

Vilniaus universiteto
Fizikos fakulteto
Lazerinių tyrimų centras

Laimis Zubauskas

INŽINERINIŲ MEDŽIAGŲ ABLIACIJA ORE IR VANDENYJE SU DIDELIO DAŽNIO
ULTRATRUMPŲ IMPULSŲ LAZERIU

Magistrantūros studijų baigiamasis darbas

Lazerinių technologijų
studijų programa

Studentas

Laimis Zubauskas

Leista ginti

2021-05-19

Darbo vadovas

dr. Edgaras Markauskas

Centro direktorius

prof. Aidas Matijošius

Vilnius 2021

Turinys

Įvadas.....	3
1. Lazerinės spinduliuotės sąveika su medžiaga	5
1.1. Sąveikos mechanizmai.....	5
1.2. Sugertis metaluose	6
1.3. Sugertis dielektrinėse medžiagose	7
1.4. Tiesinė, daugiafotonė ir tunelinė jonizacija	8
1.5. Smūginė ir griūtinė jonizacija.....	9
2. Medžiagų pjovimo technologijos	10
3. Efektyvi abliacija.....	12
4. Pažeidimų formavimasis stikle abliacijos metu	14
5. Šiluminės akumuliacijos įtaka abliacijai	15
6. Vandens įtaka lazeriniam procesui	17
6.1. Plazmos susidarymas	18
6.2. Kavitacijos burbulai	19
7. Eksperimentinė įranga	19
8. Eksperimentų metodika	21
8.1. Pluošto radiusas sąsmaukoje.....	21
8.2. Abliacijos efektyvumas ir pjovimo sparta	21
8.3. Stiklų lūžimo riba.....	22
9. Eksperimentų rezultatai	23
9.1. Vandens sluoksnio įtaka abliacijos efektyvumui.....	23
9.1.1. Stiklo abliacija	23
9.1.2. Metalų abliacija	26
9.2. Plonų stiklų pjovimas: borosilikatinis stiklas	29
9.2.1. 1064 nm bangos ilgis.....	29
9.2.2. 355 nm bangos ilgis.....	30
9.2.3. Spinduliuotės bangos ilgio įtaka pjūvio kokybei.....	33
9.2.4. Atsparumas lenkimui	33
9.3. Storų stiklų pjovimas. Silikatinis stiklas.....	35
9.3.1. Pjūvio kokybė.....	36
9.3.2. Atsparumas lenkimui.....	37
9.3.3. Pjovimo technologijų palyginimas	39
Pagrindiniai rezultatai ir išvados	40
Pranešimai mokslinėse konferencijose ir publikacijų sąrašas	41
Literatūra	42

Įvadas

Vystantis technologijoms yra siekiama gaminti kuo mažesnius prietaisus, kuriems reikia ir mažų matmenų elementų. Mažesnės detalės leistų surinkti kompaktiškesnius prietaisus, kuriuos būtų lengviau integruoti į daugiafunkcines sistemas. Jie taptų lengvesni ir mobilesni. Papildomai, tai sumažintų sunaudojamą žaliavų kiekį. Visa tai leistų sumažinti gamybos savikainą bei transportavimo ir sandėliavimo kaštus, kas ir yra ekonomikos pagrindas - pagaminti detalę kuo pigiau ir greičiau išlaikant aukštą jos kokybę ir patrauklumą vartotojui.

Aukštos kokybės medžiagų apdirbimui lazerinės technologijos yra vis plačiau taikomos. Lazeris įgalina tikslesnį apdirbimą ir mažesnę medžiagos eikvojimą, tai yra pjūvis gali siekti keliasdešimt mikrometrų. Galima gauti geresnę pjūvio kokybę, kartu pagerinant medžiagos mechanines savybes arba sumažinti kraštų šlifavimo ir poliravimo žingsnių skaičių taip padidinant gamybos spartą ir atpiginant procesą [1, 2].

Lazerinių sistemų panaudojimas tampa aktualus stiklų pramonėje. Prietaisų matmenys yra vis labiau mažinami ir dėl to atsiranda poreikis mažų matmenų optiniams elementams gaminti. Aukštosios technologijos kaip fotonika (kompaktiniai lazeriai, motorizuoti teleskopai ir t.t.), mikrofluidinės ar mikroelektromechaninės sistemos yra vystomos juos paverčiant į vis kompaktiškesnius įrenginius, o tokių produktų pardavimų apimtys nuolat didėja. Technologiniai apribojimai kyla iš poreikio mažinti vidinius optinius komponentus kaip veidrodžiai, lęšiai, ar iš stiklo pagamintus elementus kaip mikrovožtuvai ar siurbliukai. Tokie elementai įprastai yra pjaunami iš didesnių stiklo padėklų, o pjaunant tradiciniais mechaniniais metodais užtikrinti aukštą detalių kokybę tampa vis sudėtingiau, dėl to didėja gamybos kaštai. Ateityje gali būti reikalinga pjauti stiklines detales į kurias būtų galima įrašyti šviesolaidžius ir jas panaudoti, pavyzdžiui, kuriuose kvantiniuose kompiuteriuose [3, 4]. Taip pat, sparčiai auga elektronikos su liečiamais ekranais rinka. Ploni stiklai pradėti naudoti lankstiems ekranams, kur yra reikalingas tikslus jų pjovimas ir skylių gręžimas kameroms, garsiakalbiams ar mikrofonams [5, 6].

Tuo tarpu metalų pramonėje lazerinis mikroapdirbimas tampa svarbus siekiant pakeisti tam tikras metalo savybes, frezuoti aukštos kokybės liejimo formas, kurios paviršiuje turi suformuotas mikrometrines ar nanometrines struktūras [7]. Lazериu metalo paviršiuje yra formuojamos struktūros savo forma ir savybėmis kopijuojančias gamtos pasaulyje esančias struktūras. Tokiu būdu galima gauti hidrofobinį paviršių [8] ar sumažinti paviršiaus trintį su vandeniu, atkartojant, ryklio odos formą - išabliavus pasikartojančias erdvines struktūras medžiagos paviršiuje [9]. Trinties koeficiento sumažinimą abliuojant metalų paviršius yra norima pritaikyti vidaus degimo varikliuose, kur yra dideli energijos nuostoliai dėl judančių detalių trinties [10]. Visoms šioms paviršiaus modifikacijoms

reikia didelio tikslumo, o dėl jų mažų matmenų lazeris tampa puikia priemone jas formuoti pasinaudojant tiesioginės abliacijos technologija [8, 9].

Siekiant lazerines sistemas pritaikyti medžiagų apdirbimui yra vystomos įvairios lazerinės technologijos. Stiklų apdirbimo atveju, perspektyviausios lazerinės technologijos yra stiklų pjovimas iš apatinės pusės [11], trūkių generavimas stiklo tūryje [12] bei tiesioginė abliacija [13]. Pirmos dvi technologijos pasižymi didele pjovimo sparta, tačiau turi ir trūkumų: pjaunant stiklą iš apatinės pusės galimas stiklo apskeldėjimas siekiantis kelis šimtus mikrometrų [11], o trūkių generavimo technologija yra apribota pjūvio geometrijos [12]. Tuo tarpu, tiesioginė abliacija pasižymi aukšta apdirbimo kokybe ir neturi paminėtų geometrinių apribojimų bei yra tinkama neskaidrių, sugeriančių medžiagų apdirbimui. Kita vertus, stiklų pjovimui, lyginant su kitomis minėtomis technologijomis, tiesioginė abliacija yra lėčiausia.

Metalams abliuoti yra naudojama tiesioginė medžiagos abliacija. Abliuojant metalus susidaro terminiai pažeidimai, perlydyto metalo sankaupos pjūvio kraštuose [14]. Taigi, buvo pastebėta, kad vandens sluoksnis sudarytas ant apdirbamos medžiagos padeda efektyviai pašalinti abliacijos produktus [15], nuneša šilumos perteklių iš abliacijos zonos [14, 16] bei sumažina plazmos ekranavimą [17], kas bendrai leidžia pasiekti didesnę abliacijos spartą ir geresnę kokybę nei pjaunant šias medžiagas ore.

