T 008),
dr. Evaldas Stankevičius (Fizinių ir technologijos mokslų centras, gamtos mokslai, fizika, N 002),
prof. dr. Tomas Tamulevičius (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, medžiagų inžinerija, T 008).

Disertacija ginama viešame Gynimo tarybos posėdyje 2026 m. rugsėjo mėn. 29 d. 10 val. FTMC Fizikos instituto salėje. Adresas: Savanorių pr. 231, 02300 Vilnius, Lietuva, tel. +37064515557; el. paštas office@ftmc.lt

https://doi.org/10.15388/vu.thesis.965
https://orcid.org/0009-0006-8184-7810

VILNIUS UNIVERSITY
CENTER FOR PHYSICAL SCIENCE AND TECHNOLOGY

Laimis Zubauskas

Formation of Optical Surfaces in Transparent Materials Via Laser Milling Technology

DOCTORAL DISSERTATION

Technological Sciences,
Materials Engineering (T 008)

VILNIUS 2026

The dissertation was prepared between 2021 and 2026 at the Center for Physical Science and Technology.

Academic Supervisor – Dr. Paulius Gečys (Center for Physical Science and Technology, Technological Sciences, Materials Engineering, T 008).

This doctoral dissertation will be defended in a public meeting of the Dissertation Defence Panel:

Chairman – Prof. Dr. Domas Paipulas (Vilnius University, Natural Sciences, Physics, N 002).
Members:
Dr. Lina Grinevičiūtė (Center for Physical Science and Technology, Technological Sciences, Materials Engineering, T 008),
Prof. Dr. Vygantas Mizeikis (Shizuoka University, Japan, Technological Sciences, Materials Engineering, T 008),
Dr. Evaldas Stankevičius (Center for Physical Science and Technology, Natural Sciences, Physics, N 002),
Prof. Dr. Tomas Tamulevičius (Kaunas University of Technology, Technological Sciences, Materials Engineering, T 008).

The dissertation shall be defended at a public meeting of the Dissertation Defence Panel at 10:00 on 29th of September 2026 in meeting room of the Physics Institute (Center for Physical Science and Technology).
Address: Savanorių Ave. 231, 02300 Vilnius, Lithuania
Tel. +37064515557; e-mail: office@ftmc.lt

Trumpiniai / Abbreviations

3D – trimatis (angl. three-dimensional)

CCD – krūvį kaupiantis ir jį nuskaitantis įrenginys (angl. charge-coupled device)

CAD – kompiuteriu projektuotas modelis (angl. computer-aided design)

DKP – didžiausias krašto pažeidimas (angl. the widest edge damage)
LED – puslaidininkinis šviestukas (angl. light emitting diode)

SEM – skenuojantis elektronų mikroskopas (angl. scanning electron microscope)

SLG – silikatinis stiklas (angl. soda-lime glass)

VKP – vidutinis krašto pažeidimas (angl. average edge damage)

Turinys / Contents

1. Įvadas 9
1.1. Disertacijos tikslas ir uždaviniai 10
1.2. Praktinė nauda ir naujumas 11
1.3. Ginamieji teiginiai 11
1.4. Publikacijos 12
1.4.1. Autoriaus indėlis 14
1.4.2. Bendraautorių indėlis 14
2. Literatūros apžvalga 15
2.1. Lazerinės spinduliuotės sąveika su medžiaga 15
2.2. Pažeidimų formavimasis stikle 17
2.2.1. Medžiagos paviršiaus pažeidimas 17
2.2.2. Stiklo skeldėjimas 18
2.2.3. Tūriniai pažeidimai 19
2.2.4. Fokusavimasis stiklo tūryje 21
2.3. Optinio paviršiaus sąvoka 21
2.4. Lazerinės technologijos stiklo pjovimui ir frezavimui 22
2.4.1. Pjovimas generuojant trūkius 23
2.4.2. Frezavimas nuo apatinės stiklo pusės 24
2.4.3. Tiesioginė stiklo abliacija nuo viršutinio paviršiaus . 24
2.5. Pjovimas pro tekantį skysčio sluoksnį 25
2.5.1. Vandens sluoksnio nauda lazerinio apdirbimo procesui 26
2.6. Stiklo frezavimas naudojant GHz papliūpų režimą 28
2.7. Lazerinis poliravimo etapas optinių elementų gamybai 29
2.8. Kitos lazerinės optinių elementų gamybos technologijos 33
2.9. Populiarios ne lazerinės optinių elementų gamybos technologijos 36
2.9.1. Kontaktiniai metodai 36

2.9.2. Bekontaktės technologijos 37
3. Eksperimentinė įranga ir metodika 40
3.1. Lazeriniai šaltiniai 40
3.2. Eksperimentiškai tirti stiklai 41
3.3. Stiklo pjovimo tyrimo metodika 43
3.3.1. Tekančio vandens sluoksnio sudarymas ir charakterizavimas 48
3.4. Paviršiaus frezavimo tyrimų metodika 49
3.4.1. Lydyto kvarco frezavimas papliūpų režime 52
3.5. Paviršiaus poliravimo tyrimų metodika 53
3.6. Apdirbimo kokybės įvertinimo metodika 54
3.6.1. Kraštų apskeldėjimo matavimas 54
3.6.2. Paviršiaus šiurkštumo matavimas 55
3.6.3. Kritinio įtempio matavimas 58
3.6.4. Lęšių masyvo charakterizavimas 59
3.7. Pluošto homogenizavimo lęšių masyvu principas 61
4. Lazerinis borosilikatinio stiklo pjovimas oro ir vandens aplinkose 63
4.1. Vandens sluoksnio įtakos stiklo pjovimui tyrimas 63
4.2. Skirtingo storio borosilikatinių stiklų pjovimo tyrimas 68
4.3. Borosilikatinio stiklo lazerinio pjūvio kokybės analizė 70
4.3.1. Pjūvio krašto paviršiaus kokybės analizė 71
4.3.2. Pjūvio sienelės šiurkštumo analizė 76
4.3.3. Išpjautų borosilikatinių stiklų mechaninio atsparumo analizė 77
4.3.4. Periodinių apatinio paviršiaus pažeidimų ties pjūvio kraštu analizė 79
4.4. Pagrindiniai borosilikatinio stiklo pjovimo rezultatai ir išvados 81
5. Lydyto kvarco paviršiaus frezavimo tyrimai IR ultratrumpų impulsų lazeriais 83
5.1. Lydyto kvarco frezavimas pavieniais lazeriniais impulsais ... 83

5.1.1. Poliruoto lydyto kvarco frezavimo tyrimas 83
5.1.2. Pašiurkštinto lydyto kvarco frezavimo tyrimas 88
5.2. Lydyto kvarco frezavimas su GHz papliūpų režimu 91
5.2.1. Frezavimo kokybė naudojant GHz papliūpų režimą . 95
5.3. Pagrindiniai lydyto kvarco frezavimo tyrimo rezultatai ir išvados..... 97
6. Lęšių masyvo formavimo ir poliravimo CO_2 lazeriu tyrimai 99
6.1. Lęšių masyvo paviršiaus formavimas..... 99
6.2. Lęšių masyvo paviršiaus poliravimo CO_2 lazeriu tyrimas.... 101
6.3. Pagrindiniai lęšių masyvo formavimo ir poliravimo tyrimo rezultatai ir išvados 108
7. Lęšių masyvų homogenizatoriaus gamyba ir taikymai..... 110
Pagrindiniai rezultatai ir išvados 113
Literatūros sąrašas / References 115
Santrauka / summary 127
Padėka 143
Curriculum vitae..... 144

1. Įvadas

Skaidrios medžiagos, ypač stiklai, yra plačiai naudojamos optinių elementų gamyboje dėl savo didelio optinio skaidrumo plačiame spektriniame diapazone, cheminio ir terminio stabilumo bei gerų mechaninių savybių. Stikliniai optiniai elementai pasižymi ilgaamžiškumu ir tinkamumu darbui sudėtingomis aplinkos sąlygomis, todėl jie dažnai pasirenkami tiek laboratorinėse, tiek pramoninėse sistemose. Paprastai, optiniai paviršiai ir mikro optiniai elementai naudojami vaizdinimo, apšvietimo, jutiklių ar telekomunikacijų optinėse sistemose. Ypatingą reikšmę šiose srityse turi lęšių masyvai, leidžiantys kompaktiškai ir efektyviai valdyti šviesos sklidimą [1–3] ar formuoti pageidaujamą spinduliuotės intensyvumo pasiskirstymą [4, 5].

Tradiciškai mikro optinių elementų, įskaitant lęšių masyvus, gamyba remiasi tokiais metodais kaip karštu presavimu [6], terminiu paviršiaus perlydimu [7] ar rašaliniu rašymu [8]. Nors šios technologijos leidžia pasiekti aukštą paviršiaus kokybę, jos dažnai reikalauja sudėtingų daugiaetapių procesų ir iš anksto paruoštų formų, kaukių ar šablonų. Be to, tokie metodai riboja geometrinį lankstumą, apsunkina greitą prototipavimą ir dažniausiai yra pritaikyti tik ribotai medžiagų grupei, pavyzdžiui, polimerams. Šie apribojimai tampa ypač aktualūs kuriant individualizuotus ar mažų serijų stiklinius optinius elementus.

Atsižvelgiant į šiuos trūkumus, vis didesnis dėmesys skiriamas lazerinėms technologijoms kaip alternatyviam mikro optinių paviršių formavimo metodui, kuriuo būtų gebama išpjauti, suformuoti ir nupoliruoti stiklą su viena sistema. Lazeriai įrodė savo pranašumą kaip lankstus ir preciziškas įrankis įvairių medžiagų mikroapdirbimui. Pastaraisiais metais buvo išsamiai tyrinėjamos metalų [9, 10], puslaidininkių [11, 12] ir dielektrikų [13] apdirbimo galimybės. Be to, galimybė operatyviai keisti formuojamų elementų geometriją sudaro galimybę lazerinėms technologijoms tapti universaliu pramoniniu įrankiu.

S. Schwarz palygino populiariausius lazerinius laisvosios formos optikos formavimo metodus, apjungiančius tokias technologijas kaip lazerinė abliacija, stiklo ėsdinimas ar dvifotonė polimerizacija [14]. Autorius konstatavo, kad stiklų lazerinio frezavimo ir poliravimo CO_2 lazeriu derinys yra universaliausias būdas, leidžiantis optinius elementus formuoti išskirtinai lazerinėmis technologijomis. Taigi stiklinių optinių elementų formavimas tik lazeriniais šaltiniais tapo itin aktualia tyrimų kryptimi, siekiant tobulinti lazerines mikro optikos gamybos technologijas bei padidinti jų našumą ir optinę kokybę iki masinei gamybai būdingų standartų.

Viena iš perspektyvių lazerinių technologijų pritaikomų optinių elementų gamybai yra tiesioginė stiklų abliacija nuo viršutinės bandinio pusės. Tai yra universali lazerinė technologija, gebanti apjungti stiklo pjovimo ir paviršiaus frezavimo žingsnius kartu įgalinant įvairių, lazerio pluoštui skaidrių ir neskaidrių optinių terpių 3D apdirbimą. Kita vertus, ji gana lėta, ypač apdirbant storesnius stiklus. Tai lemia, kad reikia ieškoti būdų kaip didinti šios technologijos efektyvumą bei spartą neprarandant apdirbimo kokybės, kad ji būtų konkurencinga pramonėje. Pastaroji problema yra šios disertacijos pagrindinė tyrimų sritis.

Šiame darbe aptariami rezultatai, gauti pritaikant lazerinę stiklų abliacijos technologiją optinių elementų gamybai. Apskritai, tyrimai išskirti į tris dalis – elementų pjovimo, jų paviršiaus formavimo bei poliravimo etapus. Stiklo pjovimas plačiau aptartas **4 skyriuje**, kur buvo gilinamasi į pjovimo greičio didinimą. Vienas iš perspektyvių būdų padidinti pjovimo efektyvumą ir spartą yra pjauti stiklą pro vandens sluoksnį. Šiuo tikslu buvo tyrinėjamas stiklo pjovimas oro ir vandens aplinkose su femtosekundiniu lazeriu esant dideliems impulsų pasikartojimo dažniams (≥100 kHz). Tyrime buvo parodyta sudaromo vandens sluoksnio įtaka lazerinės sistemos parametrams, kai jie yra optimizuojami didžiausiam pjovimo greičiui ir efektyvumui.

Tiriant galimybę spartinti optinio elemento paviršiaus formavimo etapą, **5 skyriuje** buvo analizuojama lazerinių impulsų trukmės įtaka apdirbamo paviršiaus kokybei bei apdirbimo skyrai. Parodytas femtosekundinių impulsų pranašumas formavimo greityje ir skyroje lyginant su ilgesniais pikosekundiniais impulsais. Papildomai pademonstruotas būdas didinti apdirbimo skyrą apdirbant ne skaidrų, o pašiurkštintą stiklo paviršių. Šio skyriaus pabaigoje išsamiai ištirta lazerinių papliūpų sudarytų iš femtosekundinių lazerinių impulsų įtaka formavimo procesui. Parodytas frezavimo spartos ir efektyvumo didėjimas prastėjant apdirbamo paviršiaus kokybei. Pagrindinis dėmesys buvo skirtas mechanizmui, dėl kurio didėja medžiagos pašalinimo efektyvumas papliūpų režime.

Galiausiai, **6 skyriuje** aprašyti rezultatai gauti CO_2 lazeriu poliruojant suformuotus lęšių masyvus, o **7 skyriuje** pateiktas realus suformuotų masyvų pritaikymo pavyzdys, jas integruojant į pramoninę sistemą.

1.1. Disertacijos tikslas ir uždaviniai

Šios disertacijos tikslas buvo ištirti būdus didinti tiesioginės stiklo abliacijos spartą bei kokybę pritaikant lazerinio apdirbimo technologiją optinių elementų gamybai. Tam buvo išsikelti uždaviniai: (i) ištirti 1030 nm bangos ilgio femtosekundinio lazerio įtaką skirtingų storių stiklų pjovimo

procesui ore ir pro tekančio vandens sluoksnį; (ii) ištirti pikosekundinių ir femtosekundinių impulsų įtaką stiklo paviršiaus frezavimui; (iii) ištirti stiklo paviršiaus frezavimą panaudojant GHz papliūpų režimą; (iv) pagaminti lęšių masyvus kombinuojant stiklo frezavimo ultratrumpų impulsų lazeriu ir paviršiaus poliravimo CO_2 lazeriu technologijas.

1.2. Praktinė nauda ir naujumas

Disertacijoje gilinamasi į optinių paviršių formavimą pasitelkiant tiesioginės lazerinės abliacijos nuo viršutinio stiklo paviršiaus technologiją. Sprendžiamas pagrindinis technologinis trūkumas – lėtas stiklo abliacijos procesas – ir tiriami būdai jam spartinti.

Pirmiausia, pirmą kartą buvo pademonstruotas lazerinis stiklų pjovimas ore ir pro tekantį vandens sluoksnį panaudojant didelius lazerio impulsų pasikartojimo dažnius. Abiejose aplinkose buvo tiriamos stiklo pjovimo spartos ir efektyvumo priklausomybės nuo skirtingų lazerinės sistemos parametrų. Parodyta, kad pjaunant stiklą pro vandens sluoksnį, galima ne tik paspartinti procesą, bet ir pasiekti aukštesnę pjūvio kokybę.

Papildomai, buvo analizuojama GHz papliūpų įtaka stiklo apdirbimo procesui. Pirmą kartą pademonstruota, kad spartus stiklo frezavimo efektyvumo augimas papliūpų režime yra susijęs su medžiagos pašalinimo mechanizmų pokyčiais lazerinės abliacijos metu: pereinama nuo švelnios stiklo abliacijos (nenaudojant papliūpų režimo) prie stiklo skaldymo ir pašalinimo didesnėmis medžiagos frakcijomis (papliūpų režime), kas stipriai lemia medžiagos pašalinimo spartą bei apdirbamo paviršiaus kokybę.

Galiausiai pirmą kartą buvo sistemingai palyginta optinių paviršių gamyba skirtingos trukmės lazeriniais impulsais, panaudojant femtosekundinį ir pikosekundinį lazerius. Pademonstruotas femtosekundinių impulsų pranašumas optinių paviršių formavime. Papildomai panaudojus lazerinio poliravimo technologiją, vien tik lazeriais buvo pagaminti lęšių masyvai ir sėkmingai pritaikyti ultravioletinio šviestuko pluošto homogenizavimo sistemoje.

1.3. Ginamieji teiginiai

1. Lazerinis stiklo pjovimas ultratrumpais lazerio impulsais vandens aplinkoje, lyginant su pjovimu ore, užtikrina efektyvų bandinio aušinimą pjaunant 110–550 μm storio stiklus. Tai leidžia naudoti maksimalią lazerio galią išvengiant kritinės stiklo destrukcijos, kuri

ore įvyksta pjaunant 550 µm storio bandinį, bei užtikrina mažesnį defektų kiekį, siauresnius pjovimo kanalus ir didesnį proceso greitį.

2. Femtosekundiniais lazerio impulsais galima pasiekti submikroninį frezavimo tikslumą veikiant jau lazeriu apdirbtą paviršių, kas užtikrina mažesnį šiurkštumą ir iki 2,6 karto didesnį našumą nei frezuojant tą patį stiklą su pikosekundiniais lazeriniais impulsais.
3. Femtosekundinio lazerio GHz papliūpų panaudojimas yra netinkamas optinių paviršių formavimui siekiant didinti frezavimo spartą dėl pasikeičiančio medžiagos šalinimo mechanizmo - intensyvesnio paviršiaus daužymo ir medžiagos šalinimo stambiomis frakcijomis, kas kraštutiniu atveju lemia stiprią apdirbimo kokybės degradaciją augant paviršiaus šiurkštumui S_a iki 17,7 karto.
4. Selektyvus lazerinis frezavimas femtosekundiniais impulsais, derinamas su papildomu CO_2 lazeriniu poliravimu, užtikrina geresnę optinio paviršiaus kokybę nei analogiškas apdirbimas pikosekundiniais impulsais, tačiau dėl bendrai išliekančio per didelio banguotumo W_q ši technologija labiau tinka optinių elementų ir prietaisų gamybai, kur šis parametras nėra kritinis.

1.4. Publikacijos

Moksliniai rezultatai, aptarti šioje disertacijoje, buvo publikuoti 3-uose recenzuojamuose moksliniuose leidiniuose [S1-S3]. Be to, doktorantūros studijų metu buvo išspausdintos dar trys publikacijos [S4-S6]. Rezultatai pristatyti 5-iose tarptautinėse mokslinėse konferencijose [C1-C5]. Į šį sąrašą neįtrauktos dvi nacionalinės doktorantų konferencijos „Fiztech“ bei du žodiniais ir du stendiniais pranešimai tarptautinėse vasaros mokyklose.

Moksliniai straipsniai tiesiogiai susiję su šia disertacija (išspausdinti tarptautiniuose mokslo leidiniuose, turinčiuose cituojamumo rodiklį *Clarivate Web of Science (WoS)* duomenų bazėje):

S1. E. Markauskas, **L. Zubauskas**, G. Račiukaitis, P. Gečys, Femtosecond laser cutting of 110–550 µm thickness borosilicate glass in ambient air and water, *Micromachines* **14**(1), 176 (2023).

S2. **L. Zubauskas**, E. Markauskas, A. Vyšniauskas, V. Stankevič, P. Gečys, Comparative analysis of microlens array formation in fused silica glass by laser: femtosecond versus picosecond pulses, *Journal of Science: Advanced Materials and Devices* **9**(4), 100804 (2024).

S3. **L. Zubauskas**, E. Markauskas, P. Šleiniūtė, P. Gečys, Classical top-down fused silica milling with a femtosecond laser using different laser pulse burst regimes, Journal of Materials Processing Technology **155**, 820-830 (2025).

Kiti moksliniai straipsniai publikuoti doktorantūros studijų laikotarpiu (išspausdinti tarptautiniuose mokslo leidiniuose, turinčiuose cituojamumo rodiklį *Clarivate Web of Science (WoS)* duomenų bazėje):

S4. E. Markauskas, **L. Zubauskas**, B. Voisiat, P. Gečys, Efficient water-assisted glass cutting with 355 nm picosecond laser pulses, *Micromachines* **13**(5), 785 (2022).
S5. J. Dudutis, **L. Zubauskas**, E. Daknys, E. Markauskas, R. Gvozdaitė, G. Račiukaitis, P. Gečys, Quality and flexural strength of laser-cut glass: classical top-down ablation versus water-assisted and bottom-up machining, *Optics Express* **30**(3), 4564 (2022).
S6. E. Markauskas, **L. Zubauskas**, A. Naujokaitis, B. Čechavičius, M. Talaikis, G. Niaura, M. Čaplovičová, V. Vretenár, T. Paulauskas, GaAs ablation with ultrashort laser pulses in ambient air and water environments, *Journal of Applied Physics* **133**, 235102 (2023).

Dalyvavimas tarptautinėse konferencijose:

C1. **L. Zubauskas**, E. Markauskas, P. Gečys, Water-assisted borosilicate glass ablation with 355 nm wavelength picosecond laser, The 23rd International Symposium on Laser Precision Microfabrication (LPM2022), Dresdenas, Vokietija, birželio 07 – 10, (2022).
C2. **L. Zubauskas**, A. Vyšniauskas, E. Markauskas, P. Gečys, Comparison of fused silica ablation with picosecond and femtosecond lasers, Laser Precision Microfabrication (LPM2023), Hirosakis, Japonija, birželio 13 – 16, (2023).
C3. **L. Zubauskas**, A. Vyšniauskas E. Markauskas, P. Gečys, Complex element formation in fused silica: picosecond versus femtosecond laser ablation, Lasers in Manufacturing (LIM 2023), Miunchenas, Vokietija, June 26 – 29, (2023).
C4. **L. Zubauskas**, E. Markauskas, P. Gečys, Top-down ablation of fused silica by biburst femtosecond laser, Conference on Laser Ablation (COLA2024), Kreta, Graikija, rugsėjo 29 – spalio 4, (2024).
C5. **L. Zubauskas,** E. Markauskas, A. Naujokaitis, B. Čechavičius, M. Talaikis, G. Niaura, M. Čaplovičová, V. Vretenár, T. Paulauskas,

GaAs ablation in air and water with femtosecond pulses, Laser Precision Microfabrication (LPM2024), San Sabastianas, Ispanija, birželio 11-14, (2024).

1.4.1. Autoriaus indėlis

Disertacijos autorius atliko stiklų pjovimo ir frezavimo eksperimentus, suformavo ir ištestavo lęšių masyvus bei išanalizavo gautus rezultatus. Kartu su bendraautoriais parengė šešias mokslines publikacijas (S1-S6).

1.4.2. Bendraautorių indėlis

- Dr. Paulius Gečys prižiūrėjo visus tyrimus, prisidėjo prie publikacijų rengimo, yra disertacijos autoriaus mokslinis vadovas.
- Dr. Edgaras Markauskas vadovavo autoriaus bakalauro ir magistro baigiamiesiems darbams, konsultavo bei patarė įvairiais klausimais, susijusiais su eksperimentų metodika bei duomenų analize.
- Dr. Juozas Dudutis atliko pluošto homogenizatoriaus testavimą, kuris buvo sudarytas iš dviejų lęšių masyvų, pagamintų šios disertacijos metu. Parengė S5 publikaciją.
- Dr. Gediminas Račiukaitis konsultavo rengiant S1 publikaciją.
- Dr. Valdemar Stankevič prisidėjo prie pagamintų lęšių testavimo metodikos parengimo. Konsultavo gaminantis testavimo stendą.
- Dr. Bogdan Voisiat konsultavo rengiant S4 publikaciją.
- Arnas Vyšniauskas, disertacijos rengimo metu buvęs magistro studentas, prižiūrimas ir konsultuojamas disertacijos autoriaus, atliko stiklų poliravimo eksperimentus CO_2 lazeriu.
- Patricija Šleiniūtė, disertacijos rengimo metu buvo bakalauro studentė, kurios baigiamajam darbui vadovavo disertacijos autorius. Studentė atliko kraštų apskeldėjimo matavimus, gautus frezuojant stiklą su GHz papliūpomis.

2. Literatūros apžvalga

2.1. Lazerinės spinduliuotės sąveika su medžiaga

Lazeriniam pluoštui krentant į medžiagą, gali pasireikšti keli pagrindiniai sąveikos mechanizmai. Pirma, lazerio pluoštas gali atsispindėti nuo stiklo paviršiaus. Neatsispindėjusi dalis patenka į medžiagą, kur gali būti išsklaidyta, sugerta, arba pereiti pro ją be didesnių nuostolių. Dažniausiai pasireiškia visi šie efektai, tai yra lazerio energija nėra tik tiesiogiai panaudojama medžiagos apdirbimui – turime ir lazerinės spinduliuotės energetinius nuostolius.

Stiklo apdirbimo kontekste svarbiausia yra energijos sugertis medžiagoje. Lazerinės spinduliuotės energija medžiagoje yra sugeriama laidumo elektronų. Tačiau stiklai yra dielektrinės medžiagos, kuriose laidumo juosta yra atskirta nuo valentinės – idealiu atveju laidumo juostoje elektronų nėra. Norint perkelti elektroną iš valentinės į laidumo juostą, reikia jam suteikti energiją, atitinkančią arba didesnę už draustinių energijų tarpą E_g.

Tam tikslui galimi du skirtingi atvejai: tiesinė ir netiesinė sugertis. Tiesinė sugertis stikluose gali vykti, jeigu lazeris generuoja trumpų bangos ilgių spinduliuotę, esančią UV spektro dalyje. Tokiu atveju lazerio generuojamų fotonų energija yra pakankama sužadinti elektroną iš valentinės į laidumo juostą.

Bendrai, kai fotono energija yra didesnė nei medžiagos draustinių energijų tarpas, spinduliuotės sugertis ir jos intensyvumo mažėjimas gali būti aprašomas Beer – Lambert dėsniu [15]. Šis dėsnis nusako, kad medžiaga sklindančios lazerinės spinduliuotės intensyvumas I mažėja eksponentiškai, o mažėjimo sparta priklauso nuo sugerties koeficiento μ:

$$I(z) = (1 - R)I_0 e^{-\mu z}. \quad (1)$$

Šioje formulėje $I(z)$ yra lazerinės spinduliuotės intensyvumas, nusklidus tam tikrą atstumą z, o I_0 – pradinis intensyvumas. Paprastai tariant, sugerties koeficientas μ yra atvirkščiai proporcingas atstumui L, kurį praėjus lazerinei spinduliuotei medžiagoje, jos intensyvumas sumažėja apytiksliai 2,7 karto.

Kita vertus, lazerinės sistemos gali generuoti spinduliuotę artimojoje IR dalyje, kurioje fotono energija yra mažesnė už draustinių energijų tarpą. Tokiu atveju elektronas gali pereiti (būti sužadintas) į laidumo juostą tik dėl netiesinės sugerties mechanizmų. Priklausomai nuo fotono energijos ir lazerio intensyvumo, galimi du pagrindiniai netiesinės sugerties mechanizmai: daugiafotonė ir tunelinė jonizacija [16].

Naudojant didesnės energijos fotonus, bet vis dar tenkinant sąlygą, kad vieno fotono energija yra mažesnė už draustinių energijų tarpą, elektronas gali būti sužadintas iš valentinės į laidumo juostą dėl daugiafotonės jonizacijos

mechanizmo. Šis procesas vyksta, kai elektronas vienu metu sugeria kelių fotonų energiją. Kuo mažesnė fotono energija, tuo didesnį jų skaičių N reikia sugerti, kad elektrono energija viršytų E_g. Tačiau tai kartu reiškia, kad tuo pačiu laiko momentu vis didesnis fotonų skaičius turės sąveikauti su elektronu, todėl mažėja sąveikos skerspjūvis arba šio proceso tikimybė $\sigma_{(N)}$. Norint, kad mechanizmas nenutrūktų mažinant fotonų energiją, reikia didinti lazerinės spinduliuotės intensyvumą. Taigi, daugiafotonės jonizacijos sparta J gali būti išreikšta taip [17]:

$$J = \sigma_{(N)} I^N \tag{2}$$

Kai lazerinės spinduliuotės elektrinio lauko stipris tampa palyginamas su medžiagos atomo vidiniu potencialu, yra galimas tuneliavimo mechanizmas [18]. Tokiu atveju, lazerinės spinduliuotės elektrinis laukas iškreipia atomo vidinį potencialą, todėl elektronui perkelti į laidumo juostą reikia mažiau energijos. Dėl atomo vidinio potencialo iškreipimo susidaro baigtinio pločio ir aukščio potencialinis barjeras. Jeigu barjeras pakankamai mažas, tai elektronas gali būti sužadintas ir tiesinės sugerties metu. Kita vertus, jei barjero aukštis yra mažesnis nei atomo jonizacijos energija, tai gali įvykti viršbarjerinė jonizacija be papildomos fotono sugerties.

Sąryšis tarp šių dviejų netiesinių mechanizmų aprašomas L. V. Keldysh parametru γ [18]:

$$\gamma = \frac{c}{\lambda q}\sqrt{\frac{mcn\varepsilon_0 E_g}{I}}, \tag{3}$$

kur m ir q, atitinkamai, yra elektrono masė ir krūvis, c – šviesos greitis, n – medžiagos lūžio rodiklis ir ε_0 - vakuumo dielektrinė skvarba. Jeigu $\gamma \leq 1{,}5$, tai dominuos tunelinė jonizacija ir atvirkščiai, jei $\gamma \geq 1{,}5$ – dominuos daugiafotonė jonizacija [16].

Sužadinti elektronai toliau greitėja laidumo juostoje sąveikaudami su išoriniu elektromagnetiniu lauku (lazerine spinduliuote). Judėdamas elektronas gali susidurti su medžiagos atomu. Jeigu elektrono energija viršija atomo jonizacijos energiją, tai atomas bus jonizuotas – taip sužadinamas naujas elektronas. Šis procesas vadinamas smūgine jonizacija, o jam tęsiantis sužadintų elektronų skaičius pradeda augti eksponentiškai – vyksta griūtinė jonizacija. Laisvųjų elektronų skaičius auga, kol pasiekiamas kritinis jų tankis $N_{kr} \approx 10^{21}$ cm^{-1}, kuris atitinka plazmos susidarymo pradžią [19]. Toliau sąveikaujant stiklui ir lazerinei spinduliuotei, stiklas pradeda, kaisti, todėl įvyksta jo faziniai virsmai.

Dar vienas lazerinės spinduliuotės energijos sugerties mechanizmas tampa svarbus stiklo apdirbime, naudojant CO_2 lazerio generuojama 10,6 μm bangos ilgio spinduliuotę. Šiuo atveju, infraraudonojoje srityje veikiančių lazerių

generuojamos spinduliuotės energija gali būti sugeriama ir per fononus – atomų virpesius. Paprasčiausiu atveju šią sugertį galime įsivaizduoti pasitelkus klasikinį osciliatoriaus modelį [20].

Tokį osciliatorių sudaro teigiamo ir neigiamo krūvio jonai. Stiklą veikiant išorinei jėgai (elektromagnetiniam laukui) jonai pradeda svyruoti apie pusiausvyros padėtį, o jų svyravimo dažnis atitinka lazerio dažnį. Jeigu išorinio lauko dažnis atitinka rezonanso sąlygą, stebimas rezonansinis reiškinys, kai smarkiai išauga svyravimo amplitudė ir sustiprėja sugertis [20].

Lydytas kvarcas yra sudarytas iš silicio (Si) ir deguonies (O) tetraedrinių grupių, kur keturi deguonies atomai supa vieną silicio atomą, o atskiros grupės sujungtos per bendrus deguonies atomus. Vibracinius dažnius nusako Si-O-Si jungtys [21]. Paprastai SiO_4 tetraedrų virpesiai lemia sugertį, kai išorinės spinduliuotės bangos ilgis yra >9 μm [22]. Kita vertus, sugertis 3 – 9 μm bangos ilgių ruože yra lemiama aukštesnio dažnio fundamentinių modų generacijos (angl. overtones) bei kelių fononų modų sumos (dažnių išplitimas), kai jungiamasis deguonies jonas yra asimetriškai tempiamas aplinkinių silicio jonų [21, 22]. Galiausiai, artimojoje IR srityje (<3 μm) egzistuoja sugerties maksimumų smailės esant 1,39 ar 2,73 μm bangos ilgiams dėl priemaišinių OH grupių virpesių [23].

2.2. Pažeidimų formavimasis stikle

2.2.1. Medžiagos paviršiaus pažeidimas

Stiklui sugėrus pakankamai energijos, tai yra esant pakankamam energijos įtėkiui, įvyksta stiklo paviršiaus pažeidimas. Skaidrios medžiagos optinio pramušimo slenkstis gali būti suprantamas kaip neutralios medžiagos perėjimas į plazmos būseną, kurioje medžiaga efektyviai sugeria lazerinio pluošto energiją. Tai įvyksta, kai laisvųjų krūvininkų tankis medžiagoje pasiekia kritinę vertę, kuri atitinka plazmos susidarymo pradžią. Stiklams šis dydis yra apytiksliai 10^{21} cm^{-1} eilės [24]. Galima pramušimo pasekmė – stiklo paviršiuje susidarantis pažeidimas.

Slenkstinį energijos įtėkį F_{th}, kuriam esant susidaro kritinis krūvininkų tankis ir atsiranda optiškai matomas medžiagos pažeidimas, galima eksperimentiškai nustatyti pagal J. M. Liu aprašytą metodiką [25]. Taikant šį metodą, medžiagos paviršiuje keičiama impulso energija, o tuomet matuojami suformuotų kraterių skersmenys. Lazerinio impulso energija E_p siejasi su energijos įtėkiu Gauso pluošto centre F_0 taip:

$$F_0 = \frac{2E_p}{\pi\omega_0^2}, \tag{4}$$

kur ω_0 yra lazerinio pluošto radiusas ties bandinio paviršiumi. Pusiau logaritminėje skalėje gaunama tiesinė priklausomybė tarp suformuotų kraterių skersmenų ir naudoto energijos įtėkio. Ekstrapoliavus šią tiesę į tašką, kur kraterio skersmuo lygus nuliui, nustatomas slenkstinis energijos įtėkis.

Galiausiai, energijos įtėkiui viršijant slenkstinę vertę, įvyksta stiklo paviršius abliacija – pašalinamas tam tikras medžiagos kiekis. Išabliuoto kraterio gylis d bei tūris V gali būti aprašomi taip [26]:

$$d = d_0 ln \frac{F}{F_{th}}; \tag{5}$$

$$V = \frac{\pi d_0 \omega_0^2}{4} (ln \frac{F_0}{F_{th}})^2, \tag{6}$$

kur d_0 – efektinis energijos sugerties gylis.

2.2.2. Stiklo skeldėjimas

Formuojant pažeidimus stiklo paviršiuje, dėl medžiagos trapumo gali atsirasti įtrūkimų (skylimų). Šie įtrūkimai dažniausiai pradeda plisti nuo bet kokio atsitiktinio defekto, o tai sumažina stiklo mechaninį atsparumą. M. Sun aprašė termodinaminį ir atominių jungčių nutraukimo mechanizmus, aiškinančius įtrūkimų formavimąsi stikluose [13].

Termodinaminis procesas siejamas su lokaliu medžiagos kaitinimu [27, 28]. Šiuo atveju lazerio energija sugeriama mažame medžiagos tūryje, kuris įkaista iki lydymosi arba garavimo temperatūros [29]. Ši įkaitusi zona pradeda sparčiau plėstis, o šis plėtimasis nusakomas terminiu plėtimosi koeficientu. Besiplečianti medžiagos dalis pradeda spausti aplinkinę šaltesnę zoną. Dėl to stikle susidaro gniuždomieji (spaudžiamieji) ir tempiamieji įtempiai, kuriems viršijus medžiagos stiprumo ribą, stiklas įskyla [28].

Atominių jungčių nutraukimo lemtas įtrūkimų formavimasis vyksta veikiant stiklą pikosekundiniais arba femtosekundiniais lazerio impulsais. Ultratrumpų impulsų sąveikos su stiklu metu yra sužadinami laidumo elektronai. Dėl stabdomosios sugerties šie elektronai gali įgyti elektronvoltų eilės energiją, pakankamą medžiagos atominiams ryšiams suardyti. Srityje, kurioje nutraukiami atominiai ryšiai, atsiranda tuštuma ir įtrūkimas. Šis įtrūkimas nėra matomas plika akimi, nes jo matmenys yra nanometrinėje skalėje [30–32].

Apjungiant abu mechanizmus, M. Sun [13] apibendrino, kad plika akimi matomas didesnių matmenų įtrūkimas iš pradžių susidaro dėl atominių ryšių nutraukimo. Vėliau šis nanometrinis įtrūkimas išauga dėl šiluminės akumuliacijos ir stikle susidarančių terminių įtempių.

H. Shin ir D. Kim aptarė galimą pjūvio kraštų skeldėjimo mechanizmą apatinėje stiklo pusėje [33]. Eksperimentų metu, naudojant 800 nm bangos ilgio ir 50 fs trukmės lazerinius impulsus, buvo pjaunamas 100 μm storio borosilikatinis stiklas. Palyginus pjovimo rezultatus, gautus esant skirtingiems lazerinių impulsų persiklojimams, nustatytas dėsningumas, kad apatiniai pjūvio kraštai stipriau skeldėjo mažinant tarpą tarp impulsų centrų. Šiomis sąlygomis, norint prapjauti stiklą, reikėjo didesnio skenavimų skaičiaus. Autorių aiškinimu, tokiu atveju apdirbimo proceso metu apatinėje pjūvio pusėje liko plonas stiklo sluoksnis, kuris neišlaikė savo svorio bei lazerio sukeliamo slėgio ir išlūžo. Būtent šis išlūžimas ir lėmė stiprų kraštų skeldėjimą.

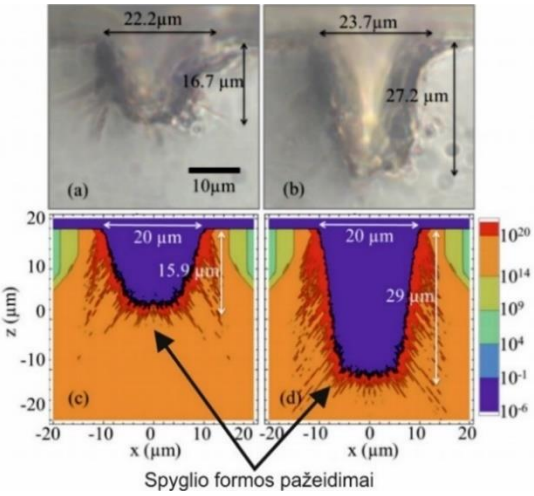
Svarbu atkreipti dėmesį, kad susiformavę įtrūkimai daro neigiamą įtaką optinėms medžiagos savybėms [27]. Vienas iš galimų neigiamų efektų yra sugerties padidėjimas, sukeliantis optinio elemento pažeidimą. N. Bloembergen parodė, kad medžiagos paviršiaus pažeidimai (kanalai, poros, įtrūkimai), kurių matmenys viršija 0,01 μm, lėmė mažesnį slenkstinį medžiagos pažeidimo energijos įtėkį [34]. Taip pat M. D. Feit išskyrė, kad lazerio spinduliuotės intensyvumas plyšio viduje (lydytame kvarce) gali išaugti proporcingai medžiagos lūžio rodikliui, pakeltam ketvirtuoju laipsniu, o tai atitiktų 4 – 5 kartus didesnę vertę nei pradinė [35].

Iš kitos pusės, įtrūkimai mažina ir bandinio mechaninį stiprumą. A. Griffith [36] aprašė, kad jėga, reikalinga sulaužyti stiklą, yra atvirkščiai proporcinga skylimo ilgiui. Taigi, kuo įtrūkimas ilgesnis, tuo mažesnės jėgos reikia stiklui sulaužyti. Šiuo atveju M. Sun [13] parodė, kad įtrūkimų ilgis priklausė nuo šilumos paveiktos zonos charakteristikų. Kuo platesnė šilumos paveikta zona, tuo ilgesni susidarė įtrūkimai. Taigi, pjaunant stiklą, yra svarbu išvengti šilumos paveiktos zonos susidarymo arba bent sumažinti jos dydį bei apriboti stiklo skeldėjimą.

2.2.3. Tūriniai pažeidimai

Popaviršiniai pažeidimai taip pat gali turėti įtakos stiklo mechaniniam stiprumui. Šiuos pažeidimus lemia lazerio spinduliuotės sklidimas stikle. M. Sun tyrė pikosekundinių impulsų sukeltus pažeidimus skaidriose medžiagose [37]. Remdamasis teoriniais skaičiavimais ir eksperimentiniais rezultatais, autorius įvardijo kelis galimus pažeidimų tipus po išabliuotu kraterio dugnu: ploną pažeidimo sluoksnį, dengiantį kraterio paviršių, po juo esančias spyglių formos mikrostruktūras (pažeidimus) ir spyglius ties kanalo kraštais **(žr. 1 pav.)**.

Plonas pažeidimo sluoksnis buvo siejamas su netiesine lazerinės spinduliuotės sugertimi stikle ir susiformavo, kai laidumo elektronai perdavė sugertą energiją medžiagai. Tuo tarpu spyglių formos pažeidimai po plonu sluoksniu atsirado dėl lazerinio pluošto lūžimo ties oro-stiklo sandūra, pluošto sklidimo bei energijos sugerties stiklo tūryje. Anot autoriaus, šios modifikacijos pradėjo formuotis ten, kur laidumo elektronų tankis buvo apytiksliai eile mažesnis už kritinį.



1 pav. *Išabliuotų kanalų skerspjūviai ir sugeneruoti pažeidimai gauti eksperimentiškai po 5 impulsų (a) ir 10 impulsų (b) bei gauti modeliuojant 5 impulsų (c) ir 10 impulsų (d) abliaciją. (c) ir (d) nuotraukose raudona spalva pažymėtas pažeidimų regionas, kur laidumo elektronų tankis buvo artimas kritinei vertei. Juodomis rodyklėmis pažymėti spyglio formos pažeidimai. Paimta iš* [37].

Papildomų įžvalgų pateikė Y. Ito, kuris nagrinėjo spyglio formos pažeidimų atsiradimą pjaunamo kanalo kraštuose [38]. Autorius šias struktūras susiejo su įtempių relaksacija, vykstančia po lazerinio apdirbimo (abliacijos). Šiame tyrime krateriai stikle buvo formuojami 228 fs trukmės lazeriniais impulsais, o kraterio skerspjūvyje išmatuotų pažeidimų ilgis siekė 7,3 μm. Atlikta teorinė analizė parodė, kad praėjus 0,5 ns po lazerinio impulso šūvio, stiklo temperatūra tapo tinkama įtempių relaksacijai. Po 4 ns temperatūra sparčiai nukrito dėl šiluminio laidumo stikle, todėl relaksacijos procesas nutrūko. Taigi, praėjus 4 ns po lazerinio impulso, įtempiai jau buvo relaksavę, o modeliuojamas liekamosios deformacijos ilgis ties kanalo kraštu siekė 6,4 μm, kas buvo artima eksperimentiškai gautai vertei.

2.2.4. Fokusavimasis stiklo tūryje

Lazeriniam pluoštui sklindant stikle, pažeidimai taip pat gali susidaryti dėl fokusavimosi reiškinio. Intensyviam Gauso pluoštui sklindant skaidriomis Kero terpėmis, jis gali pradėti fokusuotis [19]. Taip nutinka todėl, nes bendras medžiagos lūžio rodiklis n_b priklauso nuo lazerinės spinduliuotės intensyvumo I:

$$n_b = n_0 + n_n I, \tag{7}$$

kur n_0 yra medžiagos lūžio rodiklis, o n_n – netiesinis medžiagos lūžio rodiklis. Esant dideliam spinduliuotės intensyvumui, bendras medžiagos lūžio rodiklis padidėja. Kadangi Gauso intensyvumo pasiskirstymo pluošte didžiausias intensyvumas sutelktas jo centrinėje dalyje ir mažėja į kraštus, centrinėje pluošto dalyje lūžio rodiklis tampa didesnis nei periferijoje. Todėl centrinėje dalyje lazerio pluoštas sklis mažesniu faziniu greičiu ir ims fokusuotis (medžiaga suveikia kaip teigiamas lęšis).

Kita vertus, fokusavimąsi stabdo kiti lygiagrečiai vykstantys procesai, neleidžiantys pluoštui kolapsuoti. Svarbiausi iš jų yra difrakcija ir daugiafotonė sugertis (bei jos sukelta plazmos generacija). Būtent šių konkuruojančių reiškinių pusiausvyros pakanka šviesos gijų (angl. filaments) susidarymo dinamikai aprašyti [19].

Siekiant, kad lazerinis pluoštas pradėtų fokusuotis reikia atsverti difrakciją [39]. Tam reikia, kad pradinė lazerinio pluošto smailinė galia viršytų kritinę vertę P_{kr} [40]:

$$P_{kr} \approx \frac{3{,}77\lambda^2}{8\pi n_0 n_n}. \tag{8}$$

Kol lazerio pluošto galia dėl sugerties mechanizmų nenukrenta žemiau kritinės vertės, šviesos gija gali formuotis toliau [41].

Šis fokusavimosi reiškinys ir šviesos gijų formavimas yra plačiai taikomas stiklų lazeriniam apdirbimui. Suformuotose šviesos gijose lazerinis pluoštas išlieka sufokusuotas didesniuose atstumuose negu paprastai fokusuojant Gauso pluoštą, o tai leidžia formuoti kelių milimetrų gylio pažeidimus [42, 43]. Tai itin naudinga pjaunant storus stiklus.

2.3. Optinio paviršiaus sąvoka

Apibendrinant, norint suformuoti kokybišką optinį elementą, būtina maksimaliai sumažinti pažeidimų dydį stiklo paviršiuje, kad į elementą krintanti ar juo sklindanti šviesa nebūtų chaotiškai išsklaidoma. Tokio elemento paviršius, kuriame šviesa pakeičia kryptį dėl atspindžio ar lūžio reiškinių, vadinamas optiniu paviršiumi. Jo kokybei kiekybiškai įvertinti

dažniausiai naudojamas vidutinis kvadratinis šiurkštumas R_q, nusakantis šiurkštumo profilio aukščių nuokrypių nuo vidutinės vertės kvadratinę vidutinę reikšmę. Šis parametras yra tiesiogiai susijęs su elektromagnetinių bangų sklaida – didėjant šiurkštumui, didėja ir sklaidos nuostoliai [44].

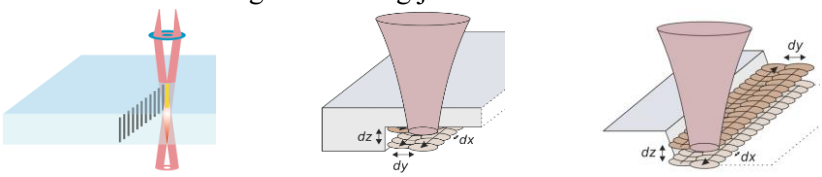
T. V. Vorburger *et al.* [44] išskyrė du galimus atvejus: optiškai lygų ir optiškai beveik lygų paviršius. Optiškai lygaus paviršiaus atveju, kai spinduliuotė krenta statmenai paviršiui, galioja sąlyga, kad paviršiaus šiurkštumas yra nedidesnis nei dvidešimtoji bangos ilgio dalis ($R_q \leqslant \lambda/20$). Tokiu atveju paviršiaus nelygumai yra daug mažesni už spinduliuotės bangos ilgį, todėl sklaida yra minimali. Pagal J. M. Bennett [45] komerciškai poliruotų optinių elementų paviršiaus šiurkštumas R_q siekia nuo 1,5 iki 2,5 nm, o tam tikrais atvejais ir <0,5 nm. Optiškai beveik lygiam paviršiui galioja švelnesnė sąlyga – paviršiaus šiurkštumas turi būti nedidesnis nei septintoji bangos ilgio dalis ($R_q \leqslant \lambda/7$) [44]. Galiojant šiai sąlygai, kai $\lambda/20 \leqslant R_q \leqslant \lambda/7$, yra stebima stipresnė kritusios spinduliuotės sklaida, bet toks optinis elementas dar gali būti naudojamas optinėse sistemose, kur nėra būtinas tikslus atvaizdo atkūrimas.

Kita vertus, be paviršiaus šiurkštumo, svarbus ir jo banguotumas, sukeliantis aberacijas (iškraipantis optiniu elementu praėjusią šviesą). M. S. Virdee [46] pateikė kelias lazerinėje sistemoje naudojamų optinių elementų paviršiaus banguotumo vertes. Jo išmatuotos vidutinės banguotumo amplitudės W_a siekė 20-30 nm. Be to, literatūroje sutinkami kriterijai apibrėžiami per optinio kelio skirtumą (angl. optical path difference), kuris rodo skirtumą tarp realaus ir teorinio (idealaus) optinio kelio tam tikroje elemento vietoje [47]. Šis dydis yra svarbus vertinant optinės sistemos gebėjimą tiksliai atkurti vaizdą. Paprastai, bet koks B aukščio nelygumas elemento paviršiuje, sukelia optinio kelio pokytį lygų $B(1-n_0)$, kur n_0 – elemento lūžio rodiklis. Aukštos kokybės atvaizdavimo sistemose (teleskopuose ar mikroskopuose) naudojami elementai, kuriuose optinio kelio skirtumas yra ne didesnis nei ketvirtis bangos ilgio [47].

2.4. Lazerinės technologijos stiklo pjovimui ir frezavimui

Optinio elemento gamybą sudaro du etapai: norimos formos padėklo išpjovimas ir jo paviršiaus formavimas frezuojant. Šiam tikslui gali būti taikomi keli lazerinio apdirbimo metodai: mikroįtrūkių (trūkių) generavimas stiklo tūryje su vėlesniu mechaniniu atskyrimu [48], apdirbimas iš apatinės stiklo pusės [49] bei tiesioginė abliacija nuo viršutinio paviršiaus (**žr. 2 pav.)** [50]. Pastarosios dvi technologijos yra tinkamos abiem gamybos etapams, o trūkių generavimas gali būti pritaikytas tik stiklo padėklo pjovimui. Dėl šios

priežasties, norint visiškai išpjauti ir suformuoti optinį elementą, būtina kombinuoti kelias skirtingas technologijas.



(a) (b) (c)

2 pav. *Perspektyviausios lazerinės stiklų apdirbimo technologijos: trūkių generavimas (a), stiklo apdirbimas iš apatinės pusės (b) ir tiesioginė abliacija nuo stiklo viršaus (c). Šiuo atveju, trūkių generavimas atliekamas Beselio pluoštu. Paveiksle dx, dy bei dz atitinkamai žymi atstumus tarp gretimų lazerinių impulsų X, Y bei Z kryptimis. (a) dalies paveikslas adaptuotas iš* [27]*, o (b, c) iš* [51].

2.4.1. Pjovimas generuojant trūkius

Stiklo pjovimas, generuojant pažeidimus stiklo tūryje, remiasi lazeriniu pažeidimų formavimu ir stiklo mechaniniu atskyrimu išilgai sukurtų deformacijų [52]. Šis metodas yra labai panašus į mechaninį stiklų raižymą rėžtuku. Proceso esmė – lazeriu stikle lokaliai sukeliami įtempiai, lemiantys įtrūkių susidarymą [52]. Pjūvis suformuojamas pozicionuojant šiuos įtrūkimus į vieną liniją (eilę), o šio proceso tikslas – vienu lazerio pluošto skenavimu sukurti pakankamai gilius pažeidimus ir taip padidinti pjovimo spartą. Tam yra pritaikomas Beselio pluoštas [48] arba Gauso pluošto fokusavimosi reiškinys [53].

Pagrindinis šios technologijos privalumas – galimybė greitai suformuoti pjūvius su idealiai vertikaliomis sienelėmis. Pavyzdžiui, M. Mackevičiūtė aprašė teorinę galimybę pasiekti net 32 m/s pjovimo greitį [43]. Autorės straipsnyje lydyto kvarco stiklas buvo pjaunamas formuojant iki 1,5 mm gylio pažeidimus, kuriuos lėmė femtosekundinio lazerinio pluošto fokusavimasis.

Mažesni, milimetrų per sekundę (mm/s) eilės pjovimo greičiai pasiekiami gilias struktūras formuojant Beselio pluoštu. Tai lemia faktas, kad skenavimas tokiu atveju atliekamas ne galvanometriniu skeneriu, o pozicionavimo stalais. J. Dudutis, naudodamas pikosekundinius Beselio pluošto impulsus, pjovė 1 mm storio silikatinį stiklą ir pademonstravo iki 250 mm/s pjovimo greitį [54]. Panašiai, S. Chen 6 mm storio silikatinį stiklą prapjovė 200 mm/s greičiu [55]. Galiausiai, K. Mishchik, formuodamas Beselio pluoštą su femtosekundinių impulsų MHz papliūpomis, pademonstravo kelis kartus didesnius pjovimo greičius - 0,5 mm storio aliuminio borosilikatinis stiklas buvo prapjautas 600 mm/s greičiu. [56].

Kita vertus, pagrindinis technologinis trūkumas yra tas, kad šis metodas dažniausiai skirtas tik tiesiems pjūviams formuoti. J. Lopez išskyrė, kad pjūvių radiusas gali siekti iki 1 mm [57].

2.4.2. Frezavimas nuo apatinės stiklo pusės

Kita technologija – lazerinis stiklų pjovimas nuo apatinės pusės, kuri gali būti pritaikyta ne tik stiklo pjovimui, bet ir jo frezavimui. Ji išsiskiria tuo, kad apdirbimo procesas yra inicijuojamas apatiniame bandinio paviršiuje ir toliau vyksta nuo apačios į viršų. Kadangi lazerinis pluoštas fokusuojamas per bandinį, sumažėja energijos nuostoliai, kuriuos paprastai sukelia lazerinės spinduliuotės ekranavimas abliacijos produktais (pašalinamomis stiklo dalelėmis) ir generuojama plazma. Kartu užtikrinama didelė pjovimo ir frezavimo sparta, nes technologija remiasi įtrūkių generavimu bei kontroliuojamu stiklo skaldymu į kelių šimtų mikrometrų dydžio daleles [58]. Pavyzdžiui, 1 mm storio silikatinio stiklo pjovimo greičiai siekė iki 20,9 mm/s [49], o lydyto kvarco frezavimo sparta ir efektyvumas atitinkamai 140,4 mm^3/min ir 130 $\mu m^3/\mu J$ [59].