Šio darbo tikslas yra įvertinti vandens sluoksnio įtaką lazerinės abliacijos efektyvumui pjaunant inžinerines medžiagas (borosilikatinį ir silikatinį stiklus bei nerūdijantį plieną) didelio impulsų pasikartojimo dažnio (0,1 - 1 MHz) pikosekundiniais impulsais.

1. Lazerinės spinduliuotės sąveika su medžiaga

1.1. Sąveikos mechanizmai

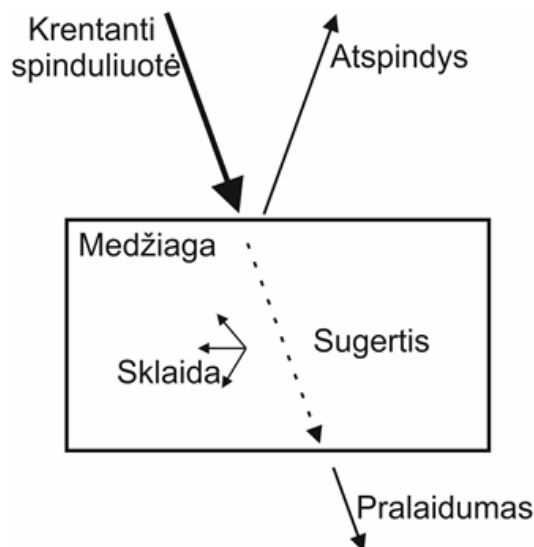
Krintant elektromagnetinei spinduliuotei į medžiagą pirmiausia gali įvykti spinduliuotės atspindys nuo medžiagos paviršiaus (žr. 1 pav.) [1, 18]. Tokiu būtu yra prarandama dalis spinduliuotės energijos. Atspindys gali būti aprašomas naudojantis medžiagos parametrais:

$$R = \frac{(n_1 - n_2)^2 + (\kappa_1 - \kappa_2)^2}{(n_1 + n_2)^2 + (\kappa_1 + \kappa_2)^2}. \quad (1)$$

Šioje formulėje dydis R yra atspindžio koeficientas, kuris nurodo atsispindėjusios spinduliuotės ir kritusios spinduliuotės santykį, n_1 ir n_2 atitinkamai terpės, iš kurios ir į kurią krinta lazerinė spinduliuotė, lūžio rodikliai, κ_1 ir κ_2 atitinkamai tų pačių terpių ekstinkcijos koeficientai. Atspindžio koeficiento formulėje esantys nariai veikia lazerinę spinduliuotę – lūžio rodiklis veikia bangos fazę ir kartu fazinį greitį, o ekstinkcijos koeficientas - bangos amplitudę [1]:

$$E(z, t) = E_0 e^{-\frac{\kappa\omega z}{c}} e^{i(\frac{\omega n z}{c} - \omega t)}, \quad (2)$$

čia $E(z, t)$ – medžiaga sklindančios spinduliuotės elektrinio lauko stiprio kitimas z kryptimi per laiką t , E_0 – pradinis lauko stipris (bangos amplitudė), c – šviesos greitis vakuume, ω – bangos virpesių dažnis. Pirmoji eksponentė formulėje aprašo lūžio rodiklio įtaką amplitudei, o antroji eksponentė aprašo bangos fazę.



1 pav. Lazerinės spinduliuotės sąveikos su medžiaga mechanizmai [18].

Neatspindėta spinduliuotės dalis patenka į medžiagą, kur ji gali būti išsklaidyta, sugerta, arba nesąveikauti su medžiaga, tai yra praeiti medžiagą be nuostolių (žr. 1 pav.) [18]. Pažeidimui

inicijuoti, yra svarbi spinduliuotės sugertis medžiagoje, kurios metu spinduliuotės energija perduodama medžiagai.

Medžiagos ir lazerio spinduliuotės sąveiką galime įsivaizduoti gana paprastai. Klasikiniu požiūriu elektroną galima įsivaizduoti susijusį su medžiagos atomu per spyruoklę su tam tikru tamprumo koeficientu [1]. Kai atomas sąveikauja su išoriniu elektromagnetiniu lauku, išorinės bangos elektrinis laukas yra veikiančioji jėga, dėl kurios svyruoja elektronai apie pusiausvyros padėtį, dažniu, lygiu išorinės bangos dažniui. Jei tas dažnis sutampa su rezonansiniu dažniu, matomas rezonanso reiškinys, kurio metu sukeliama didelės svyravimų amplitudės ir vyksta išorinės energijos sugertis. Šio proceso metu elektronai pradeda vis smarkiau virpėti, tai yra didėja jų kinetinė energija, kuri smūgių su gardele metu yra perduodama gardelei ir virsta šiluma.

Spinduliuotės sugertis medžiagoje yra aprašoma sugerties koeficientu α , kuris nusako sugertos galios dydį vienetiniame terpės ilgyje ir yra susijęs su ekstinkcijos koeficientu:

$$\alpha = \frac{4\pi\kappa}{\lambda}, \quad (3)$$

čia λ – bangos ilgis. Tariant, kad spinduliuotė krenta į medžiagą z kryptimi, tai spinduliuotės intensyvumo kitimą galime užrašyti taip:

$$I(z) = I_0(1 - R)e^{-\alpha z}, \quad (4)$$

čia I – kritusios ant medžiagos paviršiaus spinduliuotės intensyvumas, o $I(z)$ – intensyvumas prasklidus ilgį z terpėje. Taigi spinduliuotės intensyvumas yra didžiausiais medžiagos paviršiuje, o skverbiantis gilyn į medžiagą, dėl sugerties, mažėja eksponentiškai. Gylio, kuriame spinduliuotės intensyvumas sumažėja e kartų (apie 2,7) yra vadinamas sugerties gyliu L ir yra atvirkščiai proporcingas sugerties koeficientui ar spinduliuotės dažniui ν [Hz] [1]:

$$L = \frac{1}{\alpha} = \frac{1}{\sqrt{\pi\sigma_e\mu_m\nu}}, \quad (5)$$

čia σ_e - savitasis elektrinis laidis [S/m], μ_m - magnetinė skvarba [H/m].

1.2. Sugertis metaluose

Metalai pasižymi laidininkų savybėmis, kurių valentinė ir laidumo juostos yra persiklojusios, tai yra laidumo juostoje visada yra laisvų elektronų (žr. 2a pav.). Tačiau elektronai nėra visiškai laisvi – juos supa kitos dalelės [1]. Kvantiniu požiūriu fotono sugertis yra įmanoma, kai elektronas susiduria su trečia dalele (kitu elektronu ar atomu). Šiuo atveju fotono energija pasiskirsto tarp susidūrusių dalelių priklausomai nuo dalelių masių (lengvesnė paprastai gauna daugiau energijos). Šis sugerties efektas yra vadinamas stabdomąja sugertimi. Vykstant stabdomajai sugerčiai elektrono energija auga iki tam tikros ribos, priklausančios nuo susidūrimų dažnio [1, 19]. Maksimali įgyjamos energijos dalis atsiranda, nes be stabdomosios sugerties egzistuoja ir atvirkštinis procesas,