Kita vertus, ši technologija turi ir trūkumų. Vienas pagrindinių – stambus kraštų apskeldėjimas, kuris gali siekti net kelis milimetrus [49]. Taip pat pjovimas nuo apatinės pusės technologiškai netinka neskaidriems stiklams, kuriuose lazerinė spinduliuotė negali būti sufokusuojama į apatinį stiklo paviršių. Pastarasis ribojimas lemia ir tai, kad ši technologija yra netinkama, kai bandinį reikia apdirbti iš abiejų pusių, taip sukuriant 3D elementą.

2.4.3. Tiesioginė stiklo abliacija nuo viršutinio paviršiaus

Paminėtus abiejų technologijų trūkumus padeda spręsti tiesioginė stiklo abliacija nuo viršutinio paviršiaus. Šiuo atveju, kaip sufleruoja technologijos pavadinimas, medžiaga pašalinama kryptimi nuo viršaus link stiklo apačios, todėl galima atlikti ir neskaidrių medžiagų 3D apdirbimą. Kita vertus, tai yra gana lėta technologija. J. Dudutis pademonstravo milimetro storio silikatinio stiklo pjovimą 0,19 mm/s greičiu [51], o E. Markauskas gavo dar mažesnį - 0,036 mm/s pjovimo greitį apdirbdamas 0,5 mm storio silikatinį stiklą [50]. Šiek tiek didesnis, 3 mm/s siekiantis pjovimo greitis buvo pasiektas tik pjaunant itin plonus, 100 µm storio stiklus [33]. Apskritai mažesnę pjovimo spartą, lyginant su kitomis lazerinėmis technologijomis, lemia tai, kad tiesioginės abliacijos metu dalį lazerio spinduliuotės energijos ekranuoja patys abliacijos produktai bei sugeneruota plazma [60, 61].

Didėjant stiklo storiui, pjovimo greitis staigiai mažėja, o tai tiesiogiai susiję su nuožulnių pjūvio sienelių („V“ formos kanalo profilio) formavimusi [62]. Patys nuožulnūs kraštai susidaro dėl lazerinio pluošto Gauso intensyvumo skirstinio [37]. Dėl šios priežasties pradinis stiklo pažeidimas yra parabolės formos [26, 37]. Vykstant stiklo pjovimui ir gilėjant kanalui, išauga energijos nuostoliai dėl lazerio spinduliuotės atspindžių nuo kanalo sienelių [63]. Atitinkamai mažėja kanalo dugną pasiekiantis lazerinės spinduliuotės energijos įtėkis, o tai gali lemti kanalo gylio įsisotinimą – visišką pjovimo proceso sustojimą [63, 64].

Apibendrinant, tiesioginė abliacija pasižymi universalumu – ji leidžia pjauti ir kartu formuoti sudėtingos geometrijos objektus įvairiose medžiagose. Be to, galima lengvai apdirbti abu stiklo paviršius ir taip sukurti 3D optinį elementą. Tačiau išlieka poreikis ieškoti metodų, kaip pagreitinti procesą, kad ši technologija priartėtų prie spartos, demonstruojamos apdirbimo nuo apatinės stiklo pusės metu.

2.5. Pjovimas pro tekantį skysčio sluoksnį

Tiesioginės abliacijos spartą galima padidinti pakeitus aplinką, kurioje apdirbamas bandinys. Tam puikiai tinka įvairūs skysčiai, pavyzdžiui, vanduo. Eksperimento schema gana paprasta – bandinys abliuojamas per ant jo paviršiaus suformuotą vandens sluoksnį.

Skystį į lazerinės abliacijos zoną galima tiekti keliais būdais: tiesiogiai panardinant bandinį į stovintį [65, 66] arba tekantį [67, 68] vandenį, naudojant aukšto slėgio (dažniausiai nuo 5 iki 60 MPa [69]) vandens čiurkšlę lazerio spinduliuotei nukreipti [70, 71] arba purškiant vandens dulksną šalia apdirbamos zonos [10, 72]. Dauguma tyrimų atlikta panardinant bandinius į stovintį arba lėtai tekantį vandenį, kai virš bandinio esančio skysčio sluoksnio storis siekė nuo kelių iki kelių dešimčių milimetrų. Šių tyrimų metu išryškėjo pagrindiniai tokios eksperimentinės schemos trūkumai. Pirma, dėl lazerio spinduliuote inicijuoto bandinio kaitimo skystyje ties abliacijos zona susidaro kavitacijos burbulai [67, 72]. Jie vandens paviršiuje sukelia bangas, lemiančias lazerinės abliacijos nestabilumą [73]. Šie nestabilumai pasireiškia lazerio pluošto sąsmaukos (fokusavimo centro) padėties svyravimais ir spinduliuotės sklaida dėl difrakcijos bei lūžio reiškinių ties vandens ir burbulų sandūra. Antra, storas vandens sluoksnis padidina lazerio spinduliuotės energijos nuostolius dėl optinės sugerties. Esant 2 mm storio vandens sluoksniui, šie nuostoliai siekė 6,5 %, kai buvo naudojama 1080 nm bangos ilgio lazerinė spinduliuotė [73].

Kita vertus, šiuos iššūkius galima dalinai įveikti purškiant vandenį šalia abliacijos zonos ir taip sudarant ploną, tekantį skysčio sluoksnį [50]. Tokiu atveju tekanti vandens srovė sparčiai pašalina susidariusius burbulus, o paties vandens sluoksnio storis išlieka mažesnis nei 1 mm [72], todėl sumažėja ir lazerio spinduliuotės energijos nuostoliai.

Lazeriniam medžiagų apdirbimui buvo išbandyti ir kiti skysčiai. A. Garcia-Giron tyrė stiklo keramikos abliaciją nanosekundiniu 1064 nm bangos ilgio lazeriu pro 3 mm storio etilenglikolio sluoksnį [65]. Vis dėlto ši terpė teigiamo poveikio neturėjo – suformuotų kanalų gylis išliko panašus į gautąjį abliuojant stiklą ore. Padidinus skysčio sluoksnio storį, abliacijos procesas visiškai nutrūko. Savo ruožtu L. S. Jiao naudojo femtosekundinį 775 nm bangos ilgio lazerį silicio abliacijai pro skirtingus alkoholius: metanolį, etanolį, butanolį ir pantenolį [74]. Abliacijos metu pastebėta, kad žemesnės virimo temperatūros skysčiai (metanolis, etanolis) sumažino nusėdusių abliacijos produktų kiekį šalia apdirbimo zonos. Visais atvejais, lyginant su abliacija ore, buvo stebimas šilumos paveiktos zonos sumažėjimas.

Visgi didžiausią proceso spartos padidėjimą dažniausiai lemia būtent vandens naudojimas. A. Kanitz palygino geležies lazerinio frezavimo efektyvumą, abliuojant ją pro skirtingus alkoholius ir vandenį [75]. Tyrimas parodė, kad geležį abliuojant vandens aplinkoje buvo suformuojami giliausi dariniai bei pasiekiamas didžiausias proceso efektyvumas (1,23±0,13 $\mu m^3/\mu J$ per vieną lazerinį impulsą), lyginant su abliacija pro metanolį, etanolį, acetoną bei tolueną. Atitinkamai H. Liu pasiekė gilesnius kraterius silicyje, kai abliaciją femtosekundiniu lazeriu atliko pro vandens sluoksnį, o ne pro etanolį [76]. Galiausiai, pats vanduo yra patrauklesnis taikymams dėl to, nes yra pigus ir ekologiškai nekenksmingas [67, 72].

2.5.1. Vandens sluoksnio nauda lazerinio apdirbimo procesui

Paprastas būdas didinti tiesioginės stiklo abliacijos spartą – didinti vidutinę lazerio galią. Tačiau toks sprendimas didina terminę akumuliaciją stikle, dėl to intensyvėja defektų formavimasis: didėja pjūvio kraštų apskeldėjimai ir intensyvėja įtrūkių generacija, kuri mažina bendrą stiklo mechaninį stiprumą [36, 62]. Kita vertus, perteklinę šilumą, sugeneruojamą lazerinio pjovimo metu, galima efektyviai sumažinti aušinant stiklą vandeniu. A. Kruusing nustatė, kad vandens naudojimas lazeriniame apdirbime padidina lazerio spinduliuotės sugeneruotos šilumos nuostolius aplinkai [77]. Tai savo ruožtu sudaro sąlygas medžiagas efektyviai pjauti naudojant didesnę vidutinę lazerio galią ir taip padidinti tiek proceso spartą, tiek kokybę. Pavyzdžiui, vandeniu aušinamas stiklas buvo sėkmingai abliuojamas D. Crimella tyrime, naudojant

320 μJ energijos pikosekundinius lazerinius impulsus [78]. Tyrimo metu buvo pjaunamas 525 μm storio silikatinis stiklas, panardintas į vandenį. Vienu 320 μJ energijos lazeriniu impulsu buvo pašalinama apytiksliai 1125 μm^3 stiklo (frezavimo efektyvumas siekė apie 3,5 $\mu m^3/\mu J$). Tuo tarpu ore stiklo prapjauti nepavyko, nes dėl terminės akumuliacijos pradėdavo formuotis skylimai, dėl kurių bandiniai tiesiog suduždavo.

Vandens sluoksnio naudą mažinant terminį medžiagų pažeidimą pademonstravo ir J. Zhou [72]. Šiuo atveju nanosekundiniu 1064 nm bangos ilgio lazeriu buvo pjaunamas silicis. Autoriai parodė, kad pjūviai, atlikti pro ploną tekantį vandens sluoksnį, lėmė pastebimai mažesnes termiškai paveiktas zonas nei pjaunant ore. Taip pat, lyginant vienodomis vidutinėmis lazerio galiomis suformuotų kanalų gylius ore ir vandenyje, pastaroji terpė leido pasiekti iki trijų kartų gilesnius pjūvius. Panašias tendencijas, formuodamas kraterius bei kanalus stikle femtosekundiniu lazeriu, pademonstravo ir M. Silvennoinen [79]. Šiuo atveju stiklo abliacija pro vandens sluoksnį leido gauti iki dviejų kartų gilesnius kraterius su lygesnėmis sienelėmis bei mažesniais defektais jų kraštuose. Vertindamas visišką stiklo prapjovimo procesą ore bei per tekantį vandens sluoksnį, E. Markauskas pademonstravo, kad vandens sluoksnio sudarymas leido pasiekti iki 8 kartų efektyvesnį 0,5 mm storio silikatinio stiklo pjovimą pikosekundiniu lazeriu [50]. Šiuo atveju stiklo pjovimo efektyvumas pro vandens sluoksnį siekė apytiksliai 5,4 $\mu m^3/\mu J$.

Egzistuoja keli faktoriai, lemiantys stiklo pjovimo spartos didėjimą jį pjaunant pro vandens sluoksnį. Pirma, N. Krstulovič išskyrė, kad vanduo padeda pašalinti abliacijos produktus iš apdirbimo zonos, taip sumažindamas energijos nuostolius, atsirandančius dėl lazerio spinduliuotės ekranavimo [80]. Konkrečiau, A. Kruusing išskyrė du pagrindinius abliacijos produktų pašalinimo mechanizmus, kuriuos susiejo su termine vandens konvekcija bei kavitacijos burbulų formavimusi bei jų įrimo dinamika [81]. Kita vertus, energijos nuostoliai gali būti mažinami ir dėl vandens įtakos susidarančiai plazmai. Buvo pademonstruota, kad vandenyje susidaro mažesnių matmenų, trumpiau gyvuojanti plazma [82, 83]. Be to, dėl vandens sukeliamo erdvinio apribojimo, padidėja plazmos slėgis. G. Y. Mak parodė, kad plazmos slėgis gali būti iki 8,4 kartų didesnis, lyginant su plazma, susidarančia abliuojant medžiagą ore [83]. Didesnio slėgio plazma, kartu su suyrančiais kavitacijos burbulais, kuria stipresnes smūgines bangas, o tai prisideda prie spartesnio abliacijos produktų pašalinimo [67, 68, 83, 84].

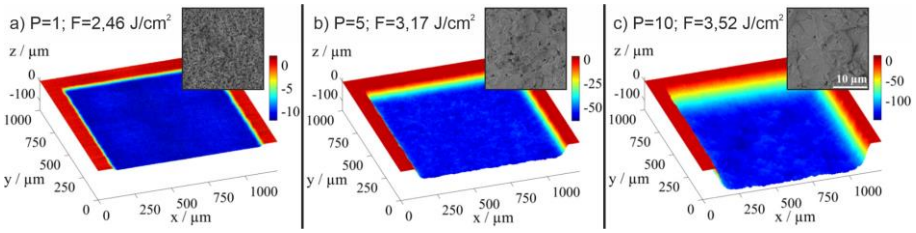
Galiausiai, naudojant femtosekundinius impulsus, vandens sluoksnyje gali pasireikšti lazerinio pluošto fokusavimosi efektas, leidžiantis išlaikyti didelį lazerinės spinduliuotės intensyvumą pjaunant storesnius stiklus [85]. Tam reikia, kad lazerinio impulso smailinė galia viršytų vandens kritinę

fokusavimosi galią [86]. Imant, kad vandens lūžio rodiklis yra lygus 1,329, o netiesinis lūžio rodiklis 1030 nm bangos ilgiui – $4{,}1 \times 10^{-20}$ m^2/W [87], tai vandenyje kritinė galia yra lygi tik 2,9 MW. Šiai sąlygai tenkinti užtenka turėti 350 fs trukmės ir 1,1 μJ energijos impulsus. Pavyzdžiui, S. Butkus pademonstravo 1 mm storio stiklo pjovimą, išnaudodamas šį netiesinį procesą [88]. Tyrime 0,6 - 1,5 mm storio vandens sluoksnyje vyko 260 fs trukmės lazerinių impulsų fokusavimasis, užtikrinantis pjūvius su apytiksliai 1:15 pločio ir gylio santykiu. Tai yra ypač aktualu mažinant pjaunamų medžiagų eikvojimą ir formuojant itin siaurus pjūvius. Šiuo atveju, pjovimo greitis siekė apie 0,3 mm/s. Kita vertus, tyrime buvo orientuojamasi į kuo siauresnius pjūvius, todėl lazerinis pluoštas buvo skenuojamas tik vienoje linijoje. Tai reiškia, kad buvo formuojamas keliasdešimties mikrometrų pločio kanalas, o visiškas (pilnas) stiklo prapjovimas buvo įmanomas tik dėl lazerinio pluošto fokusavimosi vandenyje [63]. Ore formuojamo kanalo gylis sotinosi ties 300 – 400 μm, o pjovimas sustojo dėl energijos nuostolių ties „V“ formos kanalo sienelėmis.

2.6. Stiklo frezavimas naudojant GHz papliūpų režimą

Santykinai naujas metodas lazerinio medžiagų apdirbimo spartai didinti yra naudoti lazerinių papliūpų režimą. Šiuo atveju ultratrumpi lazeriniai impulsai yra generuojami MHz arba GHz pasikartojimo dažniu, todėl laiko tarpai tarp impulsų yra atitinkamai nanosekundžių arba pikosekundžių eilės. Vienas pirmųjų papliūpų režimo naudą medžiagų apdirbime aptarė C. Kerse, aprašydamas abliacija aušinamą medžiagos pašalinimo režimą (angl. ablation-cooled regime) [89]. Šiame modelyje kiekviena lazerio impulsų papliūpa abliuoja dar neatvėsusią medžiagą, kadangi pirmojo impulso sugeneruota šiluma nespėja difunduoti iš apdirbimo zonos. Tokiu būdu vėlesnių impulsų energija sunaudojama tiesiogiai medžiagai pašalinti, o ne jos pakartotiniam pašildymui iki lydymosi ar garavimo temperatūros. Taigi, abliacijos procesui palaikyti pakanka mažesnės energijos impulsų, o tai kartu sumažina energijos nuostolius dėl silpnesnio spinduliuotės ekranavimo sugeneruota plazma [90].

Kita vertus, S. M. Remund palygino skirtingų medžiagų (silikatinio stiklo, safyro, nerūdijančio plieno, vario, žalvario) frezavimo efektyvumus, gautus frezuojant šių medžiagų paviršius su GHz papliūpų režimu ir be jo [92]. Rezultatai parodė, kad frezuojant metalus GHz papliūpų režimu pasiekiamas mažesnis efektyvumas nei taikant tradicinį apdirbimo būdą. Efektyvumo padidėjimas naudojant papliūpas buvo pastebėtas tik lazerinio gręžimo metu, kai, pasak S. M. Remund, vyksta intensyvesnė šiluminė akumuliacija ir didesnis metalo kiekis pašalinamas skysto lydalo forma.



3 pav. *Lydytame kvarce išfrezuotų plotų topografijos bei frezuoto paviršiaus SEM nuotraukos, kai abliacijai buvo naudotas femtosekundinis lazeris pavienio impulso režime (a) bei GHz papliūpų režime sudarytame iš P=5 (b) ir P=10 (c) lazerinių impulsų. Visais atvejais abliacijos sąlygos buvo vienodos: atlikta 10 skenavimų lazerinį pluoštą skenuojant 2 m/s greičiu. Tarpas tarp skenuojamų linijų buvo 20 µm. Paveiksluose F raidė žymį naudotą energijos įtėkį. Paimta iš* [91].

Vis dėlto papliūpų nauda didinant frezavimo efektyvumą bei spartą buvo pastebėta stiklų apdirbime. S. M. Remund silikatinio stiklo frezavimo efektyvumą padidino apytiksliai tris kartus: nuo 10,2 $\mu m^3/\mu J$ (nenaudojant papliūpų režimo) iki 32,7 $\mu m^3/\mu J$, kai papliūpą sudarė 25 impulsai [92]. D. Metzner frezuodamas lydytą kvarcą, frezavimo efektyvumą padidino 5,4 karto (nuo 5,3 iki 26,7 $\mu m^3/\mu J$), naudodamas 5 impulsų GHz papliūpą [93]. Padvigubinęs impulsų skaičių GHz papliūpoje, S. Schwarz dar labiau padidino lydyto kvarco frezavimo efektyvumą [91]. Šiuo atveju kvarco frezavimo efektyvumas išaugo 7,4 karto (nuo 6,8 iki 50,8 $\mu m^3/\mu J$).

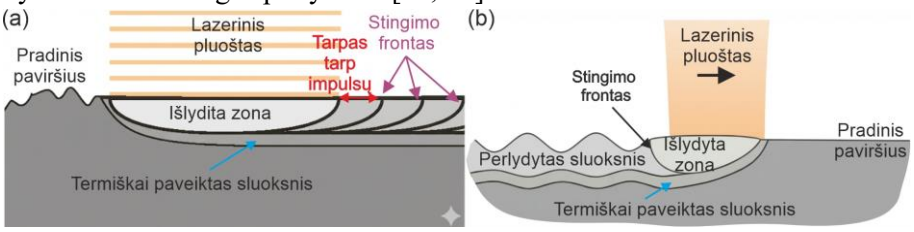
Tačiau kol kas nėra vieningos nuomonės, kokie mechanizmai nulemia efektyvumo padidėjimą, kai stiklai frezuojami GHz papliūpų režimu. S. Schwarz [91] ir S. M. Remund [92] pastebėjo, kad papliūpų režimas lemia prastesnę apdirbimo kokybę, ir tai susiejo su destruktyvesniu abliacijos pobūdžiu. S. Schwarz fiksavo didėjantį paviršiaus šiurkštumą R_a nuo 0,4 µm (nenaudojant papliūpų režimo) iki 3 µm efektyviausiu režimu (**žr. 3 pav**.). Kita vertus, S. M. Remund ryškaus paviršiaus šiurkštumo padidėjimo nepastebėjo, tačiau užfiksavo įtrūkių (skylimų) formavimąsi stiklo paviršiuje, jį frezuojant GHz papliūpomis. Galiausiai, D. Metzner tyrimo atveju stiklo frezavimo kokybė neprastėjo – paviršiaus šiurkštumas visais atvejais išliko mažesnis nei 1 µm [93]. Autorius efektyvumo didėjimą naudojant papliūpų režimą aiškino šilumine akumuliacija stikle, kurią sukelia didelio pasikartojimo dažnio lazerinė spinduliuotė.

2.7. Lazerinis poliravimo etapas optinių elementų gamybai

Po lazerinio apdirbimo suformuotas stiklo paviršius dažniausiai yra per šiurkštus optiniams taikymams. Norint sumažinti šio šiurkštumo sukeliamus

šviesos sklaidos nuostolius, būtina atlikti papildomą paviršiaus poliravimo etapą. Mechaniniai automatizuoti poliravimo metodai šiuo atveju nėra patrauklūs, kadangi jie dažniausiai pritaikyti didelio ploto plokštiems paviršiams. Be to, mechaninio apdirbimo metu yra suapvalinami optinio elemento kraštai bei nepasiekiami giliau esantys reljefo paviršiai [94]. Todėl sudėtingos geometrijos paviršiai dažnai poliruojami tik rankiniu būdu, o tai prailgina gamybos trukmę, padidina savikainą, o galutinė paviršiaus kokybė tiesiogiai priklauso nuo operatoriaus įgūdžių [94].

Lazerinis stiklų poliravimas dažniausiai atliekamas naudojant CO_2 lazerį. Taip yra todėl, kad stiklas gerai sugeria 10,6 µm bangos ilgio spinduliuotę – šiam bangos ilgiui stiklo sugerties koeficientas siekia apie 10^5 m^{-1} [95]. Be to, didelės (>100 W) vidutinės galios CO_2 lazeriai, generuojantys mikrosekundinius impulsus, yra santykinai pigūs, užtikrinantys pakankamą energijos įtėkį didesnėje lazerio sąveikos su medžiaga zonoje bei optimalią sąveikos trukmę [96, 97]. Dėl šių savybių jie dažnai pasirenkami stiklui tolygiai kaitinti iki lydymosi ar garavimo temperatūrų. Medžiagos garavimas yra naudingas siekiant koreguoti paviršiaus formą, o poliravimo procesas vyksta dėl medžiagos perlydimo [98, 99].



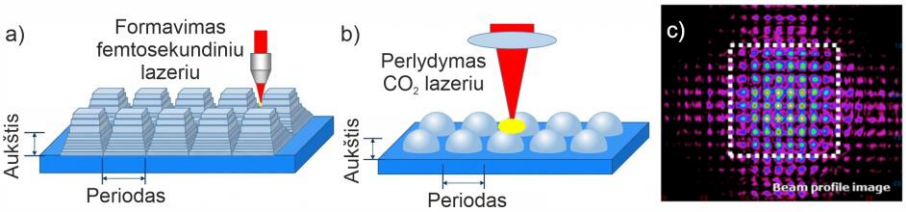
4 pav. *Negilaus (a) ir gilaus (b) perlydimo mechanizmų schemos. Gilaus perlydymo atveju pavaizduotas lydalo judėjimas dėl paviršiaus įtempio gradiento ir gravitacijos jėgos. (a) dalis paimta iš* [100]*, (b) dalis paimta iš* [101].

Lazeriniame poliravime išskiriami du pagrindiniai mechanizmai: negilus perlydimas (angl. shallow surface melting) ir gilus perlydimas (angl. surface over melt; **žr. 4 pav.**) [98]. Negilaus perlydimo mechanizmas interpretuojamas kaip paviršiaus iškilimų (mikrošiurkštumo) išlydimas, kai skystas lydalas dėl kapiliarinių ir gravitacijos jėgų suteka į greta esančias daubas ir taip išlygina reljefą. Šio proceso metu paviršius yra perlydomas tik dalinai, todėl sumažinamas jo mikrošiurkštumas, tačiau neprarandama pradinė elemento forma.

Padidinus energijos dozę, perlydomas gilesnis stiklo sluoksnis ir pereinama į gilaus perlydimo režimą. Šis režimas taikomas tada, kai reikia koreguoti paties elemento geometriją, pavyzdžiui, pirminį kvadratinį profilį pakeisti sferiniu [102]. Vis dėlto gilus perlydimas turi ir reikšmingą trūkumą

– jo metu formuojasi antriniai paviršiaus nelygumai bei didėja paviršiaus banguotumas [98, 103].

Šiuo atveju, giliai perlydant stiklo paviršių, yra modifikuojamas storesnis medžiagos sluoksnis, kurio gylis viršija pirminį paviršiaus mikrošiurkštumą. Lydalo paviršių toliau veikiant lazerio spinduliuotei, gali prasidėti hidrodinaminis lydalo srauto judėjimas, priešingas lazerio pluošto skenavimo krypčiai (**žr. 4 pav.**). Šis reiškinys pasireiškia dėl temperatūros gradiento tarp skysto stiklo kietėjimo (stingimo) zonos ir srities, kurioje lazerio pluoštas tiesiogiai sąveikauja su medžiaga. Dėl šio temperatūrų skirtumo atsiranda lydalo paviršiaus įtempio gradientas (lydalo paviršiaus įtempis mažėja didėjant temperatūrai [104]). Tai sukuria jėgą skysčio paviršiuje, nukreiptą stingimo zonos link. Artėjant prie stingimo zonos, temperatūros gradientas išnyksta, o lydalo srautą stabdo paviršiaus įtempio ir gravitacijos jėgos, kurios teoriškai turėtų grąžinti skystį į pradinį lygų paviršių [103]. Tačiau lydalo relaksaciją stabdo skysto stiklo klampumas. Jei relaksacijos trukmė viršija lydalo stingimo trukmę, paviršiuje susidaro periodiniai dariniai, didinantys galutinį paviršiaus banguotumą ir šiurkštumą [98, 103].

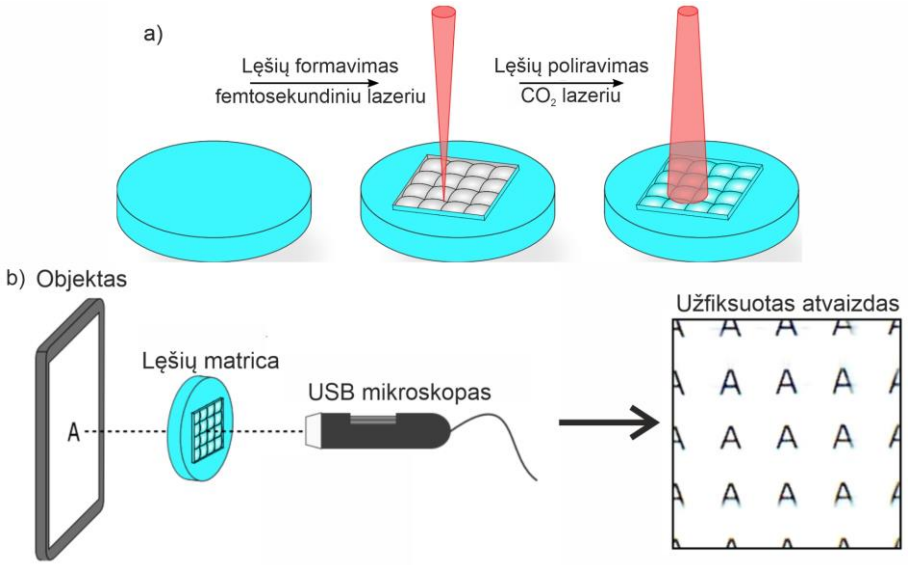


5 pav. *Lęšių masyvo gamybos schema panaudojant femtosekundinį ir CO_2 lazerius, kai femtosekundiniu lazeriu yra suformuojamas masyvo karkasas (a), o CO_2 lazeriu karkaso paviršius perlydomas iki sferinės formos lęšių (b). (c) helio-neono lazerio intensyvumo pasiskirstymas praėjus pagamintą lęšių masyvą. Galutinių formuotų lęšių aukštis ir periodas buvo atitinkamai 20 ir 40 μm. Paimta iš* [105].

Abu šie poliravimo režimai gali būti tiesiogiai pritaikomi formuojant glaudžiamųjų plokščiai išgaubtų mikrolęšių masyvus. H. K. Choi grupė, naudodama femtosekundinį lazerį, lydyto kvarco paviršiuje išabliavo kanalus ir taip suformavo keturkampės nupjautinės piramidės formos struktūras [105]. Šie paviršiai vėliau buvo perlydomi su CO_2 lazeriu (**žr. 5a, b pav.**). Perlydimo metu gravitacijos veikiamas lydalas tekėjo nuo piramidžių viršaus į suformuotus kanalus, taip suformuojant sferinius lęšius. Elemento paviršiaus šiurkštumas buvo sumažintas nuo 4,3 μm iki 0,78 μm, tačiau tokia vertė vis tiek išliko per didelė optiniams taikymams ir lėmė intensyvią šviesos sklaidą bei aberacijas elemente (**žr. 5c pav.**).

Panašius lęšių masyvus formavo T. Delgado [106]. Šiame tyrime pradiniai suformuoti paviršiai silikatiniame stikle taip pat buvo perlydomi naudojant CO_2 lazerį, tačiau jų pirminiam formavimui buvo pasitelkti nanosekundinis ir femtosekundinis lazeriai. Tyrimas parodė, kad nanosekundinis lazeris buvo tinkamesnis pradinėms struktūroms formuoti, kadangi trumpesniais impulsais suformuotų paviršių perlydimo proceso optimizuoti nepavyko. Po perlydimo femtosekundiniu lazeriu apdirbti lęšių paviršiai nebuvo visiškai išlyginti (išliko mikronelygumų), todėl jie pasižymėjo prastesnėmis fokusavimo charakteristikomis nei tie, kurių gamybai naudotas nanosekundinis lazerinis šaltinis. Kita vertus, abejais atvejais paviršiaus šiurkštumas po poliravimo siekė 3,7 ± 0,1 nm.

Tikslesnė lęšių gamyba yra įmanoma orientuojantis į negilų paviršiaus perlydimą. Pavyzdžiui, S. Schwarz, naudodamas femtosekundinį lazerį, pirminiame etape visiškai suformavo sferinių mikrolęšių masyvą, o vėliau šio elemento paviršių poliravo CO_2 lazeriu, nepakeičiant pradinės elemento formos (**žr. 6a pav.**) [14]. Nupoliruoto elemento paviršiaus šiurkštumas R_a siekė 25 nm, o suformuotas lęšių masyvas buvo sėkmingai pritaikytas optinėje atvaizdavimo sistemoje (**žr. 6b pav.**).



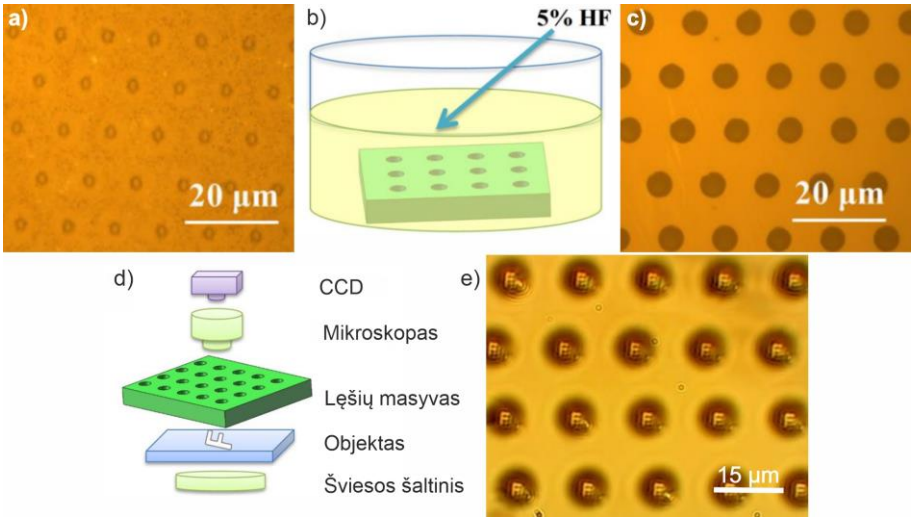
6 pav. *Lęšių masyvo gamybos schema lęšius pilnai suformuojant femtosekundiniu lazeriu ir tada nupoliruojant paviršių iki optinės kokybės panaudojant CO_2 lazerį (a). (b) suformuoto lęšių masyvo išbandymas atvaizduojant „A“ raidę. Paimta iš* [14].

2.8. Kitos lazerinės optinių elementų gamybos technologijos

Galima išskirti ir kitus lęšių masyvų formavimo metodus, kurie glaudžiai susiję su lazerinėmis technologijomis. Vienas iš tokių pavyzdžių yra lazerinis stiklo modifikavimas kombinuotas su cheminiu ėsdinimu [107]. Šiuo atveju lęšių masyvų formavimas gali būti atliktas keliais būdais: medžiagos paviršiuje lazerine spinduliuote suformuojami pradiniai pažeidimai (krateriai) arba sukuriamos lokalios modifikacijos jos tūryje, o vėliau šie dariniai yra selektyviai išėsdinami rūgščių arba šarmų tirpaluose (**žr. 7a-c pav.**).

F. Zhang [108] pademonstravo 8 - 10 µm skersmens lęšių masyvo gamybą ant lydyto kvarco bandinio. Tyrime femtosekundiniu lazeriu buvo suformuota šimtas pradinių kraterių stiklo paviršiuje, kurie po to buvo ėsdinami 5 % vandenilio fluorido (HF) rūgštyje, kol buvo gautos sferinės formos duobutės. Pastebėta, kad per 30 minučių buvo visiškai išėsdinti norimos formos elementai, kurių šiurkštumas R_a siekė 100 – 200 nm. Šio optinio elemento funkcionalumas buvo sėkmingai įvertintas registruojant atvaizdą CCD kamera (**žr. 7d, e pav.**).

A. Pan [109] taip pat pademonstravo šią technologiją ant polimero bandinio. Naudojo panašią sistemą kaip ir minėta anksčiau. Suformavo lęšius, kurių skersmenys buvo nuo 20 iki 100 µm. Vienintelis skirtumas, kad naudojo 40 % HF, 69 % HNO3 (vandenilio nitrido) bei 99 % HAC (acto rūgšties) mišinį. Suformuoti lęšiai irgi gana neblogai veikė atvaizdavimo eksperimente.



7 pav. *Lazeriu išabliuoti pažeidimai lydyto kvarco paviršiuje (a), jų ėsdinimas vandenilio fluorido (HF) rūgštyje (b) ir po ėsdinimo gautas lęšių masyvas (c). Šio lęšių masyvo testavimo schema atvaizduojant objektą CCD kameroje (d) ir gautas rezultatas (e). Paimta iš* [108].

Dar vienas lęšių masyvų gamybos metodas – lazeriu inicijuotas stiklo ėsdinimas nuo galinės bandinio pusės (angl. laser-induced back-side wet etching, LIBWE). Šis procesas vyksta lazerio spinduliuotei praeinant pro optiškai skaidrų bandinį ir sąveikaujant su prie galinio jo paviršiaus esančiu (dažniausiai organiniu) tirpalu. Sugerta fotonų energija sukelia staigų skysčio įkaitimą ir garų fazės susidarymą. Tuomet susidariusi aukšto slėgio smūginė banga bei lokalus temperatūros šuolis nulemia kontroliuojamą stiklo paviršiaus abliaciją, vienu lazerio impulsu pašalinant mažesnį nei 1 nm medžiagos sluoksnį [110]. Tokiu būdu stiklą galima apdirbti naudojant mažesnį energijos įtėkį nei jo abliacijos slenkstis oro aplinkoje.

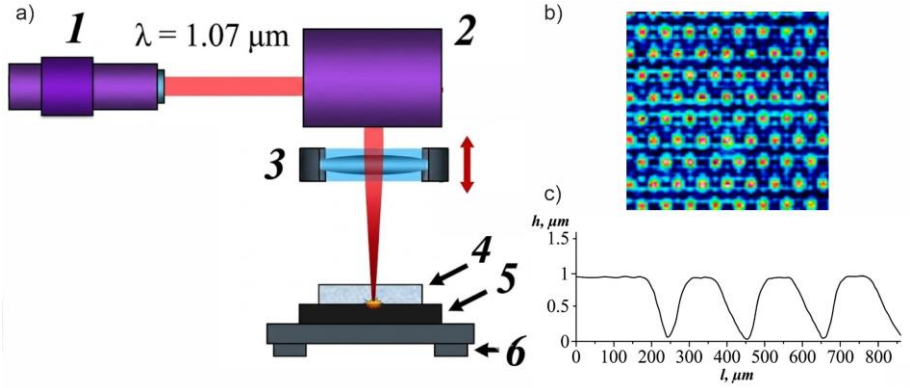
Lęšių masyvas, sudarytas iš 1 mm diametro elementų, buvo suformuotas naudojant fazinę kaukę, skirtą į bandinį krintančio lazerio pluošto intensyvumo skirstiniui moduliuoti. Taip pagamintų lęšių paviršiaus šiurkštumas R_q siekė 10-30 nm [111]. Kita vertus, po lęšių formavimo buvo reikalingas papildomas elemento valymo etapas, kadangi gamybos metu ant stiklo paviršiaus susidarė plonas anglies sluoksnis. Papildomas šio metodo trūkumas – būtinybė gaminti naujas fazines kaukes kaskart norint pakeisti elemento dizainą (geometriją).

Analogiškas lęšių masyvų formavimo metodas įgyvendinamas skystąją terpę pakeičiant kietu (sausu) taikiniu – šis procesas vadinamas lazeriu inicijuotu galinio paviršiaus sausuoju ėsdinimu (angl. laser-induced backside dry etching, LIBDE). Lyginant su šlapiuoju ėsdinimu (LIBWE), LIBDE pasižymi didesne apdirbimo sparta ir lygesniu suformuotų struktūrų paviršiumi. Tačiau Ramano spektroskopijos tyrimai rodo, kad stiklo paviršius šiuo atveju taip pat yra užteršiamas taikinio medžiagos dalelėmis [112]. Be to, procesui inicijuoti reikalingas gerokai didesnis energijos įtėkis [112].

Taikant vieną iš šios technologijos variacijų, kurioje kaip taikinys naudotas poliruotas grafitas, nanosekundiniu infraraudonosios (IR) spinduliuotės lazeriu buvo formuojami lęšių masyvai (**žr. 8a pav**.) [113]. Formavimo trukmė (nuo 5 iki 15 min) tiesiogiai priklausė nuo lęšių skersmens (70–400 μm). Lazerinio apdirbimo metu suformuoti lęšiai papildomai 30 min buvo ėsdinami 10 % vandenilio fluorido (HF) rūgštyje. Išmatuotas vidutinis paviršiaus šiurkštumas R_a siekė 10 nm lęšių viršūnėse (kur išliko nepažeistas pradinis stiklo paviršius) ir 30–50 nm likusiame plote.

Suformuotos lęšių matricos fokusuojamas helio-neono lazerio pluoštas pateiktas **8b paveiksle**. Eksperimento metu buvo stebima spinduliuotės sklaida bei aberacijos, kurią tikėtinai lėmė neideali lęšių forma (**žr. 8c pav.**). Lęšių formos netolygumus autoriai siūlė šalinti papildomai perlydant stiklo paviršių CO_2 lazeriu arba kaitinant lęšių masyvą krosnyje. Pažymėtina, kad ir šiuo atveju elemento paviršius buvo užterštas grafito dalelėmis. Jos buvo

šalinamos taikant specifinį valymo metodą: ant stiklo paviršiaus suformuojant ploną vandens sluoksnį ir atliekant lazerinę abliaciją pro vandenį.



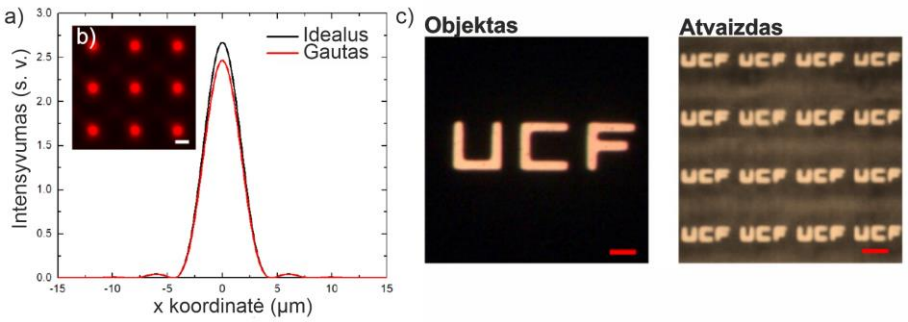
8 pav. *Lazeriu inicijuoto apatinio paviršiaus sauso ėsdinimo schema (LIBDE), kai taikinio vietoje naudojamas grafitas (a). Paveiksle skaičiais sužymėta 1 – lazeris, 2 – galvanometrinis skeneris, 3 – telecentrinis lęšis, 4 – stiklo bandinys, 5 – grafitas ir 6 – stalas. Šios technologijos pagalba suformuotu lęšių masyvu fokusuojamas helio-neono lazerio pluoštas CCD kameroje – intensyvumo skirstinys (b). Suformuotų lęšių profilis (c). Paimta iš* [113].

Galima išskirti ir dar vieną labai panašią technologiją naudojamą darinių formavimui stikle - lazeriu indukuotos plazmos sužadintą abliaciją (angl. laser-induced plasma-assisted ablation, LIPAA) [114]. Šiuo atveju sausas kietas taikinys į kurį fokusuojama lazerinė spinduliuotė, yra patalpinamas nedideliu atstumu nuo stiklo paviršiaus (nuo kelių iki kelių šimtų μm) [115]. Pagrindinis trūkumas, kad vėlgi reikalingas bandinio valymas. Hanada *et al.* [115] išskyrė, kad naudojant vario taikinį, išėsdintos stiklo vietos buvo metalizuotos, todėl reikėjo papildomo ėsdinimo druskos rūgštyje (HCl), kad stiklo paviršius būtų nuvalytas.

Galiausiai, siekiant tiksliai formuoti itin mažų matmenų darinius polimeruose yra galima pasitelkti lazerinės polimerizacijos technologiją. Tiesioginio lazerinio rašymo metodas, pagrįstas dvifotone polimerizacija, leidžia formuoti submikrometrinius darinius fotoreziste [116]. Z. He *et al.* [117] 256 mikrolęšių masyvo formavimui pasitelkė 780 nm bangos ilgio femtosekundinį lazerį. Masyvo gamybos metu, IP-Dip fotorezistas buvo užlašinamas ant indžio alavo oksidu dengto stiklo padėklo, o lazeriu nuosekliai formuojami 500 nm storio sluoksniai, kol buvo gautas galutinis 120 μm skersmens ir 5 μm aukščio lęšis. Procesas kartotas periodiškai, kol suformuotas visas lęšių masyvas.

Po lazerinio įrašymo bandinys papildomai buvo panardintas į specialų tirpalą (1,2-propandiolio monometileterio acetatą), taip pašalinant

nesukietėjusį fotorezistą. Suformuoto mikrolęšių masyvo funkcinės savybės įvertintos atliekant fokusavimo bei vaizdinimo eksperimentus. Fokusavimo kokybei tirti naudota 633 nm bangos ilgio spinduliuotė – gauti rezultatai gerai sutapo su teoriniu idealiu signalu (**žr. 9a, b pav.**). Siekiant pademonstruoti praktinį masyvo pritaikomumą optinėse sistemose, atliktas objekto atvaizdavimo bandymas, naudojant baltos šviesos halogeninę lempą (**žr. 9c pav.**).



9 pav. *633 nm bangos ilgio spinduliuotės intensyvumo pasiskirstymas po fokusavimo lazerinės polimerizacijos būdu suformuotu mikrolęšiu (a); sufokusuoto pluošto vaizdas židinio plokštumoje fiksuojant jį CCD kamera (b) ir objekto atvaizdavimas naudojant mikrolęšių masyvą (c). Paimta iš* [117].

Analogiškus tyrimus atliko ir D. Wu *et al.* [116], naudodamas 800 nm bangos ilgio femtosekundinį lazerį ir SU-8 fotorezistą 80 μm skersmens lęšiams formuoti. Autoriaus duomenimis, suformuoto 10x10 μm² plokščio ploto vidutinis kvadratinis šiurkštumas R_q siekė apie 2,5 nm, tačiau pačių lęšių paviršiaus šiurkštumo vertės nebuvo pateiktos.

Papildomai galima išskirti, kad panaudojant šią technologiją yra įmanomas spartus norimos formos lęšių formavimas. M. Malinauskas *et al.* [118] išskyrė, kad 100 μm diametro ir 100 μm židinio nuotolio lęšis gali būti pagamintas per 14,7 valandas (užpildant / skenuojant visą lęšio tūrį) arba 2,6 minutes (formuojant tik išorinį lęšio paviršių, o viduje paliekant nepaveiktą polimerą). Pagamintų lęšių paviršiaus šiurkštumai siekė apie 30 nm.

2.9. Populiarios ne lazerinės optinių elementų gamybos technologijos

2.9.1. Kontaktiniai metodai

Lęšių masyvai gali būti gaminamos ir kitais, nelazeriniais būdais. Viena iš galimų tradicinių gamybos technologijų yra mechaninis frezavimas su deimantiniu ar metaliniu įrankiu [119]. Tačiau ši technologija yra nepatraukli dėl galimų stiklo paviršiaus pažeidimų (įrėžimų), atsirandančių kontaktinio

proceso metu [120]. Papildomai, mechaniškai dėvisi ir pats įrankis, o jo nusidėvėjimas daro neigiamą įtaką formuojamo bandinio kokybei [121].

Vis dėlto, M.-J. Lin [122] sėkmingai suformavo trisdešimties 1,5 mm skersmens lęšių masyvą polimero paviršiuje su volframiniu 100 µm pločio peiliu. Formavimo procesas truko 1,5 valandos. Po papildomo rankinio lęšių poliravimo buvo pasiektas 43 nm paviršiaus šiurkštumas (pradinis šiurkštumas buvo apie 462 nm). Šie lęšiai buvo ištestuoti fokusuojant helio-neono lazerio generuojamą pluoštą.

Kita technologija, kuri irgi paremta kontaktiniu elemento formavimu yra karštas presavimas. Pati technologija žingsnis po žingsnio atrodo taip [123]: sukuriamas spaudo dizainas ir jis pagaminamas; iškaitinamas polimeras ir spaudas iki aukštesnės temperatūros nei polimero minkštėjimo temperatūra (dažniausiai >50ºC); medžiagos presavimas spaudu (įprastai kelių kN jėga); vėsinimas iki žemesnės temperatūros nei polimero stiklėjimo temperatūra; spaudo nuėmimas. Gamybos svarbiausia dalis yra spaudo gamyba. Tam gali būti pasitelktos įvairios technologijos tiek lazerinės, tiek ir ne. Vienas iš galimų būdų joninis spaudo ėsdinimas [124].

N. S. Ong [123] pademonstravo apie 70 µm diametro lęšių gamybą polikarbonate su silicio spaudu, kuris buvo suformuotas fokusuotu jonų pluoštu. Eksperimentiškai parodė, kad galutiniai lęšių paviršiaus parametrai priklausė nuo spaudo paviršiaus kokybės, jo panaudojimo skaičiaus, spaudimo jėgos ir temperatūros. Naudojant spaudą, kurio paviršiaus šiurkštumas R_a buvo 7 nm, optimaliomis sąlygomis pagamino lęšių masyvą, kurio paviršiaus šiurkštumas R_a siekė 11 nm. Kita vertus, didžiausi trūkumai, kad technologija tinka tik polimerams ir negalimas greitas lęšių masyvų prototipavimas – kiekvienam pakeitimui reikia gaminti naują spaudą.

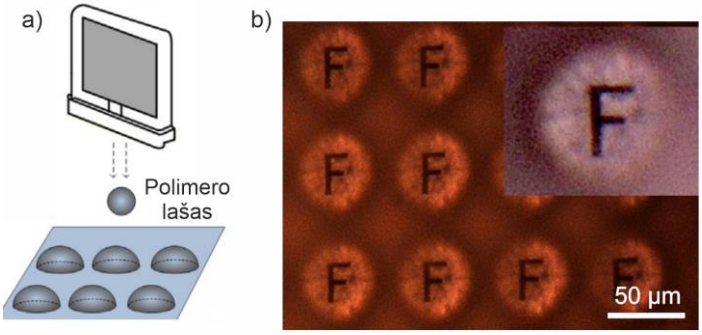
2.9.2. Bekontaktės technologijos

Siekiant išvengti kontaktinio proceso trūkumų, yra vystomos bekontaktės technologijos. Viena iš jų – reaktyvus jonų ėsdinimas [125]. Formavimo procesas vyksta dėl įgreitintų argono ar galio jonų susidūrimų su medžiagos paviršiumi [126]. Pašalinamos medžiagos kiekis tiesiogiai priklauso nuo jonų ir medžiagos paviršiaus sąveikos trukmės ir jonų energijos [125]. Tikslų silicio apdirbimą galio jonų spinduliu pademonstravo W. C. L. Hopman, suformuodamas 200 - 400 µm diametro kraterius [125]. Išskirtinė technologinė savybė, kad formavimo rezoliucija siekė apytiksliai 10 nm.

Šiuos W. C. L. Hopmano rezultatus savo tyrime pritaikė M. T. Langridge [124]. Jis silicio paviršiuje formavo nuo kelių iki keliasdešimt µm skersmens parabolinius kraterius, kurių paviršiaus šiurkštumas siekė apie 4 nm. Kita

vertus, parodė, kad silicio paviršius liko užterštas galio atomais. Taip pat išėsdinti paviršiai neatitiko norėtos parabolinės formos.

Reaktyvi jonų ėsdinimo technologija gali būti pritaikyta ir kitomis technologijomis suformuotų paviršių poliravimui. Viename iš tyrimų lydyto kvarco paviršiaus šiurkštumas buvo sumažintas nuo 260 iki 26 nm, panaudojant 2,54 cm skersmens argono jonų pluoštą įgreitintą iki 1500 eV [126]. Nepaisant to, 30 cm skersmens stiklo padėklo poliravimo procesas truko ilgiau nei 5 valandas.



10 pav. *Rašalinio spausdinimo technologijos schema neįtraukiant polimero stingimo UV šviesoje (a) ir „F“ raidės optinis atvaizdavimas pagamintu lęšių masyvu (b). Paimta iš* [8].

Viena iš paprasčiausių lęšių masyvų gamybos technologijų tinkanti tik polimerinėms medžiagoms – terminis perlydimas [127]. Technologinis principas buvo pritaikytas ir lazeriniuose taikymuose suformuojant abstrakčios formos paviršius ir juos perlydant CO_2 lazeriu [106]. Šiuo atveju, terminio perlydimo technologija paremta karkaso paruošimu pasinaudojant litografijos technologija, kuris vėliau perlydomas krosnyje. Polimero paviršiaus lydymosi metu dėl lydalo paviršiaus įtempio ir gravitacijos jėgų susidaro sferiniai lęšiai. Ši technologija pasižymi tuo, kad yra pigi ir gana efektyvi. Kita vertus, sunku kontroliuoti, kokia bus galutinio lęšio geometrija ir užpildymas (galimos poros, kurios veiks kaip sklaidos centrai) [128]. Be to, norint pakeisti dizainą, reikia gaminti naują litografinę kaukę.

Galiausiai panaši technologija yra ir rašalinis (polimerų) spausdinimas (angl. inkjet printing) [129]. Technologijos principas yra toks, kad skystas polimeras yra lašinamas ant padėklo paviršiaus (**žr. 10a pav.**). Dėl paviršiaus drėkinimo susidaro tam tikras kampas tarp padėklo paviršiaus ir lašiuko liestinės – kontaktinis kampas. Šis kampas nusako, kokio kreivumo radiuso lęšis susidarys. Užlašintas polimeras sukietėja paveikiamas UV spinduliuote, dažniausiai naudojant UV lempą, taip sudarant lęšių masyvą. Tačiau vienas iš tokio proceso trūkumų yra tai, kad sudėtinga valdyti lęšių dydį ir formą, o norint keisti drėkinimo kampą, tenka specialiai modifikuoti padėklą [8].

Tipinis lęšių diametras yra apie 50 µm, paviršiaus šiurkštumas R_q siekia 2 nm, o suformavus tokius lęšius ant neapdirbto stiklo paviršiaus, kur kontaktinis kampas <10°, gaunamas masyvas, kuris gali būti taikomas optinėse atvaizdavimo sistemose (**žr. 10b pav.**) [8].

Apibendrinant galima teigti, kad visos aptartos technologijos yra tinkamos lęšių masyvų gamybai, tačiau jų pasirinkimą lemia specifiniai našumo, technologinio lankstumo ir medžiagos pasirinkimo reikalavimai. Įvairiomis technologijomis pagamintų elementų paviršiaus šiurkštumai buvo mažesni nei 50 nm. Jie buvo testuojami fokusuojant šviesos pluoštą ir panaudojant suformuotus elementus atvaizdavimo sistemose. Vertinant gamybos spartą, tiesioginio rašymo metodai yra konkurencingi prototipavimo stadijoje, tačiau savo našumu nusileidžia replikavimo technologijoms (pvz., karštam presavimui). Lazerinės technologijos, mechaninis frezavimas pasižymi didžiausiu geometriniu lankstumu, nes leidžia operatyviai modifikuoti lęšių geometriją be papildomos įrangos keitimo.

Nors joninis ėsdinimas, lazerinė abliacija ir mechaninis frezavimas leidžia apdirbti platų medžiagų spektrą, mechaninis metodas pasižymi keliais trūkumais: ribota skiriamąja gebą (sąlygotą įrankio geometrijos) ar įrankių nusidėvėjimu, kuris lemia formuojamo paviršiaus kokybę. Papildomai, siekiant gamyboje išvengti cheminių tirpalų naudojimo (pvz., ėsdinimo rūgštyse), kad sumažinti paviršiaus taršą, tiesioginė lazerinė abliacija kartu su lazeriniu poliravimu vertinama kaip efektyvi alternatyva stiklo apdirbimui.