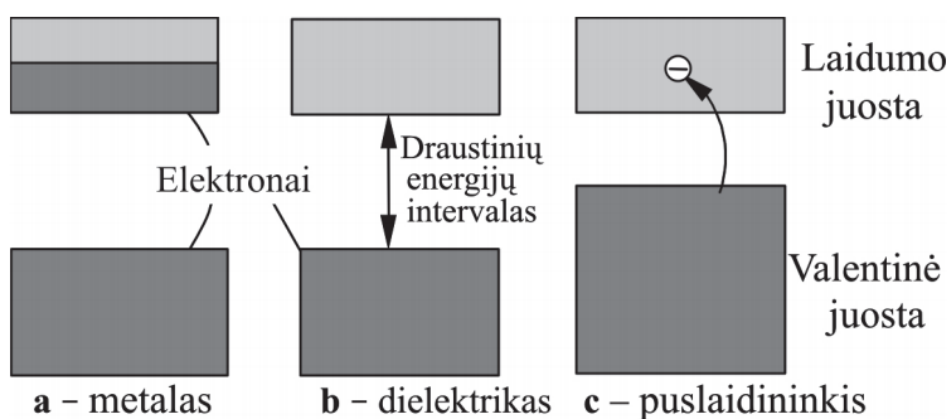
kai dėl smūgio su kita dalele elektronas praranda dalį energijos (stabdomasis spinduliavimas) [1, 19]. Taip elektronas gaudamas energiją iš elektromagnetinės spinduliuotės, susidūrimų metu, ją perduoda medžiagai, kuri savo ruožtu šyla bei pradeda lydėtis ir garuoti. Tradiciniu atveju, kai yra maži lazerio intensyvumai, tai yra $I < 10^9 \text{ W/cm}^2$, paviršinis garavimas yra pagrindinis metalo pašalinimo būdas. Didėjant intensyvumui, lydalas yra perkaitinamas ir medžiaga pašalinama kaip lydalo ir garų mišinys, tai yra pašalinami didesni medžiagos tūriai [20].

1.3. Sugertis dielektrinėse medžiagose

Kitaip nei laidininkuose, puslaidinikiuose, laidumo juosta yra tuščia ir nuo valentinės juostos atskirta draustinių energijų tarpu E_g . Dielektrikuose - valentinė juosta taip pat atskirta nuo laidumo juostos draustinių energijų tarpu, tačiau šis tarpas yra kur kas didesnis nei puslaidininkų atveju (žr. 2b ir 2c pav.). Sugertis tokiose medžiagose paremta laisvųjų krūvininkų generavimu ir elektromagnetinės spinduliuotės sugertimi juose [1, 21]. Siekiant elektronus perkelti iš valtinės į laidumo juostą elektronams reikia suteikti energijos kiekį lygų draustiniam energijų tarpui. Energija gali būti sugerta dviem būdais – tiesine ir netiesine fotono sugertimi. Šiuo atveju tiesinė sugertis gali vykti tik esant labai trumpiems bangos ilgiams – didelėms fotonų energijoms, kurios atitiktų draustinių energijų tarpą. Kita vertus, dažnai draustinių energijų tarpas yra didesnis nei fotono energija:

$$\frac{h\omega}{2\pi} < E_g, \quad (6)$$

čia $h\omega/2\pi$ – fotono energija, kur h yra Planko konstanta, o ω – bangos virpesių dažnis, todėl sugerčiai vykti reikia netiesinių sugerties procesų [1].



2 pav. Įvairių medžiagos tipų energijos juostos [1].

Dielektrikuose fotonų sugerties metu pasiekiamas kritinis krūvininkų tankis ir įvyksta medžiagos optinis pramušimas, o dielektrikas optinėmis savybėmis tampa panašus į laidininką. Dėl

tolimesnės medžiagos ir spinduliuotės sąveikos, medžiaga šyla ir galiausiai įvyksta faziniai medžiagos virsmai [1].

1.4. Tiesinė, daugiafotonė ir tunelinė jonizacija

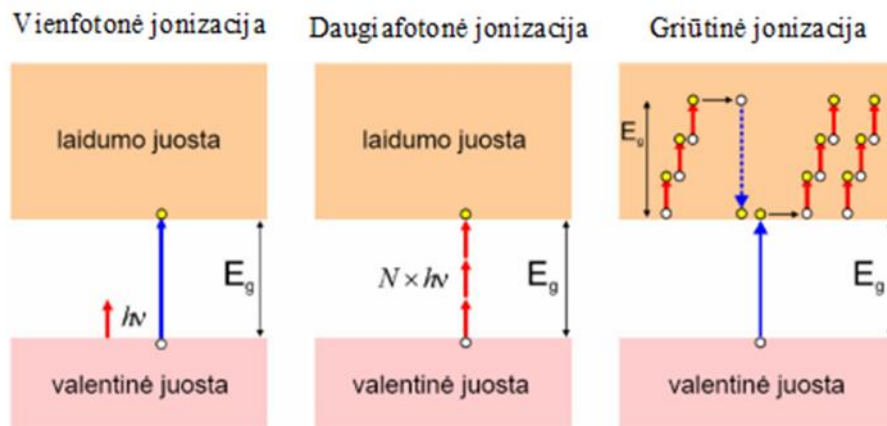
Fotonų sugertis dielektrinėse medžiagose gali būti tiesinė (vienfotonė jonizacija), daugiafotonė, griūtinė (žr. 3 pav.) ir tunelinė. Kuri iš šių sugerčių dominuos priklausys nuo spinduliuotės intensyvumo ir fotono energijos. Tiesinei sugerčiai įvykti turi galioti sąlyga:

$$h\omega \geq E_{ion}, \quad (7)$$

čia E_{ion} – energija reikalinga jonizuoti atomą. Sugerdamas tokį fotoną elektronas gali būti išlaisvintas nuo atomo ir tapti laisvuju. Tikimybė, kad sugerus fotoną įvyks jonizacija arba kitaip fotojonizacijos sparta gali būti išreikšta taip:

$$w^{(1)} = \sigma^{(1)}I, \quad (8)$$

čia I – lazerio spinduliuotės intensyvumas, o $\sigma^{(1)}$ – yra fotojonizacijos skerspjūvis. Turint dielektrinę medžiagą tiesinė sugertis gali vykti tik esant trumpiems bangos ilgiams. Esant didesniems bangos ilgiams tiesinė sugertis nebegali vykti, nes nebetenkinama (7) sąlyga, tai yra fotono energija yra mažesnė nei draustinių energijų tarpas. Kita vertus, jeigu fotono energija yra didesnė nei draustinių energijų tarpas, tai perteklinė energija virsta išlaisvinto elektrono kinetine energija [1, 21].



3 pav. Fotonų sugerties ir elektronų išlaisvinimo mechanizmai [1].

Netiesinė jonizacija vyksta kai sugerties metu yra sugeriami daugiau negu vienas fotonas (daugiafotonė jonizacija) arba spinduliuotės laukas iškreipia vidinį atomo potencialą ir vyksta tunelinė jonizacija. Daugiafotonė jonizacija paprastai vyksta, kai fotono energija yra mažesnė nei draustinių energijų tarpas. Šiuo atveju jonizacijos sąlyga yra:

$$Nh\omega \geq E_{ion}. \quad (9)$$

Kvantiniu požūriu tokia N fotonų sugertis vienu laiko momentu gali būti aiškinama, kad sugerdamas kiekvieną fotoną atomas pereina į vis aukštesnę, virtualią sužadavimo būseną, kol galiausiai yra viršijama draustinės juostos energija ir elektronas yra išlaisvinamas (žr. 3 pav.) [21]. Taip pat kaip ir tiesinė jonizacija, daugiafotonės jonizacijos tikimybė arba sparta gali būti išreikšta taip:

$$w^{(N)} = \sigma^{(N)} I^N, \quad (10)$$

čia $\sigma^{(N)}$ - yra daugiafotonės jonizacijos skerspjūvis. Iš formulės galime matyti, kad daugiafotonė jonizacija smarkiai priklauso nuo spinduliuotės intensyvumo esant dideliui, sugertyje dalyvaujančių fotonų, skaičiui. Šis procesas gali vykti tik esant pakankamai dideliui intensyvumui, nes sąveikos skerspjūvis (tikimybė) mažėja didėjant sugertyje dalyvaujančių fotonų skaičiui [21].

Tunelinei jonizacijai įvykti reikia, kad spinduliuotės elektrinio lauko stipris (išorinis laukas) būtų palyginamas su atomo vidiniu potencialu. Tokiu atveju išorinis laukas iškraipo atomo vidinį potencialą ir elektronas lengviau gali būti išlaisvintas. Tai galima suprasti taip: esant stacionariam, išoriniam, elektriniam laukui atomo potencialas tampa asimetrinis ir susidaro baigtinio pločio ir aukščio potencialinis barjeras, pro kurį gali tuneliuoti elektronas. Jeigu barjero aukštis tampa mažesnis negu jonizacijos energija, tai turime situaciją, kai elektronas gali išsilaisvinti ir tai vadinama viršbarjerine jonizacija [21].

1.5. Smūginė ir griūtinė jonizacija

Elektrono energijai viršijant jonizacijos energiją ženkliai išauga jonizacijos tikimybė [21]. Laisvas elektronas dėl sugerto fotono įgauna kinetinės energijos ir judėdamas gali susidurti su atomais. Laisvojo elektrono energija išoriniame elektromagnetiniame lauke gali būti išreikšta taip:

$$E_{kin} = I \frac{\lambda^2 r_{kl}}{2\pi c}, \quad (11)$$

čia λ – elektromagnetinės bangos ilgis, c – šviesos greitis vakuume, I – spinduliuotės intensyvumas, r_{kl} – klasikinis elektrono radiusas. Jei elektrono kinetinė energija viršija atomo jonizavimo energiją yra galimas kito elektrono išlaisvinimas vadinamas smūgine jonizacija:

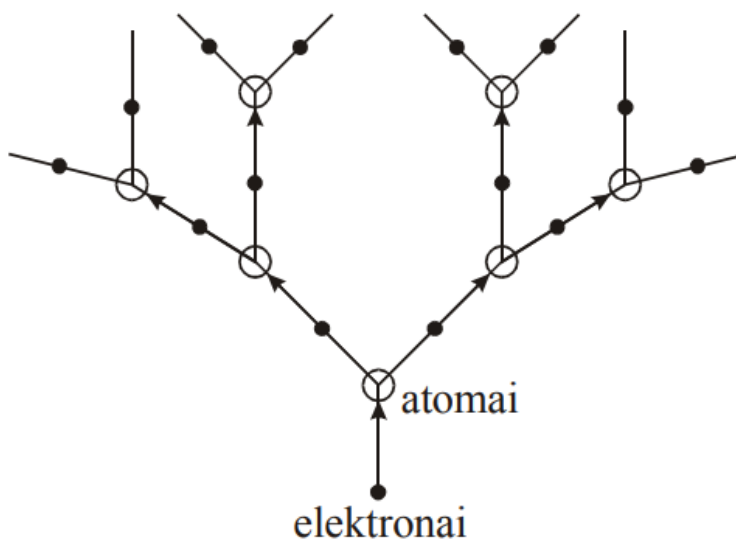


čia A – atomas, e^- – elektronas, o A^+ - jonizuotas atomas. Išlaisvintas elektronas sąveikaudamas su išorine spinduliuote irgi gali įgyti energijos ir jonizuoti kitus atomus (žr. 4 pav.). Elektronų N_e skaičiaus augimą dėl smūginės jonizacijos galima aprašyti eksponentine lygtimi:

$$N_e = N_{e0} e^{\nu_i t}, \quad (13)$$

čia N_{e0} – pradinis laisvų elektronų skaičius, t – laikas, o ν_i – jonizacijų dažnis, kuris yra atvirkščiai proporcingas laikui per kurį elektronas įgyja energiją lygią jonizacijos energijai. Lygtyje nėra atsižvelgta į daugiafotonę sugertį ir galimus elektronų nuostolius kaip rekombinacija su jonais,

difuzija iš sąveikos zonos. Šis eksponentinis elektronų augimas yra bendrai vadinamas griūtine jonizacija ir jam vykti reikia laisvųjų elektronų [1, 21].



4 pav. Smūginės (griūtinės) jonizacijos schema [22].

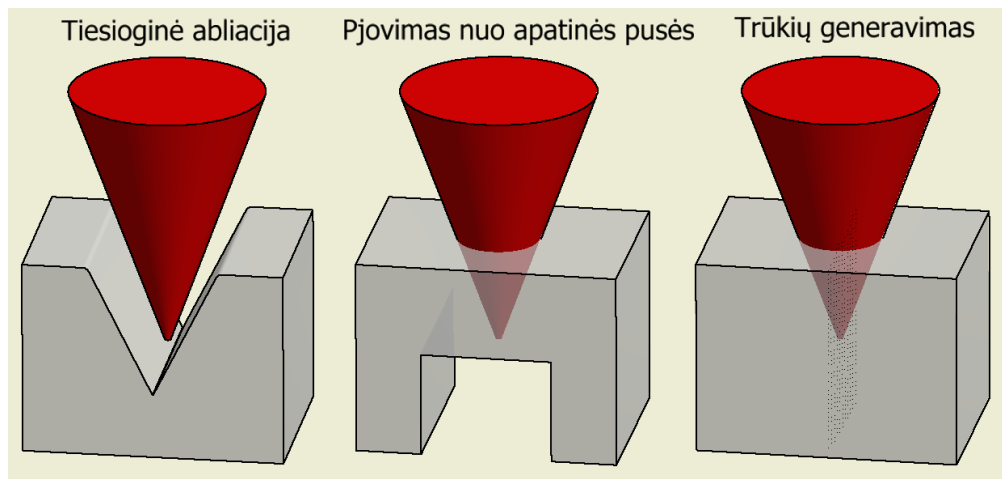
Dielektrinėse medžiagose idealiu atveju nėra laisvųjų elektronų, tačiau visos medžiagos turi priemaišų, kurios gali sugerti spinduliuotę ir tokiu būdu pradėti griūtinį procesą. Taip pat, laisvieji elektronai medžiagoje yra išlaisvinami daugiafotonės jonizacijos metu ir šie, savo ruožtu, gali sąveikauti su spinduliuote ir išlaisvinti naujus krūvininkus. Taigi, laisvų elektronų skaičius auga tol, kol yra pasiekiamas tam tikra kritinė jų tankio vertė $N_{kr} \approx 10^{21} \text{ cm}^{-3}$, kuri atitinka plazmos susidarymo pradžią [21]:

$$N_{kr} = \frac{m\omega^2}{4\pi e^2}, \quad (14)$$

čia m – elektrono masė, $e \approx 2,7$, o ω – rezonansinis plazmos dažnis. Kai dielektrike susidaro kritinis elektronų skaičius medžiaga savo optinėmis savybėmis tampa panaši į laidininką ir tampa smarkiai absorbuojančia [21].

2. Medžiagų pjovimo technologijos

Medžiagų apdirbimui lazeriu yra kuriamos įvairios technologijos, siekiant, lazerinį apdirbimą pritaikyti visoms pramonės keliamoms užduotims. Kalbant apie stiklus, tai perspektyviausios jų pjovimo technologijos yra stiklo pašalinimas iš apatinės pusės [11], trūkių generavimas stiklo tūryje [12] ir tiesioginė abliacija (kuri tinka ir metalų apdirbimui) [15] (žr. 5 pav.). Kiekviena iš šių technologijų turi savų privalumų ir trūkumų, todėl gali būti pritaikomos skirtinguose uždaviniuose.



5 pav. Lazerinės stiklų apdirbimo technologijos.

Stiklo pjovimas iš apatinės pusės yra viena sparčiausių technologijų leidžiančių gana pigiai ir efektyviai pjauti stiklus [11]. Šia technologija pjaunant stiklo padėklą, lazerio spinduliuotė yra fokusuojama per stiklą į apatinį jo paviršių (žr. 5 pav.) [23]. Technologija paremta trūkių generavimu ir medžiagos suskaldymu į smulkias, kelių šimtų mikrometrų dydžio, stiklo daleles. Pagrindinis šios technologijos privalumas yra didelė medžiagos pašalinimo sparta, kuri pjaunant 4 mm storio stiklus gali leisti pasiekti pakankamai didelius pjovimo greičius, siekiančius iki 10 mm/s [11]. Kita vertus, Stiklų pjovimas iš apatinės pusės turi ir trūkumų. Vienas pagrindinių trūkumų yra pjūvio kraštų apskeldėjimas, kuris gali siekti kelis šimtus mikrometrų, o tai turi įtakos pjaunamos detalės stiprumui ir vizualinei pjūvio kokybei [11].