3. Eksperimentinė įranga ir metodika

3.1. Lazeriniai šaltiniai

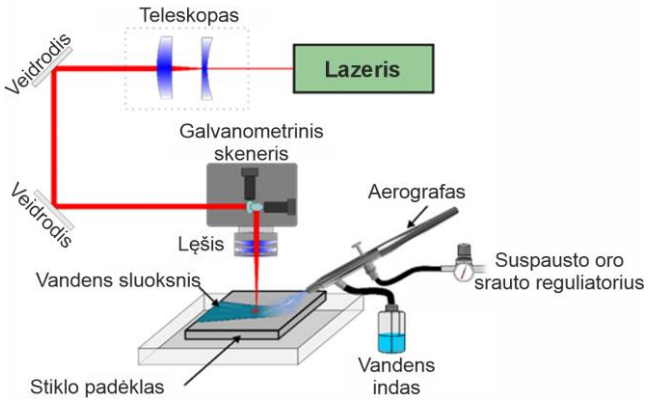
Disertacijoje aprašytuose tyrimuose buvo panaudoti keturi lazeriniai šaltiniai (**žr. 1 lentelę**). Pirmiausia stiklo pjovimo eksperimentai buvo atlikti su Eksplos lazeriu FemtoLux 30, kuris generavo 320 fs trukmės ir 1030 nm bangos ilgio impulsus. Tada paviršiaus frezavimui panaudoti pikosekundinis Atlantic 60 (Eksplos), tas pats femtosekundinis FemtoLux 30 bei femtosekundinis Carbide 40 (Light Conversion) lazeriai. Šiais lazeriais buvo atitinkamai generuojami ~1 µm bangos ilgio bei 10 ps, 320 fs ir 176 fs trukmės lazeriniai impulsai. Paskutinėje eksperimentų dalyje suformuoti paviršiai buvo poliruojami CO_2 lazerio Diamond E-150 (Coherent) pagalba siekiant sumažinti jų paviršiaus šiurkštumą iki optinės kokybės.

Lentelė 1. *Lazerių, panaudotų stiklo apdirbimui, parametrai. Lentelėje pateikta maksimali vidutinė lazerio galia buvo matuojama po viso optinio kelio ties stiklo paviršiumi.*

Lazeris	Atlantic 60	FemtoLux 30	Carbide 40	Diamond E-150
Bangos ilgis	1064 nm	1030 nm	1030 nm	10,6 µm
Lazerinio impulso trukmė	10 ps	320 fs	176 fs	2-100 µs
Maksimali vidutinė lazerio galia	42 W	21 W esant 1,1 MHz	34 W	150 W
Impulsų pasikartojimo dažnis	0.4 – 1 MHz	0.4 – 4 MHz	100 kHz	10 kHz
Fokusuojantis lęšis	+100 mm	+100 mm	+100 mm	+250 mm
Pluošto diametras sąsmaukoje	34 µm (frezavimui)	27 µm (pjovimui) 31 µm (frezavimui)	19 µm	440 µm

Visi minėti lazeriai turėjo panašią optinę sistemą, kurią sudarė teleskopas, skirtas lazeriniam pluoštui išplėsti, veidrodžiai jam nukreipti į skenerį ir lęšis jam sufokusuoti (**žr. 11 pav.**). Lazerių generuojami pluoštai buvo skenuojami

galvanometriniais skeneriais. Konkrečiau IntelliSCAN$_{de}$ 14 (ScanLab) buvo naudojamas su lazeriais generuojančiais ~1 µm bangos ilgio spinduliuotę ir SCANcube III 14 (ScanLab) didesnio bangos ilgio, CO_2 lazerio, pluoštui.



11 pav. *Tipinė lazerinės sistemos schema su vandens sluoksnio formavimo sistema, kuri buvo naudojama stiklo pjovimo eksperimentuose.*

Pikosekundiniai ir femtosekundiniai lazeriniai pluoštai buvo fokusuojami naudojant telecentrinį +100 mm židinio nuotolio lęšį. Lazerinių pluoštų skersmenys sąsmaukoje buvo išmatuoti naudojant J. M. Liu aprašytą metodiką [25]. Pjovimo eksperimentuose išmatuotos vertės buvo lygios 28 ir 27 µm Atlantic 60 ir FemtoLux 30 lazeriams. Stiklo paviršiaus frezavimui naudoti Atlantic 60, FemtoLux 30 ir Carbide 40 lazerių pluoštų diametrai sąsmaukoje atitinkamai siekė 34, 31 ir 19 µm. Svarbu paminėti, kad plonas vandens sluoksnis nedarė įtakos lazerinio pluošto sąsmaukos skersmeniui – jis išliko toks pats ir stiklą abliuojant pro tekančią vandens plėvelę. Visų pjovimo eksperimentų metu lazerinio pluošto sąsmauka buvo laikoma po viršutiniu stiklo paviršiumi, atstumu, lygiu pusei stiklo storio. Tik stiklo paviršiaus frezavimo tyrimuose lazerinio pluošto sąsmauka buvo fiksuota ties stiklo paviršiu.

Galiausiai stiklo poliravimo eksperimentai buvo atlikti naudojant CO_2 lazerio generuojamą lazerinį pluoštą. Jam fokusuoti buvo panaudotas +250 mm židinio nuotolio lęšis. Išmatuotas dėmės diametras sąsmaukoje siekė 440 µm.

3.2. Eksperimentiškai tirti stiklai

Eksperimentų metu buvo naudojami borosilikatiniai ir lydyto kvarco stiklai. Šie stiklai yra naudojami srityse, kuriose yra reikalingas didesnis jų terminis atsparumas lyginant su paprastais silikatais. Lydytas kvarcas gaminamas iš itin gryno silicio dioksido (SiO_2), todėl pasižymi didesniu

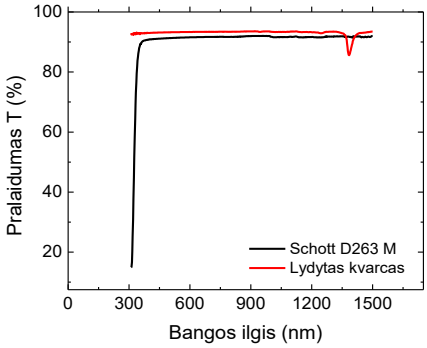
terminiu stabilumu bei mažesniu šiluminiu plėtimosi koeficientu nei sudėtinių priemaišų turintis borosilikatas. Tuo tarpu pastarojo sudėtyje esantis boro trioksidas (B_2O_3) žymiai padidina medžiagos atsparumą terminiam šokui, lyginant su įprastu silikatiniu stiklu. Nors kvarcinis stiklas techninėmis savybėmis lenkia borosilikatinį, borosilikatinis stiklas išlieka plačiai naudojamas dėl paprastesnės gamybos technologijos ir žemesnės savikainos. Svarbiausių fizinių parametrų palyginimas pateikiamas **2 lentelėje.**

Lentelė 2. *Borosilikatinio stiklo ir lydyto kvarco fizikiniai parametrai.*

Stiklas	Borosilikatas Schott D263 M [130]	Lydytas kvarcas [131]
Lūžio rodiklis n	1,5255	1,4482
Pralaidumas T, %	>90 % (~1 μm)	>90 % (~1 μm)
Draustinis energijų tarpas / jį atitinkantis bangos ilgis, eV / nm	3,97 / 312	6,88 / 180
Abliacijos slenkstis, J cm^{-2}	9,4 (10 ps) 2,98 (500 fs) [132]	11,02 (10 ps) 3,6 (500 fs) [132]
Jungo modulis, kN mm^{-2}	72,9	73,1
Šiluminis laidumas, $Wm^{-1}K^{-1}$	0,96 [133]	1,38
Šiluminis plėtimosi koeficientas, μK^{-1}	7,2	0,55

Stiklo pjovimo tyrimai buvo atliekami naudojant skirtingų storių (110, 300 ir 550 μm) borosilikatinį stiklą (Schott D263 M). Ši medžiaga pasižymi aukštu optiniu pralaidumu (>90 %) regimajame ir artimajame IR spektro diapazonuose. Šių stiklų bendras pralaidumas buvo papildomai išmatuotas spektrometru Photon RT (iš Essentoptics). Spektrai pateikti **12 paveiksle.** Ties naudotu 1030 nm bangos ilgiu pralaidumas siekė 91,6 %. Tiesa, svarbu paminėti, kad išmatuota vertė gauta nekompensavus atspindžių nuo viršutinio ir apatinio stiklo paviršių, todėl vidinis stiklo pralaidumas yra didesnis. Be to, spektre matomas sugerties kraštas - ribinis bangos ilgis lygus 312 nm, ties kuriuo prasideda tiesinė fotonų sugertis. Jis atitinka 3,97 eV draustinės energijos tarpą. Visgi borosilikatinio stiklo šiluminio plėtimosi koeficientas yra per didelis sėkmingam poliravimui CO_2 lazeriu kambario temperatūroje, todėl paviršiaus frezavimo eksperimentams buvo pasirinktas lydytas kvarcas [134]. Palyginimui, borosilikatinio stiklo šiluminio plėtimosi koeficientas yra

apie 13 kartų didesnis nei kvarcinio stiklo (atitinkamai 7,2 μK^{-1} ir 0,55 μK^{-1}). Nors borosilikatinis stiklas taip pat gali būti poliruojamas CO_2 lazeriu, procesas tampa technologiškai sudėtingesnis: siekiant išvengti skeldėjimo, poliruojamas stiklo bandinys turi būti papildomai įkaitintas iki kelių šimtų laipsnių temperatūros pagal Celsijų [97, 106]. Kita vertus, bandant lokalizuotai perlydyti borosilikatinio stiklo paviršių kambario temperatūroje yra stebimas jo paviršiaus skeldėjimas [97, 135].



12 pav. *Borosilikatinio Schott D263 M ir lydyto kvarco bendri pralaidumo spektrai. Išmatuoti Photon RT spektrometru konkretiems tyrimuose naudotiems stiklams nekompensuojant atspindžių nuo viršutinio ir apatinio stiklo paviršių.*

Kita vertus, lydyto kvarco frezavimas lazeriu yra technologiškai sunkesnis procesas. Dėl didesnio draustinės energijos tarpo yra mažesnė daugiafotonės sugerties tikimybė, todėl abliacijai inicijuoti reikalingas didesnis lazerinės spinduliuotės intensyvumas.

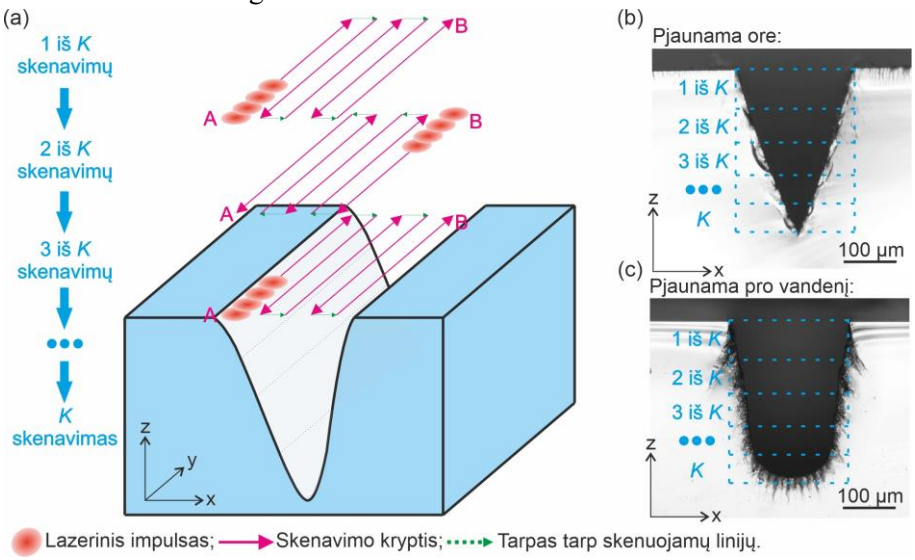
Galiausiai, lydyto kvarco pralaidumas 1030 – 1064 nm bangos ilgių intervale yra panašus į borosilikatinio stiklo pralaidumą (**žr. 12 pav.**). Išmatavus pralaidumą su spektrometru, jis buvo tik 1,6 % didesnis ir siekė apytiksliai 93,1 %. Šiuo atveju pralaidumo spektre dar buvo matoma ir sugerties smailė ties 1385 nm bangos ilgiu dėl OH- grupių fononinės sugerties, tačiau eksperimento rezultatams, tai įtakos neturėjo, nes stiklo apdirbimui buvo naudojama 1030 ir 1064 nm bangos ilgių spinduliuotė. Be to, spektrometru nebuvo galima išmatuoti lydyto kvarco sugerties krašto, kuris turėtų būti apytiksliai ties 180 nm bangos ilgiu dėl įrangos apribojimų.

3.3. Stiklo pjovimo tyrimo metodika

Lazerinis stiklo apdirbimas nuo viršutinės pusės dar vadinamas lazerine stiklo abliacija arba frezavimu – medžiagos pašalinimu pasluoksniui. Kita vertus, kiauryminis stiklo frezavimas, kai medžiaga visiškai pašalinama nuo viršutinio iki apatinio paviršiaus suformuojant kiaurymę, šiame darbe bus

vadinamas pjovimu. Laikyta, kad stiklas sėkmingai prapjautas, jei jame susiformuodavo aiški vientisa kiaurymė arba bandinys būdavo visiškai padalinamas į dalis. Pjūvio vientisumas po eksperimento buvo įvertinamas optiniu mikroskopu.

Pjūvis buvo formuojamas lazerinį pluoštą skenuojant lygiagrečiomis, vienodu atstumu atskirtomis linijomis (**žr. 13a pav.**). Šių lygiagrečių linijų visuma – jų skaičius ir parinktas tarpas tarp jų – sudarė tam tikro pločio poveikio zoną stiklo paviršiuje. Ši zona lėmė pašalinamos medžiagos sluoksnio ir kartu pjaunamo kanalo plotį. Vieną kartą atliktas lygiagrečių linijų skenavimas, kurio metu pašalinamas tam tikro storio sluoksnis, bendrai bus vadinamas tiesiog skenavimu.



13 pav. *Stiklo lazerinio pjovimo schema (a), iliustruojanti K sluoksnių skenavimo eigą keičiant skenavimo kryptį (pateikti pirmieji trys skenavimo žingsniai) ir formuojamo kanalo 3D modelį. Greta pateiktos realios pavyzdinės silikatiniame stikle suformuotų pjūvių skerspjūvių nuotraukos, pjovimą atliekant ore (b) ir pro tekantį vandens sluoksnį (c). Punktyriniais stačiakampiais skerspjūviuose pažymėti teoriniai pašalinamos medžiagos sluoksniai kiekvieno skenavimo metu.*

Siekiant sėkmingai prapjauti stiklą, vieno sluoksnio pašalinti nepakako, todėl procesas buvo kartojamas atliekant *K* skenavimų (**žr. 13 pav.**). Kiekvieno skenavimo metu lazerio spindulys judėjo ta pačia trajektorija ir palaipsniui didino kanalo gylį, kol stiklas buvo visiškai perpjautas. Po kiekvieno skenavimo pasikeisdavo skenavimo kryptis. Nelyginių skenavimų metu (1, 3 ir t. t.) lazerio pluoštas judėjo iš taško A į tašką B, o lyginių (2, 4 ir t. t.) – priešinga kryptimi iš taško B į A (**žr. 13a pav.**). Literatūroje nurodoma, kad tokia periodiškai keičiama skenavimo kryptis padeda suformuoti

tolygesnį ir simetriškesnį pjūvio profilį, palyginti su vienkrypčiu skenavimu [136].

Tipiniai suformuotų kanalų skerspjūviai, pjaunant stiklą ore ir pro tekantį vandens sluoksnį, pateikti **13b ir 13c paveiksluose**. Matyti, kad abiem atvejais susidaro „V“ formos pjūviai - kanalo plotis siaurėja didėjant gyliui. Šią geometriją lemia lazerinio pluošto Gauso intensyvumo skirstinys bei jo sąveika su formuojamo pjūvio sienelėmis. Didėjant skenavimų skaičiui ir gilėjant kanalui, auga energijos nuostoliai dėl lazerinės spinduliuotės atspindžių nuo kanalo sienelių bei lazerinės spinduliuotės ekranavimo sugeneruota plazma ar abliacijos produktais. Atitinkamai mažėja kanalo dugną pasiekiantis energijos įtėkis. Tai gali lemti kanalo gylio įsisotinimą dar nesuformavus kiaurymės – tokiu atveju pjovimo procesas tiesiog sustotų.

Pats pjūvio sienelių pasvirimo kampas priklauso nuo pjovimo bei medžiagos parametrų, todėl tiesiogiai veikia pjovimo spartą. Iš pateiktų paveikslų matyti, kad ir skirtingos aplinkos lemia skirtingą pjūvio geometriją ir sienelių polinkio kampą (**žr. 13b, c pav.**). Kuo šis kampas didesnis (sienelės mažiau vertikalios), tuo platesnį kanalą reikia formuoti, kad būtų sėkmingai prapjautas storesnis stiklas. Tokiu atveju tenka didinti skenuojamų lygiagrečių linijų skaičių per vieną skenavimą. Dėl to didėja pašalinamos medžiagos tūris ir kartu auga frezavimo efektyvumas γ, nurodantis medžiagos pašalinimo spartą per vidutinės lazerio galios vienetą. Tačiau kartu ilgėja ir pjovimo trukmė. Tai reiškia, kad mažėja pjovimo greitis v_c, nurodantis, kaip greitai galima prapjauti apibrėžto storio stiklą, bei pjovimo efektyvumas v_{ef}, apibrėžiantis pjovimo greitį per vidutinės galios vienetą:

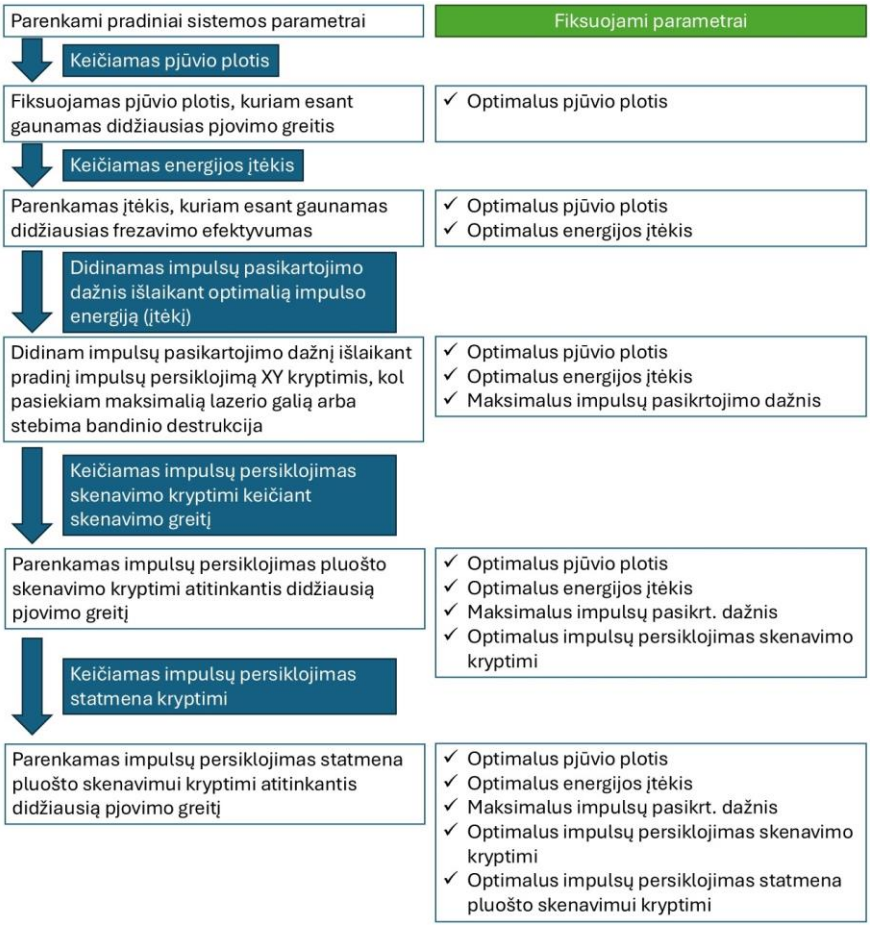
$$\gamma = \frac{V}{P_{vid} t}, \tag{9}$$

$$v_c = \frac{v_s}{K \cdot L}, \tag{10}$$

$$v_{ef} = \frac{v_c}{P_{vid}}, \tag{11}$$

kur V – pašalintos medžiagos tūris, P_{vid} – vidutinė lazerio galia, t – teorinis prapjovimo laikas, v_s – lazerio pluošto skenavimo greitis, K – minimalus skenavimų skaičius, reikalingas stabiliai prapjauti stiklą ir L – lygiagrečių skenavimo linijų skaičius. Pašalintos medžiagos tūris buvo matuojamas optiniu profilometru S neox (Sensofar). Vidutinė lazerio galia buvo registruojama optinio kelio pabaigoje, tiesiai virš bandinio, naudojant galios jutiklį F150(200) A-CM-16 (Ophir). Siekiant atmesti lazerinės sistemos komponentų bei programinės įrangos delsos įtaką (kelių šimtų milisekundžių vėlavimą proceso pradžioje paleidžiant pjovimo programą), prapjovimo laikas t buvo vertinamas teoriškai. Jis apskaičiuotas pjūvio ilgį dalijant iš skenavimo

greičio ir dauginant iš bendro skenuojamų linijų skaičiaus gauto atlikus visus skenavimus reikalingus stiklui perpjauti.



14 pav. *Stiklo lazerinio pjovimo parametrų tyrimo schema. Mėlynuose stačiakampiuose pažymėti nuoseklūs eksperimento žingsniai bei juose varijuojami parametrai, o baltuose stačiakampiuose nurodyti fiksuojami parametrai ir jų parinkimo kriterijai. Kairiame stulpelyje tyrimo seka, o dešiniame – apibendrinti fiksuoti parametrai ties konkrečiu žingsniu.*

Bendrai stiklo pjovimo eksperimentai buvo atliekami siekiant padidinti pjovimo greitį, kartu išlaikant kuo aukštesnį frezavimo efektyvumą. Šiuo tikslu borosilikatinių stiklų pjovimo tyrimo metu buvo nuosekliai keičiami skirtingi parametrai pagal **14 paveiksle** pateiktą algoritmą. Skirtingų parametrų tyrimas buvo vykdomas nuosekliai, žingsnis po žingsnio: suradus optimalią kintamojo parametro vertę, ji tapdavo fiksuotu parametru tolimesniame tyrimo etape. Šis algoritmas buvo atskirai taikomas pjaunant 110, 300 ir 550 µm storio stiklus ore bei pro ploną vandens sluoksnį.

Pradiniai pjovimo parametrai buvo parinkti atsižvelgiant į ankstesnius tyrimus, kai tas pats stiklas buvo pjaunamas pikosekundiniu lazeriu: 400 kHz impulsų pasikartojimo dažnis, 1 m/s skenavimo greitis, 15 µm tarpas tarp skenuojamų linijų ir maksimali lazerio galia [137]. Naudojant šiuos pradinius parametrus, pirmiausia buvo formuojami įvairaus pločio kanalai keičiant skenuojamų linijų skaičių per vieną skenavimą. Po šio etapo buvo užfiksuoti tie kanalo pločiai, kuriais oro ir vandens aplinkose buvo gauti didžiausi pjovimo greičiai.

Užfiksavus kanalo plotį, stiklas buvo pjaunamas varijuojant energijos įtėkį. Tolimesniems tyrimams buvo pasirinkti tokie energijos įtėkiai, kuriais buvo pasiekti frezavimo efektyvumo maksimumai. Juos užfiksavus, buvo didinamas impulsų pasikartojimo dažnis, kol pasiekta maksimali vidutinė lazerio galia arba kol stiklas neatlaikydavo terminių įtempių ir skildavo. Galiausiai, užfiksavus kanalo plotį, energijos įtėkį ir impulsų pasikartojimo dažnį, buvo tiriama impulsų persiklojimo skenavimo kryptimi (skenavimo greičio) įtaka pjovimo greičiui. Tai atlikus, buvo vertinamas impulsų persiklojimas jai statmena kryptimi (tarpas tarp skenuojamų linijų sluoksnyje). Impulsų persiklojimas įvertintas pagal formules:

$$Persiklojimas_{\parallel} = \left(1 - \frac{p}{2\omega_0}\right) \cdot 100\ \%, \tag{12}$$

$$Persiklojimas_{\perp} = \left(1 - \frac{h}{2\omega_0}\right) \cdot 100\ \%, \tag{13}$$

kur p ir h yra tarpas tarp lazerinių impulsų centrų atitinkamai skenavimo (persiklojimas su „||“ simboliu) ir jai statmena kryptimis (persiklojimas su „⊥“ simboliu), o $2\omega_0$ – lazerinio pluošto sąsmaukos diametras.

Pjaunant storiausią 550 µm stiklą oro aplinkoje paaiškėjo, kad naudojant femtosekundinius lazerinius impulsus procesas tampa neįmanomas viršijus 4 W vidutinę lazerio galią – dėl terminių įtempių stiklas visiškai suskildavo. Analogiški rezultatai gauti ir kituose tyrimuose, kai šiek tiek plonesnis 400 µm stiklas buvo pjaunamas pikosekundiniais IR ir UV lazeriais [137], [138]. Dėl šios priežasties 550 µm storio stiklui pradiniai parametrai buvo parinkti kitokie: impulsų pasikartojimo dažnis sumažintas iki 100 kHz. Tai leido eksperimentuose išlaikyti tuos pačius energijos įtėkių rėžius su mažesne vidutine lazerio galia. Šis sumažintos vidutinės galios režimas toliau bus vadinamas – mažos galios režimu (P_{min}).

Papildomai, pjovimai ore buvo atliekami ir mažos galios režimu pjaunant plonesnius, 110 ir 300 µm storio, stiklus. Tai buvo atlikta siekiant turėti tiksliau palyginamus duomenis su 550 µm storio stiklu. Šiuo atveju visi eksperimentai nebuvo kartojami – išlaikant pjaunamo kanalo plotį, energijos įtėkį ir impulsų persiklojimą gautus su maksimalia lazerio galia (P_{max} –

maksimalios galios režimu), buvo sumažinamas impulsų pasikartojimo dažnis iki 100 kHz.

Priešingai nei ore, suformavus ploną tekančio vandens sluoksnį, stiklas buvo efektyviai aušinamas. Tai leido išnaudoti visą lazerio potencialą net ir pjaunant storiausius stiklus, todėl apdirbimas vandenyje buvo vykdomas naudojant tik maksimalią galią ir orientuojantis į didžiausią proceso spartą (tyrimai mažos galios režimu vandenyje nebuvo atliekami).

Galutiniais užfiksuotais pjovimo parametrų rinkiniais buvo pjaunamos 26×5 mm^2 matmenų stiklo juostelės. Su kiekvienu parametrų rinkiniu buvo išpjaunamos 24 juostelės. Iš viso ištirti 8 parametrų rinkiniai: 5 ore (3 mažos galios ir 2 maksimalios galios režimuose, pjaunant 110–550 µm storio stiklus) ir 3 vandenyje (maksimalios galios režime skirtingo storio stiklai). Išpjovus juosteles, buvo vertinama jų kokybė: optiniu mikroskopu Eclipse LV100NDA (Nikon) išmatuotas pjūvio kraštų apskeldėjimo ilgis, o pjūvio sienelės šiurkštumas R_a išmatuotas optiniu profilometru pagal ISO 4287 standartą. Detalesnė šių parametrų matavimo metodika bus pateikta apdirbimo kokybės įvertinimo skyriuje.

3.3.1. Tekančio vandens sluoksnio sudarymas ir charakterizavimas

Tekantis vandens sluoksnis buvo suformuotas specialia vandens purškimo sistema. Šią sistemą sudarė aerografas, į kurį buvo tiekiamas 3 atmosferų slėgio suspaustas oras, talpa su dejonizuotu vandeniu ir indas į kurį subėgdavo procese naudotas vanduo. Suspausto oro pagalba, dėl slėgių skirtumo aerografe, vamzdeliu vanduo buvo pakeliamas iš indo į aerografą. Susimaišęs vanduo su suspaustu oru buvo išpurškiamas ir suspaudžiamas į ploną tekančią vandens plėvelę ant bandinio paviršiaus (**žr. 11 pav.**). Aerografo galvutė buvo įtvirtinta 1 cm virš ir nukreipta 45 laipsnių kampu į stiklo paviršių. Purškiamo vandens debitas siekė 11 ml/min.

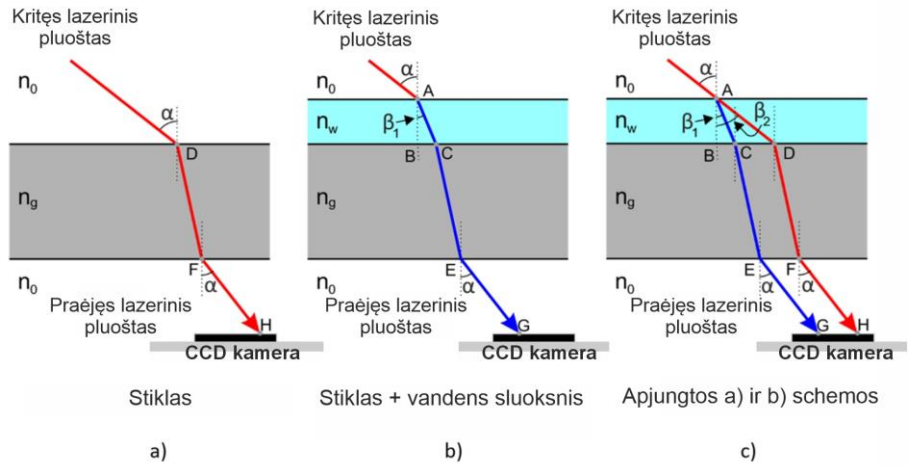
Pjūvis stikle buvo formuojamas išilgai vandens tekėjimo kryptimi ir 5 mm atstumu nuo padėties, kur buvo pradedama formuoti vandens plėvelė. Toks išdėstymas leido išvengianti lazerio energijos ekranavimo dėl aerografu purškiamos vandens miglos. Suformuotos vandens plėvelės ilgis ir plotis plačiausiose vietose atitinkamai siekė 35 ir 24 mm. Pastarasis atitiko stiklo padėklo plotį.

Vandens plėvelės storis buvo išmatuotas naudojant kampu sklindantį Atlantic 60 lazerio pluoštą ir Snelijaus dėsnį, kuris nusako lazerinio pluošto lūžimą pereinant dviejų terpių sandūrą (**žr. 15 pav.**). Matavimui atlikti nukreipiant lazerinį pluoštą 30 laipsnių kampu į stiklo paviršių ir registruojant jį CCD kameroje po bandiniu. Sudarius vandens sluoksnį ant paviršiaus, buvo

matuojamas lazerinio pluošto poslinkis CCD kameroje ir iš jo buvo nustatomas vandens sluoksnio storis *AB*:

$$AB = \frac{GH}{tg(\alpha) - tg(\beta_1)}, \tag{14}$$

kur $\beta_1 = \text{asin}\left(\frac{n_0}{n_w}\sin(\alpha)\right)$ – lazerinės spinduliuotės lūžio kampas, praėjus oro ir vandens sandūrą; α - lazerinės spinduliuotės kritimo kampas; *AB* – vandens sluoksnio storis; *GH* – lazerinio pluošto padėties poslinkis CCD kameroje. Skaičiavimuose buvo naudota, kad oro ir vandens terpių lūžio rodikliai buvo atitinkamai $n_0 = 1$ ir $n_w = 1{,}325$ [139]. Šiuo būdu išmatuotas vandens sluoksnio storis kito nuo 650 µm vandens sluoksnio susidarymo pradžioje iki 350 µm jo pabaigoje. Vidutinis vandens sluoksnio storis per 26 mm ilgį siekė 500 µm. Pravartu paminėti, kad papildomi testai parodė, jog vandens sluoksnio storio kitimas neturėjo reikšminės įtakos nei pjovimo efektyvumui, nei jo kokybei.



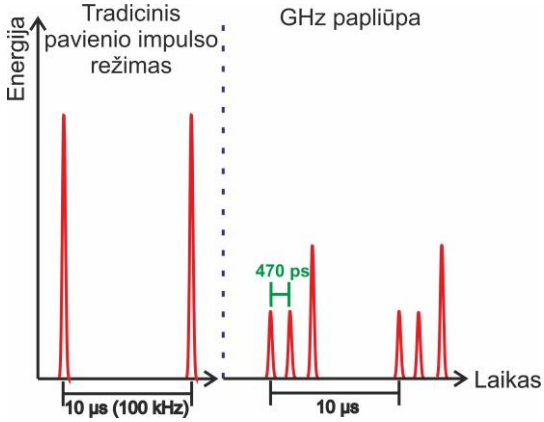
15 pav. *Vandens plėvelės storio matavimo schema: lazerinis pluoštas krenta tik į stiklą (a) ir į stiklą padegtą vandens sluoksniu (b). Be to, (c) yra pavaizduota apibendrinta schema apjungianti (a) ir (b) dalis. Paimta iš* [137].

3.4. Paviršiaus frezavimo tyrimų metodika

Po stiklo pjovimo eksperimentų atlikti 6,3 mm storio lydyto kvarco paviršiaus frezavimo tyrimai. Lazerinis pluoštas skenuotas analogiškai kaip stiklų pjovimo eksperimente, tačiau, siekiant suformuoti 2×2 mm^2 ploto laukelius, padidintas skenavimo linijų skaičius. Skenavimų skaičius keistas nuo 1 iki 256, siekiant ištirti impulso trukmės įtaką nuimant vieną bei keletą medžiagos sluoksnių.

Eksperimentų metu impulsų persiklojimas statmena skenavimui kryptimi buvo pastovus visų frezavimo tyrimų metu. Tarpas tarp skenavimo linijų parinktas lygus 5 µm, o tai atitiko 83,9 % (femtosekundiniams impulsams) ir 85,3 % (pikosekundiniams impulsams) impulsų persiklojimą. Šis dydis užtikrino geriausią santykį tarp paviršiaus kokybės ir apdirbimo spartos. Nors didesni tarpai tarp skenuojamų linijų leido pasiekti didesnį vieno sluoksnio pašalinimo greitį, tai kartu lėmė ir didesnį paviršiaus šiurkštumą. Priešingai, mažinant tarpą (didinant persiklojimą), femtosekundinių impulsų atveju šiurkštumas beveik nekito, o pikosekundinių impulsų atveju – sumažėjo vos 11 %. Tačiau dėl didesnio skenuojamų linijų skaičiaus, proceso sparta krito net 4,8 karto. Todėl abiem atvejais buvo pasirinktas bendras 5 µm tarpas, siekiant išlaikyti didelį našumą be reikšmingo kokybės praradimo.

Pradinio etapo metu tirta impulso trukmės įtaka poliruoto (skaidraus) stiklo abliacijai, naudojant tradicinį pavienio impulso režimą (impulsai atskirti µs trukmėmis; **16 pav.**). Eksperimentams pasitelkti „Atlantic 60“ (10 ps) ir „Femtolux 30“ (320 fs) lazeriai, generuojantys vienodą 400 kHz impulsų pasikartojimo dažnį (periodas tarp impulsų – 2,5 µs). Laukelių frezavimo metu keistas skenavimo greitis (impulsų persiklojimas skenavimo kryptimi) ir energijos įtėkis, kol abliacija tapdavo nestabili arba nutrūkdavo. Šio tyrimo metu buvo pašalinamas tik vienas medžiagos sluoksnis (atliekamas vienas skenavimas), o optiniu profilometru matuotas pašalinto sluoksnio storis bei paviršiaus šiurkštumas S_a.

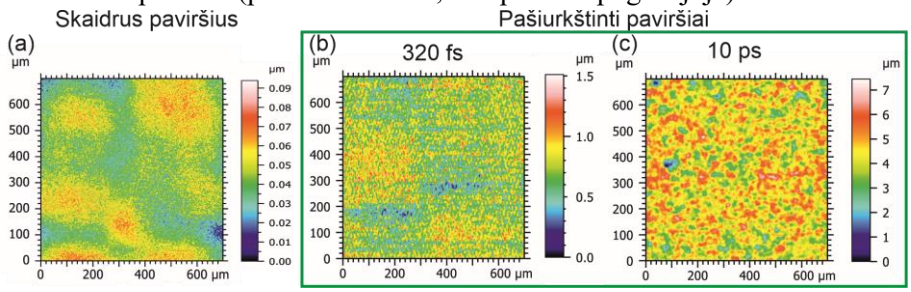


16 pav. *Laikinės dviejų naudotų lazerio režimų charakteristikos: tradicinio pavienio impulso (impulsai pasikartoja kas 10 µs arba 100 kHz dažniu) ir GHz papliūpos (impulsai pasikartoja papliūpoje kas 470 ps (2 GHz), o papliūpos pasikartoja kas 10 µs).*

Siekant pašalinti kuo plonesnius medžiagos sluoksnius, buvo frezuojamas ne skaidrus, o pašiurkštintas stiklo paviršius. Pašiurkštinimas atliktas naudojant lazerinės sistemos parametrus, užtikrinančius mažiausią paviršiaus

šiurkštumą frezuojant skaidrų stiklą atskirai abejomis impulsų trukmėmis. Pašiurkštinimo metu stiklo paviršiuje buvo suformuojami defektai, kurie sumažino paviršiaus abliacijos slenkstį, todėl frezavimas buvo galimas esant mažesniems energijos įtėkiams nei skaidraus stiklo abliacijos slenkstis. Taigi pašiurkštintas paviršius vėlgi buvo frezuojamas varijuojant impulsų persiklojimą skenavimo kryptimi ir energijos įtėkį.

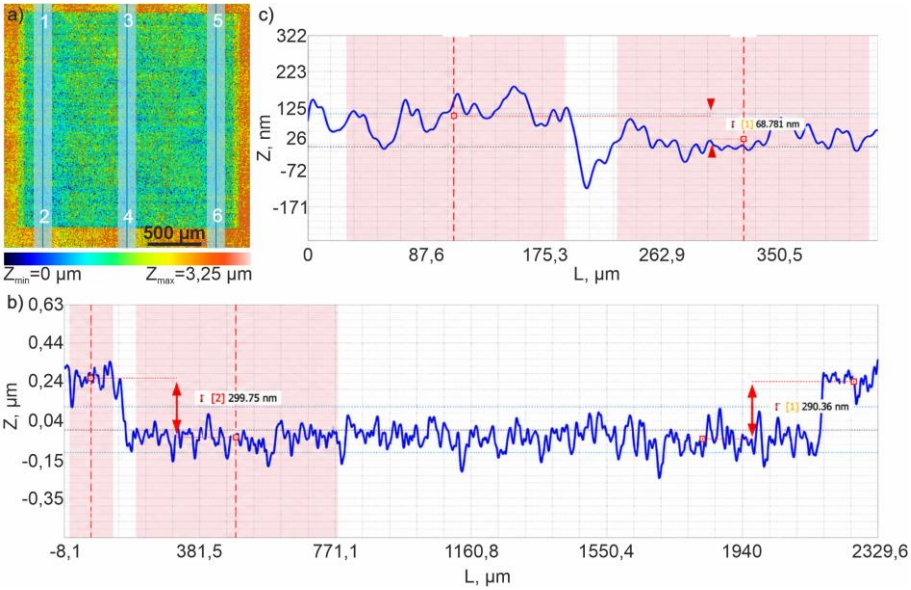
Skaidraus ir pašiurkštintų paviršių topografijos pateiktos **17 paveiksle**, kuriuose matyti, kad skaidrus stiklo paviršius pašiurkštintas pikosekundiniais impulsais buvo šiurkštesnis (spalvinė skalė didesnė) ir paviršių sudarantys elementai - platesni (platesni raudoni, žali plotai topografijoje).



17 pav. *Skaidraus (a) ir pašiurkštinto (b, c) paviršių topografijos. Stiklo paviršius pašiurkštintas su 320 fs (b) ir 10 ps (c) trukmės lazeriniais impulsais. Išmatuota optiniu profilometru. Paviršiaus šiurkštumai S_a siekia 15 nm (a), 130 nm (b) ir 590 nm (c).*

Pašalintas sluoksnio storis buvo įvertinamas kiekviename išfrezuotame laukelyje, matuojant gylį šešiose vietose – ties kampais ir dviejose vietose centre (melsvos matavimo linijos su paryškintais matavimo taškais; **žr. 18a pav.**). Išmatuotos vertės buvo suvidurkintos ir apskaičiuotas standartinis nuokrypis. Kiekvienas atskiras matavimas buvo atliekamas programiškai vidurkinant artimus paviršiaus taškus XY plokštumoje, norint tiksliau įvertinti vidutinį pasiekiamą gylį šiurkščiame paviršiuje (permatomos šviesiai mėlynos ir raudonos zonos; **žr. 18a ir b pav.**). Optinio profilometro specifikacijoje nurodyta, kad gylio matavimo paklaida siekia 4 nm (įvertinta pagal ISO 98-3:2008 standartą), tačiau dėl paviršiaus šiurkštumo buvo įmanoma išskirti ne mažesnį kaip 50 nm gylį (**žr. 18c pav.**).

Galiausiai parinkti parametrų rinkiniai, kuriais pasiektas panašus pašalinamo sluoksnio storis abejomis impulsų trukmėms. Šie rinkiniai ištirti nuimant nuo 1 iki 256 sluoksnių. Kiekvienu atveju optiniu profilometru matuotas išfrezuoto laukelio gylis ir jo dugno šiurkštumas, siekiant įvertinti proceso stabilumą bei parametrų pokyčio tendencijas. Tyrimo pabaigoje apskaičiuota frezavimo sparta, frezavimo efektyvumą dauginant iš naudotos vidutinės galios.



18 pav. *Pašalinamo sluoksnio storio matavimo metodika. (a) Nufrezuoto laukelio topografija su pažymėtomis mėlynomis profilio matavimo linijomis ir 1–6 skaičiais, nurodančiais gylio matavimo vietas. (b) Kairiąją profilio liniją topografijoje atitinkantis profilis su gylio matavimais 1 ir 2 taškuose. (c) Pavyzdinis mažo gylio profilis ties vienu iš matavimo taškų. Permatomos raudonos ir melsvos spalvos zonos iš abiejų matavimo linijos pusių nurodo programinį taškų vidurkinimo lauką, naudojamą vidutiniam paviršiaus aukščio profiliui gauti.*

3.4.1. Lydyto kvarco frezavimas papliūpų režime

Papildomai tokie pat 2×2 mm^2 ploto laukeliai buvo formuojami naudojant tradicinį pavienio impulso režimą bei skirtingą impulsų skaičių GHz papliūpoje. Tam pasitelkta Carbide 40 lazerinė sistema. Šiuo atveju GHz papliūpa apibrėžiama kaip impulsų grupė, kurioje impulsai pasikartoja kas 470 ps (**žr. 16 pav.**). Svarbu pabrėžti, kad vienoje papliūpoje esančių impulsų energija svyravo iki 7,3 %. Paskutinis papliūpos impulsas buvo iki 3 kartų intensyvesnis už likusius dėl Carbide lazerių rezonatoriaus iškrovos specifikos. Tokios papliūpos, sudarytos iš N impulsų, energijos įtėkis (arba impulsų bendrasis dozės tankis F) buvo skaičiuojamas taip:

$$F = \frac{2\sum_{i=1}^{N} E_{pi}}{\pi\omega_0^2}, \qquad (15)$$

kur E_p – lazerinio impulso papliūpoje energija, ω_0 – lazerinio pluošto radiusas sąsmaukoje.

Siekiant supaprastinti skirtingų režimų palyginimą, visų eksperimentų metu buvo palaikomas pastovus 3 m/s skenavimo greitis, 5 µm tarpas tarp

skenuojamų linijų bei 100 kHz impulsų pasikartojimo dažnis. Šie parametrai užtikrino stabilų stiklo frezavimą tiek papliūpų, tiek pavienio impulso režimuose. Tokia metodika leido tikslingai įvertinti, kaip abliacijos procesą veikia išskirtinai impulsų skaičius papliūpoje. Išlaikant fiksuotus parametrus, kiekvienu režimu buvo frezuojamas stiklas nuimant po 5 sluoksnius. Frezavimas kartotas keičiant impulsų skaičių papliūpoje ir energijos įtėkį nuo didžiausios vertės (238,5 J/cm^2) iki stiklo abliacijos slenksčio.

Išfrezuotų plotelių analizė buvo atliekama optiniu profilometru išmatuojant bendrą paviršiaus nelygumo rodiklį 1 × 1 mm^2 plote, kuris toliau darbe bus vadinamas bendru paviršiaus nelygumu S_a. Rodiklis apskaičiuotas kaip aritmetinis vidutinis paviršiaus aukščių nuokrypis nuo vidutinės linijos, tai yra S_a parametras, neatskiriant šiurkštumo ir banguotumo (nenaudojant erdvinių filtrų). Šiuo atveju buvo pasirinkta nenaudoti filtrų, nes papliūpų režime stiklas buvo smarkiai išdaužomas, kas lemdavo nelygius sudėtingos formos paviršius. Vienodomis matavimo sąlygomis ištirti paviršiai, suformuoti nenaudojant ir naudojant papliūpų režimus, leido kiekybiškai palyginti gaunamą paviršiaus morfologiją.

Papildomai stiklo daužymo įtaka buvo įvertinama optiniu mikroskopu (LV100NDA iš Nikon) matuojant didžiausius krašto pažeidimus.

Kiekybiškai procesas buvo įvertinamas apskaičiuojat frezavimo efektyvumą. Šiuo tikslu optiniu profilometru buvo išmatuojami pašalinti medžiagos tūriai.

3.5. Paviršiaus poliravimo tyrimų metodika

Lydyto kvarco paviršiaus poliravimo tyrimas atliktas naudojant CO_2 lazerį Diamond G150 (Coherent). Ši sistema generavo 10,6 µm bangos ilgio mikrosekundinius (µs) impulsus 10 kHz pasikartojimo dažniu. Impulsų trukmė, priklausomai nuo naudoto darbo ciklo (angl. duty cycle), kito 2-100 µs intervale, o didžiausia vidutinė lazerio galia siekė 150 W.

Eksperimentai pradėti nuo bandinių paruošimo: femtosekundiniu FemtoLux 30 lazeriu pradinis stiklo paviršiaus šiurkštumas S_a buvo padidintas nuo 15±5 nm iki 400±37 nm. Šie pašiurkštinti paviršiai vėliau buvo perlydomi CO_2 lazeriu, skenuojant pluoštą lygiagrečiomis linijomis kas 25 µm. Formuojant 2×2 mm^2 ploto laukelius, buvo sistemingai keičiama vidutinė lazerio galia ir fokusuojamo pluošto sąsmaukos padėtis bandinio atžvilgiu (tolinant bandinį nuo lęšio, didintas pluošto skersmuo ant stiklo paviršiaus). Visų bandymų metu skenavimo greitis (200 mm/s) ir impulsų dažnis (10 kHz) išliko pastovūs, užtikrinant nekintamą 20 µm tarpą tarp impulsų skenavimo

kryptimi. Šiuo tyrimo etapu nustatytas optimalus pluošto skersmuo, leidžiantis pasiekti mažiausią paviršiaus šiurkštumą S_a.

Vėliau nuo plokščių paviršių buvo pereita prie sferinių lęšių masyvų poliravimo. Masyvų ruošiniai, suformuoti FemtoLux 30 lazeriu, buvo poliruojami CO_2 lazeriu perlydant didesnį 15×15 mm^2 plotą. Optiniu profilometru matuojant paviršiaus šiurkštumą S_a ir sferos kreivumo spindulį prieš poliravimą bei po jo, siekta optimizuoti režimą taip, kad būtų sumažintas paviršiaus šiurkštumas, tačiau neprarasta pradinė lęšių forma.

3.6. Apdirbimo kokybės įvertinimo metodika

3.6.1. Kraštų apskeldėjimo matavimas

Plonos stiklo juostelės buvo pjaunamos dviem lygiagrečiais lazerio pjūviais, taip suformuojant dvi pjautines briaunas kiekvienoje juostelėje. Juostelės buvo pjaunamos ore ir pro tekantį vandens sluoksnį iš 110, 300, 550 µm storio borosilikatinių stiklų. Kiekvieno storio stiklui ir pjovimo aplinkai (oras ar vanduo) buvo atskirai nustatytas pjovimo parametrų rinkinys, lėmęs didžiausią pjovimo spartą. Iš viso kiekvienam pjovimo režimui ištirtos 24 stiklo juostelės (48 pjūvio briaunos).

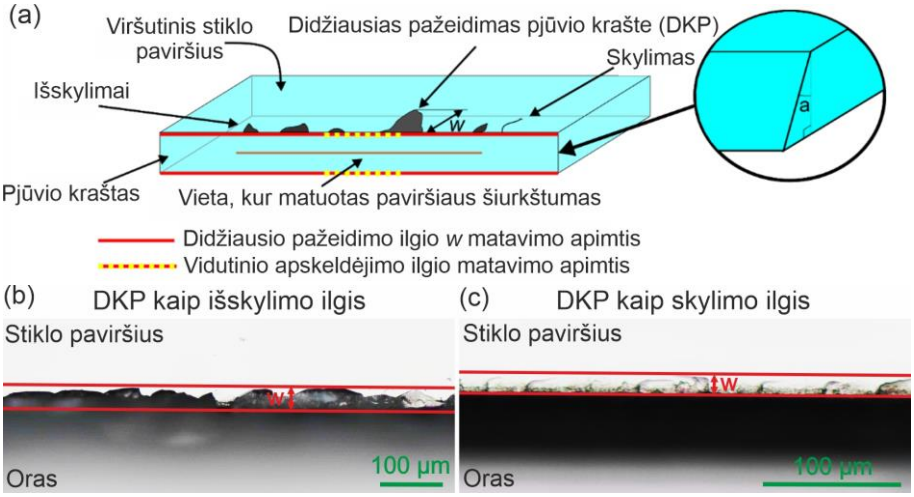
Briaunų kokybei įvertinti analizuoti pjovimo metu susidarę krašto defektai (įskilimai ir išskilimai), šiame darbe bendrai įvardijami kaip krašto pažeidimai. Krašto pažeidimai vertinti tiek viršutinėje briaunos pusėje (į kurią pirmiausia pateko lazerio spindulys), tiek apatinėje pusėje matuojant du rodiklius:

- didžiausią krašto pažeidimą DKP (w_{max}) – didžiausias pavienis defektas 10 mm ilgio ruože ties briaunos centru, apibūdinantis kritinį krašto pažeidimą, galintį lemti stiklo juostelės mechaninį stiprumą;
- vidutinį krašto pažeidimą VKP (w_{vid}) – visų defektų vidutinė vertė >1 mm ruože, apibūdinanti bendrą pažeidimų intensyvumą.

Matavimai atlikti naudojant Eclipse LV100NDA (Nikon). Stikle atlikto pjūvio schema su pažeidimų matavimo vietomis pateikta **19 paveiksle**. Tame pačiame paveiksle parodyta ir briaunos šiurkštumo R_a matavimo vieta, o pats šiurkštumo matavimo metodas aprašytas kitame skyriuje. Svarbu atkreipti dėmesį, kad papildomai atliekant paviršiaus šiurkštumo matavimus keliuose atskiruose 110 – 550 storio stiklo bandiniuose, pjūvio viršuje ir apačioje nebuvo pastebėta ženklaus šiurkštumo pokyčio. Todėl pasirinkta likusius matavimus atlikti tik pjūvio centrinėje dalyje.

Papildomai DKP vertės buvo vertinamos ir po lydyto kvarco paviršiaus frezavimo, naudojant pavienio impulso ir GHz papliūpų režimus. Suformavus

2×2 mm^2 ploto laukelius skirtingais režimais, optiniu mikroskopu buvo analizuojamos visos keturios išfrezuoto kvadrato briaunos ir išmatuojamas didžiausio pažeidimo ilgis. Pastebėta, kad šiuo atveju DKP vertės silpnai priklausė nuo naudoto energijos įtėkio, todėl pažeidimų ilgiai, gauti naudojant tą patį papliūpos impulsų skaičių, bet skirtingus energijos įtėkius, buvo vidurkinami. Taip buvo vertinama tik impulsų papliūpoje įtaka stiklo frezavimo procesui.



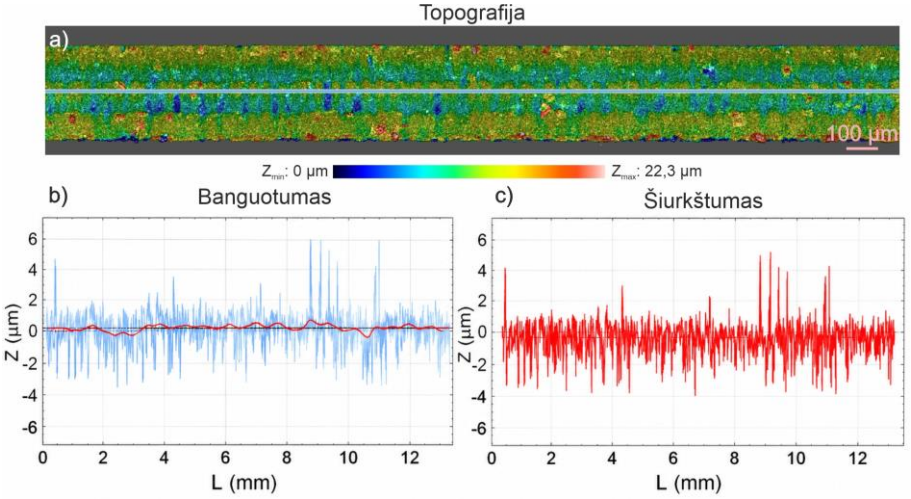
19 pav. *Išpjautos stiklo juostelės schema su pažymėtomis kokybinių parametrų matavimo vietomis (a) bei optinės viršutinių pjūvio kraštų pavyzdinės nuotraukos su išskirtais išskylimais (b) bei įskylimais (c). Čia w žymi matuojamą pažeidimo ilgį pjūvio krašte, o pjūvio sienelės šiurkštumas R_a matuotas pjūvio viduryje. Schemoje a raidė žymi pjūvio sienelės polinkio kampą. Papildomai į krašto pažeidimų vertinimą buvo įtraukiami ir susidarę skylimai. Jeigu skylimas buvo ilgesnis negu išskylimas, tokiu atveju DKP buvo matuojamas kaip skylimo ilgis.*

3.6.2. Paviršiaus šiurkštumo matavimas

Kitas kokybinis lazerinio apdirbimo proceso vertinimas – paviršiaus šiurkštumo matavimas optiniu profilometru, siekiant įvertinti briaunų kokybę. Stiklo pjovimo tyrimuose matuotas pjūvio sienelės linijinis šiurkštumas R_a, nurodantis vidutinį aritmetinį visų profilio nelygumų nuokrypį. Paviršiaus frezavimo ir poliravimo eksperimentuose vertintas apdirbto ploto šiurkštumas S_a (trimačio paviršiaus vidutinis nuokrypis – R_a parametro atitikmuo paviršiui) ir linijinis šiurkštumas R_q (vidutinis kvadratinis profilio nuokrypis). Matuojant pastarąjį, papildomai įvertintas paviršiaus banguotumas W_q – parametras, apibūdinantis didesnio žingsnio periodinius nelygumus, kurie atskiriami nuo šiurkštumo naudojant erdvinius filtrus.