Kita technologija yra trūkių generavimas. Trūkių generavimo technologija yra plačiai taikoma pramonėje siekiant tiesiomis linijomis padalinti stiklo plokštes [2]. Lazerinis trūkių generavimo metodas yra panašus į mechaninį režimą ir perlaužymą. Šiuo atveju trūkiai stiklo tūryje yra sugeneruojami lazerio pagalba (žr. 5 pav.). Trūkių generavimas leidžia stiklą apdirbti mažesne lazerio galia nei reikalinga abliacijos procese [2]. Proceso esmė yra ta, kad skylimai sugeneruojami atsirandant lokaliai medžiagos kaitimui, kai yra sugerama lazerio spinduliuotė medžiagos tūryje. Sugėrus lazerio spinduliuotę, dėl didelės temperatūros medžiagoje susidaro įtempiai. Jei šie įtempiai viršija kritinę vertę – stikle susiformuoja skylimai. Pozicionuojant skylimus į vorą, galima perlaužti stiklą [11]. Šios technologijos pagrindinis privalumas yra didelė pjovimo sparta, kuri gali siekti metrus per sekundę [12]. Perlaužus stiklą yra gaunamos statmenos lūžio sienelės, mažas kraštų apskeldėjimas bei mažas sienelės šiurkštumas, kuris siekia kelis mikrometrus [12, 24]. Kita vertus, ši technologija turi ribotą geometriją – negalima pjauti smulkių elementų ir linijų, kurių radiusas mažesnis negu 1 mm [25], sudėtingesnės formos elementų, bei ypatingai sudėtinga išpjauti vidinius uždarus elementus [2, 12, 24].

Papildomai abi aptartos technologijos turi bendrą trūkumą – medžiaga turi būti skaidri spinduliuotei, kad ši galėtų prasiskverbti į medžiagą. Taigi yra svarbus aspektas, kad stiklus būtų galima pjauti iš apatinės pusės ar generuojant trūkius tik jei stiklas yra skaidrus lazerinei spinduliuotei, t. y. negalima pjauti smarkiai sugeriančių stiklų, stiklų dengtų atspindinčiomis dangomis ar kitų sugeriančių medžiagų kaip, pavyzdžiui, metalai [11, 12].

Tuo tarpu, tiesioginė abliacija yra paremta tiesioginiu medžiagos pašalinimu pasluoksniui, pradedant nuo viršutinio detalės paviršiaus (žr. 5 pav.) [26]. Dėl pasiekiamo didelio energijos tankio galima pjauti medžiagas nepriklausomai ar jos turi atspindinčią dangą ar ne. Lyginant su prieš tai minėtomis stiklų pjovimo technologijomis, tiesioginė abliacija neturi geometrijos apribojimų kaip, pavyzdžiui, trūkių generavimo technologija, nes šiuo atveju lazerio pluoštą galima skenuoti norima kryptimi [13]. Taigi, tinkamiausia technologija siekiant pjauti įvairios geometrijos objektus iš įvairių medžiagų, išlaikant aukštą pjūvio kokybę, yra tiesioginė abliacija. Tačiau šis procesas gali būti ribojamas susiformuojančių terminių pažeidimų [14], bei tikslumo mažėjimo apdirbant metalus, dėl išlydytos medžiagos zonų susidarymo [27]. Kitas ryškus trūkumas, tai kad abliuojant medžiagą susidaro nuožulnios sienelės (žr. 5 pav.), kurias po to gali tekti šlifuoti papildomais procesais. Galiausiai, reikia ieškoti būdų kaip padidinti mažą tiesioginės abliacijos pjovimo spartą, kad ši technologija rastų vis platesnį pritaikymą pramonėje.

3. Efektyvi abliacija

Visose pramonės šakose svarbu dirbti efektyviai – sunaudoti kuo mažiau energijos pasiekiant tuos pačius, gerus rezultatus. Medžiagų pjovime svarbus aspektas yra abliacijos efektyvumas, kuriuo galima vadovautis ieškant optimalių apdirbimo parametrų [28, 29, 30, 31]. Tokių parametrų radimo modelį vienas pirmųjų pristatė J. Furmanskis [28].

Medžiagų abliacijoje egzistuoja tam tikras slenkstinis energijos tankis F_{th} , kuriam esant susidarys kritinis laisvųjų elektronų tankis, sustiprės sugertis ir įvyks medžiagos pažeidimas. Esant energijos tankiui F didesniau už F_{th} , kiekvienas spinduliuotės impulsas pašalins tam tikrą medžiagos dalį, tai yra formuos kraterį medžiagos paviršiuje [28]. Maksimalus kraterio gylis gali būti išreikštas taip:

$$d = d_0 \ln \left(\frac{F}{F_{th}} \right), \quad (15)$$

čia d_0 - efektyvus energijos sugerties gylis. Imant, kad lazerinė sistema generuoja Gauso pluoštą, erdvinis pluošto energijos tankio pasiskirstymas gali būti išreikštas kaip

$$F(r) = F_0 e^{-\frac{r^2}{a^2}}, \quad (16)$$

čia F_0 – energijos tankis pluošto centre, r – atstumas nuo pluošto centro ir a – pluošto radiusas $\frac{1}{e}$ aukštyje. Taigi įstate (16) į (15) gauname parabolinę kraterio formą:

$$d(r) = d_0 \left(\ln \left(\frac{F_0}{F_{th}} \right) - \frac{r^2}{a^2} \right). \quad (17)$$

Tokio kraterio tūris bus lygus:

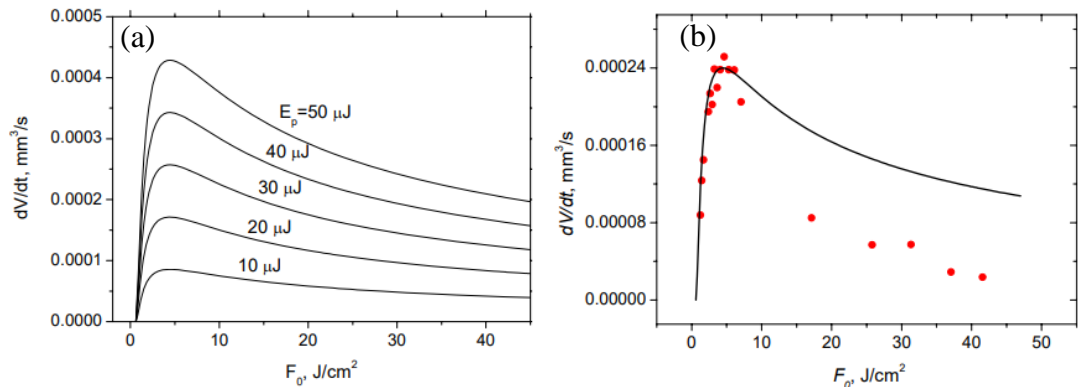
$$V = \ln \left(\frac{F_0}{F_{th}} \right) \frac{\pi d_0 a^2}{2}. \quad (18)$$

Taigi egzistuoja maksimalus išabliuojamos medžiagos tūris per laiką dV/dt (t. y. abliacijos sparta, žr. 6a pav.), kuris priklauso nuo impulso energijos E_p , impulsų persiklojimo Δx (priklauso nuo impulsų pasikartojimo dažnio R_{rep} ir skenavimo greičio v), pluošto radiuso w ir slenkstinio energijos tankio F_{th} [28, 29]:

$$\frac{dV}{dt} = R_{rep} \frac{d_0 \pi}{6} \ln \left(\frac{F_0}{F_{th}} \right) \left(3a^2 \ln \left(\frac{F_0}{F_{th}} \right) - \Delta x^2 \right) = R_{rep} \frac{d_0 \pi}{6} \ln \left(\frac{F_0}{F_{th}} \right) \left(3 \frac{w_0}{2} \ln \left(\frac{F_0}{F_{th}} \right) - \frac{v^2}{R_{rep}^2} \right), \quad (19)$$