Parametrai parinkti atsižvelgiant į literatūroje dažniausiai pateikiamas vertes: R_a yra standartiškai sutinkamas dydis stiklo pjovimo tyrimuose, o R_q pasirinktas kaip jautresnis indikatorius optinio paviršiaus kokybei vertinti, nes kvadratinis vidurkis labiau išryškina pavienius defektus. Tuo tarpu optinio paviršiaus formavimo tyrimų etape atliekant paviršiaus frezavimą matuojamas S_a parametras leido visapusiškai įvertinti viso formuojamo ploto, o ne tik atskirų linijų, morfologiją.

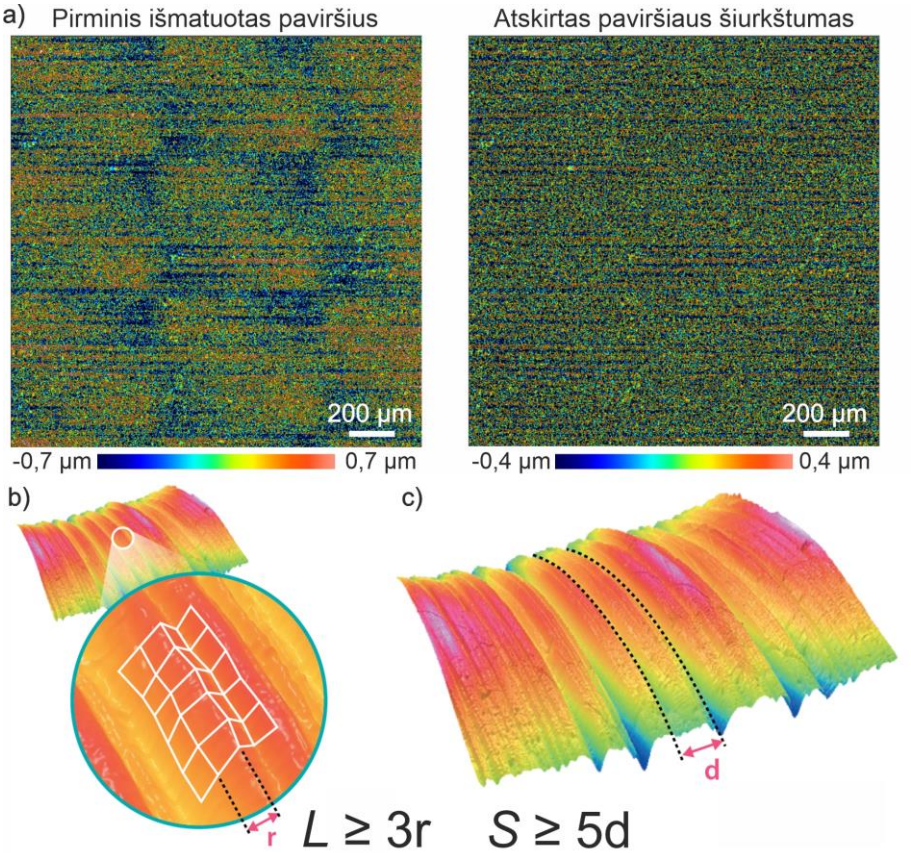
Pjūvio sienelės linijinis šiurkštumas R_a matuotas vadovaujantis ISO 4287 ir 4288 standartais. Remiantis jais, kai paviršiaus šiurkštumas yra intervale $0{,}1<R_a<10$ µm, matavimo ilgis turi būti ne mažesnis nei 12,5 mm. Atsižvelgiant į tai, pjūvio sienelėse šiurkštumas buvo matuojamas 13,5 mm ilgyje.



20 pav. *Borosilikatiniame stikle atlikto pjūvio sienelės topografija (a) ir iš matuojamo profilio išskirtas banguotumas (b) bei šiurkštumas (c). Pjūvio paveiksle (a) mėlyna linija žymi šiurkštumo matavimo vietą. (b) dalyje mėlyna kreivė yra originalus išmatuotas profilis, o banguotumo kreivė pažymėta raudona linija. (c) dalyje raudonas profilis yra gaunamas iš bendro profilio atėmus banguotumą. Pjūvis atliktas 300 µm storio stikle optimizuotais parametrais pjaunant stiklą pro tekantį vandens sluoksnį. Šiuo atveju paviršiaus šiurkštumas R_a= 780 nm, o atskirtas banguotumas W_q=220 nm.*

Siekiant šiurkštumą atskirti nuo banguotumo ir formos nuokrypių, buvo pritaikomi formos ir erdviniai filtrai. Pirmiausia taikomas formos operatorius (F-operatorius), skirtas pašalinti bendrą detalės geometrinę formą ar nuolydį (paviršius „ištiesinamas“). Toliau naudojami erdviniai filtrai: *S*-filtras (λ_S), kuris veikia kaip triukšmo filtras ir pašalina pačius smulkiausius, su matavimo prietaiso įranga ar aplinka susijusius triukšmus, bei *L*-filtras (λ_C). Pastarasis atskiria šiurkštumą nuo banguotumo, pašalindamas iš bendro profilio didelio

bangos ilgio nelygumus. Pjūvio sienelės šiurkštumui matuoti *S* ir *L* filtrai buvo atitinkamai lygūs 8 ir 800 µm.



21 pav. *Pavyzdinė lazeriu suformuoto paviršiaus pirminė išmatuota topografija ir topografija gauta atskyrus šiurkštumą nuo banguotumo pagal ISO 25178 standartą (a) bei L (b) ir S (c) erdvinių filtrų nustatymo būdas. (b) ir (c) dalys paimtos iš* [140].

Vieno pjūvio krašto matavimo eiga pateikta **20 paveiksle**. Optiniu profilometru išmatuotas pjūvio kraštas ties išpjautos stiklo juostelės viduriu ir pritaikomas F-operatorius pašalinti paviršiaus formai (**žr. 20a pav.**). Tada ties pjūvio centru, išilgai juostelės, išskirtas bendras paviršiaus profilis (mėlyna kreivė, **žr. 20b pav.**). Iš gauto profilio atskyrus banguotumą (raudona kreivė, **žr. 20b pav.**), gaunamas galutinis šiurkštumo profilis (**žr. 20c pav.**), iš kurio apskaičiuojami galutiniai šiurkštumo parametrai.

Stiklo paviršiaus frezavimo proceso vertinimui buvo matuojamas išfrezuoto 1,8×1,8 mm^2 ploto šiurkštumas S_a pagal ISO 25178 standartą. Matavimo eiliškumas buvo toks pats kaip ir matuojant linijinį šiurkštumą. Iš pradžių pašalinama paviršiaus forma ir tada erdvinių filtrų pagalba atskiriamas

paviršiaus šiurkštumas (**žr. 21a pav.**). Šiuo atveju erdvinių filtrų pasirinkimui atsiranda daugiau laisvės laipsnių. Matavimo standarte nurodomos rekomendacijos yra gana abstrakčios. Pagal ISO 25178, *S* filtras turi būti nemažesnis negu matavimo pikselio dydis (rezoliucija XY matavimo plokštumoje) padaugintas iš trijų (**žr. 21b pav.**). Siūlomos dažniausiai pasirenkamos vertės 0,5 µm, 0,8 µm, 1 µm, 2 µm, 2,5 µm, 5 µm, 8 µm. Kita vertus, *L* filtras turi būti bent 5 kartus didesnis nei stambiausias dominuojantis / atsikartojantis paviršiaus elementas (angl. coarsest structure of interest; **žr. 21c pav.**). Stiklui frezuotam su femtosekundiniu ar pikosekundiniu lazeriais matuoti buvo naudojamos S=2,5 µm (pikselio dydis buvo 0,69 µm) ir L=800 µm vertės. Poliruotiems plokštiems paviršiams su CO_2 lazeriu – S=2,5 µm ir L=80 µm.

Svarbu išskirti, kad stiklo paviršių frezuojant GHz papliūpų režimu, stiklas buvo smarkiai išdaužomas, kas lemdavo nelygius sudėtingos formos paviršius. Taigi šiuo atveju, paviršiaus bendras nelygumų rodiklis S_a buvo matuojamas 1×1 mm^2 plote neatskiriant šiurkštumo nuo banguotumo – nenaudojant erdvinių filtrų.

3.6.3. Kritinio įtempio matavimas

Stikluose atlikti pjūviai buvo įvertinami sulaužant išpjautas stiklo juosteles. Jos buvo laužomos su 4-ių taškų lenkimo sistema, siekiant įvertinti lazerinio pjūvio įtaką stiklo juostelių stiprumui (**žr. 22 pav.**). Lenkimo sistemą sudarė du vidiniai cilindriniai laikikliai, kurių skersmuo buvo 2 mm, o tarpas tarp jų – 6 mm, ir du išoriniai 6 mm skersmens laikikliai, atskirti 16 mm atstumu. Lenkimo metu vidiniai laikikliai judėjo išorinių laikiklių link, apkraudami stiklą 1,7 MPa/s greičiu. Pati apkrova buvo matuojama dinamometru FMI-S30A5 (iš Alluris). Tokiu būdu buvo sukuriami tempiamieji įtempiai stiklo pusėje, besiremiančioje į išorinius laikiklius, ir spaudžiamieji įtempiai stiklo pusėje, kontaktuojančioje su vidiniais laikikliais. Dėl šio skirtumo, po 12 bandinių buvo laužoma iš abiejų stiklo pusių.

Taigi, matavimo metu kiekvienai juostelei buvo išmatuojama lenkimo jėga *F*, kuriai esant ji lūžo. Ši vertė buvo perskaičiuota į maksimalų įtempį σ, reikalingą sulaužyti stiklo juostelei [141]:

$$\sigma = \frac{3F(L-l)}{2bt^2}, \tag{16}$$

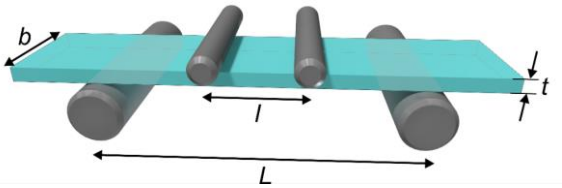
kur *b* yra stiklo juostelės plotis, *t* – jos storis, o *l* ir *L* – atitinkamai atstumas tarp vidinių ir išorinių laikiklių.

Kadangi stiklas yra trapi medžiaga ir gali lūžti dėl atsitiktinio defekto joje, laužymo rezultatai paprastai būna išsibarstę plačioje imtyje [142]. Dėl šios

priežasties rezultatai yra nagrinėjami naudojant Veibulio pasiskirstymą, siekiant apibrėžti tipinį stiklo stiprumą [143]:

$$T_f(\sigma) = 1 - exp\left(-\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^m \quad (17)$$

čia σ_0 ir m yra atitinkamai Veibulio skalės ir formos parametrai, o T_f – lūžimo tikimybė. Skalės parametras parodo tipinį stiklo stiprumą, kuris atitinka įtempį, kuriam esant lūžta 63,2 % bandinių [142]. Kita vertus, formos parametras nurodo duomenų išsibarstymo mastą – kuo didesnis, tuo duomenys mažiau išsibarstę [142].



22 pav. *Keturių taškų lenkimo sistemos schema.*

Testų metu išmatuoti maksimalūs įtempiai σ_n buvo išdėstomi didėjančia tvarka i = 1, 2, .., n ir kiekvienam iš jų buvo priskiriama santykinė tikimybė $0 < T_f < 1$. Kadangi realios lūžimo tikimybės nėra žinomos, tai jos buvo apskaičiuojamos naudojant statistinę formulę, kuri yra dažniausiai naudojama esant mažesnėms bandinių imtims (iki 50 vienetų) [144, 145]:

$$T_{f,i}(\sigma) = \frac{(i - 0.5)}{n}. \quad (18)$$

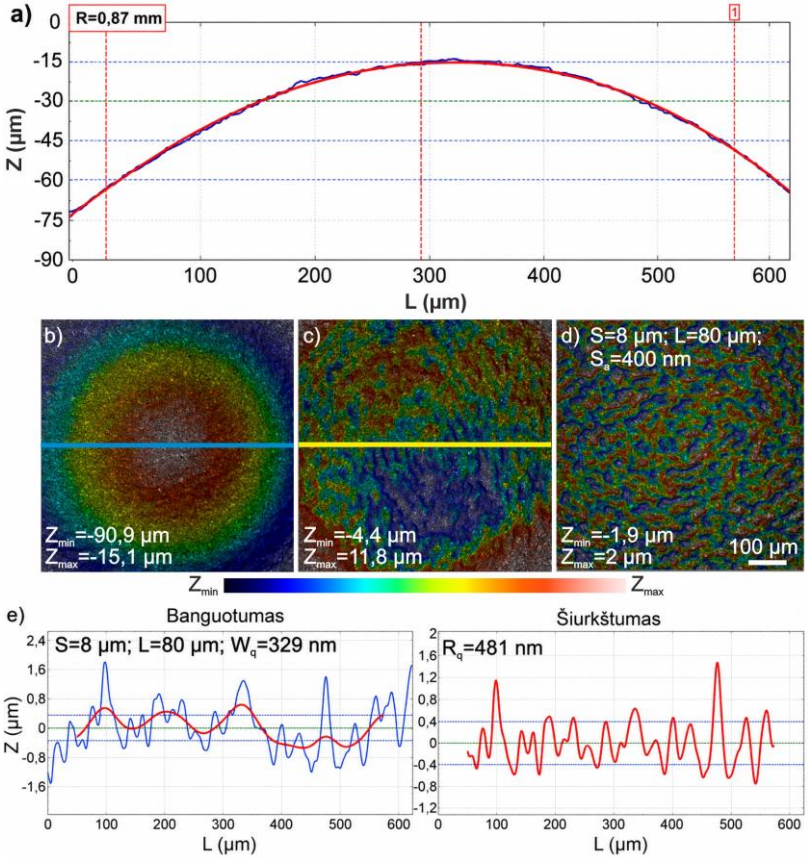
Galiausiai, (18) formulę aproksimavus Veibulio pasiskirstymu (17) yra gaunamos Veibulio skalės ir formos parametrų vertės.

3.6.4. Lęšių masyvo charakterizavimas

Tyrimų pabaigoje buvo formuojami išgaubti sferinių lęšių masyvai femtosekundiniais ir pikosekundiniais lazeriniais impulsais bei galiausiai poliruojami CO_2 lazeriu. Šie elementai buvo charakterizuojami prieš ir po poliravimo etapo. Buvo įvertinamas lęšių paviršiaus kreivumo radiusas R, efektyvusis lęšių židinio nuotolis EFL, linijinis šiurkštumas R_q bei banguotumas W_q, paviršiaus šiurkštumas S_a. Visi matavimai atlikti su optiniu profilometru.

Lęšių paviršiaus kreivumo radiusas buvo matuojamas 5 atskiriems lęšiams kiekviename suformuotame masyve lęšių paviršių profilius aproksimuojant pusapskritimiais (**žr. 23a pav.**). Panaudojant gautą vertę buvo naikinama paviršiaus forma iš išmatuotos topografijos (**žr. 23b pav.**) atimant gauto radiuso sferinį paviršių. Rezultatas pateiktas **23c paveiksle**. Tada atliekami

šiurkštumo / banguotumo matavimai 0,65 mm ilgyje (vieno lęšio diametras buvo 1 mm) ar 0,65×0,65 mm^2 plote priklausomai nuo matuojamo šiurkštumo parametro (**žr. 23d, e pav.**). Erdviniai filtrai naudoti matuoti nepoliruotų lęšių šiurkštumams buvo S=8 µm, L=80 µm, poliruotiems – S=2,5 µm ir L=80 µm.



23 pav. *(a) Lęšio paviršiaus kreivumo radiuso R matavimas lęšio paviršių (melsva kreivė) aproksimuojant apskritimu (raudona kreivė); (b) Išmatuoto lęšio paviršiaus topografija. Horizontali mėlyna linija atitinka profilį (a) dalyje; (c) Panaikinta išmatuoto paviršiaus forma iš topografijos (b) dalyje atimant išmatuoto radiuso (a) dalyje pussferę; (d) To paties paviršiaus šiurkštumo S_a topografija panaikinus banguotumą (naudoti erdviniai filtrai S=8 µm ir L=80 µm); (e) Išskirti linijiniai banguotumo W_q ir šiurkštumo R_q profiliai (raudonos kreivės) matuojant topografiją su panaikinta forma (c) dalyje (geltona horizontali linija).*

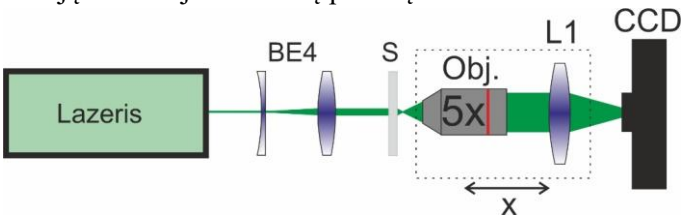
Aproksimavus išmatuotą lęšio paviršių apskritimu, buvo kartu įvertinamas ir pagamintų lęšių formos atitikimas idealiam paviršiui. Tam, vertikalioje ordinačių ašyje („Z“; **žr. 23a pav.**) buvo išmatuojamas vidutinis gauto paviršiaus nuokrypis nuo idealios kreivės – iš idealios kreivės (raudona kreivė, **žr. 23a pav.**) atimamas išmatuotas profilis (mėlyna kreivė; **žr. 23a pav.**).

Be to, išmatuotas lęšių paviršiaus kreivumo radiusas *R* buvo panaudojamas siekiant apskaičiuoti abiejų trukmių impulsais suformuotų elementų efektyvius židinio nuotolius *EFL*. Tai buvo atliekama panaudojant šią formulę:

$$EFL = \frac{R}{n_{stiklo} - n_{oro}}, \tag{19}$$

kur n_{stiklo} = 1,4482 ir n_{oro} = 1 atitinkamai yra stiklo ir oro lūžio rodikliai.

Galiausiai pagaminti lęšių masyvai ištestuoti optinėje sistemoje. Tam naudotas 520 nm bangos ilgio lazerinis diodas „Matchbox“ (Integrated Optics). Jo generuojamas pluoštas buvo išplečiamas tiek, kad apšviestų visus masyvo lęšius, o fokusuotas vaizdas registruojamas CCD kamera „Beamage-4M“ (**žr. 24 pav.**). Rezultate buvo galima įvertinti suformuotų optinių elementų funkciją fokusuojant lazerinį pluoštą.



24 pav. *Lęšių masyvo testavimo sistemos schema. Paveiksle S žymi lęšių masyvą, BE4 – lęšių sistemą naudotą išplėsti lazerinį pluoštą, Obj. – 5x mikroskopinis objektyvas, L1 – lęšis sufokusuojantis lazerinį pluoštą į CCD kamerą.*

3.7. Pluošto homogenizavimo lęšių masyvu principas

Pagaminti lęšių masyvai taip pat buvo panaudoti sukurti homogenizatorių, kuris formuotų tolygų apšvietimo profilį. Šis prietaisas gali būti sėkmingai pritaikomas tiek koherentiniams, tiek nekohrentiniams šviesos šaltiniams. Patys homogenizatoriai plačiai taikomi įvairiose technologijose, kuriose būtina užtikrinti tolygų energijos pasiskirstymą apšviečiamame medžiagos paviršiuje. Tai apima medžiagų apdirbimui naudojamas lazerines sistemas (koherentinius šaltinius) arba nekoherentinius šaltinius, pavyzdžiui, halogenines, kaitrines bei kitokio tipo lempas, integruojamas optiniuose matavimo prietaisuose ar litografijos įrenginiuose.

Tipinis atvaizduojantysis homogenizatorius susideda iš dviejų lęšių masyvų ir fokusuojančiojo lęšio [146]. Pirmasis lęšių masyvas padalina krentančią spinduliuotę ir fokusuoja ją į antrąjį lęšių masyvą. Antrasis lęšių masyvas kartu su Furjė lęšiu fokusuoja ir perkloja padalintus pluoštelius Furjė lęšio židinio plokštumoje (**žr. 25 pav.**). Dėl tokios konstrukcijos

homogenizatoriai pasižymi kompaktiškumu, patikimumu ir efektyvumu lyginant šviesos pluoštus.

Homogenizuoto intensyvumo skirstinio forma priklauso nuo masyvą sudarančių lęšių formos, o skirstinio dydis D – nuo lęšių periodo p, lęšių židinio nuotolių f_1 ir f_2, Furjė lęšio židinio F ir atstumo tarp lęšių masyvų a [14]:

$$D = \frac{pF(f_1 + f_2 - a)}{f_1 f_2}. \tag{20}$$

Šis sąryšis supaprastėja, jeigu yra tenkinama sąlyga, jog antrojo lęšių masyvo židinio nuotolis yra lygus atstumui tarp abiejų masyvo elementų ($a=f_2$):

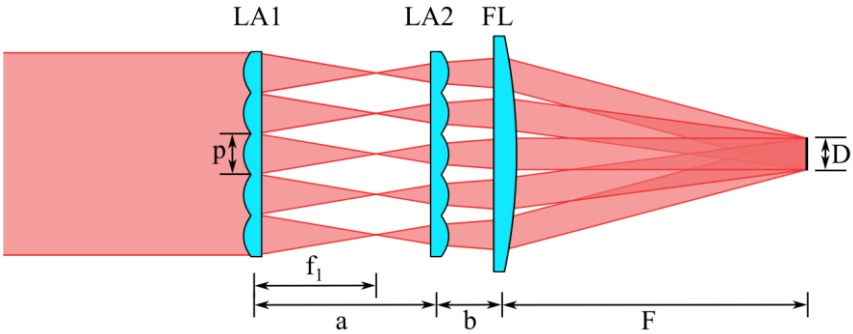
$$D = \frac{pF}{f_2}. \tag{21}$$

Atstumas tarp antrojo lęšių masyvo ir Furjė lęšio b nesudaro įtakos homogenizuoto pluošto dydžiui ar difrakcijai [147]. Tačiau dažniausiai modeliuose šis atstumas būna pasirenkamas artimas nuliui, o jis lemia tik homogenizuoto pluošto divergenciją θ [148]. Esant $b=0$ ir $a=f_2$, divergencija gali būti apskaičiuota taip:

$$tan(\theta) = \frac{1}{2}\left(\frac{D_{in} - 2p + D}{F} + \frac{f_2 p}{f_1 F}\right), \tag{22}$$

kur D_{in} yra į homogenizerį (į pirmąjį lęšių masyvą) krentančio pluošto skersmuo.

Homogenizuotas plokščios viršūnės intensyvumo skirstinys yra charakterizuojamas išmatuojant intensyvumo skirstinio stabilumą. Pagal ISO 13694:2018 standartą, tai yra atliekama matuojant pluošto energijos įtekio vidutinį kvadratinį nuokrypį nuo vidutinės vertės.



25 pav. *Pluošto homogenizatorius susidedantis iš dviejų lęšių masyvų LA1 ir LA2 bei Furjė lęšio FL. Paimta iš* [14].

4. Lazerinis borosilikatinio stiklo pjovimas oro ir vandens aplinkose

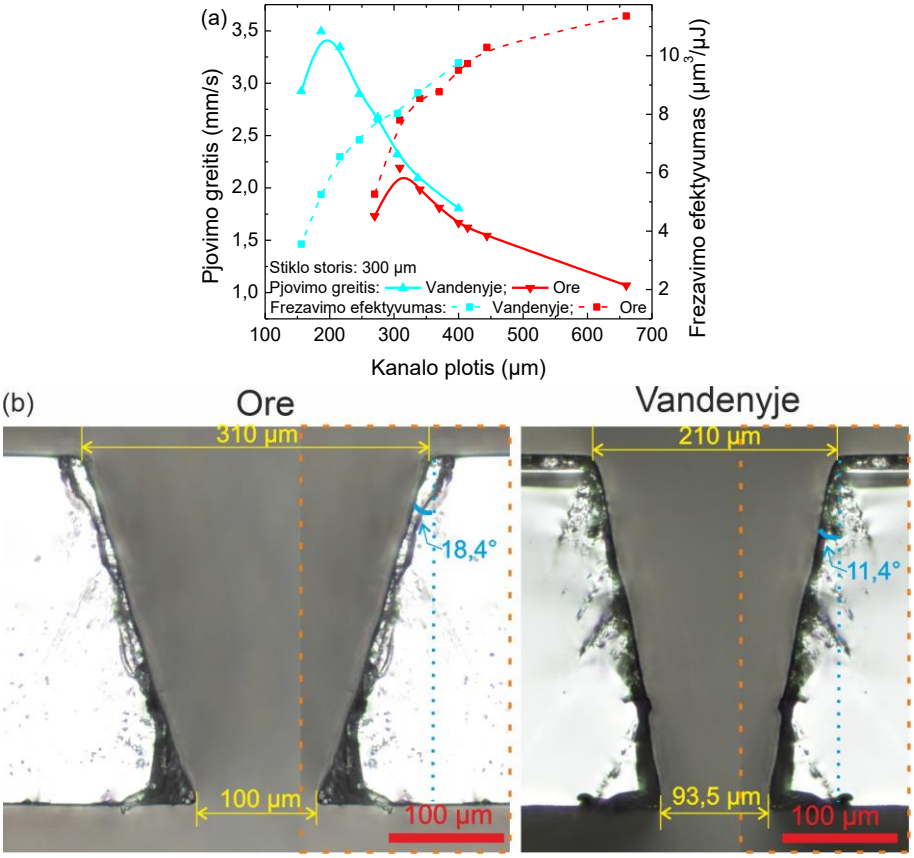
Šiame skyriuje aprašyti rezultatai buvo publikuoti [S1] moksliniame straipsnyje.

Lazerinis stiklų pjovimas yra vienas pirmųjų žingsnių optinio elemento gamyboje, kuris leidžia išpjauti norimos specifinės formos elementą iš didesnio stiklo padėklo. Šiam procesui tiesioginė lazerinė abliacija yra mažiau patraukli technologija dėl gana lėtos pjovimo spartos, ypač, kai reikia pjauti storesnes medžiagas. Tačiau buvo pademonstruota, kad tiek pjovimo spartą, tiek ir kokybę galima pagerinti stiklą pjaunant pro ploną tekančią vandens plėvelę [149]. Kita vertus, trūksta sisteminių tyrimų, kur būtų lyginami rezultatai, gauti atskirai optimizavus stiklų pjovimą oro ir vandens aplinkose, o tai bus aptariama šiame skyriuje. Bendrai darbas buvo orientuotas į dvi kryptis: analizuojama vandens sluoksnio įtaka lazerinio pjovimo parametrams bei tiriamas stiklo storio poveikis pjovimo procesui.

4.1. Vandens sluoksnio įtakos stiklo pjovimui tyrimas

Šioje dalyje bus aptariamas borosilikatinio stiklo pjovimo tyrimas panaudojant femtosekundinį lazerį Femtolux 30 (**žr. 3.1. skyrių**). Siekiant sistemiškai įvertinti vandens sluoksnio įtaką lazerinio stiklo pjovimo procesui, buvo pasirinktas 300 µm storio stiklas kaip pagrindinis tyrimo objektas. Papildomai buvo atlikti eksperimentai su 110 µm ir 550 µm storio stiklais, siekiant nustatyti storio įtaką procesui, kuri bus aptarinėjama sekančiame skyriuje. Vis dėlto, pjaunant 550 µm storio stiklą maksimalia lazerio galia be vandens sluoksnio, bandiniai skilo. Tuo tarpu 110 µm storio stikle vandens sluoksnio poveikis buvo mažiau pastebimas. Atsižvelgiant į šiuos kraštinius atvejus, 300 µm storio stiklas buvo pasirinktas kaip kompromisinis variantas, leidžiantis tirti vandens sluoksnio įtaką visame technologinių parametrų lange.

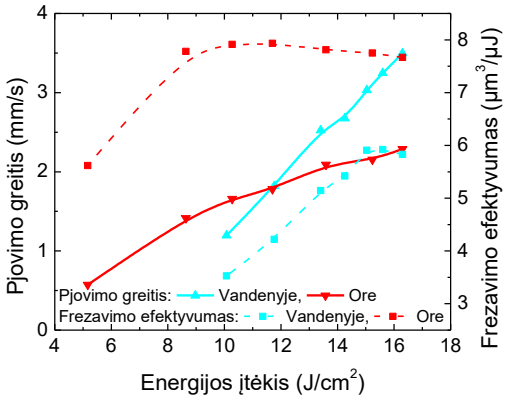
Eksperimentų metu pagal 3.3 skyriuje aprašytą algoritmą (**žr. 14 pav.**) sistemingai buvo keičiami šie parametrai: pjaunamo kanalo plotis, naudojamas energijos įtėkis ir impulsų persiklojimas lazerinio pluošto skenavimo ir jai statmena kryptimis.



26 pav. *Pjovimo greičio (vientisa kreivė) ir frezavimo efektyvumo (punktyrinė kreivė) priklausomybė nuo pjaunamo kanalo pločio, kai energijos įtėkis lygus 16,3 J/cm² (a). Stiklas buvo pjaunamas ore ir vandenyje. Grafiko taškai sujungti kreivėmis, kad būtų lengviau sekti tendencijas. (b) dalyje pateiktos ore ir vandenyje suformuotų pjūvių kraštų skerspjūvio nuotraukos. Oranžiniu punktyru apvestas kraštas yra veidrodinis atspindys, skirtas pilnam pjūvio skerspjūvio modeliui atvaizduoti, o veidrodinio atspindžio pozicija buvo parinkta taip, kad atitiktų išmatuotus pjūvio pločius. Pjūvio krašto veidrodinis atspindys naudotas, nes nepavyko stiklo nulaužti taip, kad matytųsi abu kraštai. Suformuotų pjūvių pločiai pjaunant stiklą ore ir vandenyje buvo atitinkamai 310 ir 210 μm.*

Pradiniai abiejų aplinkų (oro ir vandens) apdirbimo parametrai buvo vienodi ir pasirinkti iš ankstesnių tyrimų, kai borosilikatinis stiklas buvo pjaunamas su pikosekundiniais impulsais [137]: 400 kHz impulsų pasikartojimo dažnis, 1000 mm/s skenavimo greitis (persiklojimas skenavimo kryptimi 90,7 %), 15 μm žingsnis tarp skenuojamų linijų (persiklojimas statmena skenavimui kryptimi 44,4 %) ir 18,9 W vidutinė lazerio galia. Su šiais parametrais stikle buvo formuojami 5 mm ilgio skirtingo

pločio kanalai ir matuojamas jų pjovimo greitis bei frezavimo efektyvumas (atitinkamai vientisa ir punktyrinė kreivės; **žr. 26a pav.**). Siaurinant kanalą, pjovimo greitis iš pradžių augo dėl mažėjančio reikalingų skenuoti lygiagrečių linijų skaičiaus (**žr. 13 pav.**). Tačiau pasiekus kritinį kanalo plotį (310 µm ore ir 210 µm vandenyje), tolesnis jo mažinimas lėmė pjovimo greičio kritimą. Kanalo pločio apribojimą lemia formuojamo kanalo geometrija. Dėl lazerinio pluošto Gauso formos intensyvumo skirstinio giliausia struktūra yra suformuojama pluošto centre. Tęsiant abliaciją, formuojasi „V“ formos kanalas su tam tikru sienelių polinkio kampu, kuris priklauso nuo medžiagos, lazerinės sistemos parametrų bei aplinkos, kurioje sąveikauja lazerinis pluoštas ir stiklas (oras ar vanduo). Pjaunant stiklą, atsiranda lazerinės spinduliuotės energijos nuostoliai dėl sklaidos nuo pjūvio sienelių ir ekranavimo, kurį sukelia sugeneruota plazma bei abliacijos produktai, galintys vėl būti perlydomi pjūvio paviršiuje. Dėl šių priežasčių mažėja energijos kiekis, pasiekiantis kanalo dugną. Kritiniu atveju, kai kanalas yra per siauras, pjovimo procesas gali sustoti pasiekus tam tikrą gylį. Tad norint sėkmingai perpjauti bandinį, reikia platinti kanalą, kad bent jo centrinėje dalyje mažėtų minėti nuostoliai. Iš to seka, kad kuo storesnį stiklą pjausime, tuo platesnio pjūvio reikės.

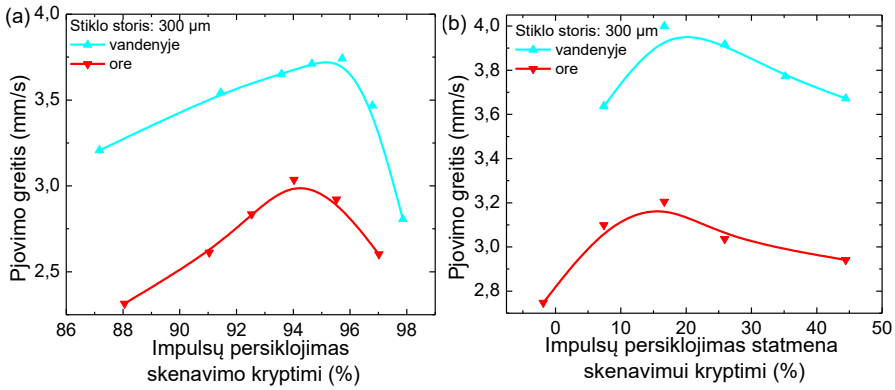


27 pav. *Pjovimo greičio (vientisa kreivė) ir frezavimo efektyvumo (punktyrinė kreivė) priklausomybė nuo naudoto energijos įtėkio, kai fiksuoti kanalo pločiai buvo atitinkamai 210 µm vandenyje ir 310 µm ore. Stiklas buvo pjaunamas ore ir pro vandenį. Grafiko taškai buvo sujungti kreivėmis lengvesniam tendencijų sekimui.*

Kita vertus, pjaunant stiklą vandens aplinkoje pastebėta, kad susidaro mažesnio polinkio kampo pjūvio sienelės (11,4° vandenyje ir 18,4° ore; **žr. 26b pav.**). Tikėtina, kad polinkio kampo sumažėjimą lėmė efektyvesnis abliacijos produktų pašalinimas iš pjūvio zonos, kas galėjo lemti mažesnę lazerio pluošto sklaidą ir didesnį energijos įtėkį kanalo dugne. Tai suteikia

galimybę formuoti siauresnius pjūvius ir taip didinti pjovimo greitį. Šiuo atveju didžiausias pjovimo greitis pjaunant pro vandenį buvo 1,6 karto didesnis nei ore ir siekė 3,5 mm/s (vientisos kreivės; **žr. 26a pav.**).

Vertinant frezavimo efektyvumą, matome, kad jis augo platinant formuojamą kanalą abejose aplinkose. Platinant kanalą, plokščio kanalo dugno plotis atitinkamai didėjo lyginant su kanalo sienelių pločiu, kas lėmė mažesnę pluošto sklaidos nuo sienelių kraštų įtaką. Tikėtina, kad dėl to didėjo pašalinamos medžiagos tūris. Tuose taškuose, kur kanalo pločiai buvo vienodi tiek ore, tiek vandenyje (300, 350 ir 400 µm), frezavimo efektyvumo vertės buvo panašios – frezavimo efektyvumų neatitikimas nesiekė 3 procentų.



28 pav. *Pjūvio greičio priklausomybė nuo impulsų persiklojimo skenavimo kryptimi (a) ir jai statmena kryptimi (b). Tarpas tarp impulsų statmena kryptimi atitinka tarpą tarp skenuojamų lygiagrečių linijų. Impulsų persiklojimas skenavimo kryptimi (b) dalyje fiksuotas ties efektyviausia (a) dalies verte. Lazerinio pluošto diametras sąsmaukoje buvo 27 µm.*

Fiksavus kanalo pločius, kuriais 300 µm storio borosilikatinis stiklas buvo pjaunamas greičiausiai (210 µm vandenyje ir 310 µm ore), buvo atliekami pjūviai stikle varijuojant naudojamą energijos įtėkį nuo maksimalios vertės (16,3 J/cm^2) iki tol, kol stiklas nebebuvo prapjaunamas (**žr. 27 pav.**). Bendrai, pjaunant stiklą ore ir esant tiems patiems energijos įtėkiams, buvo stebimas didesnis frezavimo efektyvumas lyginant su pjovimu pro tekantį vandens sluoksnį (punktyrinės kreivės; **žr. 27 pav.**). Tai sietina su ore formuojamu platesniu pjūviu. Vertinant maksimalias frezavimo efektyvumo vertes (esant 15,6 J/cm^2 energijos įtėkiui vandenyje ir 11,7 J/cm^2 ore), nustatyta, kad stiklo medžiagos pašalinimas ore buvo 25,3 % efektyvesnis negu pro vandens sluoksnį (atitinkamai 7,9 µm^3/µJ ore ir 5,9 µm^3/µJ vandenyje). Kita vertus, ties šiomis energijos įtėkio vertėmis, pjovimo greitis pjaunant pro vandenį buvo 1,8 karto didesnis ir siekė 3,25 mm/s vandenyje lyginant su 1,8 mm/s ore. Tokį rezultatą galima paaiškinti tuo, kad dėl vandenyje formuojamo siauresnio frezavimo kanalo buvo kompensuoti frezavimo spartos nuostoliai

vandenyje apribojant medžiagos pašalinamą tūrį, kas lėmė spartesnį pjovimo greitį.

Be to, galima matyti, kad efektyvumo maksimumas pjaunant pro vandens sluoksnį buvo pasiekiamas ties didesniais energijos įtėkiais nei ore (15,6 J/cm^2 vandenyje ir 11,7 J/cm^2 ore). Galime spekuliuoti, kad vandens aplinkoje, dėl efektyvaus aušinimo, efektyviau pašalinamų abliacijos produktų bei mažesnių matmenų ir trumpiau gyvuojančios sugeneruotos plazmos, galima efektyviai išnaudoti didesnę lazerio impulsų energiją stiklo pjovimui lyginant su pjovimu ore. Kita vertus, dėl vandens sluoksnio netiesinės lazerio pluošto sugerties, galėjo būti ribojamas krentančio pluošto į formuojamo kanalo dugną įtėkis, kas reikštų, kad yra reikalingi didesni energijos įtėkiai pjaunant stiklą vandenyje.

Abejose aplinkose fiksavus energijos įtėkius, lėmusius didžiausią 300 µm storio stiklo frezavimo efektyvumą (15,6 J/cm^2 vandenyje ir 11,7 J/cm^2 ore), impulsų pasikartojimo dažnis buvo didinamas tol, kol šios energijos įtėkio vertės buvo pasiektos ties maksimalia lazerio galia. Ore šis impulsų pasikartojimo dažnis siekė 620 kHz, o vandenyje – 433 kHz. Tada išlaikant iki šiol fiksuotus parametrus (ore pjūvio plotis 310 µm, energijos įtėkis 11,7 J/cm^2, impulsų pasikartojimo dažnis 620 kHz, vidutinė galia 20,8 W, o vandenyje atitinkamai 210 µm, 15,6 J/cm^2, 433 kHz, 19,3 W) buvo pjaunamas stiklas keičiant tarpą tarp lazerinių impulsų modifikacijų centrų pluošto skenavimo kryptimi (keičiamas skenavimo greitis; **žr. 28a pav.**) ir jai statmena (keičiamas tarpas tarp skenuojamų linijų; **žr. 28b pav.**).

Išlaikant pastovų pradinį tarpą tarp skenuojamų linijų (15 µm, kas atitinka 44,44 % impulsų persiklojimą statmena skenavimui kryptimi), buvo varijuojamas impulsų persiklojimas tiesiogine skenavimo kryptimi (**žr. 28a pav.**). Nustatyta, kad visame tirtame impulsų persiklojimų diapazone (nuo 87 % iki 98 %) stiklo pjovimo greitis vandens aplinkoje buvo vidutiniškai 1,3 karto didesnis nei ore. Pjovimo greičio maksimumai pasiekti, kai impulsų persiklojimas skenavimo kryptimi siekė 94,0 % ore ir 95,7 % vandenyje. Atitinkamai, optimalus geometrinis tarpas tarp impulsų centrų vandens aplinkoje buvo 28,6 % mažesnis. Vėl galime spekuliuoti, kad skirtumas sietinas su efektyvesniu stiklo aušinimu vandens terpėje. Dėl intensyvesnio šilumos atidavimo vandenyje reikalingas didesnis impulsų persiklojimas (didesnė energijos dozė), kad abliacijos zonoje būtų pasiekta stiklo garavimo temperatūra. Ore stiklas aušta lėčiau, todėl pasireiškia šiluminė akumuliacija ir pakanka mažesnio impulsų persiklojimo abliacijai palaikyti.

Paskutiniu žingsniu buvo varijuojamas impulsų persiklojimas statmena skenavimui kryptimi – keičiamas tarpas tarp skenuojamų lygiagrečių linijų taip, kad išliktų tas pats kanalo plotis (**žr. 28b pav.**). Šiuo atveju, impulsų

persiklojimai buvo fiksuoti lazerinio pluošto skenavimo kryptimi, kurie lėmė didžiausius pjovimo greičius (**žr. 28a pav.).** Atlikus pjovimus, pjovimo greičio maksimumas buvo pasiektas ties tuo pačiu persiklojimu abejose aplinkose, lygiu 16,67 %. Išlaikant šį atstumą, pjovimo greičiai atitinkamai buvo lygūs 3,2 ir 4 mm/s ore ir vandenyje.

Bendrai lyginant lazerio impulsų persiklojimą skenavimo ir jai statmena kryptimi, buvo įvertintas suminis dozės tankis vienetiniame paviršiaus plote (energijos įtėkis *F* padaugintas iš persiklojančių impulsų skaičiaus *N*). Taigi dėl didesnio energijos įtėkio ir impulsų persiklojimo, suminis dozės tankis vienetiniame plote buvo apie 1,8 karto didesnis pjaunant stiklą pro vandens sluoksnį (667,1 J/cm^2 vandenyje ir 361,6 J/cm^2 ore).

4.2. Skirtingo storio borosilikatinių stiklų pjovimo tyrimas

Tuo pačiu algoritmu (**žr. 3.3 skyrių, 14 pav.**) buvo rasti parametrai ir kitų storių (110 ir 550 µm) borosilikatinių stiklų pjovimui. Bendrai, lazerinės sistemos parametrai, kuriais buvo gauti didžiausi pjovimo greičiai pjaunant skirtingo storio stiklus ore ir pro vandens sluoksnį pateikti **3 ir 4 lentelėse**.

Ore pjaunant 550 µm storio borosilikatinį stiklą maksimalia vidutine lazerio galia, buvo stebimas stiklo skylimas dėl terminės akumuliacijos jame nulemto įtempių formavimosi. Tik 110 ir 300 µm storio stiklai buvo išpjauti ore, išnaudojant visą lazerio galią. Dėl šios priežasties eksperimentai ore buvo atlikti dviem etapais – ties mažomis (P_{min}) ir didelėmis (P_{max}) vidutinėmis galiomis. P_{min} vidutinė lazerio galia buvo apribota iki 1,9 – 3,35 W (1,9 W – 110 µm, 3,35 W – 300 µm ir 3,3 W – 550 µm storio stiklui), sumažinant impulsų pasikartojimo dažnį iki 100 kHz, bet išlaikant energijos įtėkius, kurie lėmė efektyvų stiklo pjovimą kiekvienam stiklo storiui atskirai. Orientuojantis tik į maksimalias pjovimo spartas, stiklas pro vandenį buvo pjaunamas tik didelės galios režime (išlaikant energijos įtėkį, bet panaudojant maksimalią lazerio galią).

Atlikus pjūvius skirtingo storio stikluose, optiniu mikroskopu buvo įvertinti pjūvio sienelių polinkio kampai *a* (**žr. 17 pav.**). Rezultatai parodė, kad sienelių polinkio kampas mažėjo storėjant stiklui. Pjaunant stiklą pro vandens sluoksnį, polinkio kampas sumažėjo nuo 13,1º iki 10,7º (nuo 110 iki 550 µm storio stiklams). Vidutinis polinkio kampas buvo lygus 11,9 ± 0,4º.

Kita vertus, ore atliktų pjūvių sienelių polinkio kampas buvo žymiai didesnis ir nepriklausė nuo naudotos vidutinės lazerio galios. Pjaunant 110, 300 ir 550 µm storio stiklus, atitinkamai pjūvio sienelės polinkio kampas buvo 27,5 ± 2,6º, 18,9 ± 0,6º ir 17,3 ± 1,0º.

Lentelė 3. *Apdirbimo parametrai ir kiekybiniai pjovimo rezultatai pjaunant stiklą ore su femtosekundiniu lazeriu. Vertės skliausteliuose gautos naudojant mažos vidutinės lazerio galios režimą (P_{min}), o ne skliausteliuose – išnaudojant visą lazerio vidutinę galią (P_{max}). Kanalo plotis buvo išlaikomas tas pats esant abiem galios režimams.*

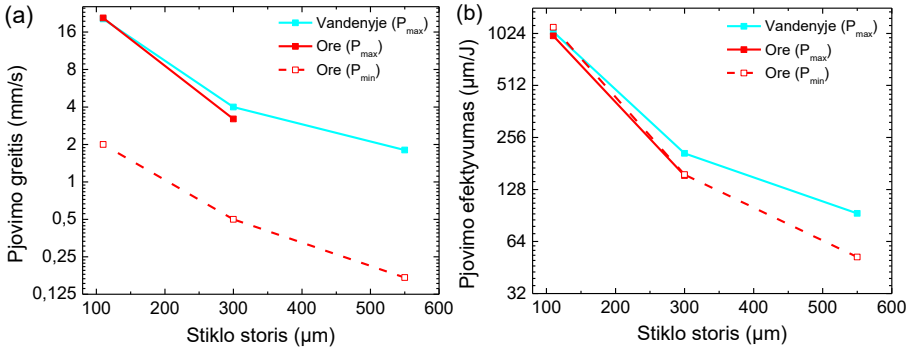
Stiklo storis, µm	Energijos įtėkis, J/cm^2	Impulsų pasikartojimo dažnis, kHz	Impulsų persiklojimas skenavimo kryptimi, %	Impulsų persiklojimas statmena skenavimui kryptimi, %	Kanalo plotis, µm	Pjovimo greitis, mm/s	Pjovimo efektyvumas, µm/J	Frezavimo efektyvumas, µm^3/µJ
110	6,7	1100 (100)	94,6	25,9	150	20,8 (2)	990 (1111)	10,6 (11,3)
300	11,7	620 (100)	94	16,7	310	3,2 (0,5)	154 (156)	8,6 (8,8)
550	11,5	- (100)	90,7	25,9	350	- (0,17)	- (52)	- (7,9)

Lentelė 4. *Apdirbimo parametrai ir kiekybiniai pjovimo rezultatai pjaunant stiklą pro vandenį su femtosekundiniu lazeriu. Pro vandens sluoksnį buvo pjauta tik su didžiausia vidutine lazerio galia (P_{max}).*

Stiklo storis, µm	Energijos įtėkis, J/cm^2	Impulsų pasikartojimo dažnis, kHz	Impulsų persiklojimas skenavimo kryptimi, %	Impulsų persiklojimas statmena skenavimui kryptimi, %	Kanalo plotis, µm	Pjovimo greitis, mm/s	Pjovimo efektyvumas, µm/J	Frezavimo efektyvumas, µm^3/µJ
110	12,9	530	92,3	53,7	135	20,4	1046	8,7
300	15,6	433	95,7	16,7	210	4	207	7,2
550	15,6	433	95,7	16,7	260	1,8	93	7,3

Apibendrinant visų tirtų storių stiklų rezultatus, pjaunant ore, dėl didesnių sienelių polinkio kampų, reikėjo praplatinti pjaunamus kanalus, siekiant, kad pjaunamo kanalo gylis neįsisotintų. Kanalus praplatinus vidutiniškai 38 %, buvo gaunamas iki 18,3 % didesnis frezavimo efektyvumas nei pjaunant pro vandenį dėl didesnio pašalinto medžiagos tūrio (**žr. 3 ir 4 lentelėse**). Vis dėlto,

pjūviai, atlikti pro vandens sluoksnį, buvo iki 1,5 karto siauresni, taip užtikrinant mažesnį medžiagos pašalinamą kiekį. Todėl, nors frezavimo efektyvumas ir buvo mažesnis stiklą pjaunant pro vandenį, bet pjovimo greitis buvo panašus pjaunant 110 µm storio stiklą ir jau 25 % didesnis apdirbant 300 µm storio stiklus (**žr. 29a pav.**).



29 pav. *Pjovimo greičio (a) ir pjovimo efektyvumo (b) priklausomybės nuo pjauto stiklo storio, kai stiklas buvo pjaunamas mažos P_{min} ir didelės P_{max} galių režimais ore bei pro tekantį ploną vandens sluoksnį P_{max} režimu.*

Storiausių 550 µm storio stiklų pjovimo greičių negalime tiesiogiai palyginti P_{max} režime, nes ore šių stiklų prapjauti nepavyko. Šie stiklai ore buvo išpjauti tik P_{min} režimu. Lyginant P_{min} režimą ore ir P_{max} režimą vandenyje, buvo gauta, kad pro vandenį pjauti stiklą buvo apie 10,6 karto greičiau (**žr. 29a pav.**).

Tikslesnis palyginimas galimas vertinant pjovimo efektyvumus (**žr. 29b pav.**), kur pjovimo greitis yra sunormuotas vidutinės lazerio galios atžvilgiu. Rezultatai patvirtino tą pačią tendenciją: pjovimas vandenyje tampa vis efektyvesnis didėjant stiklo storiui. Ploniausio stiklo atveju efektyvumo vertės išlieka panašios – apdirbimas P_{min} režimu ore buvo atitinkamai 10,8 % ir 6,6 % efektyvesnis nei P_{max} režimuose ore ir vandenyje. Tačiau galimybė formuoti siauresnius pjūvius bei našesnis abliacijos produktų pašalinimas vandenyje lėmė 25,6 % didesnį pjovimo efektyvumą 300 µm stiklui ir 44,1 % didesnį pjovimo efektyvumą 550 µm stiklui.

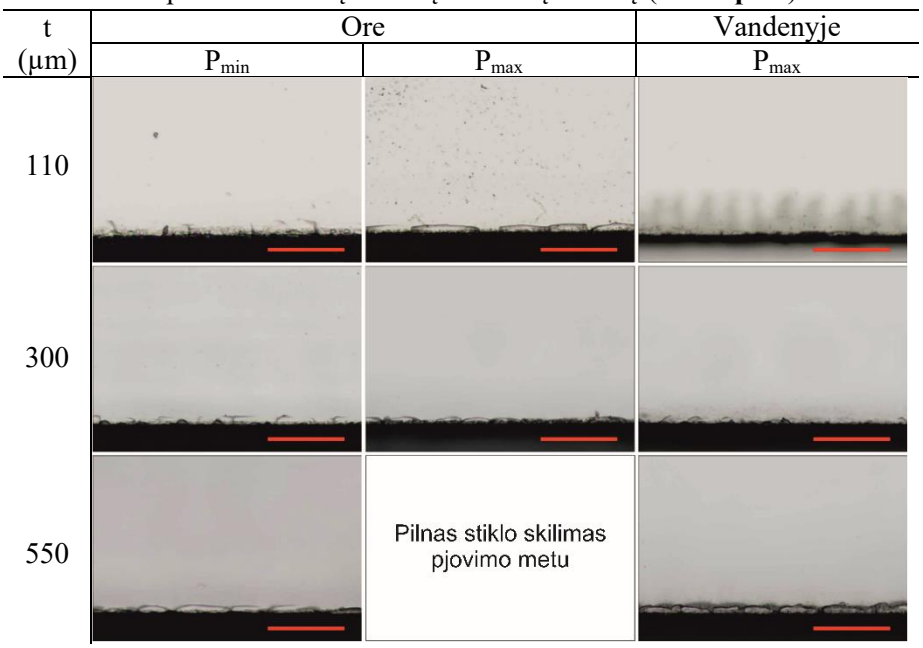
4.3. Borosilikatinio stiklo lazerinio pjūvio kokybės analizė

Galiausiai, galutiniais parametrų rinkiniais buvo išpjautos 192 juostelės – po 24 juosteles kiekvienam režimui (aštuoni parametrų rinkiniai; **žr. 3 ir 4 lenteles**). Juostelių ilgis ir plotis buvo atitinkamai 26 × 5 mm^2. Išpjautų juostelių kokybė buvo įvertinta matuojant pjūvio kraštų apskeldėjimus, pjūvio sienelės šiurkštumą bei pjūvio įtaką bandinio stiprumui (juostelės atsparumą lenkimui). Vienoje stiklo juostelėje buvo vertinami du pjūviai, o išmatavus

vienam režimui 24 juosteles, rezultatai buvo suvidurkinami. Matavimų metodika detaliau aprašyta **3.6 skyriuje**.

4.3.1. Pjūvio krašto paviršiaus kokybės analizė

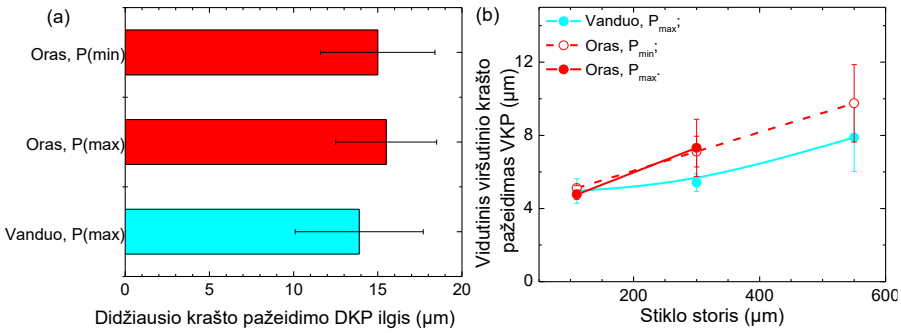
Pjūvio krašto apskeldėjimas buvo įvertinamas matuojant du parametrus: didžiausią krašto pažeidimą (DKP (w_{max})) ir vidutinį krašto pažeidimą (VKP (w_{vid})) abejose pjūvio pusėse. Linijiniai įskylimai nuo pjūvio krašto taip pat buvo laikomi pažeidimais ir įtraukti į rezultatų analizę (**žr. 19 pav.**).



30 pav. *Femtosekundiniu lazeriu išpjautų stiklo juostelių viršutinių kraštų optinės nuotraukos. Eilutėmis atskirti skirtingi stiklo storiai t, o stulpeliais – skirtingi vidutinės galios režimai. Čia P_{max} – maksimali, o P_{min} – limituota (<4 W) vidutinė lazerio galia. Pjūviai atlikti ore ir pro vandens sluoksnį. Raudona skalė atitinka 100 µm ilgį.*

Tipinė pjūvio kokybė viršutinėje stiklo pusėje (tai yra paviršiuje nuo kurio buvo pradėtas pjovimas) pavaizduota **30 paveiksle**. Pjūvio kraštų nuotraukose galima matyti, kad vizuali kraštų kokybė praktiškai nepriklausė nuo pjovimo sąlygų, kuriomis buvo pjaunamas stiklas su femtosekundiniais lazeriniais impulsais (pjauta ore ar vandenyje, mažos ar didelės galios režime). DKP viršutiniame paviršiuje visais atvejais buvo panašus ir svyravo siaurame rėžyje nuo 13,9 ± 3,8 µm (vandenyje) iki 15,5 ± 3,0 µm (ore, naudojant P_{max} režimą). Vidutinė vertė buvo lygi 14,8 ± 0,8 µm (**žr. 31a pav.**). Šiame grafike

rezultatai, pjaunant skirtingus stiklo storius, buvo suvidurkinti, nes didžiausių pažeidimų ilgiai nepriklausė nuo stiklo storio.



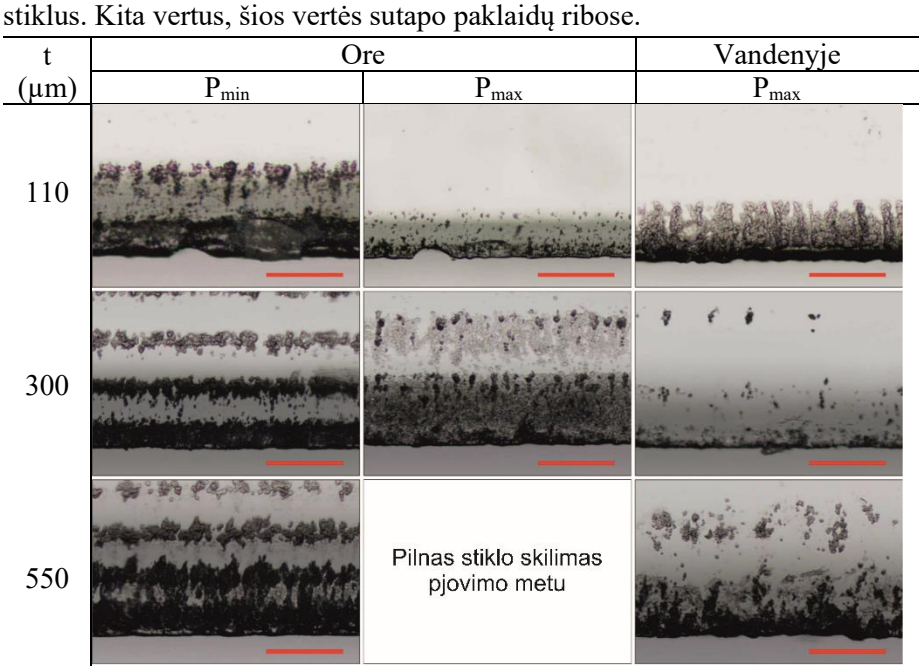
31 pav. *Didžiausių pažeidimų ilgiai DKP išmatuoti pjūvių kraštuose viršutinėje stiklo pusėje (a) bei vidutinio viršutinio krašto pažeidimų VKP priklausomybė nuo stiklo storio (b). P(min) žymi limituotą (<4 W), o P(max) – didžiausią vidutinę lazerio galią. Pjūviai atlikti ore ir pro vandens sluoksnį naudojant femtosekundinį IR lazerį. DKP vertės, gautos pjaunant skirtingo storio stiklus, buvo suvidurkintos.*

Viršutiniame paviršiuje gaunami paklaidų ribose panašūs DKP skirtinguose pjovimo režimuose galėjo būti gauti dėl panašių energijos įtėkių (kartu ir panašios energijos dozės, priklausančios nuo įtėkio) ir vandens didinamo stiklo aušinimo. Šiuo atveju pažeidimo dydį pagrinde lemia energijos įtėkis, tai yra didesnis įtėkis – didesnis pažeidimas [38]. Pjaunant stiklą pro vandenį reikėjo didesnių energijos įtėkių, o tai turėjo lemti didesnius pažeidimus. Tačiau efektyvesnis stiklo aušinimas vandeniu galėjo kompensuoti terminius įtempius. Kita vertus, dėl vandens sluoksnio netiesinės lazerio spinduliuotės sugerties galėjo būti ribojamas į formuojamo kanalo dugną krentančio pluošto įtėkis, o tai taip pat galėjo sumažinti pažeidimus pjūvio krašte.

Abejose aplinkose ploniausias stiklas buvo pjaunamas mažesniais energijos įtėkiais nei storesni bandiniai, kas turėjo sąlygoti mažesnį pažeidimą. Vis dėlto dėl plono stiklo geometrijos galėjo pakisti šilumos akumuliacijos mechanizmai, skatinantys didesnių įtempių formavimąsi. Storesni 300 ir 550 μm storio stiklai buvo pjaunami panašiais energijos įtėkiais tiek ore (apie 11,6 J/cm^2), tiek vandenyje (15,6 J/cm^2), todėl ir pažeidimai išliko panašūs.

Didesnė rezultatų sklaida buvo stebima vertinant viršutinio paviršiaus VKP. Šiuo atveju rezultatai priklausė ir nuo stiklo storio (**žr. 31b pav.**). Pjaunant 110 μm storio stiklą, viršutinio paviršiaus VKP ilgis buvo apytiksliai vienodas su visais testuotais režimais ir siekė 4,95 ± 0,2 μm. Storėjant stiklui,

viršutinio paviršiaus VKP pjaunant pro vandenį buvo mažesnis nei pjaunant stiklą ore: 25 % (5,4 ± 0,5 µm lyginant su 7,2 ± 1,2 µm) ir 19 % (7,9 ± 1,9 µm lyginant su 9,8 ± 2,1 µm) mažesnis atitinkamai pjaunant 300 ir 550 µm storio stiklus. Kita vertus, šios vertės sutapo paklaidų ribose.

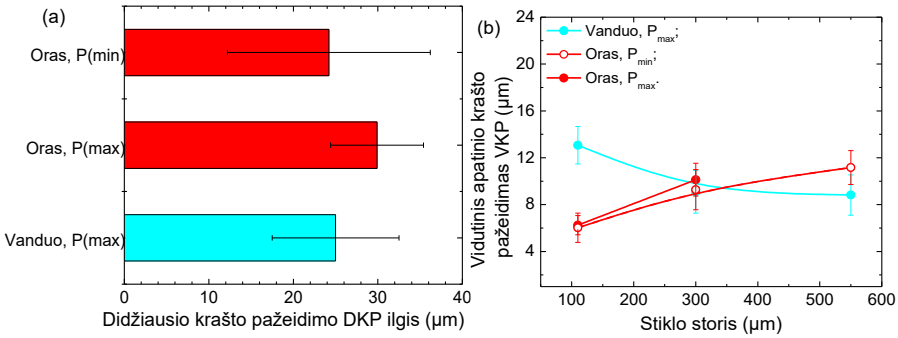


32 pav. *Femtosekundiniu lazeriu išpjautų stiklo juostelių apatinių kraštų optinės nuotraukos. Eilutėmis atskirti skirtingi stiklo storiai t, o stulpeliais – skirtingi vidutinės galios režimai. Čia P_{max} – maksimali, o P_{min} – limituota (<4 W) vidutinė lazerio galia. Pjūviai atlikti ore ir pro vandens sluoksnį. Raudona skalė atitinka 100 µm ilgį. Juodi paviršiaus pažeidimai nebuvo įskaičiuojami vertinant DKP ir VKP.*

Viršutinio paviršiaus VKP verčių augimas didėjant stiklo storiui galėtų būti sietinas su pažeidimų akumuliacija medžiagoje bei akumuliuota lazerio pluošto energijos doze. Ploniausias (110 µm) stiklas abejose aplinkose buvo prapjaunamas vienodu greičiu, todėl ir sugeneruotos VKP vertės išliko minimalios. Didėjant bandinio storiui, proporcingai augo reikalingų skenavimų skaičius, lemiantis ilgesnį pjovimo procesą bei augančią energijos dozę. Kita vertus, vandens sluoksnio efektyvesnis stiklo aušinimas galėjo mažinti temperatūrą pjaunamo kanalo aplinkoje, kas galėjo sąlygoti mažesnius terminius įtėmpius, todėl pjaunant pro skysčio sluoksnį VKP vertės storėjant stiklui galėjo augti lėčiau nei ore.

Gautos panašios DKP vertės gali indikuoti, kad ilgesnė apdirbimo trukmė nedidino maksimalaus galimo nuskėlimo dydžio. Ilgesnis stiklo kaitinimas

storesniuose stikluose galėjo generuoti didesnį skaičių vidutinio dydžio pažeidimų, kurie yra artimi maksimaliai DKP vertei.



33 pav. *Didžiausių pažeidimų (DKP) ilgiai išmatuoti pjūvių kraštuose apatiniame stiklo paviršiuje (a) bei vidutinio apatinio krašto pažeidimų (VKP) ilgio priklausomybė nuo stiklo storio (b). P(min) žymi limituotą (<4 W), o P(max) – didžiausią vidutinę lazerio galią. Pjūviai atlikti ore ir pro vandens sluoksnį naudojant femtosekundinį lazerį. DKP vertės, gautos pjaunant skirtingo storio stiklus, buvo suvidurkintos.*

Tuo tarpu tipinė pjūvio krašto kokybė apatiniame paviršiuje pateikta **32 paveiksle**. Nuotraukos atskleidė, kad apatinėje stiklo dalyje susidarė ne tik anksčiau nagrinėti pažeidimai, tokie kaip įskylimai ir apskeldėjimai (**žr. 19 pav.)**, bet ir periodiniai pažeidimai šalia pjūvio krašto (juodos periodinės linijos, atsikartojančios tolstant nuo krašto; **žr. 32 pav.**). Panašūs pažeidimai buvo aptinkami ir pjaunant stiklą su pikosekundiniu lazeriu, generuojančiu 1064 nm bangos ilgio spinduliuotę [51]. Siekiant supaprastinti matavimus, šie periodiniai pažeidimai nebuvo įtraukti vertinant didžiausius ir vidutinius pažeidimus kraštuose, bet bus aptarti vėliau.

Tyrinėjant skirtingo storio stiklo juosteles, buvo pastebėta, kad didžiausi pažeidimai apatiniame stiklo paviršiuje (DKP) buvo 1,8 karto didesni nei viršutiniame (**žr. 33a pav.**). Taip gali būti dėl to, kad pjovimo proceso metu apatinėje pjūvio pusėje susidaro sąlygos, kai lieka plonas stiklo sluoksnis (prieš pilnai prapjaunant stiklą). Yra pademonstruota, kad didžiausias slėgis ir įtempiai susidaro apdirbamo kanalo (skylės) dugne [38]. Šis plonas sluoksnis galimai neišlaiko pjaunamo kanalo dugne susiformavusio slėgio bei jo sukeltų įtempių, dėl ko tiesiog išlūžta. Išlūžusio sluoksnio pasekmė – stipresnis krašto apskeldėjimas.

Mažiausi pažeidimai buvo sugeneruojami pjaunant stiklą ore su mažos galios režimu, lygūs 24,2 ± 12,0 μm. Panaudojus maksimalią vidutinę lazerio galią, apatinio paviršiaus DKP padidėjo iki 29,9 ± 5,5 μm. Kita vertus, išnaudojant visą lazerio galią ir pjaunant pro vandenį, didžiausių apskeldėjimų

ilgis vėl sumažėjo iki panašaus dydžio kaip pjaunant stiklą ore su mažos galios režimu. Šiuo atveju DKP buvo lygus 25,0 ± 7,5 μm.

Išskirtinės tendencijos buvo stebimos vertinant apatinio paviršiaus VKP vertes. Pjaunant stiklą pro vandenį, vidutinis pažeidimų ilgis mažėjo didėjant stiklo storiui – nuo 13,1 ± 1,6 μm ploniausiame stikle iki 9,1 ± 1,8 μm, kai stiklo storis siekė 300 μm, ir iki 8,8 ± 1,7 μm storiausiame – 550 μm – stikle (**žr. 33b pav.**).

Kita vertus, pjaunant stiklą ore, VKP apatiniame paviršiuje nuolat didėjo kartu su stiklo storiu (**žr. 33b pav.**). Ploniausiame stikle vidutinis pažeidimų ilgis apytiksliai sutapo pjaunant abiem galios režimais (P_{min} ir P_{max}). Šiuo atveju vidutinė apatinio paviršiaus VKP vertė siekė 6,1 ± 0,2 μm. Rezultatai paklaidų ribose sutapo pjaunant ir storesnį 300 μm storio stiklą – apatinio paviršiaus VKP buvo šiek tiek didesnis naudojant maksimalią lazerio galią (10,1 ± 1,4 μm lyginant su 9,3 ± 1,7 μm). Pjaunant storiausius stiklus, apatinio paviršiaus VKP pasiekė 11,2 ± 1,7 μm vertę ir tik šiuo atveju tapo 21,1 % didesnis nei stiklą pjaunant pro vandenį.

Panašios VKP vertės apatiniame pjūvio paviršiuje, gautos pjaunant 300 ir 550 μm storio stiklų bandinius ore nepriklausomai nuo galios režimo (P_{min} ar P_{max}), sietinos su labai artimomis naudoto energijos įtėkio vertėmis (atitinkamai 11,7 J/cm^2 ir 11,5 J/cm^2). Dėl analogiško energijos įtėkio abiejuose stikluose buvo sugeneruoti panašaus dydžio briaunos pažeidimai. Ploniausiame (110 μm) stikle ore gautos mažiausios VKP vertės taip pat koreliuoja su mažiausiu naudotu energijos įtėkiu (6,7 J/cm^2).

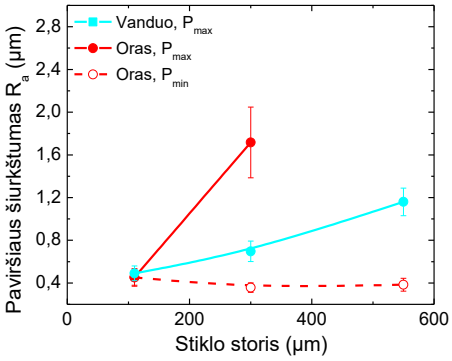
Vis dėlto ši spekuliacija nepaaiškina rezultatų, gautų pjaunant stiklą pro tekantį vandens sluoksnį. VKP tendencija storėjant stiklui buvo priešinga nei viršutiniame krašte ar apatiniame krašte pjaunant ore. VKP mažėjo storėjant stiklui. Tai galėjo lemti įvairios priežastys – šilumos akumuliacijos pokyčiai storėjant stiklui, dėl gilesnio kanalo didėjantys lazerio pluošto ekranavimo reiškiniai ar purškiamo vandens sluoksnio sukeltų stiklo mikrovibracijų pokyčiai.

Apibendrinant rezultatus, vandens sluoksnio integravimas į lazerinį stiklo pjovimo procesą leido bendrai pagerinti pjūvio kraštų kokybę, ypač apdirbant storesnius stiklus. Nors pjaunant ploniausią (110 μm) stiklą pro vandenį buvo gaunami didesni apatinio krašto vidutiniai pažeidimai VKP, didėjant stiklo storiui našesnis stiklo aušinimas vandeniu leido įžvelgti akivaizdesnę naudą: 300 μm stiklo atveju VKP susilygino, o storiausio (550 μm) bandinio atveju VKP buvo 21,2 % mažesnis. Analogiška tendencija stebėta ir viršutinėje pjūvio pusėje, kur 300 ir 550 μm storio stiklams VKP buvo iki 25,5 % mažesni nei pjaunant ore. Be to, esminis technologinis privalumas – vandens terpė iki 16,4 % sumažino kritinius didžiausius krašto pažeidimus DKP abiejose pjūvio

pusėse (lyginant tik P_{max} režimą). Tai leidžia daryti išvadą, kad borosilikatinio stiklo pjovimas pro vandenį ne tik padeda formuoti siauresnius pjūvius, taip optimizuojant medžiagos sąnaudas ir spartinant procesą, bet ir užtikrina aukštesnę pjūvio krašto kokybę.

4.3.2. Pjūvio sienelės šiurkštumo analizė

Prieš galutinį stiklų stiprumo įvertinimą, buvo analizuojamas pjūvio sienelės šiurkštumas. Toks kokybės vertinimo eiliškumas buvo pasirinktas neatsitiktinai, nes didesnės paviršiaus šiurkštumo vertės gali byloti apie galimus didesnius pažeidimus stikle [51]. Paviršiaus šiurkštumas R_a buvo matuojamas išilgai lazerinio pluošto skenavimo krypties, viduryje pjūvio sienelės (plona raudona linija pjūvio sienelėje; **žr. 19 pav.**). Matavimų rezultatai pateikti **34 paveiksle**.



34 pav. *Pjūvio sienelės šiurkštumo priklausomybė nuo pjaunamo stiklo storio. Pjaunama buvo ore ir pro vandenį naudojant femtosekundinį IR lazerį. P(min) žymi limituotą (<4 W), o P(max) – didžiausią vidutinę lazerio galią.*

Nagrinėjant pjūvius buvo pastebėta, kad šiurkštumo vertės buvo apytiksliai vienodos pjaunant 110 µm storio stiklą skirtingais režimais. Apdirbant stiklą abiem galios režimais (P_{max} ir P_{min}) ore ir vandenyje buvo pasiekta vidutinė paviršiaus šiurkštumo R_a vertė, lygi 0,50 ± 0,04 µm.

Kita vertus, storėjant pjaunamam stiklui rezultatai išsiskyrė. Ore, naudojant mažesnės galios režimą (P_{min}), paviršiaus šiurkštumas R_a praktiškai nepriklausė nuo stiklo storio ir buvo vidutiniškai lygus 0,42 ± 0,09 µm. Viskas pasikeitė padidinus vidutinę lazerio galią (naudojant P_{max} režimą). Šiuo atveju pjūvio paviršiaus šiurkštumas didėjo pjaunant storesnius stiklus. Pjaunant ore 300 µm storio stiklą, paviršiaus šiurkštumas staigiai pakilo iki 1,70 ± 0,30 µm (pjaunant plonesnį 110 µm storio stiklą buvo 0,45 ± 0,10 µm).

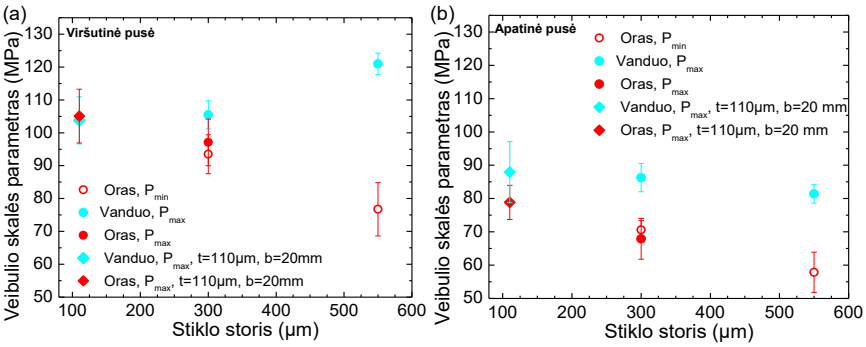
Dėl efektyvesnio stiklo aušinimo panaudojant tekantį vandens sluoksnį, šiurkštumo didėjimas nebuvo toks staigus kaip ore, naudojant P_{max} režimą.

Pjaunant tą patį 300 µm storio stiklą, pjūvio šiurkštumas buvo apie 2,4 karto mažesnis ir lygus 0,70 ± 0,09 µm. Galiausiai, 550 µm storio stiklo pjovimas pro vandens sluoksnį lėmė paviršiaus šiurkštumą R_a, lygų 1,2 ± 0,1 µm.

4.3.3. Išpjautų borosilikatinių stiklų mechaninio atsparumo analizė

Išmatavus pjovimo metu sugeneruotus paviršinius pažeidimus bei įvertinus pjūvio sienelių šiurkštumą, stiklo juostelės buvo sulaužomos keturių taškų lenkimo sistema (išsamesnę informaciją **žr. 3.6.3 skyriuje)**. Anksčiau minėto dydžio 26 × 5 mm^2 juostelės buvo naudojamos tik 300 – 550 µm storio stikluose. Tuo tarpu ploniausiame – 110 µm storio – stikle papildomai buvo išpjautos platesnės, 26 × 20 mm² dydžio juostelės, siekiant padidinti stiklui sulaužyti reikalingą jėgą ir taip užtikrinti tikslesnius lūžimo įtempio matavimus. Juostelių laužymo rezultatai pateikti **35 paveiksle**.

Pirmiausia svarbu atkreipti dėmesį, kad ore pjaunant stiklo juosteles P_{max} ir P_{min} galios režimais su femtosekundiniu IR lazeriu, rezultatai buvo gana panašūs (duomenys pažymėti raudonais pilnaviduriais ir tuščiaviduriais apskritimais; **žr. 35 pav.**). Tiksliau, pjaunant 300 µm storio stiklą abiem vidutinės galios režimais (19,3 ir 3,35 W) buvo gaunamos panašios Veibulio skalės parametrų (kritinio lenkimo stiprio) vertės. Skirtumas tarp skalės parametrų siekė vos 3,6 MPa ir 2,8 MPa atitinkamai juostelėms, laužtoms iš viršutinės ir apatinės pjūvio pusių. Šie skirtumai buvo mažesni nei paklaidos. Dėl minimalaus rezultatų skirtumo 300 µm storio stiklams, 550 µm stiklo storio atveju bus tiesiogiai lyginami P_{max} ir P_{min} režimai atitinkamai vandens ir oro aplinkose. Taip yra todėl, nes ore šio storio stiklo nebuvo galima išpjauti panaudojant visą lazerio galią.



35 pav. *Veibulio skalės parametro priklausomybė nuo stiklinių juostelių storio. Stiklas buvo laužiamas iš viršutinės (a) ir apatinės (b) pjūvio pusių. Rezultatai gauti, kai stiklai buvo pjaunami ore ir pro vandens sluoksnį.*

Laužimo rezultatus, gautus lenkiant skirtingo storio stiklo juosteles iš viršutinės pusės, galima matyti **35a paveiksle.** Ploniausių 110 µm storio stiklų

Veibulio skalės parametrai buvo apytiksliai vienodi, juostelių išpjautų abejose aplinkose. Ore pjautos juostelės pasižymėjo tik 1,3 % didesniu stiprumu (103,8 ± 7,0 ir 105,1 ± 8,0 MPa). Šis rezultatas puikiai sutapo su vidutiniu krašto apskeldėjimu ir pjūvio sienelės šiurkštumu, kurie irgi buvo apytiksliai vienodi (**žr. 31b pav. ir 34 pav.**). Kita vertus, storėjant laužiamam stiklui, juostelės, pjautos pro vandenį, tapo stipresnės nei pjautos ore. Laužant 300 µm storio stiklo juosteles, jos jau 8,6-12,8 % lenkė pjautas ore (vandenyje pjautų juostelių įtempis buvo 105,5 ± 4,3 MPa, o ore, atitinkamai, 97,1±7,0 ir 93,5±6,0 MPa pjaunant su P_{max} ir P_{min} galios režimais). Dar didesnė vandens sluoksnio nauda buvo matoma pjaunant 550 µm storio stiklą – Veibulio skalės parametrų santykis išaugo iki 58 % (lyginant 121 ± 3 ir 76,7 ± 8,0 MPa).

Laužant ore ir vandenyje pjautus stiklus iš apatinės pjūvio pusės (**žr. 35b pav.**) buvo pastebėtas skalės parametro mažėjimas storėjant stiklui. Tačiau juostelių, pjautų pro vandenį, stiprumas buvo didesnis nei ore ir mažėjo lėčiau storėjant stiklui. Atitinkamai, skirtumas tarp skalės parametrų abejose aplinkose didėjo su stiklo storiu. Ties 110 µm storiu skirtumas siekė 9,3 MPa (87,9 ± 9,1 MPa vandenyje ir 78,6 ± 5,1 MPa ore) ir išaugo iki 23,5 MPa ties 550 µm storiu (81,4 ± 2,8 MPa vandenyje ir 57,9 ± 4,7 MPa ore).

Siejant pjūvio kokybę su laužymo rezultatais, nebuvo pastebėta pastovių tendencijų ar sąryšių. Apskritai, stiklų pjovimas pro vandenį nulėmė mažesnes DKP vertes P_{max} galios režime (**žr. 31a pav. ir 33a pav.**) bei mažesnį vidutinį krašto apskeldėjimą viršutinėje pjūvio pusėje (**žr. 31b pav.**), kas galėtų būti pagrindinė priežastis dėl didesnio storesnių nei 110 µm stiklų stiprumo.

Kita vertus, P_{min} režimu ore pjautų 300 µm storio stiklų didžiausi pažeidimų ilgiai apatinėje pjūvio pusėje buvo 3,2 % mažesni, o vidutiniai apskeldėjimai apytiksliai vienodi, lyginant su rezultatais, gautais pjaunant stiklus pro vandenį. Šiuo atveju mažesni paviršiaus pažeidimai nelėmė didesnio juostelės stiprumo – pro vandenį pjauti stiklai išliko apie 18,2 % stipresni. Galiausiai, pjūvio sienelių šiurkštumai taip pat neturėjo pastebimos įtakos stiklo stiprumui. Atvirkščiai, lyginant visus stiklo storius, sienelės buvo šiurkštesnės stiklo juostelių, pjautų pro vandenį (**žr. 34 pav.**), o tai turėtų rodyti didesnį paviršiaus pažeidimą bei mažesnį stiklo juostelių stiprumą.

Iš šių rezultatų galima daryti prielaidą, kad didesnę įtaką stiklo stiprumui turi stiklo tūryje formuojami defektai (skylimai) dėl terminės akumuliacijos jame. Stiklų pjovimo greitis mažėjo storėjant stiklams – reikėjo daugiau skenavimų juos prapjauti. Taigi, stiklo padėklas buvo ilgiau kaitinamas – galėjo susidaryti didesni pažeidimai stiklo tūryje. Savo ruožtu, vanduo efektyviau aušino stiklą, mažindamas terminę akumuliaciją, o vandens įtaka pjovimo procesui didėjo storėjant stiklui.

Ploniausių stiklų atveju abiejose aplinkose pjovimo greitis buvo panašus – stiklai buvo išpjaunami vienodai greitai, kas lėmė ir panašias juostelių stiprumo vertes laužiant bandinius iš viršaus. Vis tik, ir šiuo atveju vandens nauda gali būti pastebima vertinant apatinę pjūvio pusę, kur dėl nuolatinio stiklo aušinimo galėjo būti suformuoti mažesni tūriniai pažeidimai, kas lėmė didesnį 110 µm storio stiklo juostelių atsparumą lenkiant iš apatinės pusės.

Galiausiai galime matyti, kad viršutinė stiklo pusė buvo vidutiniškai 33 % stipresnė negu apatinė juostelių pusė. Šiuo aspektu buvo stebima apskeldėjimo ilgių įtaka. Viršutinėje pjūvio pusėje DKP buvo 42,9 ± 0,1 % mažesni. Tuo pačiu ir VKP buvo vidutiniškai 1,33 ± 0,19 karto mažesni viršutiniame paviršiuje lyginant su apatiniu.

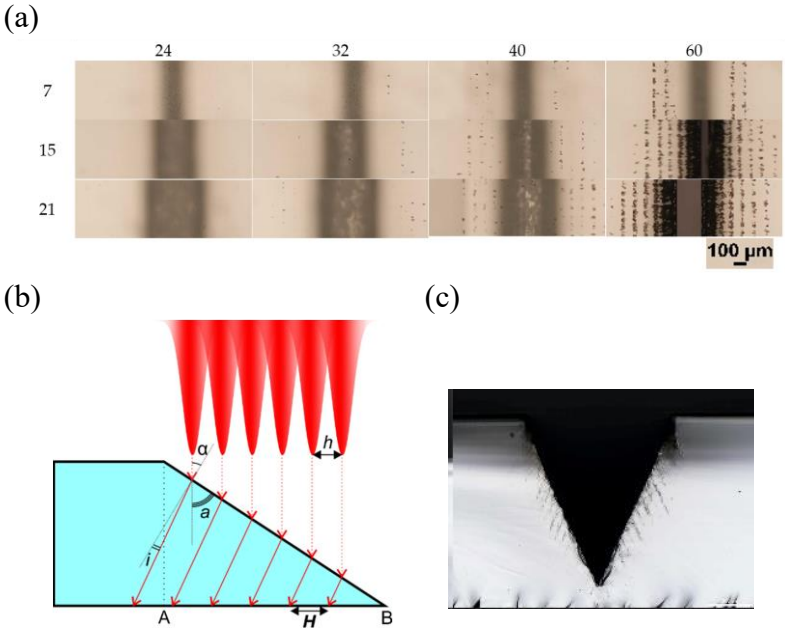
4.3.4. Periodinių apatinio paviršiaus pažeidimų ties pjūvio kraštu analizė

Vertinant pjūvio kraštų apskeldėjimus buvo išskirti pažeidimai, besiformuojantys šalia pjūvio krašto apatiniame stiklo paviršiuje (juodo atspalvio išdegimai, periodiškai tolstantys nuo pjūvio krašto; **žr. 32 pav.**). Šie pažeidimai buvo stebimi ir kituose tyrimuose [33, 150–152]. Jų kilmė buvo aiškinama lazerinio pluošto lūžiu oras – stiklas sandūroje ties pjūvio kraštu ir sklidimu stikle, periodiškai atsispindint nuo apatinio ir viršutinio stiklo paviršių (panašu į šviesos sklidimą šviesolaidžiu). Tačiau borosilikatinio stiklo pjovimo eksperimentai leido padaryti išvadą, kad šių pažeidimų prigimtis yra tiesiogiai susijusi tik su lazerinės spinduliuotės lūžiu ties pjūvio kraštu.

Papildomų eksperimentų metu buvo pjaunamas 550 µm storio stiklas, keičiant skenavimų skaičių nuo 24 iki 60 bei skenuojamų lygiagrečių linijų skaičių nuo 7 iki 21, taip kontroliuojant pjaunamo kanalo gylį ir plotį. Šiuo atveju tarpas tarp skenuojamų linijų buvo fiksuotas ties 25 µm. Apatiniame paviršiuje gautų pažeidimų nuotraukos pateiktos **36a paveiksle**. Matoma, kad periodiniai pažeidimai atsirado tik po 32 skenavimų kaip atsitiktinai atsiradę taškiniai defektai. Didinant skenavimų skaičių, taškiniai pažeidimai susijungė į linijas dėl pažeidimų akumuliacijos, pakartotinai skenuojant lazerio pluoštą ta pačia trajektorija. Taigi, skenuojant lazerio pluoštą lygiagrečiomis linijomis pastovia trajektorija, lūžęs pluoštas nuo pjūvio krašto gali pasiekti apatinį paviršių ir jį tiesiogiai pažeisti (**žr. 36b pav.**). Pažeidimų periodiškumas H gali būti atrastas geometriškai:

$$H = \frac{h \cdot \cos(i)}{\sin(a)\sin(i + a)} \tag{24}$$

kur h – tarpas tarp skenuojamų lygiagrečių linijų, a – pjūvio sienelės polinkio kampas. Šiuo atveju Snelijaus dėsnis buvo panaudotas nustatyti lūžusio spindulio kampą i, kai buvo žinomas lazerinio pluošto kritimo kampas α. Taigi galime matyti, kad pažeidimų periodas H priklauso tik nuo pjūvio sienelės polinkio, tarpo tarp skenuojamų linijų ir lazerinio pluošto lūžimo kampo oro / stiklo sandūroje (stiklo lūžio rodiklio). Be to, toks periodo įvertinimas atitiko pažeidimų atstumus, gautus pjaunant skirtingo storio borosilikatinius stiklus.



36 pav. *(a) Stiklo apatinio paviršiaus optinės nuotraukos, kai stiklas buvo pjaunamas su femtosekundiniu IR lazeriu keičiant skenavimų skaičių (nuotraukų stulpeliai 24-60 skenavimų) ir skenuojamų lygiagrečių linijų skaičių (eilutėse buvo keičiamas skaičius tarp 7, 15 ir 21). (b) Lazerinio pluošto lūžimo ir sklidimo stikle schema – apatinio paviršiaus pažeidimo mechanizmas. Pavaizduota pjūvio kanalo viena sienelė. (c) Ore suformuoto kanalo tipinė profilio nuotrauka, kurioje matomi spyglio formos pažeidimai stiklo tūryje.*

Papildomai buvo stebimas ir periodinių pažeidimų skaičiaus augimas apatiniame pjūvio paviršiuje storėjant stiklui, o tai taip pat atitiko didėjantį skenuojamų linijų skaičių. Tuo tarpu, vandenyje buvo stebimas mažesnis šių pažeidimų skaičius dėl mažesnio pjūvio sienelės polinkio kampo ir mažesnio skenuojamų linijų skaičiaus (siauresnio pjūvio).

Stebint pjūvio skerspjūvius buvo matomi spyglių formos pažeidimai stiklo tūryje (**žr. 36c pav.**), kurių kampai abejose aplinkose (ore ir vandenyje) atitiko lazerinio pluošto lūžimo kampą oro ir stiklo sandūroje. Šių spyglių kilmė yra aiškinama tuo, kad stiklo tūryje vyksta sklindančios spinduliuotės sugertis, o

stiklo modifikacijos įvyksta ten, kur laidumo elektronų tankis tampa palyginamas su kritine verte [13]. Šiuo atveju spygliai yra arčiau viršutinio paviršiaus, nes lazerinės spinduliuotės intensyvumas, sklindant medžiagomis, mažėja eksponentiniu dėsniu.

Spyglių formos pažeidimų buvimas stikle suteikia kelias naujas įžvalgas. Pirma, stiklą pjaunant pro vandens sluoksnį su dideliu impulsų pasikartojimo dažniu, lazerinio pluošto sąveikos su stiklu metu aplinkos lūžio rodiklis yra artimas oro (pagal išmatuotą spyglių kampą). Tai reiškia, kad sąveika vyksta esant kavitacijos burbului (galimai išgarintos medžiagos, vandens garų mišiniui). Antra, tūryje yra matomi susidarę pažeidimai, kurie gali daryti įtaką stiklo stiprumui.

Pjaunant stiklą pro vandenį, periodinių pažeidimų skaičius stiklo apatiniame paviršiuje buvo vidutiniškai apie 2 kartus mažesnis negu stikluose, pjautuose ore (**žr. 32 pav.).** Kartu kitame tyrime buvo pastebėta, kad ir spyglių formos pažeidimai stiklo tūryje buvo mažesni [51]. Tai galėtų būti dar viena iš priežasčių, kodėl buvo gaunami stipresni stiklai, pjaunant juos pro vandens sluoksnį ir kodėl vandens nauda didėjo storėjant stiklui.

4.4. Pagrindiniai borosilikatinio stiklo pjovimo rezultatai ir išvados

- Vandens sluoksnio sudarymas ant stiklo paviršiaus užtikrino efektyvų apdirbamos zonos aušinimą, apsaugojo stiklą nuo terminės destrukcijos ir leido procese naudoti maksimalią vidutinę lazerio galią pjaunant storiausius 550 µm storio stiklus.
- Stiklo pjovimas pro vandenį leido padidinti pjovimo greitį, lyginant su pjovimu oro aplinkoje, o greičio pokytis priklausė nuo stiklo storio. Nustatyta, kad 110 µm storio stiklo pjovimo greičiai buvo panašūs (skirtumas siekė apie 2 %), apdirbant 300 µm storio stiklą, pjovimo greitis augo 1,25 karto, o pjaunant storiausią 550 µm stiklą greičių santykis siekė 10,6 karto.
- Nors stiklo abliacijos (frezavimo) efektyvumas buvo mažesnis formuojant kanalus vandenyje, visgi buvo įmanoma suformuoti iki 1,5 karto siauresnius pjūvio kanalus 300 µm storio stikle. Tipiniai sienelių polinkio kampai ore ir vandenyje buvo atitinkamai 18,9° ir 11,9°. Tai leido sumažini abliuojamo stiklo tūrį bei kompensuoti medžiagos abliacijos efektyvumo nuostolius padidinant pjovimo greitį vandens aplinkoje iki 1,25 karto.
- Stiklo pjovimas pro vandens sluoksnį vidutiniškai sumažino didžiausius viršutinių pjūvio kraštų pažeidimus (DKP) iki 16,4 % ir padidino stiklo juostelių mechaninį stiprumą (kritinius laužimo

įtempius), o ši įtaka stiprėjo didėjant stiklo storiui. Bendrai nustatyta, kad viršutinė stiklo pusė po apdirbimo išliko mechaniškai 33 % stipresnė už apatinę. Be to, nebuvo pastebimos aiškios tendencijos tarp paviršinių pjūvio defektų (pjūvio krašto apskeldėjimo ir sienelės šiurkštumo) bei kritinio įtempio reikalingo sulaužyti stiklo juostelę. Stiklo stiprumas galėtų būti papildomai lemtas periodinių pažeidimų apatiniame stiklo paviršiuje ir spyglio formos pažeidimų stiklo tūryje.

- Didėjant laužiamo stiklo storiui, vandens sluoksnio įtaka pjovimo procesui stiprėjo: kritiniai įtempiai, reikalingi sulaužyti 110 µm storio stiklą iš viršutinės pjūvio pusės buvo panašūs tiek ore, tiek vandenyje (103,8 ± 1,0 MPa vandenyje ir 105,1 ± 8,0 MPa ore), o 300 ir 550 µm storio stiklo juostelės pjautos pro vandenį buvo atitinkamai iki 12,8 % (105,5 ± 4,3 MPa vandenyje ir 93,5 ± 6,0 MPa ore) bei 58 % (121,0 ± 3,0 MPa vandenyje ir 76,7 ± 8,0 MPa ore) stipresnės nei pjautos ore. Vandenyje pjauti bandiniai buvo stipresni laužant ir iš apatinės juostelės pusės – skirtumas tarp bandinių pjautų pro vandens sluoksnį ir ore augo nuo 9,3 MPa (110 µm storio stiklui) iki 23,5 MPa (550 µm storio stiklui).

5. Lydyto kvarco paviršiaus frezavimo tyrimai IR ultratrumpų impulsų lazeriais

Šiame skyriuje aprašyti rezultatai buvo publikuoti [S2] ir [S3] straipsniuose ir pristatyti [C2], [C3] ir [C4] tarptautinėse konferencijose.

Antras žingsnis optinio elemento gamyboje yra norimo paviršiaus suformavimas. Tam patogu taip pat naudoti tą pačią lazerinės abliacijos technologiją. Visgi, šiame žingsnyje pagrinde yra šalinama medžiaga ties paviršiumi, o ne giliame kanale, todėl vandens panaudojimas tampa nebenaudingas. Ankstesniuose tyrimuose buvo parodyta, kad vandens įtaka efektyvumui ir spartai mažėja platėjant ir seklėjant formuojamiems kanalams (gylio ir pločio santykiui esant mažesniam nei 0,8) [137].

Šiame skyriuje aprašyti rezultatai, gauti tiriant būdus spartinti paviršiaus frezavimą ore (be papildomo vandens naudojimo). Pirmiausia buvo įvertinta impulso trukmės (naudoti femtosekundiniai ir pikosekundiniai lazeriniai impulsai) įtaka frezavimo spartai ir kokybei. Didelis dėmesys skirtas pašalinti kuo plonesnį medžiagos sluoksnį, kad būtų padidintas paviršiaus formavimo tikslumas. Tai tampa svarbu norint formuoti sudėtingos formos paviršius.

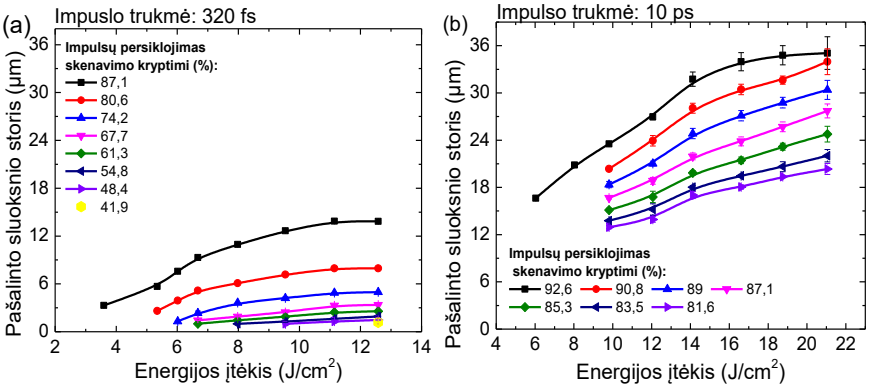
Skyriaus pabaigoje buvo papildomai įvertinta GHz pasikartojimo dažnio papliūpų įtaka stiklo frezavimo procesui. Tai yra santykinai nauja technologija, kurios pagalba buvo stebimas stiklų frezavimo efektyvumo didėjimas [91–93]. Kai kurios mokslinės grupės aiškina efektyvumo didėjimą dėl destruktyvesnės abliacijos – fiksuojamo paviršiaus šiurkštumo didėjimo [91], kiti to nepastebi – paviršiaus šiurkštumas nekinta [93]. Kadangi vis dar nėra aiškaus paaiškinimo, kas vyksta stikle jam sąveikaujant su GHz papliūpomis, literatūroje pateikiami frezavimo rezultatai prieštaringi, nuspręsta šį režimą išsamiai ištirti paviršiaus frezavimo kontekste.

5.1. Lydyto kvarco frezavimas pavieniais lazeriniais impulsais

5.1.1. Poliruoto lydyto kvarco frezavimo tyrimas

Norint pagaminti sudėtingos formos optinį paviršių, svarbu pasiekti kiek įmanoma didesnę formavimo skyrą. Šiuo atveju kalba eina apie pašalinamos medžiagos storį (arba suformuojamos duobutės gylį) per vieną lazerio pluošto skenavimą. Formuojant sferinį paviršių, pašalinamas medžiagos sluoksnis turėtų būti kuo plonesnis, kad būtų išvengta laiptuotos formos profilio susidarymo tarp skirtingų skenuojamų sluoksnių.

Tradiciniu pavienio impulso režimu buvo frezuojamas lydytas kvarcas ir matuojamas pašalinamas medžiagos sluoksnis su 320 fs ir 10 ps trukmės lazeriniais impulsais. Abejomis trukmėmis buvo frezuojamas stiklas, mažinant energijos įtėkį nuo maksimalios vertės iki tol, kol abliacija nutrūkdavo. Be to, buvo varijuojamas impulsų persiklojimas intervale nuo 41 iki 98,2 % tiriant jo įtaką frezuojamo paviršiaus kokybei. Frezavimas su fs impulsais leido pašalinti stiklą visame persiklojimų intervale. Tačiau su ps lazeriniais impulsais mažesnis nei 81,6 % impulsų persiklojimas lėmė nestabilų stiklo paviršiaus pramušimą. Dėl to šie duomenys nebuvo įtraukiami į analizę.

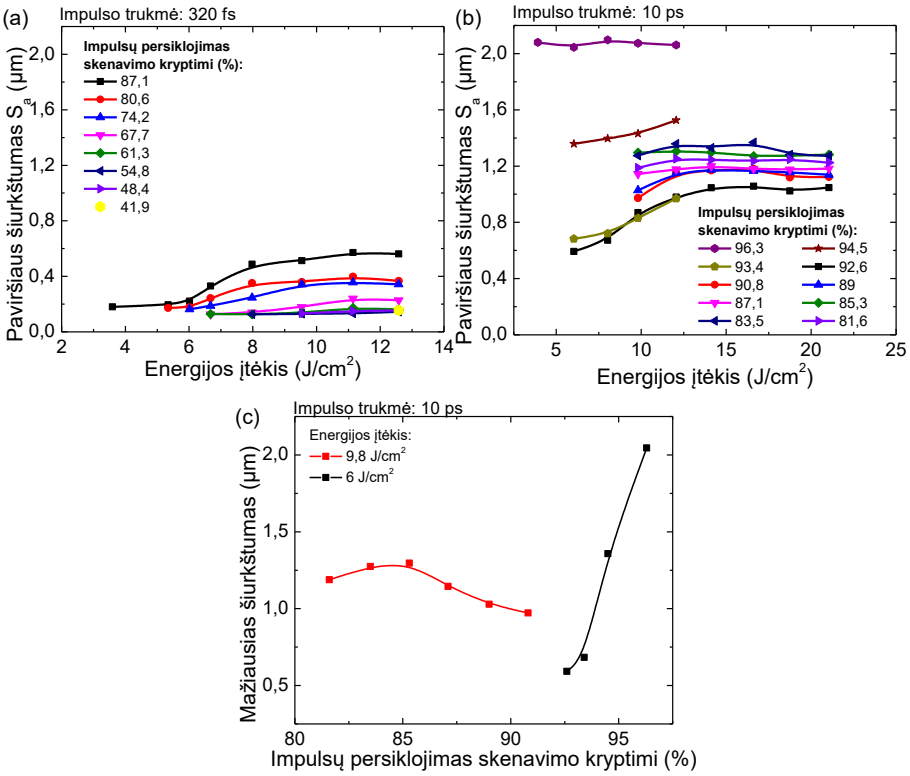


37 pav. *Pašalinto sluoksnio storio priklausomybė nuo naudoto energijos įtėkio ir impulsų persiklojimo skenavimo kryptimi, kai stiklas buvo frezuojamas su 320 fs (a) ir 10 ps (b) trukmės lazeriniais impulsais. Vieno skenavimo rezultatai. Impulsų persiklojimas statmena skenavimui kryptimi buvo 83,9 % (a) ir 85,3 % (b).*

Frezavimo rezultatai parodė, kad nufrezuojamas sluoksnis plonėjo mažinant lazerio impulsų energiją ir mažinant lazerinių impulsų persiklojimą skenavimo kryptimi (**žr. 37 pav.**). Be kita ko, plonesni sluoksniai buvo nufrezuojami su femtosekundiniais lazerinais impulsais. Pereinant nuo ps prie fs trukmių, buvo nuimamas iki 14 kartų plonesnis stiklo sluoksnis (13 ir 0,95 µm gylio išfrezuoti laukeliai). Šis rezultatas gali būti siejamas su skirtingais energijos sugerties mechanizmais fs ir ps impulsų atvejais. Trumpesnių impulsų atveju yra sudaromos sąlygos lokalizuotai energijos sugerčiai ploname sluoksnyje, nes dėl didesnio smailinio lazerinės spinduliuotės intensyvumo labiau dominuos daugiafotonė sugertis, kuri leidžia suformuoti pažeidimus ties mažesnėmis impulsų energijomis.

Kita vertus, ploniausi sluoksniai abejomis impulsų trukmėmis buvo nufrezuojami ties skirtingais impulsų persiklojimais. Labiau lokalizuota energijos sugertis, naudojant fs impulsus, leido tolygiai frezuoti stiklą mažiau perklojant impulsus. Tuo tarpu, ps impulsų energija buvo sugeriama

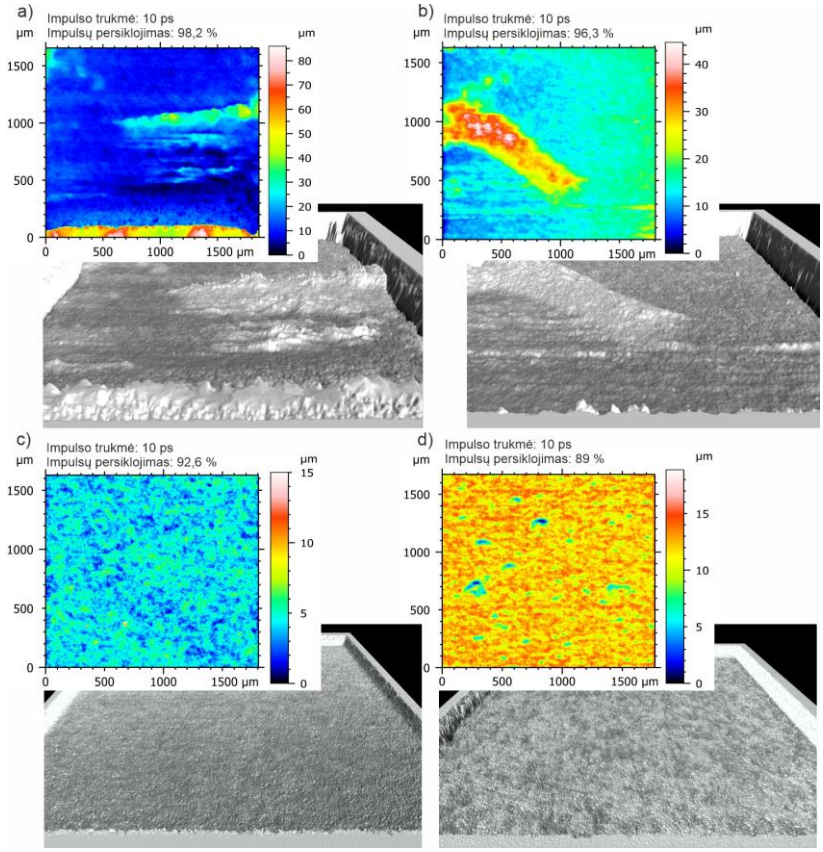
storesniame stiklo sluoksnyje, o tai mažino vienetiniam stiklo tūriui tenkantį energijos įtėkį, reikalingą pašalinti medžiagai. Taigi buvo reikalingas didesnis impulsų persiklojimas, kad padidinti energijos dozę (energijos įtėkis padaugintas iš lazerinių impulsų skaičiaus) ir išlaikyti stabilią stiklo abliaciją.



38 pav. *Nufrezuoto paviršiaus šiurkštumo priklausomybė nuo naudoto energijos įtėkio ir impulsų persiklojimo skenavimo kryptimi, kai stiklas buvo frezuojamas su 320 fs (a) ir 10 ps (b) trukmės lazeriniais impulsais bei išryškinta mažiausio pasiekiamo paviršiaus šiurkštumo priklausomybė nuo impulsų persiklojimo, kai stiklas abliuotas su pikosekundiniu lazeriu (c). (c) dalyje energijos įtėkis buvo lygus 9,8 J/cm^2, kai impulsų persiklojimas <92,6 % ir 6 J/cm^2, kai ≥92,6 %. Impulsų persiklojimas statmena skenavimui kryptimi buvo 83,9 % (a) ir 85,3 % (b).*

Paviršiaus šiurkštumo matavimai (**žr. 38 pav.**) parodė, kad lazeriniai apdirbimo režimai, kuriais buvo nufrezuojami ploniausi medžiagos sluoksniai (**žr. 37 pav.**), ne visada lėmė mažiausius paviršiaus šiurkštumus S_a. Frezuojant stiklą su fs trukmės impulsais, rezultatai apytiksliai sutapo su ploniausio sluoksnio abliacija – mažinant impulsų persiklojimą arba mažinant naudojamą energijos įtėkį, mažėjo ir šiurkštumas. Mažiausias paviršiaus šiurkštumas S_a = 0,13 µm buvo pasiektas, kai impulsų persiklojimas buvo lygus 67,7 %, o panašios šiurkštumo vertės buvo gaunamos persiklojimų intervale nuo 41,9

iki 61,3 % (**žr. 38a pav.**). Šiame intervale, naudojant energijos įtėkius nuo 6,7 iki 9,5 J/cm^2, vidutinė šiurkštumo vertė siekė 0,13 ± 0,06 µm, kas sufleravo šiurkštumo vertės sotinimąsi. E. Kažukauskas [153], frezuodamas lydyto kvarco stiklą su femtosekundiniu IR lazeriu, pastebėjo, kad tolimesnis paviršiaus šiurkštumo mažėjimas buvo nebegalimas dėl nanometrinio dydžio darinių formavimosi abliuotame stiklo paviršiuje. Jis taip pat gavo mažiausią paviršiaus šiurkštumą apytiksliai lygų 0,13 µm.