čia w_0 – pluošto radiusas $\frac{1}{e^2}$ aukštyje, o F_0 – tiesiogiai priklauso nuo impulso energijos:

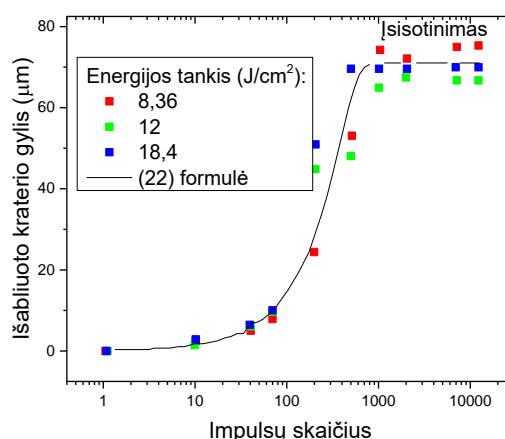
$$F_0 = \frac{2E_p}{\pi w_0^2} \quad (20)$$



6 Pav. (a) Apskaičiuota medžiagos abliacijos spartos priklausomybės nuo energijos tankio, esant pastovioms impulso energijoms [29]. (b) Nerūdijančio plieno abliacijos spartos priklausomybė nuo energijos tankio [29]. Abiem atvejais energijos tankis buvo keistas išfokusuojant pluoštą.

Šis modelis buvo patikrintas abliuojant kanalus pliene [29]. Esant fiksuotam skenavimo greičiui buvo išabliuoti kanalai ir apskaičiuotos abliacijos spartos, keičiant pluošto dydį, tai yra jį išfokusuojant. Gauti rezultatai gerai sutapo su modeliu esant mažiems energijos tankiams (žr. 6b pav.). Rezultatų neatitikimas esant didesnėms už optimalią energijos tankio vertėms buvo siejamas su išabliuotų dalelių lemiamu lazerio spinduliuotės ekranavimu [30]. Kita vertus, šis modelis neįskaitytų kelių svarbių procesų, kurie turi įtakos medžiagos abliacijai. Neatsižvelgta, kad abliuojamo kanalo gylio gali įsisotinti ties tam tikra verte, nepriklausomai, nuo toliau didinamo skenavimų skaičiaus ar kad slenkstinis energijos tankis mažėja, didėjant lazerio impulsų skaičiui. Šis abliuojamo kanalo gylio įsisotinimas yra siejamas su tuo, kad gilėjant kanalui, dėl lazerio spinduliuotės sklaidos nuo kanalo sienelių, jo dugną pasiekia vis mažesnis energijos tankis. Taip pat, iš gilėjančių kanalų

darosi vis sunkiau pasišalinti abliacijos produktams, kurie gali ekranuoti lazerio spinduliuotę, kas irgi mažina kanalo dugną pasiekiantį energijos tankį [31, 32].



7 Pav. Išabliuotų kraterių gylis priklausomybė nuo lazerio impulsų skaičiaus [33].

Lazerio impulsų inkubacijos ir kanalo gylis įsisotinimo procesai buvo įtraukti į modelį ir aprašyti šaltinyje [33]. Šis modelis įskaitė, kad medžiagos pažeidimo slenkstinis energijos tankis priklauso nuo kritusių į medžiagą impulsų skaičiaus (N):

$$F_{th}(N) = F_{th}(1) \cdot N^{S-1}, \quad (21)$$

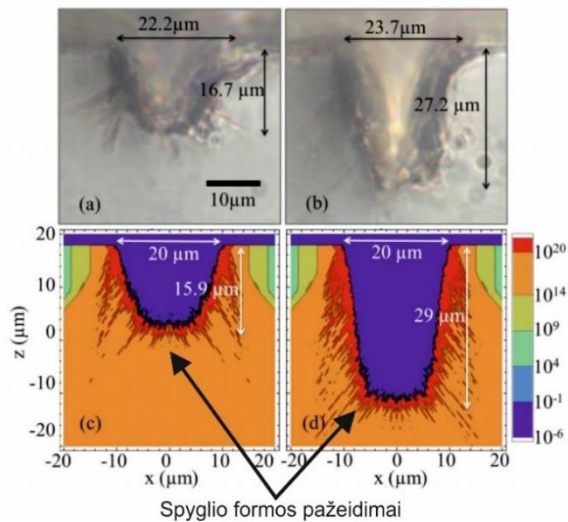
čia S – nuo medžiagos priklausantis inkubacijos parametras. Kaip buvo parodyta (15) formulėje, išabliuotas medžiagos gylis d (vienu impulsu) gali būti susietas su naudojamu energijos tankiu. Kai vyksta N impulsų persiklojimas, išabliuojamos medžiagos gylis irgi tampa priklausomas nuo impulsų skaičiaus ir šis gylis didėja, kol įsisotina. Šį gylis augimą ir įsisotinimą didėjant impulsų skaičiui galima išreikšti šia empirine formule [33]:

$$d(N) = d_0(1) \cdot \ln\left(\frac{F_0}{F_{th}}\right) \cdot \left[N - \Delta N \cdot \ln\left(1 + e^{\frac{N-N_0}{\Delta N}}\right) \right], \quad (22)$$

čia $d_0(1)$ yra vieno impulso efektinis energijos sugerties gylis, N_0 – impulsų skaičius, kada prasideda įsisotinimas (eksponentinis augimas lėtėja, žr. 7 pav.), o ΔN – impulsų skaičius nurodantis, kada sotis nusistovi. Šiam modeliui patikrinti buvo atlikti vario abliacijos eksperimentai, o gauti rezultatai atitiko modelį (žr. 7 pav.) [33].

4. Pažeidimų formavimasis stikle abliacijos metu

Medžiagų apdirbime yra svarbu ne tik proceso sparta, bet ir kokybė. Energijos sugertis stikle gali lemti paviršiaus apskeldėjimą ar trūkių formavimąsi, kas bendrai gali sumažinti stiklo stiprumą. Pažeidimus lemia lazerio spinduliuotės sklaidimas stikle bei energijos kiekis tenkantis medžiagai [34].



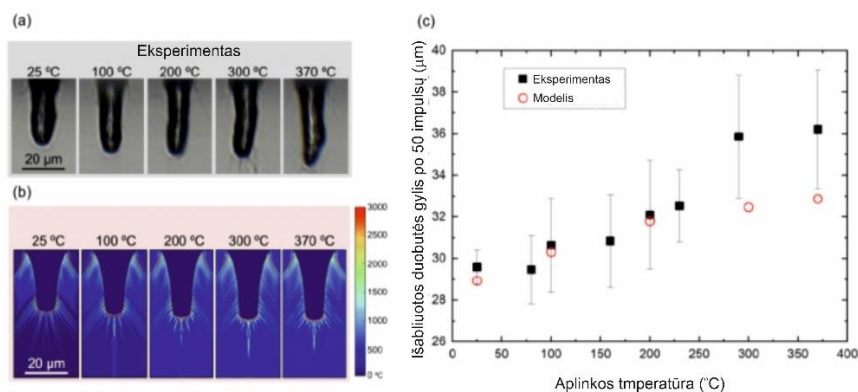
8 pav. Išabliuotų kanalų skerspjūviai ir sugeneruoti pažeidimai gauti eksperimentiškai po 5 impulsų (a) ir 10 impulsų (b) bei gauti modeliuojant 5 impulsų (c) ir 10 impulsų (d) abliaciją. (c) ir (d) nuotraukose raudona spalva pažymėtas pažeidimų regionas, kur laisvųjų elektronų tankis viršijo kritinę vertę [34]. Juodomis rodyklėmis pažymėti spyglio formos pažeidimai.

Šaltinyje [34] buvo išskirti galimi pažeidimo mechanizmai pikosekundiniu lazeriu abliuojant stiklus ir apibrėžta, kad pažeidimas atsiranda ten, kur laisvųjų elektronų tankis viršija tam tikrą slenkstinę vertę. Tyrime buvo nagrinėjami stiklo išgręžtų skylių profiliai ir jie lyginami su atliktu modeliavimu. Autoriai įvardino tris galimus pažeidimus: plonas pažeidimo sluoksnis, spyglių formos pažeidimai po abliacijos zona ir dideli pažeidimai ties kanalo kraštais (žr. 8 pav.). Straipsnio autoriai ploną pažeidimo sluoksnį (raudonai pažymėta sritis 8 pav.) sieja su netiesine lazerio spinduliuotės sugertimi stiklo. Šiame sluoksnyje medžiagos modifikacijos atsiranda, kai laisvieji elektronai perduoda energiją medžiagai. Spyglių formos pažeidimai po plonu sluoksniu (raudonai pažymėta sritis 8 pav.) atsiranda dėl spinduliuotės difrakcijos kanale, o du dideli spyglio formos pažeidimai kanalo kraštuose buvo siejami su spindulių lūžimu ties oro – stiklo sandūra. Šiuo atveju šie pažeidimai yra priežastis dėl ko gali formuotis trūkiniai stiklo ir bendrai sumažėti stiklo stiprumo riba [34].

5. Šiluminės akumuliacijos įtaka abliacijai

Ankščiau aptartame pažeidimų formavimo modelyje [34] galima gana tiksliai nuspėti gręžiamų skylių formą, bet šis modelis neįtraukia stiklo abliacijos efektyvumo priklausomybės nuo impulsų pasikartojimo dažnio. Ši priklausomybė gali būti svarbi dėl šiluminės akumuliacijos medžiagoje ir jos įtakos abliacijai [35]. Tuo tikslu, C. Wei [35], įtraukė šiluminę akumuliaciją į savo modelį ir eksperimentais parodė aplinkos ir impulsų pasikartojimo dažnio įtaką femtosekundiniu lazeriu gręžiant stiklą. Lyginant su prieš tai aptartu modeliu, jie savo modelyje papildė abliacijos

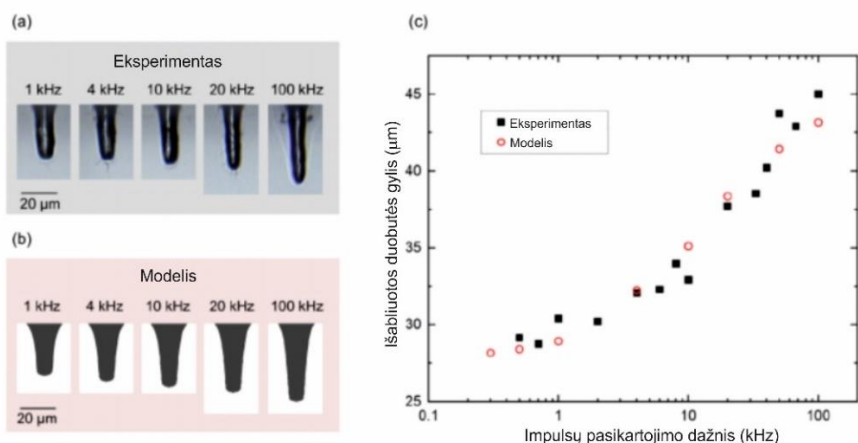
pradžios ribą - abliacija prasideda ne tik ten, kur laisvų elektronų tankis viršija kritinę tankio vertę, bet ir ten kur medžiagos temperatūra viršija virimo vertę.



9 pav. Modelio ir eksperimento rezultatų palyginimas: (a) su 50 impulsų, skirtingomis bandinio temperatūromis, išabliuotos duobutės stikle, (b) modeliuojant gautos duobučių formas ir temperatūros pasiskirstymą stikle po 50 impulsų abliacijos, (c) išabliuotų duobučių gylių priklausomybė nuo aplinkos temperatūros [35].

Atlikus modeliavimą ir eksperimentus jie pademonstravo, kad didėjant aplinkos temperatūrai didėja ir išgręžiamos duobutės gylis (žr. 9a - c pav.). Kaip matyti iš 9 paveikslo, jų modelis gana tiksliai veikia iki 200°C bandinio temperatūros, o toliau didinant temperatūrą, modelio neatitikimus su eksperimentais lėmė abliuojamos duobutės atsitiktinė forma dėl išsilydžiusios medžiagos (žr. 9a, 9b pav.).

Įvertinant šiluminės akumuliacijos įtaką abliacijai ir modelio pajėgumą duobučių formai nuspėti, buvo palyginti modelio ir atliktų eksperimentų rezultatai keičiant impulsų pasikartojimo dažnį. Buvo gauta, kad didėjantis impulsų pasikartojimo dažnis lėmė didėjančią šiluminę akumuliaciją bandinyje, dėl ko buvo išgręžtos didesnio gylio duobutės. Eksperimentų rezultatai sutapo su modeliu (žr. 10 pav.) [35].

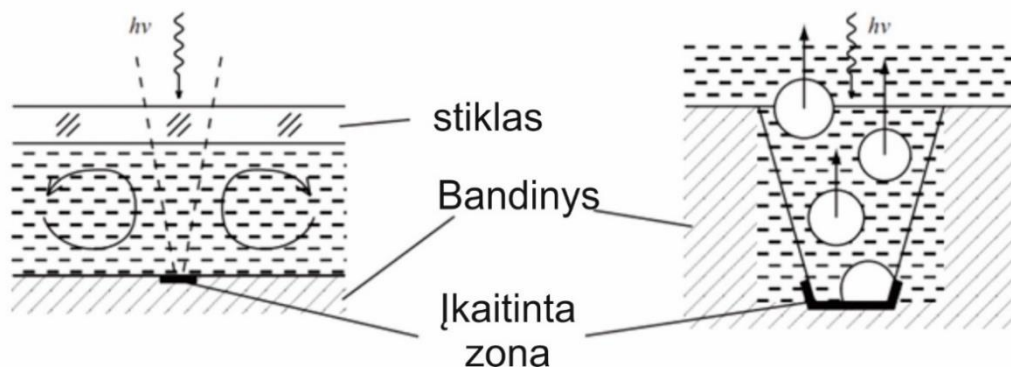


10 pav. Modelio ir eksperimento rezultatų palyginimas: (a) su 50 impulsų, skirtingomis impulsų pasikartojimo dažniais, išabliuotų duobučių formas, (b) modeliuojant gautos duobučių formas stikle po 50 impulsų abliacijos esant skirtingiems impulsų pasikartojimo dažniams ir (c) išabliuotų gylių priklausomybė nuo impulsų pasikartojimo dažnio [35].

6. Vandens įtaka lazeriniam procesui

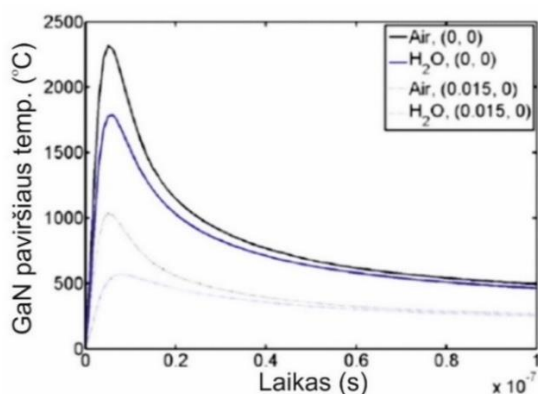
Medžiagų apdirbime retai yra panaudojamas pilnas lazerinės sistemos potencialas, siekiant išlaikyti aukštą pjūvio kokybę ir efektyvumą. Apskritai tai yra lemiamą to, kad pjaunant kanalus, pašalinama medžiaga ir susidariusi plazma ekranuoja lazerinę spinduliuotę, o abliacijos produktai dar gali būti perlydomi atgal ant kanalo sienelių [36]. Tuo pačiu, dėl šiluminės akumuliacijos atsiranda stiklo pažeidimai, formuojasi trūkiniai, o metaluose šalia pjūvio krašto formuojasi šiluminio poveikio zona [14, 37]. Siekiant spręsti šias problemas ir kartu didinti tiesioginės abliacijos spartą, buvo pastebėta, kad abliuojant stiklą pro vandens sluoksnį buvo gaunama didesnė proceso sparta ir geresnė pjūvio kokybė [32, 37, 38].