39 pav. *Pikosekundiniu lazeriu frezuoto stiklo paviršiaus topografijos, kai lazerinių impulsų persiklojimas skenavimo kryptimi buvo 98,2 % (a), 96,3 % (b) , 92,6 % (c) ir 89 % (d). Naudotas energijos įtėkis buvo 8 J/cm^2 (a-c) bei 9,8 J/cm^2 (d). Topografijose galima matyti defektus būdingus tik abliuojant stiklą su pikosekundiniu lazeriu: paviršiaus perlydimas ir nelygumų formavimasis (a ir b) bei ertmių susidarymas (d).*

Kita vertus, abliuojant stiklą su ps trukmės impulsais, mažiausi šiurkštumai buvo gaunami siaurame parametrų lange, o tai nulėmė proceso nestabilumą. Nukrypimas nuo šio siauro parametrų lango lėmė staigų paviršiaus šiurkštumo didėjimą dėl atsitiktinai išsidėsčiusių defektų formavimosi abliuotame stiklo paviršiuje (**žr. 38c ir 39 pav.**). Šiuo atveju, optimalus impulsų persiklojimas,

norint pasiekti mažiausią šiurkštumą (S_a = 0,6 µm), buvo 92,6 % (mažiausias šiurkštumas buvo apie 4,7 karto didesnis nei frezuojant stiklą su fs impulsais).

Didesni impulsų persiklojimai skenavimo kryptimi nei 92,6 % lėmė stiprų paviršiaus bei abliacijos produktų perlydimą, o tai lėmė nelygaus paviršiaus susidarymą ir padidėjusį šiurkštumą (**žr. 39a,b pav.**). Iš kitos pusės, mažesnis impulsų persiklojimas lėmė 10,6±6,1 µm gylio ertmių formavimąsi (žalias ir mėlynas zonas, raudonos ir geltonos spalvos plote; **žr. 39d pav.**). Ertmių formavimasis gali būti siejamas su atsitiktiniais defektais stiklo paviršiuje kaip, pavyzdžiui, mikroskilimai ar priemaišos. Šie defektai galėjo padidinti lokalią energijos sugertį, dėl ko buvo sugeneruojami gilesni pažeidimai.

Lentelė 5. *Parametrai reikalingi nufrezuoti ploniausius sluoksnius ir suformuoti mažiausio šiurkštumo S_a paviršius su fs ir ps trukmių lazeriniais impulsais.*

Impulso trukmė, ps	Impulsų pasikartojimo dažnis, kHz	Skenavimo greitis, mm/s	Impulsų persiklojimas skenavimo / jai statmena kryptimis, %	Energijos įtėkis, J/cm^2	Paviršiaus šiurkštumas S_a, µm	Nuimto sluoksnio storis, µm
Ploniausias nufrezuojamas sluoksnis						
0,32	400	4,8	61,3 / 83,9	6,7	0,18	0,95
10	400	2,5	81,6 / 85,3	9,8	1,2	13
Mažiausias gautas paviršiaus šiurkštumas S_a						
0,32	400	5,6	54,8 / 83,9	8	0,13	1
10	400	1	92,6 / 85,3	6	0,60	16,6

Abiem lazeriais nufrezuojamas ploniausias stiklo sluoksnis ir pasiekiamas mažiausias šiurkštumas S_a išskirti **5 lentelėje**. Svarbu atkreipti dėmesį, kad mažiausias šiurkštumas buvo pasiekiamas ties didesnėmis energijos dozėmis nei reikėjo pašalinti ploniausią stiklo sluoksnį. Taip yra todėl, kad siekiant didinti abliuojamos medžiagos storio rezoliuciją tenka naudoti kiek įmanoma mažesnį energijos įtėkį (artimą abliacijos slenksčiui). Tokiu atveju abliacijos procesas yra jautresnis stiklo paviršiuje ir po juo esantiems defektams, kas lemia didesnį frezuoto paviršiaus šiurkštumą. Dėl to buvo reikalinga naudoti šiek tiek didesnę energijos dozę, mažesniam šiurkštumui gauti.

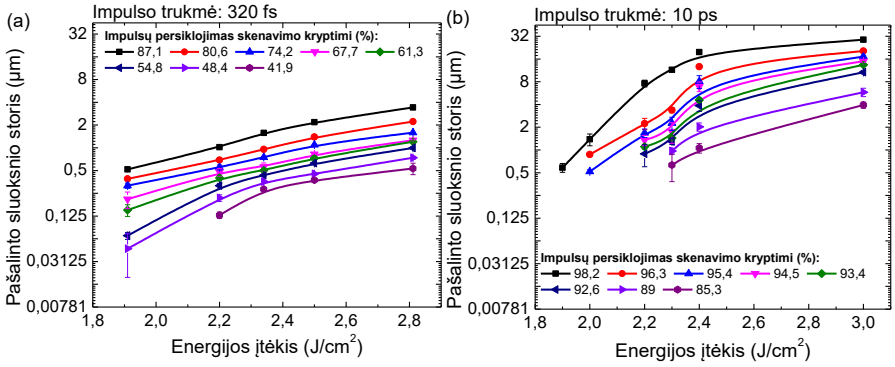
Taigi, stiklo frezavimas su ps trukmės impulsais buvo mažiau stabilus. Ploniausias nufrezuotas stiklo sluoksnis buvo 13 µm, kurio šiurkštumas S_a

siekė 1,2 µm. Naudojant 35 % didesnę energijos dozę, buvo pasiekiamas mažiausias šiurkštumas S_a lygus 0,59 µm, tačiau buvo pašalintas storesnis medžiagos sluoksnis (16,6 µm).

Iš kitos pusės, frezuojant stiklą su fs trukmės impulsais, ploniausias nuimamas medžiagos storis buvo 0,95 µm (šiurkštumas S_a = 0,18 µm). Norint gauti mažiausią šiurkštumą, pakako energijos dozę padidinti 2,3 %. Šiuo atveju buvo gaunamas 0,13 µm paviršiaus šiurkštumas ir nuimtas vos 5,3 % storesnis stiklo sluoksnis (0,99 µm).

5.1.2. Pašiurkštinto lydyto kvarco frezavimo tyrimas

Skaidraus stiklo frezavimo eksperimentai parodė, kad abliacijos procesas staigiai nutrūko pasiekus slenkstines energijos įtėkio vertes. Tas pats nutiko ir su nuimamo sluoksnio storiu – nebuvo tolygaus mažėjimo iki 0 µm (**žr. 5 lentelę**). Šis rezultatas leido daryti prielaidą, kad nuimamas stiklo sluoksnis gali būti dar labiau sumažintas, jeigu pradinio stiklo paviršiaus pažeidimo slenkstis bus mažesnis. Tam pasiekti, iš pradžių skaidrus stiklas buvo frezuojamas lazeriniais parametrais, kurie leido pasiekti mažiausią paviršiaus šiurkštumą abejomis impulsų trukmėmis atskirai (**žr. 5 lentelę**). Taip buvo pašiurkštinamas skaidrus stiklo paviršius ir sumažinamas jo pažeidimo slenkstis.

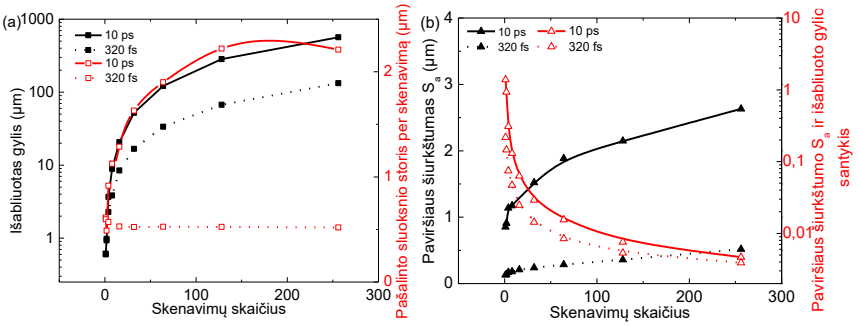


40 pav. *Pašalinto sluoksnio storio priklausomybė nuo naudoto energijos įtėkio ir lazerinių impulsų persiklojimo skenavimo kryptimi, kai stiklas buvo frezuojamas su 320 fs (a) ir 10 ps (b) trukmės lazeriniais impulsais. Vieno skenavimo rezultatai, kai frezuotas prieš tai pašiurkštintas stiklas. Impulsų persiklojimas statmena skenavimui kryptimi buvo 83,9 % (a) ir 85,3 % (b).*

Pašiurkštintas paviršius toliau buvo abliuojamas mažesniais energijos įtėkiais nei naudoti abliuojant skaidrų stiklo paviršių (atitinkamai mažesniais nei 3,6 ir 6 J/cm^2 fs ir ps impulsams). Tai leido frezuoti plonesnius medžiagos sluoksnius nei 1 µm su abiejų impulsų trukmių lazeriais (**žr. 40 pav.**). Šiuo atveju, ploniausias pašalinamas stiklo storis su ps trukmės impulsais siekė

0,5 µm. Kita vertus, fs trukmės impulsai leido abliuoti iki 11,3 karto plonesnius sluoksnius (0,05 ± 0,03 µm).

Galiausiai, norint suformuoti optinį elementą, vieno skenavimo dažniausiai nepakanka. Todėl abejomis impulsų trukmėmis buvo testuojamas stiklo frezavimo stabilumas, atliekant nuo 1 iki 256 skenavimų. Abejoms impulsų trukmėms buvo optimizuojamas energijos įtėkis ir impulsų persiklojimas skenavimo kryptimi taip, kad kuo sparčiau būtų nuimamas 0,5 µm storio sluoksnis (ploniausias galimas su ps impulsais). Pikosekundinių ir femtosekundinių impulsų atveju šie parametrai buvo atitinkamai 2 J/cm^2 ir 95,4 % (skenavimo greitis 0,625 m/s) bei 2,8 J/cm^2 ir 41,9 % (skenavimo greitis 7,2 m/s). Svarbu paminėti, kad šiame eksperimente lazerio pluošto sąsmauka buvo nuleidžiama 0,5 µm po kiekvieno skenavimo, kad būtų išlaikytos kuo panašesnės abliacijos sąlygos.



41 pav. *(a) Viso išabliuoto gylio (pilnaviduriai kvadratai) ir pašalinto sluoksnio storio per vieną skenavimą (tuščiaviduriai kvadratai) priklausomybė nuo atliktų skenavimų skaičiaus. Pašalintas sluoksnio storis buvo gautas padalinant išabliuotą gylį iš skenavimų skaičiaus. (b) Paviršiaus šiurkštumo S_a (pilnaviduriai trikampiai) ir santykio tarp paviršiaus šiurkštumo S_a ir išabliuoto gylio priklausomybė nuo naudoto skenavimų skaičiaus.*

Rezultatai atskleidė, kad tik su fs impulsais buvo pasiekiamas stabilus stiklo frezavimo procesas (neužpildyti kvadratai; **žr. 41a pav.**). Frezuojant stiklą su fs impulsais, pašalinamo vieno sluoksnio storis išliko pastovus per visus 256 skenavimus. Kita vertus, abliacija su ps trukmės impulsais išliko stabili tik frezuojant kelis pirmus sluoksnius – iki penkto skenavimo pašalinamo vieno sluoksnio storis, išliko apytiksliai lygus 0,5 µm, o po to pradėjo didėti. Po penkių skenavimų siekė 0,9 µm, po aštuonių – 1,1 µm, o ties 128-tu stabilizavosi ties 2,2 µm (pilnaviduriai kvadratai; **žr. 41a pav.**). Panašus pašalinamo sluoksnio storio augimas didėjant skenuojamų sluoksnių skaičiui buvo stebimas ir nuimant storesnius pirminius sluoksnius - 1,1 ir 11 µm. Šis augimas gali būti susietas su didesniu ps impulsų skverbties gyliu,

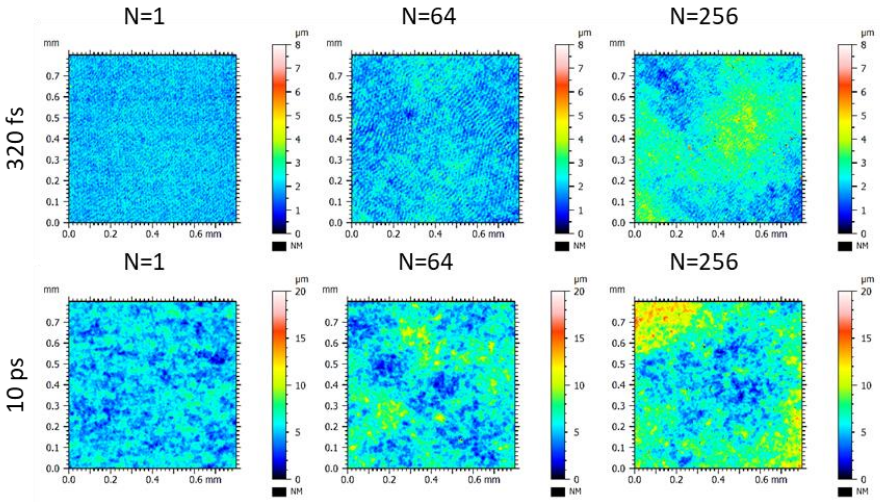
dėl ko galėjo susidaryti defektai po stiklo paviršiumi. Defektų galėjo daugėti didinant skenavimų skaičių, o tai turėjo įtakos abliacijos proceso stabilumui.

Pašalinamo sluoksnio stabilizavimasis nuo 128-o skenavimo gali būti susijęs su defektų akumuliacijos įsisotinimu bei energijos įtėkio mažėjimu gilėjant kanalui dėl lazerinio pluošto išsifokusavimo. Pastarasis efektas tapo aktualus, nes pašalinamo sluoksnio storis buvo didesnis nei lazerinio pluošto fokuso padėties korekcija. Dėl šios priežasties, po 128 skenavimų energijos įtėkis turėjo sumažėti apie 10 % (nuo 2 iki 1,8 J/cm^2).

Iš kitos pusės, didėjantis pašalinamo sluoksnio storis leido išfrezuoti daugiau medžiagos. Po 256 skenavimų išfrezuotas gylis su ps ir fs impulsais atitinkamai buvo 560 ir 130 µm (pilnaviduriai kvadratai; **žr. 41a pav.**). Tačiau frezavimo sparta vis tiek buvo 2,6 karto didesnė naudojant fs impulsus dėl 11,5 karto didesnio skenavimo greičio (1,10 mm^3/min su fs ir 0,41 mm^3/min su ps impulsais). Dėl šios priežasties su fs impulsais yra įmanoma sparčiau formuoti optinius paviršius.

Vertinant frezuoto paviršiaus kokybę, frezavimas su fs impulsais leido pasiekti iki penkių kartų mažesnį paviršiaus šiurkštumą S_a (pilnaviduriai trikampiai; **žr. 41b pav.**). Po 256 skenavimų, paviršiaus šiurkštumas S_a buvo lygus 2,63 µm abliuojant stiklą su ps impulsais ir 0,52 µm – abliojant su fs impulsais. Kita vertus, lyginamų laukelių gyliai skyrėsi 4,3 karto. Dėl to buvo lyginamas ir santykis tarp paviršiaus šiurkštumo ir išabliuoto gylio (tuščiaviduriai trikampiai; **žr. 41b pav.**). Šis parametras parodė, kad po 256 skenavimų, šiurkštumo ir gylio santykis buvo tik 20 % didesnis abliuojant stiklą su ps impulsais. Atitinkamai, turėtų būti gaunami panašaus šiurkštumo paviršiai nepriklausomai nuo naudojamos impulsų trukmės, kai formuojamos 600 µm gylio kvadratinės įdubos. Šiuo aspektu fs trukmės impulsai pranašesni tik dėl didesnės pasiekiamos formavimo rezoliucijos ir spartos nuimant <1 µm storio sluoksnius.

Lyginant išfrezuotų dugnų topografijas, buvo stebimas pažeidimų gilėjimas, abliuojant lydytą kvarcą su ps impulsais **(žr. 42 pav.)**. Frezuotame paviršiuje didėjo atstumas tarp žemiausios ir aukščiausios vietos (S_z parametras). Po vieno skenavimo jis siekė 6,4 µm, po 2 – 8,1 µm, o po 16 skenavimų įsisotino ties 16,4 ± 1,3 µm. Kita vertus, paviršių, abliuotų su fs impulsais, S_z parametras mažiau priklausė nuo skenavimų skaičiaus. Jo vidurkis buvo lygus 4,7 ± 0,9 µm. Šie rezultatai rodo, kad topografijose gilėjantys pažeidimai didinant skenavimų skaičių, siejasi su storėjančiu nuimamu stiklo sluoksniu frezuojant stiklą pikosekundiniais impulsais.

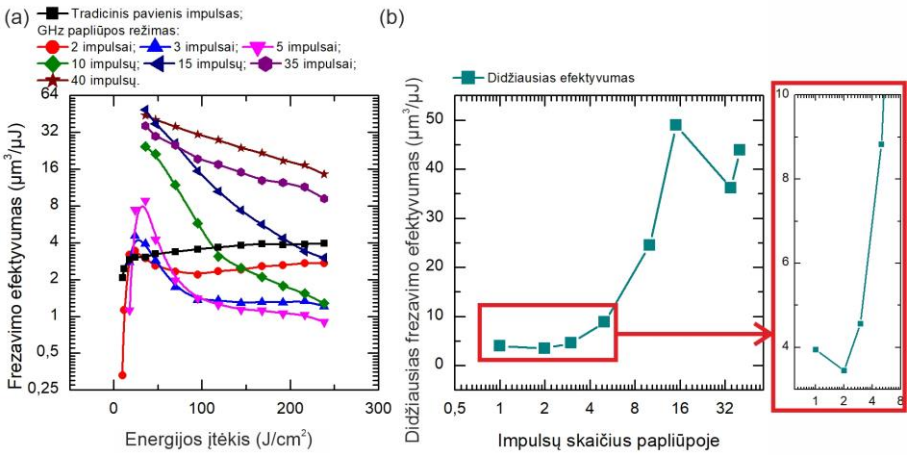


42 pav. *Pikosekundiniais (10 ps) ir femtosekundiniais (320 fs) lazeriniais impulsais frezuotų paviršių topografijos. Pateikti pavyzdžiai topografijų gautų skenuojant lazerinį pluoštą 1, 64 ir 256 kartus.*

5.2. Lydyto kvarco frezavimas su GHz papliūpų režimu

Pabaigoje tyrimų buvo stiklo paviršiaus frezavimui išbandytas ir GHz papliūpų režimas. Siekiant tarpusavyje palyginti rezultatus, eksperimentai buvo atlikti abliuojant lydytą kvarcą vėlgi tradiciniu pavienio impulso ir GHz papliūpų režimais. Išskirtinumas tik tas, kad šiuo atveju buvo panaudotas Carbide 40 femtosekundinis IR lazeris turintis galimybę generuoti GHz papliūpas. Gauta frezavimo efektyvumo priklausomybė nuo naudoto energijos įtėkio (viso papliūpos paketo, **žr. 15 formulę**) pavaizduota **43 paveiksle**. Grafike galima matyti, kad efektyvumo maksimumai susidarė tik naudojant iki penkių impulsų GHz papliūpoje. Naudojant didesnius impulsų skaičius papliūpoje, efektyvumas tolygiai augo mažinant energijos įtėkį, kaip jau buvo pastebėta kitame tyrime [92]. Pastovus efektyvumo didėjimas lėmė, kad GHz papliūpos leido pasiekti iki 12,7 karto didesnį efektyvumą nei abliuojant stiklą tradiciniu pavienio impulso režimu. Šiuo atveju didžiausias efektyvumas buvo lygus 49 $\mu m^3/\mu J$ (**žr. 43a pav.**).

Aiškesnė GHz papliūpų režimo įtaka stiklo frezavimo efektyvumui gali būti matoma **43b paveiksle,** kur pavaizduota didžiausio frezavimo efektyvumo priklausomybė nuo impulsų skaičiaus papliūpoje. Šiuo atveju vienas impulsas grafike nurodo tradicinį pavienio impulso režimą.



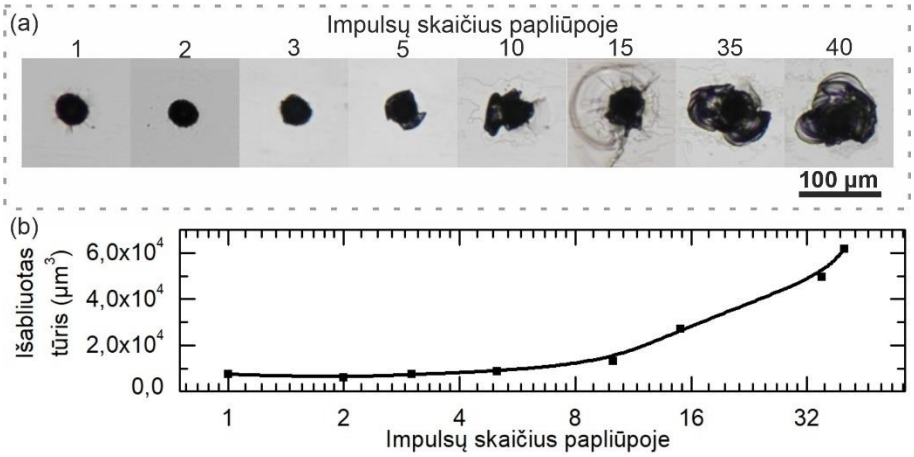
43 pav. *Frezavimo efektyvumo priklausomybė nuo naudoto energijos įtėkio (a) bei išrinktos didžiausių efektyvumų vertės ties kiekvienu naudotu režimu (b). Šiuo atveju 1-as impulsas žymi rezultatus gautus naudojant tradicinį pavienio impulso režimą.*

Stiklą frezuojant su dviem impulsais GHz papliūpoje buvo stebimas 12,5 % efektyvumo sumažėjimas lyginant su pavienio impulso režimu. Tipiškai tai yra stebima frezuojant ir kitas medžiagas, kaip, pavyzdžiui, varį, kur efektyvumo sumažėjimas aiškinamas antrojo impulso energijos nuostoliais dėl jo sąveikos su pirmojo impulso sugeneruota plazma ir išabliuotomis dalelėmis [154]. Abliuojant stiklą su trimis impulsais GHz papliūpoje, vėlgi, kaip ir abliuojant varį, frezavimo efektyvumas išaugo ir jau apie 13,3 % lenkė rezultatą, gautą su tradiciniu pavienio impulso režimu.

Kita vertus, tolimesnis impulsų skaičiaus papliūpoje didinimas lėmė tik spartų frezavimo efektyvumo didėjimą. Šiuo atveju nebebuvo stebimas anksčiau minėtas efektyvumo sumažėjimas ties lyginiais impulsų skaičiais. Galime matyti, kad efektyvumas didėjo iki penkiolikos impulsų (**žr. 43b pav.**), kur buvo pasiekta didžiausia jo vertė, lygi 49 $\mu m^3/\mu J$. Nuo šios vertės efektyvumo kreivė pradėjo sotintis ir nusistovėjo 33 - 50 $\mu m^3/\mu J$ tarpe.

Siekiant išsiaiškinti, kas lėmė spartų efektyvumo augimą, buvo formuojami krateriai stiklo paviršiuje, keičiant impulsų skaičių papliūpoje nuo 1 iki 40. Visais režimais buvo naudota ta pati GHz papliūpos paketo energijos įtėkio vertė, lygi 52,7 J/cm^2, apytiksliai ties kuria buvo pasiekiamos didžiausios efektyvumų vertės papliūpų režime (**žr. 43a pav.**). Kraterių optinės nuotraukos pateiktos **44a paveiksle**. Čia buvo matomas aiškus stiklo frezavimo mechanizmo pokytis: iš švelnios abliacijos, kur medžiaga buvo daugiau garinama, į stiprėjantį stiklo paviršiaus daužymą, naudojant daugiau nei 5 impulsus GHz papliūpoje.

Galime daryti prielaidą, kad prie stiprėjančio stiklo paviršiaus daužymo prisidėjo didėjantis stiklą pasiekiančios lazerinės energijos kiekis ir stipresni terminiai įtempiai stikle dėl didelio (~2 GHz) impulsų pasikartojimo dažnio [155]. Papliūpų atveju, pavienio impulso energija (tradicinio režimo) yra paskirstoma *N* impulsų papliūpoje, o tai reiškia, kad atskiro impulso energija bus apie *N* kartų mažesnė nei esant tradiciniam režimui (**žr. 16 pav.**). Taigi, didėjant impulsų skaičiui papliūpoje, atskiras impulsas bus vis mažesnės energijos, kas lemia silpnesnę plazmos generaciją ir mažėjančius energijos nuostolius dėl plazmos ekranavimo efekto [90, 156]. Tai reiškia, kad vis daugiau lazerio energijos dideliu dažniu pasieks stiklą ir bus sugeneruoti vis didesni pažeidimai.



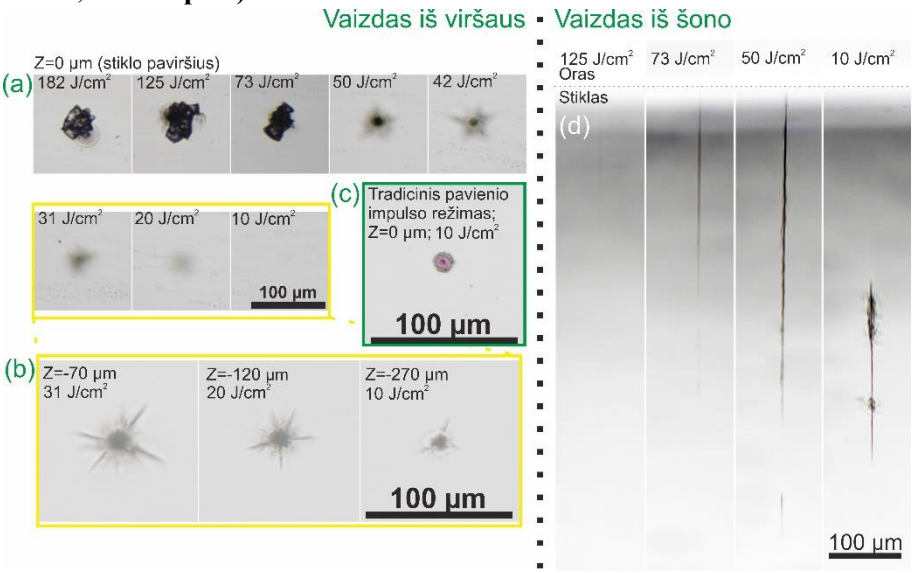
44 pav. *Suformuotų kraterių optinės nuotraukos (a) ir išmatuoti jų tūriai (b). Krateriai suformuoti naudojant skirtingus impulsų skaičius GHz papliūpoje, bet fiksavus 52,7 J/cm^2 energijos įtėkį. Šiuo atveju, 1-as impulsas žymi rezultatus gautus naudojant tradicinį pavienio impulso režimą. Vienam krateriui suformuoti buvo perklojama 100 papliūpų paketų arba pavienių impulsų pasikartojančių 100 kHz dažniu.*

Kraterių tūrio matavimai tai ir parodė. Nuo 5 impulsų papliūpoje intensyvėjantis stiklo daužymas buvo lydimas didėjančio pašalinamos medžiagos tūrio (**žr. 44b pav.**). Galime matyti, kad pašalintas medžiagos tūris išaugo daugiau nei aštuonis kartus, lyginant 40 impulsų GHz papliūpos ir tradicinio pavienio impulso režimus.

Žiūrint iš kitos pusės, medžiagos pašalinimo mechanizmas naudojant papliūpų režimą yra panašus į stiklo frezavimą nuo apatinės stiklo pusės su nanosekundžių trukmės lazeriniais impulsais, kur stiklas buvo skaldomas į mažas frakcijas, taip didinant proceso efektyvumą [58]. GHz papliūpų atveju taip pat turime nanosekundžių trukmės impulsų paketą – lazerinės

spinduliuotės sąveikos su medžiaga laikas išauga lyginant su 172,6 fs trukmės pavieniu impulsu.

Papildomai formuojant kraterius stiklo paviršiuje, buvo tiriama mažo energijos įtėkio įtaka sparčiam efektyvumo didėjimui. Tam pasirinktas 10 impulsų GHz papliūpoje režimas. Šis režimas buvo tarsi tarpinis, kuriame, ties dideliais energijos įtėkiais, frezavimo efektyvumo vertės buvo panašios, lyg gautos nenaudojant papliūpų režimo, o mažinant energijos įtėkį (nuo ~100 J/cm^2) buvo stebimas spartus efektyvumo augimas (žalios spalvos kreivė, **žr. 43a pav.).**



45 pav. *Stiklo paviršiaus optinės nuotraukos kai jame buvo formuojami krateriai keičiant energijos įtėkį (a); pažeidimai stiklo tūryje dėl lazerinės spinduliuotės fokusavimosi reiškinio (b); palyginamoji kraterio nuotrauka, suformuoto ant stiklo paviršiaus nenaudojant papliūpų režimo (c) ir ties skirtingais energijos įtėkiais lazerinio pluošto fokusavimosi lemtų pažeidimų stiklo tūryje optinės nuotraukos žiūrint iš šono (d). Krateriai formuoti naudojant 10 impulsų GHz papliūpoje režimą ir perklojant 5 papliūpas 100 kHz dažniu. Paveiksle Z=0 nurodo, kad fotografuojamas buvo stiklo paviršius, o Z<0 – atstumas gilyn į stiklo tūrį nuo paviršiaus.*

Suformavus kraterius, buvo pastebėta, kad stiklo paviršius buvo pramuštas tik esant didesniems energijos įtėkiams nei 42 J/cm^2 (**žr. 45a pav.**). Srityse, paveiktose mažesniu energijos įtėkiu, buvo matomi tik pažeidimai, esantys stiklo tūryje. Tai buvo atsitiktinai orientuoti skylimai (**žr. 45b pav.**). Tuo pačiu metu, nenaudojant papliūpų režimo, stiklo paviršius buvo pramušamas su mažiausią naudota energijos įtėkio verte (10 J/cm^2, **žr. 45c pav.**). Pavertus bandinį ir pažiūrėjus į jį iš šono, buvo pastebėta, kad tūriniai pažeidimai buvo

lemti lazerinės spinduliuotės fokusavimosi stiklo tūryje ir šviesos gijų formavimosi stikle (>500 µm ilgio pažeidimai, **žr. 45d pav.**). Šiuo atveju, esant ir mažiausiam papliūpų paketo energijos įtėkiui (10 J/cm^2), atskiro lazerinio impulso smailinė galia buvo 8,2 MW, kas apie 2 kartus viršija lazerinio pluošto fokusavimosi slenkstį stikle, lygų 4,16 MW. Panašūs stiklo tūriniai pažeidimai buvo stebimi ir kituose tyrimuose [42, 43].

Ilgiausi pažeidimai stikle buvo sugeneruojami naudojant 50 J/cm^2 energijos įtėkį (**žr. 45d pav.**). Didesni energijos įtėkiai, lėmė tik trumpėjančius pažeidimus šalia stiklo paviršiaus. Ribiniu atveju, esant 125 J/cm^2 energijos įtėkiui, buvo pramušamas stiklo paviršius, kas galėjo lemti efektyvesnį lazerinės spinduliuotės sklaidymą. Dėl šios priežasties galėjo nutrūkti fokusavimosi efektas stiklo tūryje.

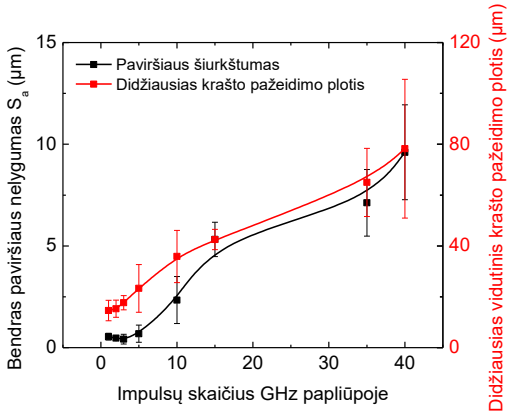
Kita vertus, mažinant energijos įtėkį nuo 50 J/cm^2, pažeidimai tolo nuo stiklo paviršiaus (**žr. 45b, d pav.**). Šiuo atveju energijos įtėkiui sumažėjus nuo 31 iki 10 J/cm^2, atstumas nuo stiklo paviršiaus iki pažeidimo susidarymo pradžios pailgėjo nuo 70 iki 270 µm (**žr. 45b pav.**). Panašus reiškinys buvo aptartas A. Couairon [41], kuris tai aiškino per netiesinį židinio rodiklio poslinkį (angl. shift of nonlinear focus).

Bendrai tūrinių pažeidimų formavimas, esant mažesniems energijos įtėkiams, galėjo prisidėti prie bendro stiklo vientisumo mažėjimo, dėl ko jį tapo lengviau išskaldyti, kartu pašalinant ir didesnį medžiagos tūrį. Tai galėjo lemti išaugusį frezavimo efektyvumą papliūpų režime, kai energijos įtėkis mažesnis nei 100 J/cm^2 (**žr. 43a pav.**). Kita vertus, matyti, kad tradicinis pavienio impulso režimas buvo efektyvesnis už papliūpų režimus, sudarytus iš mažiau nei 15 impulsų, kai energijos įtėkis >100 J/cm^2 (**žr. 43a pav.**). Šioje srityje stiklo paviršius galėjo būti labiau garinamas nei skaldomas. Tokiu atveju stiklo pašalinimo sparta priklauso nuo impulso energijos: kuo didesnė energija, tuo didesnė sparta. Šiuo atveju pavienio impulso energija, lyginant su papliūpų režimais, buvo didžiausia, o tai lėmė ir didžiausią frezavimo efektyvumą srityje virš 100 J/cm^2. Konkrečiau lyginant efektyvumus esant maksimaliam energijos įtėkiui, matoma, kad nuo pavienio impulso režimo iki 5 impulsų papliūpoje, frezavimo efektyvumas mažėjo, o nuo 10 impulsų vėl pradėjo augti dėl galimai intensyvėjančio stiklo paviršiaus skaldymo.

5.2.1. Frezavimo kokybė naudojant GHz papliūpų režimą

Frezavimo kokybė buvo įvertinta matuojant bendrą paviršiaus nelygumo parametrą S_a (S_a parametrą neatskiriant šiurkštumo nuo banguotumo) ir didžiausią krašto pažeidimo ilgį DKP. Siekiant aiškiau išskirti papliūpų

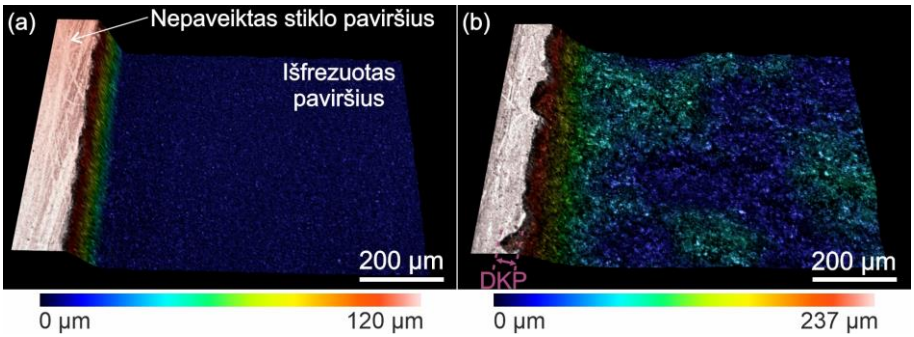
režimo įtaką, buvo suvidurkinami kokybiniai rezultatai, gauti ties skirtingomis energijos įtėkio vertėmis. Rezultatai pateikti **46 paveiksle.**



46 pav. *Vidutinio bendro paviršiaus nelygumo parametro S_a ir didžiausio krašto pažeidimo ilgio priklausomybė nuo naudoto impulsų skaičiaus GHz papliūpoje. Šiuo atveju, 1-as impulsas žymi rezultatus gautus naudojant tradicinį pavienio impulso režimą.*

Galima pastebėti, kad didėjant lazerinių impulsų skaičiui GHz papliūpoje, prastėja apdirbimo kokybė: didėja bendras paviršiaus nelygumo parametras S_a ir krašto apskeldėjimas (prastėja stiklo apdirbimo kokybė; **žr. 47 pav.**). Tai kartu indikuoja perėjimą iš švelnios į labiau destruktyvų stiklo pašalinimą. Atkreipiant dėmesį į bendro paviršiaus nelygumo S_a rezultatus (juodos spalvos kreivė; **žr. 46 pav.**), galime matyti spartų nelygumų amplitudės augimą nuo 5 impulsų papliūpoje, kur prasideda stiklo skaldymo procesas (**žr. 44a pav.**). Šiuo atveju, bendras paviršiaus nelygumų parametras S_a nenaudojant papliūpų režimo buvo 0,54 ± 0,17 µm. Tada, sumažėjo 19 % stiklą frezuojant su 2-3 impulsais ir pradėjo tolygiai augti toliau didinant impulsų skaičių GHz papliūpoje. Dėl intensyvaus stiklo skaldymo, bendras paviršiaus nelygumas S_a išaugo 17,7 karto iki 9,6 ± 2,3 µm, lyginant tradicinį pavienio impulso ir 40-ies impulsų GHz papliūpoje režimus.

Panašus perėjimas ties 5 lazeriniais impulsais GHz papliūpoje, gali būti pastebėtas lyginant ir didžiausius vidutinius krašto pažeidimo ilgius (raudonos spalvos kreivė; **žr. 46 pav.**). Nenaudojant papliūpų režimo, pažeidimų ilgis siekė 14,6 ± 4,0 µm. Stiklą frezuojant su 2-3 impulsais papliūpoje – pažeidimų ilgiai šiek tiek išaugo, bet vertės vis dar liko paklaidų ribose. Tuo tarpu nuo 5 impulsų papliūpoje buvo stebimas spartus DKP augimas. Ties 5 impulsais jis siekė 23,3 ± 9,4 µm, o ties 40 impulsų papliūpoje išaugo iki 78,3 ± 27,3 µm, o tai buvo 5,4 karto daugiau, lyginant su rezultatais, gautais frezuojant stiklą tradiciniu pavienio impulso režimu.



47 pav. *Išfrezuotų laukelių topografijos naudojant pavienio impulso (a) ir GHz papliupų režimą sudarytą iš 40 impulsų (b). Abejais atvejais naudotas energijos įtėkis buvo lygus 238.5 J/cm^2. Topografijose pavaizduoti išfrezuoti paviršiai kartu su lazeriu nepaveikto stiklo paviršiumi bei DKP matavimo būdu.*

5.3. Pagrindiniai lydyto kvarco frezavimo tyrimo rezultatai ir išvados

- Trumpesni 320 fs lazeriniai impulsai leido pašalinti iki 14 kartų plonesnius medžiagos sluoksnius lyginant su 10 ps trukmės impulsais. Minimalus pašalinamas medžiagos sluoksnis panaudojant femtosekundinius impulsus siekė 0,94 µm skaidriam paviršiui ir 50 nm pašiurkštintam.
- Femtosekundiniais impulsais buvo suformuojami mažesnio šiurkštumo stiklo paviršiai. Mažiausias pasiektas paviršiaus šiurkštumas S_a buvo lygus 130 nm – apie 4,5 karto mažiau negu pikosekundiniais impulsais.
- Lydyto kvarco abliacija femtosekundiniu lazeriu buvo stabilesnė – pašalinamos medžiagos sluoksnio storis buvo stabilus abliuojant iki 256 sluoksnių. Tuo tarpu, pikosekundiniais impulsais abliuojant stiklą, pašalinamo sluoksnio storis didėjo didinant sluoksnių skaičių.
- Femtosekundiniais lazeriniais impulsais buvo galima iki 2,7 kartų greičiau frezuoti stiklą nei su pikosekundiniais impulsais dėl 11,5 karto didesnio optimalaus atstumo tarp gretimų impulsų bei didesnio galimo naudoti lazerinio pluošto skenavimo greičio. Po 256 sluoksnių frezavimo, stiklo frezavimo sparta siekė 1,10 mm^3/min su fs ir 0,41 mm^3/min su ps impulsais.
- Panaudojant 15 impulsų papliūpoje režimą buvo stebimas 49 µm^3/µJ medžiagos pašalinimo efektyvumas, kuris buvo 12,7 karto didesnis lyginant su abliacija pavieniais impulsais. Tai buvo susiję su intensyvesniu stiklo paviršiaus daužymu ir lydyto

kvarco šalinimu stambiomis frakcijomis. Papildomai lazerinės spinduliuotės fokusavimosi nulemti tūriniai pažeidimai galėjo mažinti viso stiklo tūrinį vientisumą bei stiprumą, o tai galėjo prisidėti prie intensyvesnio stiklo pašalinimo didesnėmis frakcijomis.

- Dėl intensyvėjančio stiklo skaldymo naudojant GHz papliūpų režimą prastėjo frezavimo kokybė. Bendras paviršiaus nelygumas S_a ir didžiausias krašto pažeidimo ilgis išaugo atitinkamai 17,7 karto (nuo $0{,}54 \pm 0{,}17$ iki $9{,}60 \pm 2{,}33$ µm) bei 5,4 karto (nuo $14{,}6 \pm 4{,}0$ iki $78{,}3 \pm 27{,}3$ µm), lyginant tradicinį pavienio impulso ir 40-ies impulsų GHz papliūpoje režimus.

6. Lęšių masyvo formavimo ir poliravimo CO_2 lazeriu tyrimai

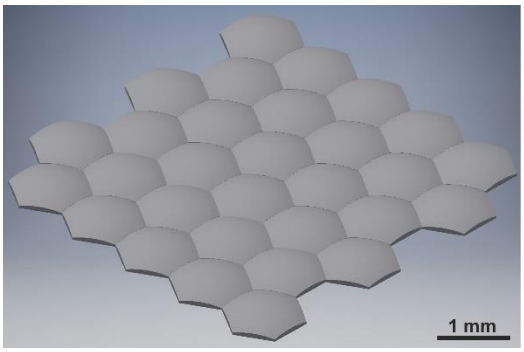
Šiame skyriuje aprašyti rezultatai buvo publikuoti [S2] straipsnyje ir pristatyti [C2], [C3] tarptautinėse konferencijose

Stiklo paviršiaus frezavimo eksperimentai IR lazeriais (**žr. 5 skyrių**) parodė, kad norint išlaikyti aukštą paviršiaus kokybę (kuo mažesnį šiurkštumą ir krašto apskeldėjimo ilgį) frezavimo metu reikia naudoti tradicinį pavienio impulso lazerinį režimą arba iki 3 impulsų GHz papliūpoje (dar išvengiama stiklo daužymo). Paprastumo dėlei, konkretus optinis elementas (lęšių masyvas) buvo toliau formuojamas naudojant tik tradicinį pavienio impulso režimą. Tokį pasirinkimą lėmė tai, kad gauti kokybiniai rezultatai buvo panašūs. Stiklą frezuojant 3 impulsų GHz papliūpų režimu, palyginti su pavienių impulsų režimu, frezuotos zonos kraštų apskeldėjimas padidėjo tik iki 17 %, o bendrasis paviršiaus nelygumo parametras S_a sumažėjo iki 19 %. Vis dėlto didesnė šiluminė akumuliacija GHz papliūpų režime yra nepageidaujama ilgėjant optinio elemento formavimo procesui, nes gali susidaryti papildomi spinduliuotės sklaidos centrai.

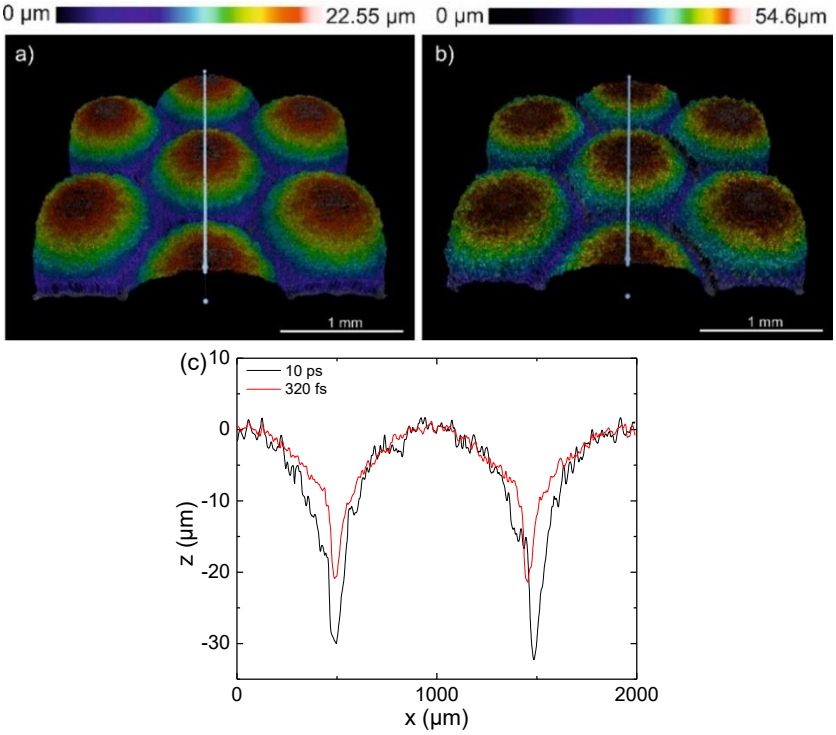
Taigi, lęšių masyvai buvo formuojami pikosekundiniu ir femtosekundiniu IR lazeriais pavienio impulso režimu. Šie elementai buvo papildomai poliruojami naudojant CO_2 lazerį, siekiant sumažinti jų paviršiaus šiurkštumą ir juos pritaikyti optinėse sistemose. Galiausiai, abejomis impulsų trukmėmis pagaminti elementai buvo palyginami tarpusavyje ir ištestuojami fokusuojant lazerinę spinduliuotę į CCD kamerą.

6.1. Lęšių masyvo paviršiaus formavimas

Trisdešimt 1 mm skersmens lęšių, išdėstytų 1 mm periodu, buvo formuojami tais pačiais parametrais kaip ir testuojant frezavimo stabilumą **5.1.2 skyriuje**. Vienintelis skirtumas, kad dabar po kiekvieno skenavimo buvo papildomai 33 laipsniais pasukama skenavimo kryptis. Tai buvo atliekama tam, kad išvengti stiklo paviršiaus pažeidimo dėl pakartotinio skenavimo krypties persiklojimo, kas buvo pastebėta kitame tyrime [153]. Tuo tarpu patys pusės sferos formos lęšiai buvo suformuoti naudojant 3D CAD brėžinį (**žr. 48 pav**.) padalintą į 42 2D sluoksnius, kurių storis atitiko 0,5 µm. CAD brėžinyje suprojektuoto lęšio paviršiaus radiusas buvo lygus 1,2 mm, o frezavimas truko 34 ir 50 minučių atitinkamai su femtosekundiniu ir pikosekundiniu lazeriais.



48 pav. *Lęšių masyvo CAD brėžinys. Masyvas buvo sudarytas iš 30 lęšių, kurių paviršiaus kreivumo radiusas buvo lygus 1,2 mm.*



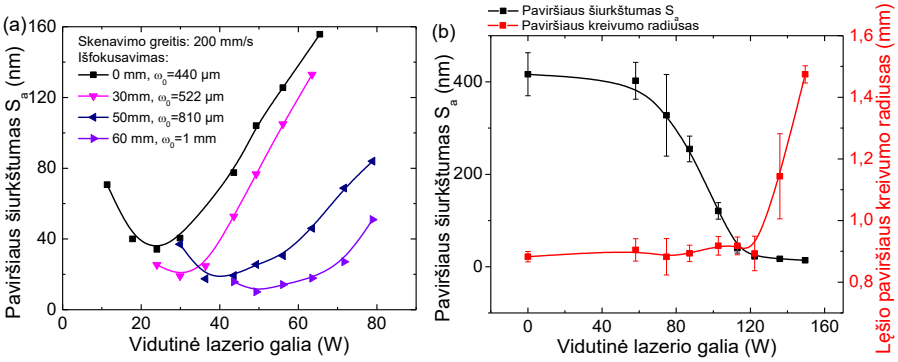
49 pav. *Suformuotų lęšių masyvų topografijos, kai jos buvo formuojamos su fs (a) ir ps (b) lazeriniais impulsais. Papildomai pateikti lęšių profiliai (c), kurių matavimo vietą atitinka balta linija topografijose.*

Suformuotų lęšių masyvų topografijos ir išmatuoti atskiro lęšio profiliai pateikti **49 paveiksle**. Kaip buvo galima numatyti, giliau stiklas buvo išfrezuojamas su ps impulsais. Gautas apie 33,5 % didesnis atstumas tarp aukščiausios ir žemiausios vietos lęšių profilyje. Tai susiję su nuolat

didėjančiu pašalinamo sluoksnio storiu, didėjant atliekamų skenavimų skaičiui (**žr. 41a pav.**). Kita vertus, nepaisant gilesnių profilių (pašalinto didesnio stiklo tūrio) gautų abliuojant stiklą su ps impulais, frezavimo efektyvumas ir sparta buvo atitinkamai 4,8 (4,3 $\mu m^3/\mu J$ su femtosekundiniu ir 0,9 $\mu m^3/\mu J$ su pikosekundiniu lazeriu) ir 5,5 (1,1 mm^3/min su femtosekundiniu ir 0,2 mm^3/min su pikosekundiniu lazeriu) karto didesni formuojant elementą su trumpesniais lazeriniais impulsais.

6.2. Lęšių masyvo paviršiaus poliravimo CO_2 lazeriu tyrimas

Po lęšių formavimo etapo stiklo paviršius buvo per šiurkštus optiniams taikymams. Todėl femtosekundiniu IR lazeriu suformuoti paviršiai toliau buvo poliruojami naudojant CO_2 lazerį. Šiuo atveju, 2×2 mm^2 dydžio ir $S_a \approx 400$ nm šiurkštumo ploteliai buvo aplydomi, skenuojant CO_2 lazerio pluoštą lygiagrečiomis linijomis atskirtomis 25 µm tarpu. Fiksavus skenavimo greitį (200 mm/s) ir impulsų pasikartojimo dažnį (10 kHz), buvo keičiami vidutinė lazerio galia ir lazerinio pluošto dydis ant bandinio paviršiaus (**žr. 50a pav.**). Pluošto dydis buvo keičiamas išfokusuojant lazerinį pluoštą – bandinį tolinant nuo fokusuojančiojo lęšio.

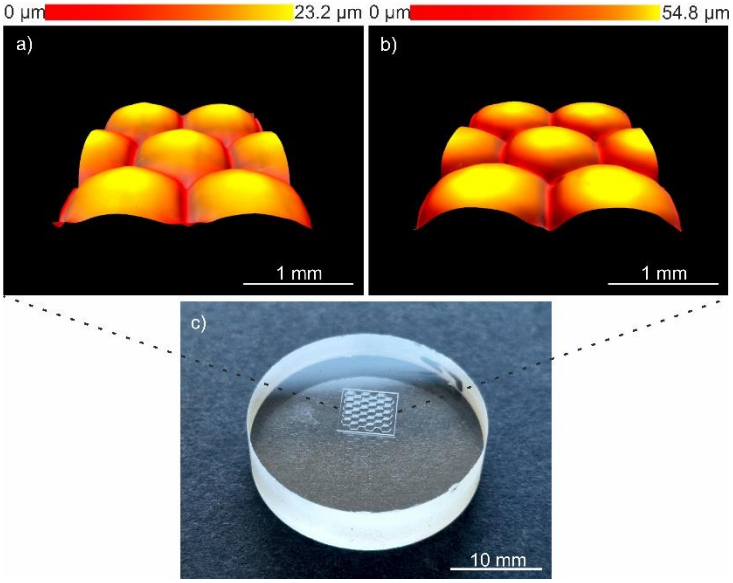


50 pav. *(a) Paviršiaus šiurkštumo S_a priklausomybė nuo vidutinės lazerio galios ir atstumo tarp lazerinio pluošto fokuso padėties bei bandinio paviršiaus. Legendoje taip pat nurodyti atitinkami pluošto skersmenys, išmatuoti ties bandinio paviršiumi. Poliruoti 2×2 mm^2 dydžio ploteliai. (b) Paviršiaus šiurkštumo S_a (juodos spalvos rezultatai) ir poliruojamų lęšių paviršiaus kreivumo radiuso (raudonos spalvos rezultatai) priklausomybė nuo naudotos vidutinės lazerio galios, kai buvo poliruoti suformuoti lęšių masyvai.*

Poliravimo metu buvo svarbu, kad stiklo paviršius įkaistų iki lydymosi temperatūros. Tai lėmė, kad optimali vidutinė lazerio galia (lemianti mažiausią paviršiaus šiurkštumą) didėjo išfokusuojant lazerinį pluoštą, kad būtų kompensuojama energijos dozė, reikalinga išlydyti stiklo paviršių (**žr.**

50a pav.). Iš to galima suprasti, kad pakeičiant bet kokį apdirbimo parametrą, iš naujo teks optimizuoti vidutinę lazerio galią.

Išmatavus aplydytų paviršių šiurkštumą (S_a), paaiškėjo, kad norint pasiekti minimalų – 11 nm – šiurkštumą, reikia išfokusuoti CO_2 lazerio pluoštą 60 mm atstumu (didžiausiu galimu sistemoje), kad jo skersmuo ant bandinio paviršiaus būtų apytiksliai 2 mm. Kita vertus, mažėjant lazerinio pluošto skersmeniui ir / ar didėjant vidutinei lazerio galiai nuo optimalios vertės (lemiančios mažiausią šiurkštumą), šiurkštumai didėjo dėl prasidedančios paviršiaus abliacijos ir stipresnio stiklo paviršiaus perlydimo. Pastarasis reiškinys lėmė paviršiaus banguotumo didėjimą.



51 pav. *Nupoliruotų lęšių masyvų topografijos, kai paviršių formavimas buvo atliekamas panaudojant femtosekundinį (a) ir pikosekundinį (b) lazerius. Papildomai, pateikta ir lęšių masyvo nuotrauka (c).*

Fiksavus lazerinio pluošto skersmenį ant bandinio paviršiaus, lygų 2 mm (60 mm išfokusuotas pluoštas), buvo tiriamas suformuotų lęšių masyvų poliravimas (**žr. 50b pav.**). Ties kiekviena lazerio galia, buvo poliruojama po penkis lęšių masyvus. Po to matuojamas jų paviršiaus šiurkštumas S_a bei paviršiaus kreivumo radiusas. Tyrimų tikslas buvo gauti mažiausią paviršiaus šiurkštumą neprarandant pradinės lęšių formos, o tai buvo pasiekta naudojant 120 W lazerio galią (**žr. 50b pav.**).

Galutinių lęšių masyvų, suformuotų ps ir fs trukmių lazeriniais impulsais, poliravimo procesas buvo atliekamas dviem skenavimais. Pirmuoju buvo perlydomas stiklo paviršius, skenuojant lazerinį pluoštą 200 mm/s greičiu, o antruoju skenavimu buvo nuvalomas stiklo paviršius, skenuojant pluoštą

didesniu greičiu – 600 mm/s. Valymo etapas buvo pasiūlytas S. Schwarz kaip papildomas žingsnis užtikrinant geresnę elemento optinę kokybę [14]. Visi šie apdirbimo parametrai buvo naudojami, kai vidutinė lazerio galia buvo fiksuota ties 120 W. Nupoliruotų paviršių topografijos pateiktos **51 paveiksle**.

Galutinės paviršiaus šiurkštumo, banguotumo, nuokrypio nuo modeliuotos formos bei lęšių kreivumo radiuso vertės pateiktos **8 lentelėje**. Lęšių, suformuotų naudojant fs impulsus, paviršiaus šiurkštumas S_a prieš poliravimą buvo 2,2 kartus mažesnis nei suformuotų ps impulsais. Atitinkamai po poliravimo, šių lęšių paviršiaus kokybė taip pat buvo geresnė – paviršiaus šiurkštumas buvo 2 kartus mažesnis.

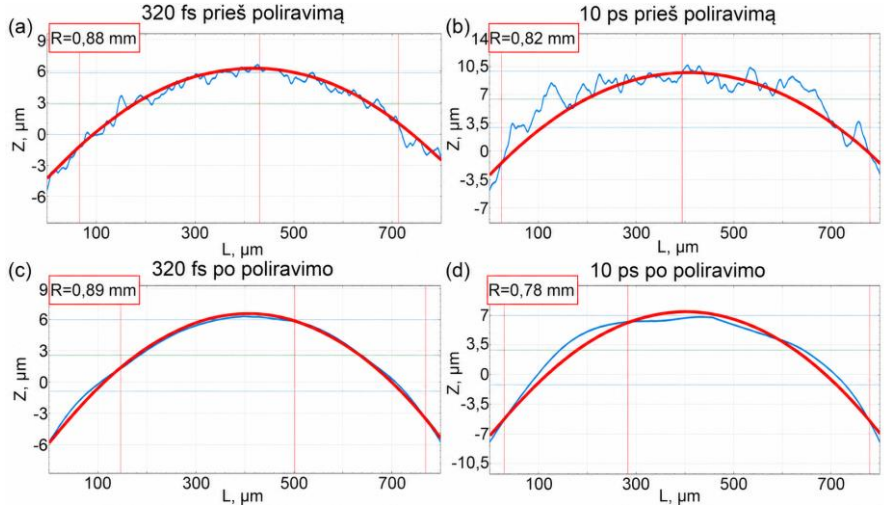
Vertinant paviršiaus banguotumą W_q, galima matyti, kad dar prieš poliravimo etapą, elemento, pagaminto su pikosekundiniais IR impulsais, banguotumas buvo apie 3,7 karto didesnis ir siekė 1,18 µm (trumpesnių impulsų atveju – 0,320 µm). Po poliravimo šis santykis išliko panašus – pikosekundiniais impulsais suformuotų lęšių paviršiaus banguotumas W_q buvo 3,9 karto didesnis (0,78 µm pikosekundinių impulsų ir 0,2 µm femtosekundinių impulsų atvejais).

Lentelė 8. *Išmatuotos suformuotų lęšių paviršiaus šiurkštumo S_a bei R_q, banguotumo w_q, kreivumo radiuso R vertės prieš lęšių poliravimą ir po jo. Taip pat pateiktos apskaičiuotos poliruotų lęšių efektyvaus židinio nuotolio EFL vertės bei išmatuotas vidutinis lęšių paviršiaus formos nuokrypis delta nuo idealios sferos. Lęšių masyvai buvo suformuoti su 10 ps ir 320 fs trukmės lazeriniais impulsais.*

	Prieš poliravimą			Po poliravimo				
	S_a / R_q, µm	W_q, µm	R, mm	S_a / R_q, µm	W_q, µm	R, mm	*EFL*, mm	*delta*, µm
10 ps	0,88 / 1,15	1,18	0,73 ± 0,14	0,06 / 0,08	0,78	0,81 ± 0,21	1,77 ± 0,65	0,8 ± 0,4
320 fs	0,4 / 0,52	0,32	0,88 ± 0,01	0,03 / 0,04	0,20	0,88 ± 0,01	1,92 ± 0,04	0,2 ± 0,1

Matavimai parodė, kad ir galutiniame elemento formavimo etape stiklo frezavimas fs impulsais buvo stabilesnis – paviršiaus kreivumo radiuso standartinis nuokrypis nuo vidutinės vertės (paklaidos) buvo mažesnės. Be to, lęšių forma nepakito po stiklo paviršiaus perlydimo jų poliravimo metu. Kita vertus, lęšių, suformuotų naudojant ps trukmės impulsus, kreivumo radiusas

po poliravimo padidėjo per 11 %. Taip galėjo nutikti todėl, kad prieš poliravimą ps impulsais suformuotų lęšių kreivumo radiusas buvo mažesnis nei lęšių suformuotu naudojant femtosekundinį lazerį. Tai reiškia, kad ps impulsais suformuotų lęšių kraštai buvo statesni ir lydalas galėjo dėl gravitacijos lengviau nubėgti nuo lęšių viršūnių į šonus, didinant paviršiaus kreivumo radiusą.

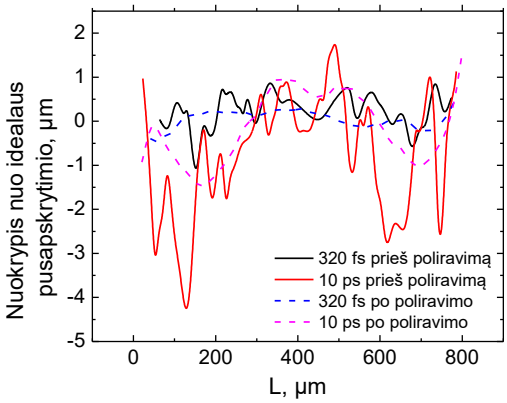


52 pav. *Masyvus sudarančių lęšių profiliai (mėlyna linija) ir jo atitikmuo idealiam apskritimui (raudona linija) prieš (a, b) ir po (c, d) poliravimo etapo. Lęšiai suformuoti femtosekundiniu (a, c) ir pikosekundiniu (b, d) lazeriais. Legendoje nurodytas idealaus apskritimo radiusas.*

Papildomai, buvo pastebėta, kad trumpesniais lazeriniais impulsais pavyko tiksliau suformuoti sferinius paviršius. Vertinant paviršių formos atitikimą idealiam apskritimui (atitinkamai mėlyna ir raudona kreivės, **žr. 52 pav.**), lęšiai prieš ir po poliravimo labiau atitiko užduotą formą, kai buvo formuoti femtosekundiniu lazeriu (**žr. 52a, c pav.**). Išmatavus gautų paviršių nuokripį nuo idealios formos (iš raudonos kreivės atimta mėlyna; **žr. 52 pav.**) gauta, kad femtosekundiniais impulsais suformuotų paviršių vidutinis nuokrypis buvo 3-is (0,4±0,3 µm su femtosekundiniais ir 1,2±1,1 µm su pikosekundiniais impulsais) ir 4-is (0,2±0,1 µm su femtosekundiniais ir 0,8±0,4 µm su pikosekundiniais impulsais) karto mažesni atitinkamai prieš ir po poliravimo etapo (**žr. 53 pav.**). Be to, pikosekundiniais lazeriniais impulsais formuoti lęšiai pasižymėjo didesniu paviršiaus šiurkštumu bei banguotumu, o lęšio viršūnė buvo plokštesnė lyginant su idealiu paviršiumi. Bendrai dėl visų šių priežasčių, šie lęšiai galėjo didinti jais sklindančios šviesos aberacijas. Dėl plokštesnės viršūnės galėjo stiprėti sferinės aberacijos, kai centre lęšio spindulių laužimas yra silpnesnis nei kraštuose. Didesni bendri

neatitikimai idealiai sferos formai didino bangos fronto iškraipymus, kai lokalioje lęšio vietoje šviesa buvo nukreipta „neteisinga“ kryptimi.

Galiausiai, nupoliruoti lęšiai charakterizuoti naudojant puslaidininkinį 520 nm bangos ilgio lazerį (**žr. 24 pav.**). Šiuo atveju, puslaidininkinio lazerio pluoštas buvo fokusuojamas suformuoto lęšių masyvo į CCD kamerą (**žr. 54 pav.**).



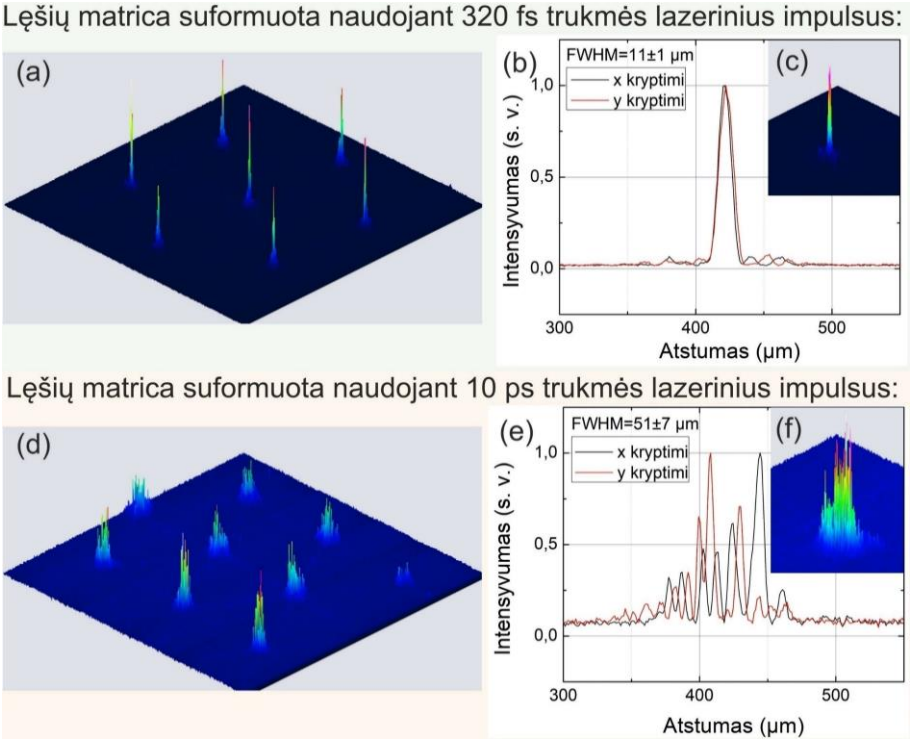
53 pav. *Suformuotų paviršių nuokrypis nuo idealios formos prieš poliravimo etapą (vientisos kreivės) ir po jo (punktyrinės linijos), kai lęšiai formuoti femtosekundiniu ir pikosekundiniu lazeriais.*

Dėl geresnio formavimo stabilumo, tiksliau suformuoto sferinio paviršiaus ir geresnių paviršiaus kokybės parametrų, lęšiai, suformuoti naudojant fs trukmės impulsus, pasižymėjo geresniu atskirų lęšių formuojamo atvaizdo atsikartojimu. Šiuo atveju, intensyvumo smailės gautos iš atskirų lęšių sufokusuotų lazerinių pluoštų, buvo vienodesnės bei mažiau išsklaidytos nei naudojant elementą, pagamintą su ps trukmės impulsais (**žr. 54 pav.**). Aišku, prastesnį lęšių, suformuotų naudojant ilgesnius impulsus, veikimą gali lemti ne tik paviršiaus formos neatitikimas ir didesnis banguotumas / šiurkštumas, bet dar ir galimi defektai suformuoti stiklo tūryje. C. Corbari [157] parodė, kad lydyto kvarco abliacija su pikosekundiniais impulsais nulėmė gilių skylimų formavimąsi, kurie irgi gali veikti kaip lazerinės spinduliuotės sklaidos centrai.

Galiausiai, galime matyti, jog femtosekundiniais impulsais suformuotas lęšių masyvas geriau fokusavo lazerinį pluoštą (**žr. 54a-c pav.**). Išmatuotas sufokusuoto pluošto skersmuo pusės intensyvumo smailės aukštyje buvo iki penkių kartų mažesnis ir lygus 11 ± 1 µm. Tuo tarpu, ilgesniais impulsais suformuotas elementas fokusavo diodo lazerinį pluoštą į 51 ± 7 µm skersmens dėmę.

Kalbant apie plačiausiai taikomą 1030/1064 nm IR optiką, šiame darbe suformuotų optinių paviršių šiurkštumo parametrai yra artimi

specifikuojamiems (**žr. 2.3 skyrių**) ir tinkami specifiniams taikymams. Tačiau paviršių banguotumo (W_q) reikšmės ir atsirandančio paviršiaus formos nuokrypio valdymas vis dar išlieka pagrindine problema dėl ko lazerinio frezavimo bei poliravimo technologija kol kas neprilygsta tradiciniam mechaniniam frezavimui ir poliravimui, kai gaminama standartinių formų simetrinė optika. Vis dėlto, banguotumo įtaka tampa mažiau reikšminga lęšių masyvuose, skirtuose koherentinių ir nekoherentinių pluoštų homogenizavimui, kur reikalingi ~1 mm dydžio bei net neperiodiškai išsidėstę lęšiai. Tokiu atveju šiame darbe išdirbta technologija yra itin patraukli ir perspektyvi vienetinių ar mažų serijų lęšių optikos gamybai.



54 pav. *Su CCD kamera užfiksuoti lazerinio pluošto atvaizdai, kurie buvo gauti fokusuojant pluoštą su pagamintais lęšių masyvais (a, d), atskirų smailių intensyvumo skirstinių profiliai (b, e) ir padidintas atskiros intensyvumo smailės atvaizdas (c, f). Lęšių masyvai buvo suformuotos naudojant fs (a, b, c) ir ps (d, e, f) trukmės lazerinius impulsus bei nupoliruotos su CO_2 lazeriu.*

Stebėti lazerinio optinių elementų formavimo trūkumai (šiurkštumas, banguotumas, formos neatitikimas) gali būti toliau mažinami didinant gamybos iteracijų skaičių į procesą įterpiant elemento formos korekcijas panaudojant stiklo abliacijos technologiją su tuo pačiu CO_2 lazeriu [99]. Tokiu būdu selektyviai būtų galima pašalinti nanometrų eilės nelygumus išlyginant

paviršių. Būtent A. Temmler [120] pademonstravo galimybę pašalinti iki 10 nm storio sluoksnius CO_2 lazeriu apdirbant lydytą kvarcą. Panaši (papildyta) gamybinė grandinė yra plėtojama „Fraunhofer“ institute.

***Lentelė 9**. Skirtingomis technologijomis suformuotų lęšių masyvų šiurkštumų palyginimas.*

Technologija	Medžiagos tipas	Paviršiaus šiurkštumas R_a	Paviršiaus šiurkštumas R_q	Komentarai
Ne lazerinės technologijos				
Mechaninis frezavimas	Polimeras	43 nm [122]	-	
Karštas presavimas	Polimeras	11 nm [123]	-	
Rašalinis spausdinimas	Polimeras	2 nm [8]	-	
Lazerinės technologijos				
Lazerinis frezavimas + perlydimas	Stiklas	783 nm [105]; 3,8 nm [106]	-	
Lazerinis frezavimas + poliravimas	Stiklas	25 nm [14]	40 nm [šis darbas]	
Lazerinis modifikavimas + cheminis ėsdinimas	Stiklas	100 nm [108]	-	
LIBWE	Stiklas	15 nm [110]	18 nm [110]	
LIBDE	Stiklas	30-50 nm [113]	-	
Lazerinė polimerizacija	Polimeras	30 nm [118]	2,5 nm [116]	Matuoti ne lęšiai, o plokšti paviršiai.

Galiausiai šiame darbe pasiektas lęšių masyvų šiurkštumas (R_q = 40 nm) gali būti palygintas su kitų tyrimų rezultatais (**žr. 9 lentelę**). Tiesa, tiesioginis palyginimas yra sudėtingas dėl skirtingų matavimo metodikų, erdvinių filtrų naudojimo, kurie dažnai būna nepateikti bei

publikacijose pateikiamų skirtingų parametrų (R_a arba R_q). Papildomai, tyrimuose pateikti banguotumo parametrai sutinkami ypač retai.

Vis dėlto, taikant analogišką lazerinio frezavimo ir poliravimo technologiją stikle, kituose darbuose gaunamos panašios paviršiaus šiurkštumo vertės, siekiančios $R_a = 25$ nm (R_a paprastai būna mažesnis nei R_q). Nagrinėjant kitus formavimo stikle metodus, mažiausi šiurkštumai fiksuojami naudojant LIBWE (15-18 nm) bei lazerinį perlydymą, kur, pagal literatūros duomenis, pasiekiamas 3,8 nm šiurkštumas atitinkantis pradinį stiklo paviršių. Tačiau LIBWE atveju bandinys dažnai užteršiamas taikinio medžiaga (šiuo atveju skysčio dalelėmis), o smarkiai perlydant stiklo paviršių, prarandamas lęšių formavimo tikslumas.

Į palyginimą įtraukus polimerines medžiagas, išsiskiria rašalinio spausdinimo ir lazerinės polimerizacijos technologijos, pasiekiančios 2-2,5 nm šiurkštumą. Visgi svarbu atkreipti dėmesį, kad itin mažos vertės gaunamos lazerinės polimerizacijos metu (2,5 nm) dažniausiai gaunamos matuojant plokščius paviršius, o ne realius lęšių elementus. Kita vertus, lazerinė technologija išlieka pranašesnė, lyginant su rašaliniu spausdinimu, dėl gamybos lankstumo, leidžiančio laisviau kontroliuoti formuojamų lęšių geometriją.

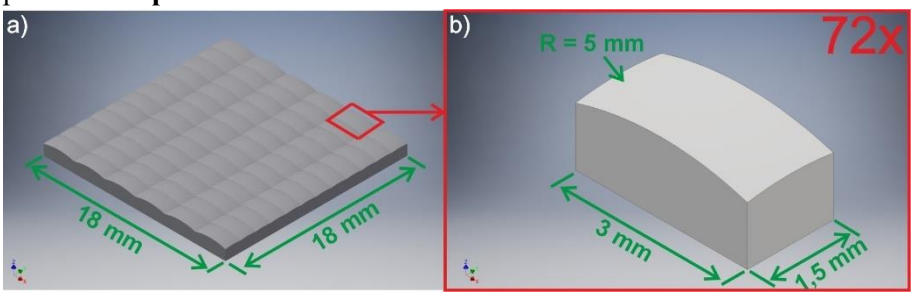
6.3. Pagrindiniai lęšių masyvo formavimo ir poliravimo tyrimo rezultatai ir išvados

- Pademonstruota, kad įmanoma IR pikosekundiniu bei femtosekundiniu lazeriu suformuoti 3D paviršius lydytame kvarce, kurių paviršiaus šiurkštumo parametrai S_a atitinkamai siekė 0,88 ir 0,4 µm.
- Formuojant lęšius pikosekundiniu lazeriu buvo stebėtas didesnis vidutinis nuokrypis nuo idealios formos, kuris po poliravimo etapo siekė $0{,}8 \pm 0{,}4$ µm. Tuo tarpu naudojant femtosekundinius impulsus, vidutinis nuokrypis nuo idealios formos buvo iki 4 kartų mažesnis ($0{,}2 \pm 0{,}1$ µm).
- CO_2 lazeriu poliruojant plokščią, femtosekundiniu lazeriu išabliuotą paviršių, kurio šiurkštumas S_a siekė 0,4 µm, buvo pasiekta minimali nupoliruoto paviršiaus šiurkštumo S_a vertė lygi 11 nm.
- Poliruojant femtosekundiniu lazeriu suformuotą lęšių sferinį paviršių, S_a vertė sumažėjo iki 30 nm, tuo tarpu nupoliravus pikosekundiniu lazeriu suformuotą paviršių, S_a sumažėjo iki 60 nm.

- Po poliravimo, lęšių masyvas suformuotas femtosekundiniu lazeriu išlaikė paviršiaus formą, tuo tarpu poliruojant pikosekundiniu lazeriu suformuotą sferinį paviršių, paviršiaus radiusas padidėjo 11 % iki 0,81±0,21 mm.
- Pagamintų optinių elementų analizė parodė, kad lęšiai, suformuoti pikosekundiniais impulsais, prasčiau veikė kaip optiniai elementai dėl didesnio neatitikimo idealiam sferiniam paviršiui, didesnio paviršiaus šiurkštumo ir banguotumo bei galimų didesnių po paviršinių defektų.
- Formuojant lęšių masyvus, femtosekundinis lazeris vienareikšmiškai yra pranašesnis lyginant su pikosekundiniu lazeriu. Vertinant poliruoto paviršiaus kokybę, buvo tiriamas paviršiaus šiurkštumas R_q, kurio vertė buvo artima standartinės optikos specifikacijoms ($\lambda/7$). Elemento suformuoto femtosekundiniais IR impulsais paviršiaus šiurkštumas R_q siekė 40 nm ir ši vertė buvo 2 kartus mažesnė negu gauta matuojant elementą suformuotą su ilgensiais lazeriniai impulsais. Visgi, poliruotų paviršių banguotumo W_q reikšmės buvo gerokai prastesnės ir siekė 780 nm ir 200 nm atitinkamai pikosekundiniais ir femtosekundiniais impulsais formatuotiems paviršiams.

7. Lęšių masyvų homogenizatoriaus gamyba ir taikymai

Lazerinio frezavimo ir poliravimo tyrimų rezultatai buvo pritaikyti lęšių homogenizatoriaus gamybai, integruojant pagamintus elementus į fotolitografijos sistemą ir siekiant formuoti puslaidininkinio šviestuko (Ultraviolet Chip-on-Board LED CBM-160X-UV-Y32-Q380-22) generuojamo UV pluošto intensyvumo skirstinį. Optinė sistema turėjo formuoti plokščiojo pasiskirstymo stačiakampio formos pluoštą, kurio viena kraštinė bent 2 kartus ilgesnė už kitą. Tam pasiekti buvo formuojami 1,5 × 3 mm^2 dydžio 5 mm paviršiaus kreivumo radiuso stačiakampio formos lęšiai užpildantys visą 25,4 mm skersmens ir 6,3 mm storio lydyto kvarco padėklą (formuojami 72 lęšiai). Šio formuojamo paviršiaus CAD brėžinys pateiktas **55 paveikslse**.

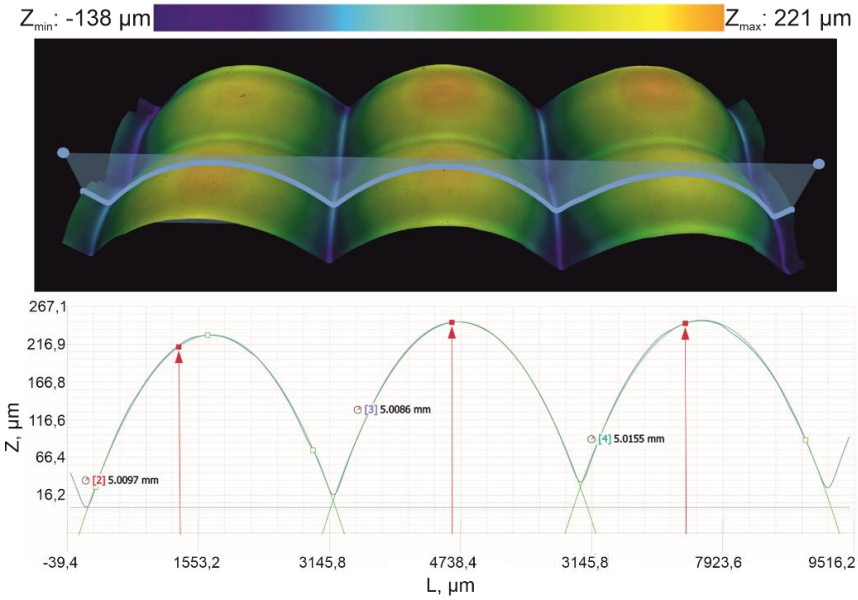


55 pav. *Stačiakampio formos lęšių masyvo CAD schema. Pavaizduotas pilnas masyvas sudarytas iš 72 lęšių (a) ir pavienis lęšis elemente (b). R yra lęšio paviršiaus kreivumo radiusas.*

Atsižvelgiant į **5 ir 6 skyrių** tyrimų rezultatus, lęšių masyvų formavimui buvo pasirinkta naudoti 320 fs trukmės lazerinius impulsus. Svarbu paminėti, kad dėl lazerinio apdirbimo sistemos specifikos buvo apribotas skenavimo greitis iki 3 m/s ir sumažintas impulsų pasikartojimo dažnis iki 200 kHz. Siekiant paspartinti gamybą, buvo aukojama formavimo skyra, dėl to nuimamas sluoksnio storis siekė 1,12 µm. Stiklo paviršiaus pašiurkštinimui ir tolimesniam lęšių formavimui atlikti buvo keičiama tik energijos įtėkio vertė. Pašiurkštinimui naudotas energijos įtėkis buvo 7,6 J/cm^2, o lęšių formavimui – 2,5 J/cm^2.

Iš viso buvo pagaminti du lęšių masyvai, reikalingi LED šaltinio intensyvumo skirstinio lyginimui. Suformuotų lęšių kreivumo radiusas ir paviršiaus šiurkštumas S_a buvo atitinkamai 4,92 ± 0,04 mm ir 550 ± 25 nm. Šiam elementui poliruoti buvo optimizuoti CO_2 lazerio parametrai: 10 kHz impulsų pasikartojimo dažnis, 80 µs impulso trukmė, 180 W vidutinė lazerio galia, 25 µm tarpas tarp skenuojamų linijų. Vėlgi, poliravimas buvo atliekamas dviem skenavimais. Stiklo paviršiaus perlydymui lazerinis

pluoštas buvo skenuojamas 180 mm/s greičiu. Antram skenavimui greitis buvo padidintas iki 500 mm/s. Šiuo atveju poliravimo parametrai pasikeitė dėl didesnių pavienio lęšio matmenų ir didesnio jų užimamo ploto, dėl ko reikėjo iki lydymosi temperatūros įkaitinti didesnį stiklo paviršių (buvo reikalinga didesnė energijos dozės vertė).

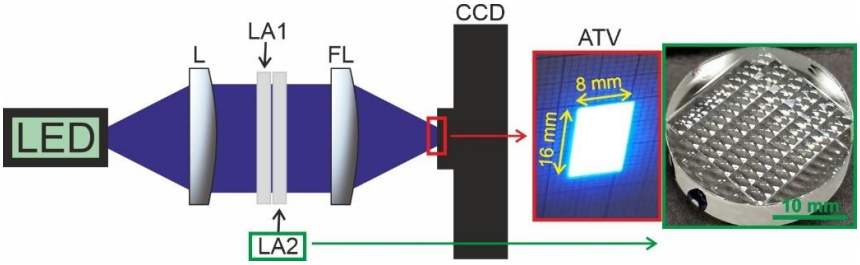


56 pav. *Pagaminto optinio elemento dalies topografija ir paviršiaus profilis su aproksimuotais idealiais apskritimais (žalios linijos). Raudonos rodyklės profilyje nurodo apskritimų spindulius, kurių ilgiai nurodyti šalimais jų. Topografijoje matoma mėlyna linija atitinka profilio matavimo vietą.*

Nupoliravus lęšių masyvą, lęšių paviršiaus kreivumo radiusas padidėjo iki projektuotos vertės 5,02 ± 0,06 mm (**žr. 56 pav.**). Šiuo atveju maksimalus lęšio paviršiaus nuokrypis nuo idealaus paviršiaus vertikalioje ašyje siekė 4,2 %, o vidutinė vertė išmatavus 9 vietose (didžiausi nuokrypiai per matuotą profilį) siekė 3 %. Tuo tarpu paviršiaus šiurkštumas S_a sumažėjo 26 kartus iki 21 ± 10 nm. Tokiam vienam optiniam elementui, sudarytam iš 72 stačiakampių lęšių, pagaminti reikėjo apytiksliai 8 valandų ir 48 minučių. Šį laiką sudarė lęšių formavimo etapas (8 valandos ir 45 minutės) bei stiklo poliravimas (2 minutės ir 38 sekundės).

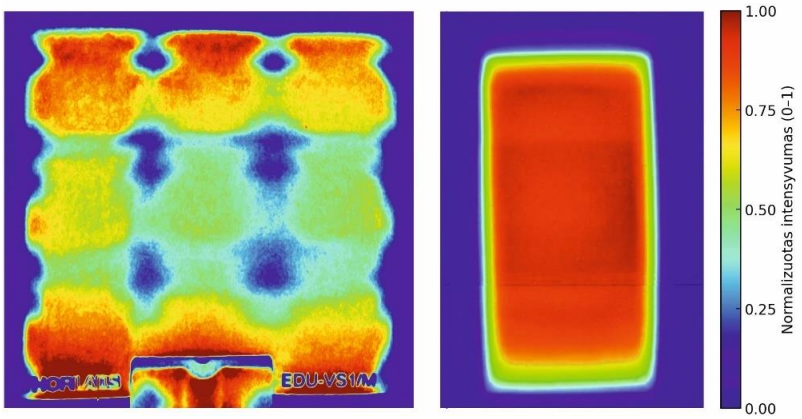
Galiausiai, pagaminti lęšių masyvai buvo išbandyti realioje optinėje sistemoje, formuojant LED masyvo intensyvumo skirstinį (**žr. 57 pav.**). Iš pradžių LED masyvo generuojamas pluoštas buvo kolimuojamas plokščiai išgaubtu sferiniu lęšiu, kurio židinio ilgis buvo lygus 30 mm. Tada kolimuotas pluoštas krito ant suformuotų lęšių masyvų LA1 ir LA2. Pro pagamintus

elementus praėjęs pluoštas buvo fokusuojamas su 50 mm židinio nuotolio lęšiu ant baltos spalvos ekrano bei į CCD kamerą.



57 pav. *LED šviestukų masyvo intensyvumo skirstinio lyginimo schema. LED šviestuko generuojamas pluoštas buvo kolimuotas lęšiu L ir sufokusuojamas į CCD kamerą FL lęšiu. LA1 ir LA2 žymi pagamintus lęšių masyvus, kurių nuotrauka pateikta dešinėje (žaliame rėmelyje). ATV pažymėtoje nuotraukoje matomas suformuotas stačiakampio formos pluoštas FL lęšio židinyje. Atvaizduotas ant balto lapo paviršiaus.*

Pirmiausia, ant balto popieriaus lapo buvo atvaizduotas suformuotas intensyvumo pluoštas. Jame išmatuotos stačiakampio dimensijos - ilgis ir plotis atitinkamai buvo 16 ir 8 mm. Iš šių duomenų buvo pastebėta, kad išlygintas pluoštas yra didesnis nei turimos CCD kameros apertūra. Todėl buvo atlikti trys matavimai, užfiksuojant skirtingas pluošto dalis: viršų, vidurį ir apačią (**žr. 58 pav.).** Iš gautų duomenų buvo įvertintas intensyvumo stabilumas. Suformuoto pluošto intensyvumo svyravimai nuo vidutinės vertės siekė iki 3,5 % (vidutinis kvadratinis nuokrypis, angl. root mean square RMS).



(a) (b)

58 pav. *LED šviestuko generuojamo pluošto intensyvumo skirstinys (a) ir lęšių masyvu suformuoto pluošto intensyvumo skirstinys (b). Pradinis LED šviestuko pluošto profilis išmatuotas atvaizduojant pluoštą ant baltos spalvos ekrano ir sunormuojant jį pagal intensyvumą.*

- Efektyvus borosilikatinio stiklo aušinimas ant jo sudarant tekantį vandens sluoksnį leido išnaudoti visą lazerio vidutinę galią pjaunant storiausius 550 µm storio stiklus, išvengiant bandinio destrukcijos.
- Pjaunant 300 µm storio stiklus vandenyje, pavyko suformuoti iki 1,5 karto siauresnius kanalus, o tai lėmė maždaug 1,25 karto didesnį pjovimo greitį. Bendras pjovimo greičio padidėjimas vandenyje pirmiausia yra susijęs su geometriniais formuojamo kanalo pokyčiais – siauresni kanalai leidžia kompensuoti sumažėjusią medžiagos pašalinimo spartą. Tai ypač aktualu pjaunant storus stiklus: 550 µm storio stiklo pjovimo greitis padidėjo 10,6 karto, lyginant su pjovimu ore.
- Pro tekantį vandens sluoksnį išpjautos borosilikatinio stiklo juostelės tapo atsparesnės mechaniniam poveikiui, lyginant su juostelėmis, išpjautomis ore. Šis atsparumas augo storėjant stiklui: ploniausio (110 µm) – rezultatai buvo panašūs tiek ore, tiek vandenyje, storesnio stiklo (300 µm) – atsparumas išaugo iki 12,8 %, o storiausio (550 µm) – iki 58 %.
- Pavieniai femtosekundiniai (320 fs) IR impulsai leido pašalinti iki 14 kartų plonesnius medžiagos sluoksnius nei naudojant 10 ps trukmės impulsus. Minimalus sluoksnio storis siekė 0,95 µm skaidriame ir 50 nm šiurkščiame paviršiuje. Taip pat, naudojant femtosekundinius impulsus, buvo suformuoti lygesni paviršiai. Mažiausias pasiektas paviršiaus šiurkštumas S_a siekė 130 nm, tai yra ~4,5 karto mažiau nei apdirbant pikosekundiniais impulsais. Be to, lydyto kvarco abliacija pasižymėjo didesniu stabilumu – šalinamo sluoksnio storis išliko pastovus net pašalinus iki 256 sluoksnių. Tuo tarpu, abliuojant stiklą pikosekundiniais impulsais, pašalinamo sluoksnio storis didėjo. Nepaisant to, frezavimo sparta išliko vis tiek 2,6 karto didesnė abliuojant stiklą trumpesniais impulsais.
- Naudojant femtosekundinį IR lazerį GHz papliūpų režime sudarytame iš 15 impulsų, medžiagos pašalinimo efektyvumas siekė 49 $\mu m^3/\mu J$ ir buvo 12,7 karto didesnis nei pavienių impulsų abliacijos atveju dėl intensyvesnio stiklo paviršiaus skaldymo ir stiklo pašalinimo stambesnėmis frakcijomis. Dėl šio efekto ženkliai suprastėjo frezavimo kokybė – kraštutiniu atveju

paviršiaus šiurkštumas S_a padidėjo 17,7 karto (nuo 0,54 ± 0,17 iki 9,6 ± 2,3 μm), o didžiausias krašto pažeidimo ilgis (DKP) – 5,4 karto (nuo 14,6 ± 4,0 iki 78,3 ± 27,3 μm) lyginant stiklo abliacijas pavieniais impulsais ir GHz papliūpomis.

- Vertinant poliruoto paviršiaus kokybę, lęšių masyvų formavimas femtosekundiniu (320 fs) IR lazeriu yra pranašesnis lyginant su 10 ps trukmės impulsus generuojančiu lazeriniu šaltiniu. Pasiektos paviršiaus šiurkštumo R_q vertės buvo artimos standartinės optikos specifikacijoms (λ/7). Visgi, poliruotų paviršių banguotumo W_q reikšmės buvo gerokai prastesnės ir siekė 775 nm ir 200 nm atitinkamai pikosekundiniais ir femtosekundiniais impulsais formatuotiems paviršiams. Dėl to, lazerinė optinių paviršių formavimo technologija yra daugiau tinkama mikro-optinių elementų, ar itin sudėtingos formos optinių paviršių formavimui (pvz. lęšių masyvų homogenizatoriams), kur paviršiaus banguotumas nedaro reikšmingos įtakos per šiuos elementus sklindančio pluošto kokybei.

Literatūros sąrašas / References

[1] Q. Deng, C. Du, C. Wang, C. Zhou, X. Dong, Y. Liu, T. Zhou, Microlens array for stacked laser diode beam collimation, *Holography, Diffractive Optics, and Applications II, Proc. of the SPIE* **5636**, 666–670 (2005).

[2] H. Hamam, A two-way optical interconnection network using a single mode fiber array, *Optics Communications* **150**(1–6), 270–276 (1998).

[3] P. J. Smith, C. M. Taylor, E. M. McCabe, D. R. Selviah, S. E. Day, L. G. Commander, Switchable fiber coupling using variable-focal-length microlenses, *Review of Scientific Instruments* **72**(7), 3132–3134 (2001).

[4] W. Yuan, C. Xu, L. Xue, H. Pang, A. Cao, Y. Fu, Q. Deng, Integrated double-sided random microlens array used for laser beam homogenization, *Micromachines* **12**, 673 (2021).

[5] A. Bich, J. Rieck, C. Dumouchel, S. Roth, K. J. Weible, M. Eisner, R. Voelkel, M. Zimmermann, M. Rank, M. Schmidt, R. Bitterli, N. Ramanan, P. Ruffieux, T. Scharf, W. Noell, H.-P. Herzig, N. De Rooij, Multifunctional micro-optical elements for laser beam homogenizing and beam shaping, *Photon Processing in Microelectronics and Photonics VII, Proc. of SPIE* **6879**, 68790Q (2008).

[6] S. S. Deshmukh, A. Goswami, Hot Embossing of polymers - A review, *Materials Today: Proceedings* **26**, 405–414 (2019).

[7] C. P. Lin, H. Yang, C. K. Chao, Hexagonal microlens array modeling and fabrication using a thermal reflow process, *Journal of Micromechanics and Microengineering* **13**(5), 775–781 (2003).

[8] Y. Luo, L. Wang, Y. Ding, H. Wei, X. Hao, D. Wang, Y. Dai, J. Shi, Direct fabrication of microlens arrays with high numerical aperture by ink-jetting on nanotextured surface, *Applied Surface Science* **279**, 36–40 (2013).

[9] M. Gaidys, A. Žemaitis, P. Gečys, M. Gedvilas, Efficient surface polishing using burst and biburst mode ultrafast laser irradiation, *RSC Advances* **13**(6), 3586–3591 (2023).

[10] V. Tangwarodomnukun, T. Wuttisarn, Evolution of milled cavity in the multiple laser scans of titanium alloy under a flowing water layer, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* **92**, 293–302 (2017).

[11] R. Pawlak, M. Tomczyk, M. Walczak, J. Mizeraczyk, M. Tański, K. Garasz, Selected problems in IR and UV laser micromachining of Si and GaAs in submillimeter scale, *Microelectronic Engineering* **151**, 47–52 (2016).

[12] K. Obata, F. Caballero-Lucas, S. Kawabata, G. Miyaji, K. Sugioka, GHz bursts in MHz burst (BiBurst) enabling high-speed femtosecond laser ablation of silicon due to prevention of air ionization, *International Journal of Extreme Manufacturing* **5**(2), 25002 (2023).

[13] M. Sun, U. Eppelt, C. Hartmann, W. Schulz, J. Zhu, Z. Lin, Damage morphology and mechanism in ablation cutting of thin glass sheets with picosecond pulsed lasers, *Optics and Laser Technology* **80**, 227–236 (2016).

[14] S. Schwarz, B. Götzendorfer, S. Rung, C. Esen, R. Hellmann, Compact beam homogenizer module with laser-fabricated lens-arrays, *Applied Sciences* **11**(3), 1–9 (2021).

[15] H. Abitan, H. Bohr, P. Buchhave, Correction to the Beer-Lambert-Bouguer law for optical absorption, *Applied Optics* **47**(29), 5354–5357 (2008).

[16] C. B. Schaffer, A. Brodeur, E. Mazur, Laser-induced breakdown and damage in bulk transparent materials induced by tightly focused femtosecond laser pulses, *Measurement Science and Technology* **12**(11), 1784–1794 (2001).

[17] S. C. Jones, P. Braunlich, R. T. Casper, X.-A. Shen, P. Kelly, Recent Progress On Laser-Induced Modifications And Intrinsic Bulk Damage Of Wide-Gap Optical Materials, *Optical Engineering* **28**(10), (1989).

[18] A. M. Zheltikov, Keldysh parameter, photoionization adiabaticity, and the tunneling time, *Physical Review A* **94**(4), 1–6 (2016).

[19] A. Dubietis, *Netiesinė optika*(Vilnius: Vilniaus universiteto leidykla, 2011).

[20] M. Fox, *Optical Properties of Solids*(New York: Oxford University Press, 2001).

[21] M. K. Gunde, Vibrational modes in amorphous silicon dioxide, *Physica B: Condensed Matter* **292**, 286–295 (2000).

[22] T. Izawa, N. Shibata, A. Takeda, Optical attenuation in pure and doped fused silica in the ir wavelength region, *Applied Physics Letters* **31**(1), 33–35 (1977).

[23] F. Nürnberg, B. Kühn, A. Langner, M. Altwein, G. Schötz, R. Takke, S. Thomas, J. Vydra, Bulk damage and absorption in fused silica due to high-power laser applications, *Laser-Induced Damage in Optical Materials: 2015, Proc. of SPIE* **9632**, 96321R (2015).

[24] A. Vogel, J. Noack, G. Hüttman, G. Paltauf, Mechanisms of femtosecond laser nanosurgery of cells and tissues, *Applied Physics B: Lasers and Optics* **81**(8), 1015–1047 (2005).

[25] J. M. Liu, Simple technique for measurements of pulsed Gaussian-beam spot sizes, *Optics Letters* **7**(5), 196–198 (1982).

[26] J. Furmanski, A. M. Rubenchik, M. D. Shirk, B. C. Stuart, Deterministic processing of alumina with ultrashort laser pulses, *Journal of Applied Physics* **102**, 073112 (2007).

[27] J. Dudutis, J. Pipiras, R. Stonys, E. Daknys, A. Kilikevičius, A. Kasparaitis, G. Račiukaitis, P. Gečys, In-depth comparison of conventional glass cutting technologies with laser-based methods by volumetric scribing using Bessel beam and rear-side machining, *Optics Express* **28**(21), 32133 (2020).

[28] S. G. Demos, R. A. Negres, R. N. Raman, M. D. Feit, K. R. Manes, A. M. Rubenchik, Relaxation dynamics of nanosecond laser superheated material in dielectrics, *Optica* **2**(8), 765–772 (2015).
[29] O. Balachninaitė, A. Bargelis, D. Aleksandr, R. Jonušas, G. Račiukaitis, V. Sirutkaitis, *Lazerinė technologija*(Vilnius: Vilniaus universiteto leidykla, 2008).
[30] F. Célarié, S. Prades, D. Bonamy, L. Ferrero, E. Bouchaud, C. Guillot, C. Marlière, Glass Breaks like Metal, but at the Nanometer Scale, *Physical Review Letters* **90**, 075504 (2003).
[31] D. Bonamy, S. Prades, L. Ponson, D. Dalmas, C. L. Rountree, E. Bouchaud, C. Guillot, Experimental investigation of damage and fracture in glassy materials at the nanometre scale, *International Journal of Materials and Product Technology* **26**(3–4), 339–353 (2006).
[32] Y. C. Chen, Z. Lu, K. I. Nomura, W. Wang, R. K. Kalia, A. Nakano, P. Vashishta, Interaction of voids and nanoductility in silica glass, *Physical Review Letters* **99**(15), 1–4 (2007).
[33] H. Shin, D. Kim, Cutting thin glass by femtosecond laser ablation, *Optics & Laser Technology* **102**, 1–11 (2018).
[34] N. Bloembergen, Role of Cracks, Pores, and Absorbing Inclusions on Laser Induced Damage Threshold at Surfaces of Transparent Dielectrics, *Applied Optics* **12**(4), 661–664 (1973).
[35] M. D. Feit, A. M. Rubenchik, Influence of subsurface cracks on laser-induced surface damage, *Laser-Induced Damage in Optical Materials, Proc. of SPIE* **5273**, 264–272 (2004).
[36] A. A. Griffits, The phenomena of rupture and flow in solids, *Philosophical Transactions of the Royal Society A* **221**(582–593), 163–198 (1921).
[37] M. Sun, U. Eppelt, S. Russ, C. Hartmann, C. Siebert, J. Zhu, W. Schulz, Numerical analysis of laser ablation and damage in glass with multiple picosecond laser pulses, *Optics Express* **21**(7), 7858–7867 (2013).
[38] Y. Ito, R. Shinomoto, K. Nagato, A. Otsu, K. Tatsukoshi, Y. Fukasawa, T. Kizaki, N. Sugita, M. Mitsuishi, Mechanisms of damage formation in glass in the process of femtosecond laser drilling, *Applied Physics A: Materials Science and Processing* **124**, 181 (2018).
[39] A. Couairon, A. Mysyrowicz, Femtosecond filamentation in transparent media, *Physics Reports* **441**, 47–189 (2007).
[40] J. H. Marburger, Self-focusing: Theory, *Progress in Quantum Electronics* **4**, 35–110 (1975).
[41] A. Couairon, L. Sudrie, M. Franco, B. Prade, A. Mysyrowicz, Filamentation and damage in fused silica induced by tightly focused femtosecond laser pulses, *Physical Review B* **71**, 125435 (2005).
[42] E. Alimohammadian, E. Ertorer, E. Mejia Uzeda, J. Li, P. R. Herman, Inhibition and enhancement of linear and nonlinear optical effects by

conical phase front shaping for femtosecond laser material processing, *Scientific Reports* **10**(1), 1–13 (2020).
[43] M. Mackevičiūtė, J. Dudutis, P. Gečys, A comparative study on MHz and GHz bursts addressing the polarization-based control of laser-induced modifications in fused silica, *Optics and Laser Technology* **181**, 111289 (2025).
[44] T. V. Vorburger, T. R. Lettieri, E. Marx, Regimes of Surface Roughness Measurable with Light Scattering, *Applied Optics* **32**(19), (1993).
[45] J. M. Bennett, Recent developments in surface roughness characterization, *Measurement Science and Technology* **3**, 1119–1127 (1992).
[46] M. S. Virdee, High Accuracy Form Measurement Of Specularly Reflecting Surfaces By Laser Autocollimation, *Ultraprecision Machining and Automated Fabrication of Optics, Proc. of SPIE* **676**, 66–73 (1986).
[47] W. J. Smith, *Modern Optical Engineering*, Third Edit., (New York: McGraw-Hill Education, 2000).
[48] J. Dudutis, P. Gečys, G. Račiukaitis, Modification of glass using an axicon-generated non-symmetrical Bessel-Gaussian beam, *Laser Applications in Microelectronic and Optoelectronic Manufacturing, proc. SPIE* **10091**, 100910N (2017).
[49] M. Mackevičiūtė, J. Dudutis, P. Gečys, Fast and efficient bottom-up cutting of soda-lime glass using GHz bursts of short laser pulses, *Optics and Lasers in Engineering* **183**, 108490 (2024).
[50] E. Markauskas, P. Gečys, Thin water film assisted glass ablation with a picosecond laser, *Procedia CIRP* **74**, 328–332 (2018).
[51] J. Dudutis, L. Zubauskas, E. Daknys, E. Markauskas, R. Gvozdaitė, G. Račiukaitis, P. Gečys, Quality and flexural strength of laser-cut glass: classical top-down ablation versus water-assisted and bottom-up machining, *Optics Express* **30**(3), 4564–4582 (2022).
[52] S. Nisar, L. Li, M. A. Sheikh, Laser glass cutting techniques—A review, *Journal of Laser Applications* **25**(4), 042010 (2013).
[53] L. Sudrie, A. Couairon, M. Franco, B. Lamouroux, B. Prade, S. Tzortzakis, A. Mysyrowicz, Femtosecond Laser-Induced Damage and Filamentary Propagation in Fused Silica, *Physical Review Letters* **89**(18), 1–4 (2002).
[54] J. Dudutis, R. Stonys, G. Račiukaitis, P. Gečys, Glass dicing with elliptical Bessel beam, *Optics and Laser Technology* **111**, 331–337 (2019).
[55] S. Chen, Y. Luo, X. Fan, C. Wu, G. Zhang, Y. Huang, Y. Rong, L. Chen, Thick Glass High-Quality Cutting by Ultrafast Laser Bessel Beam Perforation-Assisted Separation, *Micromachines* **15**, 854 (2024).
[56] K. Mishchik, R. Beuton, O. Dematteo Caulier, S. Skupin, B. Chimier,

G. Duchateau, B. Chassagne, R. Kling, C. Hönninger, E. Mottay, J. Lopez, Improved laser glass cutting by spatio-temporal control of energy deposition using bursts of femtosecond pulses, *Optics Express* **25**(26), 33271–33282 (2017).

[57] J. Lopez, K. Mishchik, B. Chassagne, C. Javaux-Leger, C. Hönninger, E. Mottay, R. Kling, Glass cutting using ultrashort pulsed bessel beams, *Proceedings of the ICALEO 2015: 34th International Congress on Laser Materials Processing, Laser Microprocessing and Nanomanufacturing* 60–69 (2015).

[58] P. Gečys, J. Dudutis, G. Račiukaitis, Nanosecond Laser Processing of Soda-Lime Glass, *Journal of Laser Micro/Nanoengineering* **10**(3), 254–258 (2015).

[59] V. Tomkus, V. Girdauskas, J. Dudutis, P. Gečys, V. Stankevič, G. Račiukaitis, High-density gas capillary nozzles manufactured by hybrid 3D laser machining technique from fused silica, *Optics Express* **26**(21), 27965–27977 (2018).

[60] M. Gaidys, A. Žemaitis, P. Gečys, M. Gedvilas, Efficient picosecond laser ablation of copper cylinders, *Applied Surface Science* **483**, 962–966 (2019).

[61] G. Račiukaitis, M. Brikas, P. Gečys, B. Voisiat, M. Gedvilas, Use of high repetition rate and high power lasers in microfabrication: How to keep the efficiency high?, *Journal of Laser Micro Nanoengineering* **4**(3), 186–191 (2009).

[62] H. Shin, J. Noh, D. Kim, Bottom-up cutting method to maximize edge strength in femtosecond laser ablation cutting of ultra-thin glass, *Optics and Laser Technology* **138**, 106921 (2021).

[63] S. Butkus, E. Gaižauskas, L. Mačernyte, V. Jukna, D. Paipulas, V. Sirutkaitis, Femtosecond beam transformation effects in water, enabling increased throughput micromachining in transparent materials, *Applied Sciences (Switzerland)* **9**, 2405 (2019).

[64] A. Žemaitis, M. Gaidys, M. Brikas, P. Gečys, G. Račiukaitis, M. Gedvilas, Advanced laser scanning for highly-efficient ablation and ultrafast surface structuring: experiment and model, *Scientific Reports* **8**(1), 1–14 (2018).

[65] A. Garcia-Giron, D. Sola, J. I. Peña, Liquid-assisted laser ablation of advanced ceramics and glass-ceramic materials, *Applied Surface Science* **363**, 548–554 (2016).

[66] Q. Chen, H. J. Wang, D. T. Lin, F. Zuo, Z. X. Zhao, H. T. Lin, Characterization of hole taper in laser drilling of silicon nitride ceramic under water, *Ceramics International* **44**(11), 13449–13452 (2018).

[67] L. M. Wee, E. Y. K. Ng, A. H. Prathama, H. Zheng, Micro-machining of silicon wafer in air and under water, *Optics and Laser Technology* **43**(1), 62–71 (2011).

[68] W. Charee, V. Tangwarodomnukun, C. Dumkum, Laser ablation of silicon in water under different flow rates, *International Journal of*

Advanced Manufacturing Technology **78**, 19–29 (2015).
[69] V. M. Tabie, M. O. Koranteng, A. Yunus, F. Kuuyine, Water-Jet Guided Laser Cutting Technology- an Overview, *Lasers in Manufacturing and Materials Processing* **6**(2), 189–203 (2019).
[70] S. Mullick, Y. K. Madhukar, S. Roy, A. K. Nath, Performance optimization of water-jet assisted underwater laser cutting of AISI 304 stainless steel sheet, *Optics and Lasers in Engineering* **83**, 32–47 (2016).
[71] D. Sun, F. Han, W. Ying, The experimental investigation of water jet–guided laser cutting of CFRP, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* **102**, 719–729 (2019).
[72] J. Zhou, Y. xing Huang, Y. wu Zhao, H. Jiao, Q. yuan Liu, Y. hong Long, Study on water-assisted laser ablation mechanism based on water layer characteristics, *Optics Communications* **450**, 112–121 (2019).
[73] V. Tangwarodomnukun, J. Wang, P. Mathew, A comparison of dry and underwater laser micromachining of silicon Substrates, *Key Engineering Materials* **443**, 693–698 (2010).
[74] L. S. Jiao, E. Y. K. Ng, L. M. Wee, H. Y. Zheng, Role of volatile liquids in debris and hole taper angle reduction during femtosecond laser drilling of silicon, *Applied Physics A: Materials Science and Processing* **104**(4), 1081–1084 (2011).
[75] A. Kanitz, J. S. Hoppius, M. Fiebrandt, P. Awakowicz, C. Esen, A. Ostendorf, E. L. Gurevich, Impact of liquid environment on femtosecond laser ablation, *Applied Physics A: Materials Science and Processing* **123**(11), 1–7 (2017).
[76] H. Liu, F. Chen, X. Wang, Q. Yang, H. Bian, J. Si, X. Hou, Influence of liquid environments on femtosecond laser ablation of silicon, *Thin Solid Films* **518**(18), 5188–5194 (2010).
[77] A. Kruusing, Underwater and water-assisted laser processing: Part 1 - General features, steam cleaning and shock processing, *Optics and Lasers in Engineering* **41**(2), 307–327 (2004).
[78] D. Crimella, T. Jwad, A. G. Demir, Microcutting of glass with high ablation efficiency by means of a high power ps-pulsed NIR laser, *Optics and Laser Technology* **166**, 9–11 (2023).
[79] M. Silvennoinen, J. J. J. Kaakkunen, K. Paivasaari, P. Vahimaa, Water spray assisted ultrashort laser pulse ablation, *Applied Surface Science* **265**, 865–869 (2013).
[80] N. Krstulović, S. Shannon, R. Stefanuik, C. Fanara, Underwater-laser drilling of aluminum, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* **69**, 1765–1773 (2013).
[81] A. Kruusing, Underwater and water-assisted laser processing: Part 2 - Etching, cutting and rarely used methods, *Optics and Lasers in Engineering* **41**(2), 329–352 (2004).
[82] M. H. Hong, M. L. Koh, S. Zhu, Y. F. Lu, T. C. Chong, Steam-assisted

laser ablation and its signal diagnostics, *Applied Surface Science* **197**(198), 911–914 (2002).
[83] G. Y. Mak, E. Y. Lam, H. W. Choi, Liquid-immersion laser micromachining of GaN grown on sapphire, *Applied Physics A: Materials Science and Processing* **102**(2), 441–447 (2011).
[84] H. W. Kang, H. Lee, S. Chen, A. J. Welch, Enhancement of bovine bone ablation assisted by a transparent liquid layer on a target surface, *IEEE Journal of Quantum Electronics* **42**(7), 633–642 (2006).
[85] S. Butkus, D. Paipulas, D. Kaškelyte, E. Gaižauskas, V. Sirutkaitis, Improvement of cut quality in rapid-cutting of glass method via femtosecond laser filamentation, *Journal of Laser Micro Nanoengineering* **10**(1), 59–63 (2015).
[86] N. A. Smirnov, S. I. Kudryashov, P. A. Danilov, A. A. Nastulyavichus, A. A. Rudenko, A. A. Ionin, A. A. Kuchmizhak, O. B. Vitrik, Femtosecond laser ablation of a thin silver film in air and water, *Optical and Quantum Electronics* **52**(2), 1–8 (2020).
[87] C. Zheng, H. Shen, Understanding nonlinear optical phenomenon for underwater material ablation by ultrafast laser with high pulse energy, *Journal of Manufacturing Processes* **70**, 331–340 (2021).
[88] S. Butkus, A. Alesenkov, D. Paipulas, E. Gaižauskas, A. Melninkaitis, D. Kaškelyte, M. Barkauskas, V. Sirutkaitis, Analysis of the micromachining process of dielectric and metallic substrates immersed in water with femtosecond pulses, *Micromachines* **6**(12), 2010–2022 (2015).
[89] C. Kerse, H. Kalaycloĝ Lu, P. Elahi, B. Çetin, D. K. Kesim, Ö. Akçaalan, S. Yavaş, M. D. Aşlk, B. Öktem, H. Hoogland, R. Holzwarth, F. Ö. Ilday, Ablation-cooled material removal with ultrafast bursts of pulses, *Nature* **537**(7618), 84–88 (2016).
[90] D. Puerto, J. Siegel, W. Gawelda, M. Galvan-Sosa, L. Ehrentraut, J. Bonse, J. Solis, Dynamics of plasma formation, relaxation, and topography modification induced by femtosecond laser pulses in crystalline and amorphous dielectrics, *Journal of the Optical Society of America B* **27**(5), 1065–1076 (2010).
[91] S. Schwarz, S. Rung, C. Esen, R. Hellmann, Enhanced ablation efficiency using GHz bursts in micromachining fused silica, *Optics Letters* **46**(2), 282–285 (2021).
[92] S. M. Remund, M. Gafner, M. V. Chaja, A. Urniezius, S. Butkus, B. Neuenschwander, Milling applications with GHz burst: Investigations concerning the removal rate and machining quality, *Procedia CIRP* **94**, 850–855 (2020).
[93] D. Metzner, P. Lickschat, C. Kreisel, T. Lampke, S. Weißmantel, Study on laser ablation of glass using MHz-to-GHz burst pulses, *Applied Physics A: Materials Science and Processing* **128**(8), 1–10 (2022).
[94] A. Temmler, E. Willenborg, K. Wissenbach, Laser Polishing, *Laser*

Applications in Microelectronic and Optoelectronic Manufacturing (LAMOM) XVII, proc. of SPIE **8243**, 82430W (2012).
[95] K. M. Nowak, H. J. Baker, D. R. Hall, Efficient laser polishing of silica micro-optic components, *Applied Optics* **45**(1), 162–171 (2006).
[96] S. Heidrich, E. Willenborg, C. Weingarten, A. Temmler, Laser polishing and laser form correction of fused silica optics, *Materials Science and Engineering Technology* **46**(7), 668–674 (2015).
[97] F. Laguarta, N. Lupon, J. Armengol, Optical glass polishing by controlled laser surface-heat treatment, *Applied Optics* **33**(27), 6508–6513 (1994).
[98] A. Krishnan, F. Fang, Review on mechanism and process of surface polishing using lasers, *Frontiers of Mechanical Engineering* **14**(3), 299–319 (2019).
[99] C. Weingarten, A. Schmickler, E. Willenborg, K. Wissenbach, R. Poprawe, Laser polishing and laser shape correction of optical glass, *Journal of Laser Applications* **29**, 011702 (2017).
[100] A. Temmler, M. Cortina, I. Ross, M. E. Küpper, S.-K. Rittinghaus, Laser Micro Polishing of Tool Steel 1.2379 (AISI D2): Influence of Intensity Distribution, Laser Beam Size, and Fluence on Surface Roughness and Area Rate, *Metals* **11**, 1445 (2021).
[101] A. Temmler, E. Willenborg, K. Wissenbach, Design Surfaces by Laser Remelting, *Physics Procedia* **12**, 419–430 (2011).
[102] I. B. Sohn, H. K. Choi, Y. C. Noh, J. Kim, M. S. Ahsan, Laser assisted fabrication of micro-lens array and characterization of their beam shaping property, *Applied Surface Science* **479**, 375–385 (2019).
[103] J. A. Ramos, D. L. Bourell, J. J. Beaman, Surface Over-Melt During Laser Polishing of Indirect-SLS Metal Parts, **758**, 19 (2002).
[104] C. Studi, Surface Tension and Density of Molten Glasses in the System La203-Na2Si2O5, *Ceramurgia International* **5**(1), 18–22 (1979).
[105] H. K. Choi, J. Ryu, C. Kim, Y. C. Noh, I. B. Sohn, J. T. Kim, Formation of micro-lens array using femtosecond and CO2 lasers, *Laser Micro Nanoengineering* **11**(3), 341–345 (2016).
[106] T. Delgado, D. Nieto, M. T. Flores-Arias, Soda-lime glass microlens arrays fabricated by laser: Comparison between a nanosecond and a femtosecond IR pulsed laser, *Optics and Lasers in Engineering* **86**, 29–37 (2016).
[107] V. Stankevič, G. Račiukaitis, P. Gečys, Chemical etching of fused silica after modification with two-pulse bursts of femtosecond laser, *Optics Express* **29**(20), 31393–31407 (2021).
[108] F. Zhang, C. Wang, K. Yin, X. R. Dong, Y. X. Song, Y. X. Tian, J. A. Duan, Quasi-periodic concave microlens array for liquid refractive index sensing fabricated by femtosecond laser assisted with chemical etching, *Scientific Reports* **8**, 2419 (2018).
[109] A. Pan, B. Gao, T. Chen, J. Si, C. Li, F. Chen, X. Hou, Fabrication of concave spherical microlenses on silicon by femtosecond laser

irradiation and mixed acid etching, *Optics Express* **22**(12), 15245–15250 (2014).
[110] X. Ding, Y. Yasui, Y. Kawaguchi, H. Niino, A. Yabe, Laser-induced back-side wet etching of fused silica with an aqueous solution containing organic molecules, *Applied Physics A Materials Science & Processing* **75**, 437–440 (2002).
[111] G. Kopitkovas, T. Lippert, J. Venturini, C. David, A. Wokaun, Laser Induced Backside Wet Etching: Mechanisms and Fabrication of Micro-Optical Elements, *Journal of Physics: Conference Series* **59**, 526–532 (2007).
[112] H. Chao, L. Furong, W. Min, Y. Jianwen, C. Jimin, H. Chao, L. Furong, W. Min, Y. Jianwen, C. Jimin, Laser induced backside wet and dry etching of solar glass by short pulse ytterbium fiber laser irradiation, *Journal of Laser Applications* **24**, 022005 (2012).
[113] G. K. Kostyuk, R. A. Zakoldaev, M. M. Sergeev, E. B. Yakovlev, Microlens array fabrication on fused silica influenced by NIR laser, *Applied Physics B* **122**, 99 (2016).
[114] M. H. Hong, K. Sugioka, Y. F. Lu, K. Midorikawa, T. C. Chong, Laser microfabrication of transparent hard materials and signal diagnostics, *Applied Surface Science* **186**, 556–561 (2002).
[115] Y. Hanada, K. Sugioka, Y. Gomi, H. Yamaoka, O. Otsuki, I. Miyamoto, K. Midorikawa, Development of practical system for laser-induced plasma-assisted ablation (LIPAA) for micromachining of glass materials, *Appl. Phys. A* **79**, 1001–1003 (2004).
[116] D. Wu, S. Z. Wu, L. G. Niu, Q. D. Chen, R. Wang, J. F. Song, H. H. Fang, H. B. Sun, High numerical aperture microlens arrays of close packing, *Applied Physics Letters* **97**, 031109 (2010).
[117] Z. He, Y.-H. Lee, D. Chanda, S.-T. Wu, Adaptive liquid crystal microlens array enabled by two-photon polymerization, *Optics Express* **26**(16), 21184–21193 (2018).
[118] M. Malinauskas, A. Žukauskas, V. Purlys, K. Belazaras, A. Momot, D. Paipulas, R. Gadonas, A. Piskarskas, H. Gilbergs, A. Gaidukevičiūtė, I. Sakellari, M. Farsari, S. Juodkazis, Femtosecond laser polymerization of hybrid / integrated micro-optical elements and their characterization, *Journal of Optics* **12**, 124010 (2010).
[119] J. P. Rolland, M. A. Davies, T. J. Suleski, C. Evans, A. Bauer, J. C. Lambropoulos, K. Falaggis, Freeform optics for imaging, *Optica* **8**(2), 161–176 (2021).
[120] A. Temmler, C. B. Weingarten, B. Schober, E. Uluz, Investigation on laser beam figuring of fused silica using microsecond pulsed CO2 laser radiation, *Applied Surface Science* **555**, 149609 (2021).
[121] M. Zhou, B. K. A. Ngoi, M. N. Yusoff, X. J. Wang, Tool wear and surface finish in diamond cutting of optical glass, *Journal of Materials Processing Technology* **174**, 29–33 (2006).
[122] M. J. Lin, C. H. Wen, Microlens array fabrication by using a

microshaper, *Micromachines* **12**(3), 1–15 (2021).
[123] N. S. Ong, Y. H. Koh, Y. Q. Fu, Microlens array produced using hot embossing process, *Microelectonic Engineering* **60**, 365–379 (2002).
[124] M. T. Langridge, D. C. Cox, R. P. Webb, V. Stolojan, The fabrication of aspherical microlenses using focused ion-beam techniques, *Micron* **57**, 56–66 (2014).
[125] W. C. L. Hopman, F. Ay, W. Hu, V. J. Gadgil, L. Kuipers, M. Pollnau, R. M. De Ridder, Focused ion beam scan routine, dwell time and dose optimizations for submicrometre period planar photonic crystal components and stamps in silicon, *Nanotechnology* **18**, 195305 (2007).
[126] S. R. Wilson, J. R. Mcneil, Neutral ion beam figuring of large optical surfaces, *Current Developments in Optical Engineering II, Proc. of SPIE* **818**, 320–324 (1987).
[127] D. Daly, R. F. Stevens, M. C. Hutley, N. Davies, The manufacture of microlenses by melting photoresist, *Measurement Science and Technology* **1**, 759–766 (1990).
[128] S. Cai, Y. Sun, H. Chu, W. Yang, H. Yu, L. Liu, Microlenses arrays: Fabrication, materials, and applications, *Microscopy Research and Technique* **84**, 2784–2806 (2021).
[129] V. Fakhfouri, N. Cantale, G. Mermoud, J. Y. Kim, D. Boiko, E. Charbon, A. Martinoli, J. Brugger, Inkjet printing of SU-8 for polymer-based MEMS a case study for microlenses, *Proceedings of the 21st IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems* 407–410 (2008).
[130] I. Ted pella, Schott D263M Glass Coverslips Technical data, *https://www.tedpella.com/histo_html/coverslip-info.aspx*, (žiūrėta 2025-12-17). .
[131] Cystran Fused Silica Glass (SiO2), *https://www.crystran.com/optical-materials/fused-silica-sio2/*, (žiūrėta 2025-12-17). .
[132] D. Nieto, J. Arines, G. M. O'Connor, M. T. Flores-Arias, Single-pulse laser ablation threshold of borosilicate, fused silica, sapphire, and soda-lime glass for pulse widths of 500 fs, 10 ps, 20 ns, *Applied Optics* **54**(29), 8596–8601 (2015).
[133] I. Miyamoto, A. Horn, J. Gottmann, Fusion Welding of Glass Using Femtosecond Laser Pulses with High-repetition Rates, **2**(1), 57–63 (2007).
[134] Y. M. Xiao, M. Bass, Thermal stress limitations to laser fire polishing of glasses, *Applied Optics* **22**, 2933–2936 (1983).
[135] T. C. Chiu, C. A. Hua, C. H. Wang, K. S. Chen, T. S. Yang, C. Da Wen, C. H. Li, M. C. Lin, C. J. Huang, K. T. Chen, On the mechanics of laser peeling for ultra-thin glasses, *Engineering Fracture Mechanics* **163**, 236–247 (2016).
[136] Z. Hou, Z. Yao, Y. Sun, H. Shen, Grooving profile control for structured grinding wheels with picosecond pulsed laser, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* **119**,

5851–5862 (2022).
[137] E. Markauskas, L. Zubauskas, P. Gečys, Efficient milling and cutting of borosilicate glasses through a thin flowing water film with a picosecond laser, *Journal of Manufacturing Processes* **68**, 898–909 (2021).
[138] E. Markauskas, L. Zubauskas, B. Voisiat, P. Gečys, Efficient Water-Assisted Glass Cutting with 355 nm Picosecond Laser Pulses, *Micromachines* **13**, 785 (2022).
[139] A. N. Bashkatov, E. A. Genina, Water refractive index in dependence on temperature and wavelength: a simple approximation, **5068**, 393–395 (2003).
[140] Sensofar, *The areal surface texture handbook. Understanding ISO 25178*(Barcelona: Sensofar-tech, 2024).
[141] L. Zhao, A. Maynadier, D. Nelias, Stiffness and fracture analysis of photovoltaic grade silicon plates, *International Journal of Solids and Structures* **97–98**, 355–369 (2016).
[142] M. Fuegl, G. Mackh, E. Meissner, L. Frey, Analytical stress characterization after different chip separation methods, *Microelectronics Reliability* **54**, 1735–1740 (2014).
[143] C. Przybilla, A. Fernández-Canteli, E. Castillo, An iterative method to obtain the specimen-independent three-parameter Weibull distribution of strength from bending tests, *Procedia Engineering* **10**, 1414–1419 (2011).
[144] B. Bergman, A. Usbeck, On the estimation of the Weibull modulus, *Journal of Material Science Letters* **3**, 689–692 (1984).
[145] A. Khalili, K. Kromp, Statistical properties of Weibull estimators, *Journal of Material Science* **26**, 6741–6752 (1991).
[146] F. Dickey, *Laser Beam Shaping Theory and Techniques*, Second edi., (Boca Raton: CRC Press, 2014).
[147] M. Zimmermann, N. Lindlein, R. Voelkel, K. J. Weible, Microlens laser beam homogenizer: from theory to application, *Laser Beam Shaping VIII, Proc. of SPIE* **6663**, 666302 (2007).
[148] S. Hwang, T. Kim, J. Lee, T. J. Yu, Design of square-shaped beam homogenizer for petawatt-class Ti:sapphire amplifier, *Optics Express* **25**(9), 9511–9520 (2017).
[149] S. Butkus, E. Gaižauskas, D. Paipulas, Z. Viburys, D. Kaškelye, M. Barkauskas, A. Alesenkov, V. Sirutkaitis, Rapid microfabrication of transparent materials using filamented femtosecond laser pulses, *Applied Physics A: Materials Science and Processing* **114**, 81–90 (2014).
[150] X. Sun, J. Zheng, C. Liang, Y. Hu, H. Zhong, J. Duan, Improvement of rear damage of thin fused silica by liquid-assisted femtosecond laser cutting, *Applied Physics A: Materials Science and Processing* **125**, 461 (2019).
[151] S. Indrišiūnas, E. Svirplys, J. Jorudas, I. Kašalynas, Laser processing

of transparent wafers with a AlGaN/GaN heterostructures and high-electron mobility devices on a backside, *Micromachines* **12**, 407 (2021).

[152] A. Collins, D. Rostohar, C. Prieto, Y. K. Chan, G. M. Oconnor, Laser scribing of thin dielectrics with polarised ultrashort pulses, *Optics and Lasers in Engineering* **60**, 18–24 (2014).

[153] E. Kažukauskas, S. Butkus, V. Jukna, D. Paipulas, Surface roughness control in deep engraving of fused silica using femtosecond laser ablation, *Surfaces and Interfaces* **50**, 104471 (2024).

[154] A. Žemaitis, M. Gaidys, P. Gečys, M. Gedvilas, Bi-stability in femtosecond laser ablation by MHz bursts, *Scientific Reports* **14**, 5614 (2024).

[155] J. Finger, B. Bornschlegel, M. Reininghaus, A. Dohrn, M. Nießen, A. Gillner, R. Poprawe, Heat input and accumulation for ultrashort pulse processing with high average power, *Advanced Optical Technologies* **7**(3), 145–155 (2018).

[156] K. He, Y. Ren, Z. Dai, J. Zhang, X. Tu, L. Cheng, Z. Xin, L. Cai, Y. Ye, Theoretical and experimental study of ablation of fused silica by femtosecond laser bursts, *Optics Communications* **537**, 129440 (2023).

[157] C. Corbari, A. Champion, M. Gecevičius, M. Beresna, Y. Bellouard, P. G. Kazansky, Femtosecond versus picosecond laser machining of nano-gratings and micro-channels in silica glass, *Optics Express* **21**(4), 3946–3958 (2013).

Introduction

Transparent materials, particularly glasses, are indispensable in the fabrication of optical components due to their exceptional optical transparency across a broad spectral range, chemical and thermal stability, and robust mechanical properties. Glass-based optical elements are characterised by superior durability and resilience under harsh environmental conditions, making them the preferred choice for both fundamental laboratory research and industrial applications. Generally, optical surfaces and micro-optical elements are utilised in imaging, illumination, sensing, and telecommunications systems. In these fields, microlens arrays are of paramount importance, as they facilitate compact and efficient control of light propagation [1–3] and the precise shaping of radiation intensity distributions [4, 5].

Traditionally, the fabrication of micro-optical elements, including microlens arrays, has relied on techniques such as hot embossing [6], thermal surface reflow [7], or inkjet printing [8]. While these methods can achieve high surface uniformity, they often require complex multi-step procedures, costly infrastructure, and the use of prefabricated moulds or templates. Furthermore, such conventional approaches frequently suffer from limited geometric flexibility, hinder rapid prototyping, and are often restricted to specific material classes, such as polymers. These constraints are particularly restrictive when developing customised glass optical components.

To address these limitations, increasing research interest has shifted toward laser-based technologies as an alternative approach for shaping micro-optical surfaces. These methods enable the cutting, forming, and polishing of glass within a single integrated system. Lasers have emerged as highly flexible and precise tools for the micromachining of diverse materials, with extensive studies conducted on metals [9, 10], semiconductors [11, 12], and dielectrics [13]. Moreover, the capacity for rapid geometric modification positions laser technologies as versatile tools for modern industrial manufacturing.

S. Schwarz [14] evaluated the most prevalent laser-based approaches for freeform optics fabrication, including laser ablation, glass etching, and two-photon polymerisation. The author hypothesised that the combination of laser milling and CO_2 laser polishing is the most versatile approach, enabling the fabrication of optical elements through purely laser-driven processes. Consequently, the development of purely laser-based fabrication methods for optical components has become a highly relevant research direction, aimed at

enhancing throughput and achieving optical quality benchmarks comparable to those of mass production.

One of the most promising laser-based techniques for fabricating optical components is direct top-down ablation of glass substrates. This versatile approach consolidates glass cutting and surface milling while enabling three-dimensional processing of both transparent and opaque optical media, simplifying the formation of different design prototypes. However, the process remains relatively slow, particularly when machining thicker substrates. Therefore, it is necessary to investigate strategies to enhance the efficiency and processing speed of laser-based manufacturing without compromising structural or optical quality. This is the primary focus of this dissertation.

This work presents the research on the production of optical elements using laser ablation technology. The investigation is divided into three parts: glass cutting, surface formation, and surface polishing. **Chapter 4** provides an in-depth analysis of glass cutting, with a primary focus on enhancing processing speeds. One promising approach to enhance cutting speed is to cut glass through a water layer. To evaluate this, cutting processes in both ambient air and water environments were investigated using a femtosecond laser at high pulse repetition rates (≥100 kHz). The study evaluates the impact of the water layer on key laser system parameters, identifying the optimal conditions for maximum cutting efficiency and velocity.

To accelerate surface shaping, **Chapter 5** investigates the influence of laser pulse duration on the quality and resolution of machined surfaces. The results demonstrate the superior performance of femtosecond pulses over picosecond pulses in terms of both milling rate and precision. Furthermore, machining resolution was increased by processing pre-roughened rather than pristine transparent glass surfaces. The final section of this chapter examines the influence of femtosecond laser GHz burst modes on the milling process. While an increase in material removal rate and efficiency was observed, it was accompanied by a degradation in surface quality. Consequently, the research focuses on the mechanisms underlying the enhanced removal efficiency and deteriorated surface quality in the burst regime.

Finally, **Chapter 6** describes the results obtained by polishing the formed lens arrays with a CO_2 laser, and **Chapter 7** presents a practical application of the formed arrays, integrating them into an industrial system.

The aim of the dissertation

The dissertation aimed to investigate methods for enhancing the speed and quality of the classical top-down laser ablation technique for optical element fabrication. The tasks of the research were (i) to investigate the influence of glass thickness on the laser cutting process using a 1030 nm femtosecond laser in both ambient air and water-assisted conditions; (ii) to investigate the influence of picosecond and femtosecond duration laser pulses on glass milling application; (iii) to investigate glass surface milling using GHz burst regime; (iv) to fabricate lens arrays by combining ultrafast laser milling and CO_2 laser polishing techniques.

Practical value and novelty

In this dissertation, the formation of optical surfaces using top-down laser ablation technology was investigated. The focus was directed at addressing the key technological limitation, specifically the slow glass ablation process. Several strategies to enhance processing speed were explored.

Firstly, glass cutting experiments at high pulse repetition rates were optimized and performed for the first time in both ambient air and through a flowing water film. In both environments, the dependencies of cutting speed and efficiency on various laser system parameters were examined. It was demonstrated that cutting glass through a thin flowing water film not only accelerated the process but also improved the quality of the cut edges.

Additionally, the effect of GHz burst pulses on the glass-milling process was investigated. For the first time, a rapid increase in glass milling efficiency in the GHz burst regime was linked to a change in the material removal mechanism: a transition from gentle ablation in the non-burst regime to glass fracturing and removal in larger fractions. This transition significantly enhances the material removal rate while also affecting the resulting surface quality.

In parallel, a systematic comparison of optical surface formation using picosecond and femtosecond laser pulses was conducted for the first time.. The superiority of femtosecond-duration laser pulses in forming optical surfaces was demonstrated. Furthermore, by integrating CO_2 laser polishing technology, lens arrays were produced and successfully applied in a UV LED beam homogenization system.

Statements to defend

1. Compared to processing in air, laser cutting of glass using ultrashort pulses in a water environment ensures efficient cooling of the specimen when cutting 110-550 µm thick glass. This allows the use of maximum laser power while avoiding critical glass destruction, which occurs in air when cutting a 550 µm thick specimen, and ensures fewer defects, narrower cutting channels, and a higher process speed.
2. Femtosecond laser pulses enable sub-micron milling resolution when processing a pre-machined laser surface, which ensures lower roughness and up to a 2.6-fold higher throughput than milling the same glass with picosecond laser pulses.
3. The use of GHz bursts with a femtosecond laser is unsuitable for optical surface formation aimed at increasing the milling throughput due to a shift in the material removal mechanism – more intensive surface fracturing and material removal in large fractions, which ultimately leads to severe degradation of processing quality, with the surface roughness S_a increasing by up to 17.7 times.
4. Selective laser milling using femtosecond pulses combined with subsequent CO_2 laser polishing ensures better optical surface quality than identical processing with picosecond pulses; however, due to the remaining excessively high overall waviness W_q, this technology is more suitable for the fabrication of optical elements and devices where this parameter is not critical.

Approbation

The main results presented in the thesis were published in 3 scientific peer-reviewed papers [S1-S3]. Additionally, three more scientific papers were published during phd studies [S4-S6]. The author presented the results at five international scientific conferences [C1-C5]. The author‘s presentations in national conferences and summer schools were excluded from this list.

Scientific papers related to thesis (peer-reviewed and indexed in Clarivate Analytics WoS):

S1. E. Markauskas, **L. Zubauskas**, G. Račiukaitis, P. Gečys, Femtosecond laser cutting of 110–550 µm thickness borosilicate glass in ambient air and water, *Micromachines* **14**(1), 176 (2023).

S2. **L. Zubauskas**, E. Markauskas, A. Vyšniauskas, V. Stankevič, P. Gečys, Comparative analysis of microlens array formation in fused silica glass by laser: femtosecond versus picosecond pulses, *Journal of Science: Advanced Materials and Devices* **9**(4), 100804 (2024).

S3. **L. Zubauskas**, E. Markauskas, P. Šleiniūtė, P. Gečys, Classical top-down fused silica milling with a femtosecond laser using different laser pulse burst regimes, *Journal of Materials Processing Technology* **155**, 820-830 (2025).

Scientific papers related to thesis (peer-reviewed and indexed in Clarivate Analytics WoS):

S4. E. Markauskas, **L. Zubauskas**, B. Voisiat, P. Gečys, Efficient water-assisted glass cutting with 355 nm picosecond laser pulses, *Micromachines* **13**(5), 785 (2022).

S5. J. Dudutis, **L. Zubauskas**, E. Daknys, E. Markauskas, R. Gvozdaitė, G. Račiukaitis, P. Gečys, Quality and flexural strength of laser-cut glass: classical top-down ablation versus water-assisted and bottom-up machining, *Optics Express* **30**(3), 4564 (2022).

S6. E. Markauskas, **L. Zubauskas**, A. Naujokaitis, B. Čechavičius, M. Talaikis, G. Niaura, M. Čaplovičová, V. Vretenár, T. Paulauskas, GaAs ablation with ultrashort laser pulses in ambient air and water environments, *Journal of Applied Physics* **133**, 235102 (2023).

Conference presentations

C1. **L. Zubauskas**, E. Markauskas, P. Gečys, Water-assisted borosilicate glass ablation with 355 nm wavelength picosecond laser, The 23rd International Symposium on Laser Precision Microfabrication – LPM2022, Dresden, Germany, June 07 – 10 (2022).

C2. **L. Zubauskas**, A. Vyšniauskas, E. Markauskas, P. Gečys, Comparison of fused silica ablation with picosecond and femtosecond lasers, Laser Precision Microfabrication (LPM2023), Hirosaki, Japan, June 13 – 16, (2023).

C3. **L. Zubauskas**, A. Vyšniauskas, E. Markauskas, P. Gečys, Complex element formation in fused silica: picosecond versus femtosecond laser ablation, Lasers in Manufacturing (LIM 2023), Munich, Germany, June 26 – 29, (2023).

C4. **L. Zubauskas**, E. Markauskas, P. Gečys, Top-down ablation of fused silica by biburst femtosecond laser, Conference on Laser Ablation (COLA2024), Crete, Greece, September 29 – October 4, (2024).

C5. **L. Zubauskas,** Edgaras Markauskas, Arnas Naujokaitis, Bronislovas Čechavičius, Martynas Talaikis, Gediminas Niaura, Mária Čaplovičová, Viliam Vretenár, Tadas Paulauskas, GaAs ablation in air and water with femtosecond pulses, Laser Precision Microfabrication (LPM2024), San Sabastian, Spain, June 11-14, (2024).

Author contribution

The author of this thesis has performed all experimental work on glass cutting and milling, as well as data analysis and interpretation. Moreover, he fabricated final lens arrays and tested their focusing capabilities. Together with co-authors, wrote and published scientific publications (S1-S6).

Co-authors contribution

- Dr. Paulius Gecys supervised the entire work and helped prepare scientific publications.
- Dr. Edgaras Markauskas supervised the author‘s bachelor's and master's theses. He consulted the author on experimental methodology and data analysis.
- Dr. Juozas Dudutis tested a beam homogeniser formed from two fabricated lens arrays and prepared publication S4.
- Dr. Gediminas Račiukaitis consulted on the preparation of the S1 publication.
- Dr. Valdemar Stankevič contributed to the development of the testing methodology for the fabricated lenses and consulted on the construction of the testing setup.
- Dr. Bogdan Voisiat consulted on the preparation of publication S4.
- The author consulted master student Arnas Vyšniauskas, who conducted glass polishing experiments with a CO_2 laser.
- The author supervised bachelor's student Patricija Šleiniūtė, who performed edge-chipping measurements on glass using GHz bursts.

Experimental setups and methodology

Laser sources

The experimental research described in this dissertation utilised four distinct laser sources (see **Table 1**). Initial glass-cutting experiments were conducted using the FemtoLux 30 (Ekspla) laser, which produced 320-fs pulses at 1030 nm. Subsequently, for the surface milling stage, three different systems were employed: the picosecond Atlantic 60 (Ekspla), the aforementioned FemtoLux 30, and the femtosecond Carbide (Light Conversion) laser. These sources delivered laser radiation at a wavelength of approximately 1 µm, with pulse durations of 10 ps, 320 fs, and 176 fs, respectively. In the final phase of the experiments, the fabricated surfaces were polished using a Diamond E-150 CO_2 laser (Coherent) to reduce surface roughness to levels meeting optical quality standards.

Table 1. *Main parameters of laser systems used for glass processing. The maximal average laser power was measured at the end of the optical path (next to the sample).*

Laser	*Atlantic 60*	*FemtoLux 30*	*Carbide 40*	*Diamond E-150*
Wavelength	1064 nm	1030 nm	1030 nm	10.6 µm
Laser pulse duration	10 ps	320 fs	176 fs	2-100 µs
Maximal average laser power	42 W	21 W at 1.1 MHz	34 W	150 W
Pulse repetition rate	0.4 – 1 MHz	0.4 – 4 MHz	100 kHz	10 kHz

All the aforementioned lasers used a similar optical configuration: a beam expander to enlarge the beam diameter, steering mirrors to direct the beam into the scanner, and a focusing lens. The generated laser beams were manipulated using galvanometer scanners. Specifically, an intelliSCAN$_{de}$ 14 (ScanLab) was employed for lasers operating at ~1 µm, while a SCANcube III 14 (ScanLab) was used for the longer-wavelength radiation emitted by the CO_2 laser.

The picosecond and femtosecond laser beams were focused using a telecentric lens with a focal length of +100 mm. The spot sizes at the focus were characterised according to the methodology described by J. M. Liu [25].

In the cutting experiments, the measured beam waist diameters were 28 µm and 27 µm for the Atlantic 60 and FemtoLux 30 lasers, respectively. For the glass milling stage, the beam waist diameters for the Atlantic 60, FemtoLux 30, and Carbide 40 systems were 34 µm, 31 µm, and 19 µm, respectively. Notably, the thin water layer did not affect the beam waist diameter; it remained constant even during ablation through the flowing water film. Throughout all cutting experiments, the beam waist was positioned beneath the upper glass surface at a depth equal to half of the substrate thickness. In contrast, during the surface-milling investigations, the beam waist was precisely fixed at the glass surface.

Finally, glass polishing experiments were performed using the CO_2 laser. The beam was focused using a +250 mm focal-length lens, yielding a measured focus spot size of 440 µm.

Methodology of glass cutting

Glass cutting can be defined as complete glass milling from the top to the bottom surface, creating a void. Cutting was performed by scanning a laser beam in parallel lines separated by the hatch distance. The number of lines in a single scan defined the cut's width. After each scan, the hatch direction was reversed. An even scan started where the odd scan had ended and returned to position A by following the same scan path backwards.

A thin flowing water film was formed on the surface of the glass workpiece by spraying a water mist using a commercially available airbrush connected to pressurised air (3 bar). Here, high-velocity air atomised water into droplets, which were then sprayed onto the glass surface, forming a liquid film that flowed through the laser ablation zone. During the cutting experiments, the airbrush was positioned at a 45-degree angle to the glass surface and 1 cm above the sample. The average thickness of the formed film was approximately 500 µm, while the water spraying rate was 11 ml/min.

Cuts were characterised by three performance and three quality parameters. Performance was evaluated by measuring milling efficiency, cutting speed, and cutting efficiency. On the other hand, cut quality was evaluated by measuring the size of edge defects, sidewall surface roughness and flexural strength of the cut. Technical information on measured parameters is described in scientific papers [S1, S4, and S5].

Cutting speed was used to determine the narrowest kerf, which allowed the fastest speed. Then, milling and cutting efficiencies were used to optimise other parameters, such as fluence and pulse overlap in both the scanning and

perpendicular directions. The parameter optimization algorithm is described in more detail in [S1].

Glass milling experiments

Glass milling was investigated by ablating 6.3 mm-thick fused silica glass. For this, three laser systems were used: *Atlantic 60*, *FemtoLux 30*, and *Carbide 40* (from *Light Conversion*). Fused silica milling was performed by scanning a laser beam in parallel lines separated by 5 µm. The scanning area was equal to 2×2 mm^2. Milling experiments were carried out in two parts. First, the non-burst regime was utilised with the *Atlantic* 60 and *FemtoLux* 30 lasers to investigate the influence of laser pulse duration on the glass-milling process. Both lasers were set to a 400 kHz pulse repetition rate. Glass was ablated by varying the scanning speed and fluence from the maximum value until ablation became unstable and stopped. Ablation was specified by measuring ablated depth, milling rate and surface roughness S_a. More technical information could be found in the articles [S2 and S3].

Finally, fused silica milling with a GHz burst regime was investigated. For this, the *Carbide 40* laser was used. In the GHz burst regime, each laser pulse in the non-burst regime was divided into bursts, where each burst contained several sub-pulses separated by 470 ps. The number of sub-pulses within the burst was adjustable from 2 to 40, while maintaining a 10 µs interval between bursts (100 kHz repetition rate). Once again, milling was performed in the non-burst and GHz-burst regimes by gradually decreasing the fluence from the maximum value (238.5 J/cm2) until material removal became unstable and eventually stopped. The scanning speed was fixed at 3 m/s. Ablated areas were evaluated by measuring milling efficiency, surface roughness (S_a), and the size of edge defects.

Glass polishing experiments

In the end, glass polishing was investigated to form an actual optical element. For this, lens arrays were formed on the fused silica glass separately using *Atlantic 60* and *FemtoLux 30* lasers. Here, the influence of laser pulse duration on optical element formation was studied.

For the polishing step, a pulsed CO_2 laser from *Coherent* (*Diamond E Series*) was used, emitting 10.6 µm wavelength laser pulses. First, the polishing process was carried out on flat, roughened areas with a surface roughness S_a of 400 nm to investigate the laser beam diameter on the sample surface, which allowed achieving the lowest surface roughness. For this, the

average laser power and the distance between the sample and the focusing lens were varied while the scanning speed and hatch were fixed at 200 mm/s and 25 µm, respectively.

In the next step, lens arrays formed using picosecond and femtosecond lasers were polished by changing the average laser power. Polished areas were measured with an optical profilometer by evaluating surface roughness S_a and/or R_q, waviness W_q, and lens surface radius R. In addition, the focusing performance of polished lens arrays was evaluated using a diode laser from *Integrated Optics* (*Matchbox*) with a 520 nm wavelength. Here, the diode laser beam was focused by a lens array onto a CCD camera to assess its focusing capabilities.

Investigation of glass cutting in ambient air and water

Results, presented in this chapter, were published in [S1] research paper.

The first step in the optical element fabrication process is glass cutting, which allows cutting an element of a specific desired shape from a larger glass substrate. For this process, direct laser ablation is a less attractive technology due to its relatively slow cutting speed, especially when cutting thicker materials. However, it has been demonstrated that both cutting speed and quality can be improved by cutting glass through a thin, flowing water film [149]. On the other hand, there is a lack of systematic studies comparing results from separately optimising glass cutting in air and water environments. This will be presented in this chapter.

A femtosecond IR laser was used for cutting borosilicate glass. However, thin glass plates are sensitive to thermal stresses caused by laser ablation. They can easily shatter when a higher laser power is applied to the material. Thicker than 300 µm glass plates used in this research fractured in ambient air if the incident laser power exceeded 4 W. For this reason, glass cutting experiments were split into two parts: low and high (average) laser power regimes. The maximum power (P_{max}) of the femtosecond IR laser was used for cutting glass in water (19.3–19.5 W). At maximum power level, only glass with thicknesses of 110 and 300 µm could be cut in ambient air. In contrast, the thickest glass plate (550 µm) suffered severe damage and shattered into smaller pieces. For this reason, glass cutting with a femtosecond IR laser was performed at high (P_{max}, 20.8–21 W for 110 and 300 µm thickness glasses) and low (P_{min}, 1.8–3.3W for all three glass thicknesses) laser powers in ambient air.

Overall, the effects of various laser parameters on milling efficiency and cutting speed were investigated. During the investigation, the cutting process was optimised separately in ambient air and water environments. Optimisation

began by finding the optimal kerf, which maximised cutting speed. After that, fluence, scanning speed, and hatch (laser pulse overlap in both the scanning and perpendicular directions) were varied to achieve the highest cutting speed and milling efficiency. Experiments were repeated for each glass (different thickness glasses were cut), power regime, and environment.

Experiments were started by cutting 300 µm thick glass plates in air and through a water layer. Results revealed that when cutting 300 µm thick glass through a water film, it was possible to form up to 1.5 times narrower channels (210 µm in water vs. 310 µm in air). This geometric change was the main reason for an approximately 1.25-fold increase in overall cutting speed. Because less material needed to be removed to cut through the glass, the narrower channel compensated for the lower material removal rate in water (7.2 $\mu m^3/\mu J$ vs. 8.6 $\mu m^3/\mu J$ in air), which was about 1.2 times lower.

Experiments on cutting different thickness glasses revealed that cutting in water with a femtosecond IR laser was superior for glasses thicker than 110 µm, with better overall cut-edge quality (mean defect width), higher cutting speed, greater characteristic strength, and less band-like damage at the back surface. Furthermore, the advantage of cutting in water with a femtosecond IR laser increased with the glass thickness. For 110 µm-thick glass, cutting performance, quality, and characteristic strength were similar in both cutting environments. For example, water-assisted glass cutting was 2 % slower (20.4 mm/s in water vs 20.8 mm/s in air). The samples themselves were 1.2 % weaker (103.8 ± 1.0 MPa in water vs 105.1 ± 8.0 MPa in air) and 10.3 % stronger (87.9 ± 9.1 MPa in water vs 78.9 ± 5.1 MPa in air), comparing the flexural strengths of the front and bottom sides of the cut, respectively. On the other hand, water-assisted glass cutting was 1.25 times faster for 300 µm-thick glass (4 mm/s in water vs 3.2 mm/s in air) and already 10.6 times faster for 550 µm-thick samples (1.8 mm/s in water vs 0.17 mm/s in air). A similar increase was observed with the front side strength of the cuts: 300 µm- and 550 µm-thick glass strips cut in water were up to 12.8% stronger (105.5 ± 4.3 MPa in water vs 93.5 ± 6.0 MPa in air) and 58 % stronger (121.0 ± 3.0 MPa in water vs 76.7 ± 8.0 MPa in air), respectively, than those cut in air. At the bottom of the cut, the strength difference between samples cut in water and in air steadily increased from 9.3 MPa for 110 µm-thick glass to 23.5 MPa for 550 µm-thick glass.

Unfortunately, no clear correlation was observed between surface defects (edge chipping and sidewall roughness) and the critical stress required to break the glass strips. Based on all results, it can be assumed that defects (cracks) formed within the glass volume due to thermal accumulation or spike-shaped damage from laser energy absorption have a greater impact on the

glass's strength. The glass cutting speed decreased as the glass became thicker. Thus, more scans were needed to cut through it. Consequently, the glass substrate was heated for an extended period, which could lead to greater damage within the glass volume. In turn, water-cooling the glass more effectively reduced thermal accumulation. Furthermore, the influence of water on the cutting process increased as the glass became thicker.

Additionally, the analysis of the band-like damage formation at the back surface of laser-cut strips with a femtosecond IR laser showed that the refraction of the laser beam from the cut sidewall was responsible for the damage formation at the back surface. Therefore, band-like damage formation could explain the difference in flexural strength between the front and bottom sides of the cut.

Investigation of glass milling with ultrashort pulse IR lasers

Results, presented in this chapter, were published in [S2 and S3] research paper and presented in [C2 - C4] conferences.

The second step in manufacturing an optical element involves forming the desired surface, a process that can conveniently be carried out using the same laser ablation technology. However, in this case, the use of water is disadvantageous, as previous studies have shown that its effect on efficiency and speed diminishes for wider, shallower structures, especially when the depth-to-width ratio is below 0.8 [137]. Furthermore, another drawback of using water for surface formation is the higher achievable surface roughness. As glass-cutting experiments showed, the roughness of cut walls when machining glass through a water layer was consistently higher than that in air. However, for an optical element, surface roughness must be minimised to ensure effective transmission and to prevent scattering of the incident radiation.

This chapter describes the results obtained by investigating methods to accelerate surface milling in air (without the additional use of water). First, the influence of pulse duration (using femtosecond and picosecond laser pulses) on milling speed and quality was evaluated. Particular attention was given to removing the thinnest possible layer of material to improve the accuracy of surface formation, which is especially important when creating complex surface geometries. Finally, the effect of GHz repetition rate bursts on the glass milling process was examined.

Results showed that femtosecond pulses removed thinner material layers than picosecond pulses, due to more confined laser energy absorption within the material. Using femtosecond pulses, 0.95 μm-thick material layers were

removed from a pristine (polished) fused silica sample, with as little as 46 nm removed after roughening the glass surface. In contrast, the thinnest removed layer using picosecond pulses was almost 14 times thicker (13 μm for pristine and 0.5 μm for roughened glasses).

Moreover, smoother ablated surfaces were produced with femtosecond pulses. The lowest surface roughness S_a was 0.13 μm. Milling with picosecond pulses resulted in 4.5 times higher roughness, reaching 0.6 μm.

In addition, multi-layer ablation was investigated. Femtosecond pulses demonstrated greater stability, enabling more predictable surface formation of optical elements. After 256 layers were removed, the average layer thickness remained constant at around 0.5 μm. In contrast, the use of picosecond pulses led to an increase in the thickness of removed material with each ablated layer. While the first few layers were around 0.5 μm, after the 128th scan, the layer thickness increased to 2.2 μm. Overall, this means that the final structure depth was 4.3 times higher with picosecond-pulse milling (560 μm vs 130 μm). However, the milling rate was still 2.6 times higher when using a femtosecond laser. Despite a lower removed volume with shorter laser pulses, the scanning speed was 11.5 times faster (0.625 m/s vs 7.2 m/s), meaning that milling rates were 0.066 mm^3/h and 0.025 mm^3/h with fs- and ps-duration pulses, respectively.

Finally, fused silica glass was milled with a GHz burst regime. Results showed that the GHz burst regime improved the maximum milling efficiency from 3.8 to 49 $\mu m^3/\mu J$ (approximately 12.7 times) compared to the non-burst regime, at the cost of surface quality. Surface roughness S_a and edge defect width increased from 0.54 ± 0.17 to 9.6 ± 2.3 μm and from 14.6 ± 4.0 to 78.3 ± 27.3 μm, respectively. Deteriorated processing quality revealed that GHz bursts were unsuitable for optical element formation.

The observed increase in milling efficiency and deterioration in surface quality were attributed to a change in the material-removal mechanism from gentle ablation to much coarser glass fracturing. During GHz bursts, significant heat accumulation occurred within the ablation zone. More substantial heat accumulation led to the excessive thermal stresses, which were relieved through glass cracking and fragmentation. Additionally, filamentation-induced volumetric damage was observed, suggesting that subsurface damage reduced the structural integrity of the underlying glass volume, lowering the material ablation threshold and promoting more efficient material fragmentation.

Investigation of glass polishing with CO_2 laser

Investigation of fused silica milling showed that high surface quality (minimal surface roughness and edge defect width) could be achieved either using a non-burst regime or up to 3 pulses in a GHz burst. For simplicity, a specific optical element (a lens array) was further formed using only the non-burst mode. This choice was made because the 3-pulse GHz burst mode increased edge chipping in the milled area by up to 17.4 %. Although GHz bursts reduced surface roughness by up to 18.5 % compared to the non-burst regime, the increased cracking caused by greater heat accumulation makes burst mode undesirable for forming optical elements, as it could introduce additional damage to the glass.

Therefore, the lens arrays were formed with optimised parameters using picosecond and femtosecond IR lasers in the non-burst regime. These elements were additionally polished using a CO_2 laser to reduce their surface roughness and make them suitable for optical systems. Finally, the elements milled with both pulse durations were compared and tested by focusing laser radiation onto a CCD camera.

Lens arrays were fabricated using optimised regimes for picosecond and femtosecond pulses. The removed layer thickness was set to 0.5 μm for both fs and ps pulse durations to compare similar processing conditions. Every fabricated array consisted of 30 microlenses separated by 1 mm between the centres of neighbouring lenses. The lenses themselves were 1 mm in diameter.

After surface formation with ultrashort pulsed lasers, lens arrays were polished with a CO_2 laser. For this, the influence of polishing parameters was investigated. Results showed that the lowest surface roughness without loss in geometry of the formed lenses was possible by increasing the laser beam diameter on the glass surface from 440 μm to 2 mm and using the following laser parameters: 10 kHz pulse resolution rate, 200 mm/s scanning speed, 25 μm hatch, and 120 W average laser power.

Analysis of fabricated lens arrays revealed that lenses fabricated with picosecond pulses exhibited greater light scattering, likely due to a 2 times higher element surface roughness (S_a = 60 nm vs 30 nm), 3.9 times higher surface waviness, and a greater formation of defects beneath the lens surface. On the other hand, lens arrays fabricated by combining femtosecond and CO_2 lasers had better lens-to-lens repeatability. Furthermore, the light detected with the CCD camera was less scattered.

In addition, the evaluation of surface waviness W_q showed that even before the polishing stage, the waviness of elements produced with picosecond IR pulses was approximately 3.7 times higher, reaching 1.18 μm, compared to

0.32 μm for elements produced with femtosecond IR pulses. After polishing, this ratio remained similar: the surface waviness W_q of lenses formed with picosecond pulses was 3.9 times greater than that of femtosecond pulses (0.775 μm vs 0.2 μm, respectively).

In the end, a combination of the femtosecond and CO_2 lasers was used to fabricate lens arrays, which were then integrated into an industrial system. Two of the produced elements were used to homogenise LED-generated UV radiation. The resulting homogenised light had a rectangular shape (dimensions 8 × 16 mm^2) with a uniformity of light intensity equal to 3.5 %.

The main results and conclusions

- Effective cooling of borosilicate glass by forming a flowing water film allowed the utilization of full average laser power for cutting the thickest (550 μm) glass samples while avoiding thermal fracturing.
- When cutting 300 μm thick glass through a water film, it was possible to form up to 1.5 times narrower channels, leading to an approximately 1.25-fold increase in cutting speed. The overall increase in cutting speed in water is primarily related to geometric changes in the formed channel – narrower channels compensate for the decreased material removal rate. This is particularly relevant for thick glass: for 550 μm thick glass, the cutting speed increased 10.6 times compared to cutting in air.
- Borosilicate glass strips cut through a flowing water film became more resistant to mechanical impact compared to those cut in air. This resistance increased with glass thickness: for the thinnest glass (110 μm), the results were similar in both air and water; for 300 μm glass, the resistance increased by up to 12.8%, and for the thickest glass (550 μm), it grew by up to 58%.
- Non-burst femtosecond (320 fs) IR pulses enabled the removal of material layers up to 14 times thinner than those achieved with 10 ps pulses. The minimum layer thickness reached 0.95 μm on a transparent surface and 50 nm on a rough surface. Furthermore, the use of femtosecond pulses resulted in smoother surfaces. The lowest achieved surface roughness S_a, was 130 nm, which is approximately 4.5 times lower than that obtained via picosecond pulse processing. Additionally, the ablation of fused silica exhibited higher stability, as the thickness of the removed layer remained constant even after removing up to 256 layers. In contrast, during the picosecond pulse ablation of glass, the thickness of the removed layer increased. Nevertheless, femtosecond pulses provided a 2.6-fold higher ablation rate.

- Using a femtosecond IR laser in GHz-burst mode, composed of 15 pulses, the material removal efficiency reached 49 $\mu m^3/\mu J$, which was 12.7 times higher than the efficiencies achieved in the non-burst regime. This enhancement was due to more severe glass cracking and the removal of larger fragments. However, this improvement came at the expense of milling quality. In the extreme case, surface roughness S_a increased 17.7-fold (from 0.54 ± 0.17 µm to 9.6 ± 2.3 µm), while the maximum edge damage width (DKP) increased 5.4-fold (from 14.6 ± 4.0 µm to 78.3 ± 27.3 µm) when comparing glass ablation in non-burst and GHz burst regimes.
- When evaluating the quality of a polished surface, the formation of micro-lens arrays with a femtosecond (320 fs) IR laser is superior to that with a picosecond laser. Achieved surface roughness R_q values approached the standard optical specification (λ/7). However, surface waviness W_q remained relatively high, reaching 775 nm and 200 nm for surfaces processed with picosecond and femtosecond pulses, respectively. Consequently, laser-based optical surface formation is particularly suitable for producing micro-optical elements or optical surfaces with highly complex geometries (e.g., microlens array homogenisers), where surface waviness has minimal effect on the quality of the transmitted beam.

Padėka

Kartu su šiuo darbu noriu išreikšti nuoširdžią padėką visiems, prisidėjusiems prie šios disertacijos gimimo ir įgyvendinimo.

Pirmiausia tariu ačiū Edgarui, Pauliui ir Gediminui, kurių pamokos, palaikymas, kritika, komentarai bei patarimai lydėjo mane nuo pat pirmųjų žingsnių FTMC Lazerinių technologijų skyriuje. Tik Jūsų perduotos patirties bei pasitikėjimo dėka saugiai jaučiausi pasukdamas mokslo keliu.

Nuoširdžiai dėkoju artimiausiems kabineto kaimynams Miglei, Modestui ir Arnui, kurie rūpinosi mano emocine gerove magistro bei doktorantūros studijų metais ir padėjo atitrūkti nuo kasdienės rutinos. Jūsų palaikymas buvo viena didžiausių paskatų sėkmingai užbaigti šį darbą.

Ačiū visiems kolegoms – Juozui, Andriui, Valdemarui, Simonui, Karoliui R., Romualdui, Evaldui, Mindaugui, Kerniui, Vitai, Rodrigui, Adai, Karoliui S., Mantui, Patricijai, Nedai – už puikią darbo atmosferą ir nuolatinį palaikymą. Tokie klausimai kaip: „Na, kaip disertacija?“, „Kaip sekasi rašyti?“ – stiprino norą Jūsų nenuvilti ir judėti pirmyn.

Padėką noriu išsakyti recenzentams ir dar kartą atskirai darbo vadovui Pauliui, kurie negailėjo savo laiko ir ne kartą skaitė šį darbą. Tik Jūsų įžvalgų, komentarų ir pastabų dėka tekstas kokybiškai pasikeitė ir pasiekė etapą, kai gali būti teikiamas viešajam gynimui.

Atskirai dėkoju broliams ir seserims iš buvusio ir dabartinio būrių, kurie padėjo atsiriboti nuo kasdienių rūpesčių ir pakeisti aplinką savaitgaliais. Ačiū už padrąsinimus bei pamokas. Jūsų klausimai: „Tai kuriam gynybos planą?“, „Kada ginsimės?“ – ramino ir didino bendrystės jausmą.

Galiausiai dėkoju šeimos nariams už palaikymą visų studijų metu, motyvaciją ir padrąsinančius žodžius. Taip pat ačiū visiems draugams, kurių dar nepaminėjau, bet kurie palaikė viso šio etapo metu.

Curriculum vitae

Name:	Laimis
Surname:	Zubauskas
Place of birth:	Panevėžys, Lithuania
E-mail:	laimis.zubauskas@ftmc.lt

Education:

2021 – 2026	Centre for Physical Sciences and Technology *PhD studies in Materials Engineering*
2019 – 2021	Vilnius University *Master's degree in Materials Technology*
2015 – 2019	Vilnius University *Bachelor's degree in Physics*
2011 – 2015	Juozas Balčikonis gymnasium *High school education*

Work experience:

2021 – now	Centre for Physical Sciences and Technology *Junior researcher*
2019 – 2021	Centre for Physical Sciences and Technology *Engineer*
2018 – 2019	Centre for Physical Sciences and Technology *Technician*

Užrašai

Užrašai

Užrašai

Vilniaus universiteto leidykla
Saulėtekio al. 9, III rūmai, LT-10222 Vilnius
El. p. info@leidykla.vu.lt, www.leidykla.vu.lt
bookshop.vu.lt, journals.vu.lt
Tiražas 20 egz.