Pjovimo spartos padidėjimą lemia keletas veiksnių. Pirmiausia, vanduo efektyviai pašalina abliacijos produktus iš darbinės zonos. Nuolaužų pašalinimui reikia tam tikro vandens judėjimo. Skysčio cirkuliacija gali susidaryti vykstant šiluminei ar burbulų sukeliama konvekcijai (žr. 11 pav.), kuri susiformuoja lazerio spinduliuotės apdirbamoje srityje. Šiluminę konvekciją lemia vandens cirkuliacija dėl vandens temperatūros skirtumo ties poveikio zona ir toliau nuo jos, o burbulų konvekciją – vandens garų kylimas į paviršių [36].



11 pav. Lazerinės spinduliuotės indukuotas skysčio judėjimas, kuris nuneša abliacijos produktus nuo apdirbamos sritys. Kairėje pavaizduota konvekcija, o dešinėje burbulų judėjimas [36].

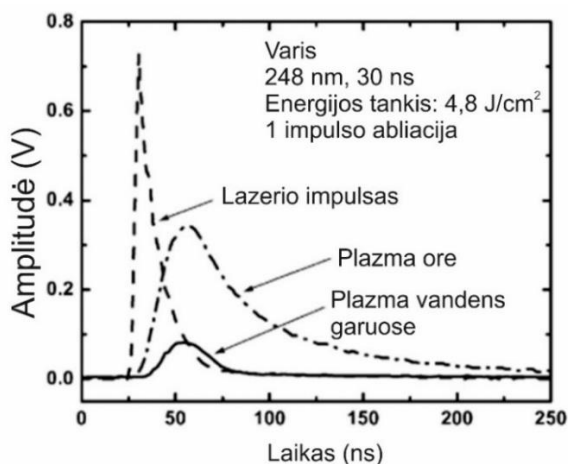
Pjūvio kokybės atžvilgiu, vanduo efektyviau aušina medžiagos paviršių nei dujos (oras) [16]. Tą lemia daugiau nei keturis kartus didesnė vandens savitoji šiluminė talpa (4190 J/kg/K) nei oro (1005 J/kg/K). Taip pat vandens šiluminis laidumas ($0,6 \text{ W/m/K}$) yra didesnis nei oro ($0,024 \text{ W/m/K}$), kuris leidžia greičiau nuvesti šilumą nuo bandinio. Tokiu būdu apdirbama detalė mažiau kaista ir medžiagoje mažėja šiluminiai įtempiai [32, 39]. Vandens sluoksnio įtaka buvo parodyta atliktame temperatūros pasiskirstymo modeliavime, kuriame buvo abliuojama GaN danga nuo safyro padėklo [16]. Buvo pademonstruota, kad po lazerinio impulso šūvio, fiksuojama maksimali bandinio temperatūra (abliuojant pro vandens sluoksnį) buvo apie 500 laipsnių mažesnė (žr. 12 pav.).



12 pav. Temperatūros pasiskirstymo GaN paviršiuje modeliavimas dvejose pozicijose: (0, 0) mm koordinatės atitinka lazerinio impulso ir medžiagos sąveikos centrą, o (0,015, 0) mm – 15 μm nuo jo. Modeliuota imant, kad po lazerio impulso šūvio praėjo 100 ns [16].

6.1. Plazmos susidarymas

Spinduliuotės sugerties medžiagoje metu po kelių pikosekundžių nuo sąveikos pradžios pradeda formuotis plazma [26]. Plazma susidaro didėjant temperatūrai ir medžiagos garų jonizacijos laipsniui [26]. Jeigu lazerio impulsas ilgesnis nei laikas per kurį susidaro plazma, tai dalis impulso bus ekranuojama, tai yra jo energija bus sugeriama plazmoje. Sugerdama lazerinę spinduliuotę plazma kaista ir plečiasi. Pagrindiniai veiksniai, kurie nusako plazmos ekranavimą yra plazmos dydis, gyvavimo trukmė ir susidarymo laikas [17].



13 pav. Lazerio impulso ir sugeneruotos plazmos optiniai signalai abliuojant varį ore ir pro vandens garus [17].

M. H. Hong [17] atliko vario abliavimo ore ir pro vandens garus tyrimą. Eksperimento metu susidariusi plazma fiksuota fotoelementu, o elektrinis signalas registruotas oscilografu. Buvo gauta, kad abliuojant vario plokštelę pro vandens garus, susidarė daugiau negu du kartus mažesnis plazmos intensyvumas, kuris buvo registruojamas trumpesnį laiko tarpą ir susidarė 5 ns vėliau lyginant su signalu gautu abliuojant varį ore (žr. 13 pav.). Kitas svarbus rezultatas – susidariusi plazma yra

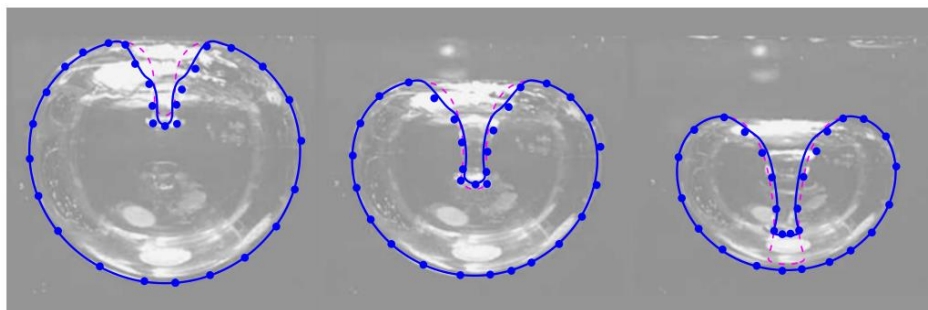
didesnio tankio ir jos sukiamas slėgis (bandinio paviršiumi) yra iki 8,4 kartų didesnis, tai yra susidaro stipresnė smūginė banga, kuri padeda pašalinti abliacijos produktus iš apdirbimo srities [16, 17, 40].

6.2. Kavitacijos burbulai

Susiformavus plazmai vandenyje, dėl didelės jos temperatūros, aplink ją pradeda garuoti vanduo. Kaistant plazmai didėja jos slėgis ir ji sparčiai plečiasi. Po sąveikos su lazerio spinduliuote ji vėsta ir pradeda trauktis, o jos vietą užima kavitacijos burbulas, užpildytas vandens ir abliuojamos medžiagos garais.

Medžiagos abliacijai įtakos turi burbulo suyrimo metu susidarančios vandens mikročiurkšlės, kurios yra nukreiptos statmenai į medžiagos paviršių [41]. Šios čiurkšlės turi tam tikrą judesio kiekį ir sąveikos su paviršiumi metu gali padėti pašalinti abliacijos produktus iš pjaunamo kanalo [38]. Eksperimentiškai buvo nustatyta, kad čiurkšlės greitis ties apatiniu burbulo paviršiumi (žr. 14 pav.) gali siekti 900 m/s [41].

Čiurkšlės formuojasi nuo viršutinio burbulo paviršiaus ir perskrodžia apatinį burbulo paviršių iki abliuojamos medžiagos paviršiaus (žr. 14 pav.). Vandens mikročiurkšlės susidaro dėl burbulo asferinio kolapsavimo, o sferinis burbulas yra deformuojamas dėl anizotropinio aplinkinio slėgio [41]. Tai gali būti gravitacijos nulemtas hidrostatinio slėgio gradientas ar slėgių skirtumai, atsirandantys dėl šalia esančių burbulų inicijuotos suirimų grandinės.

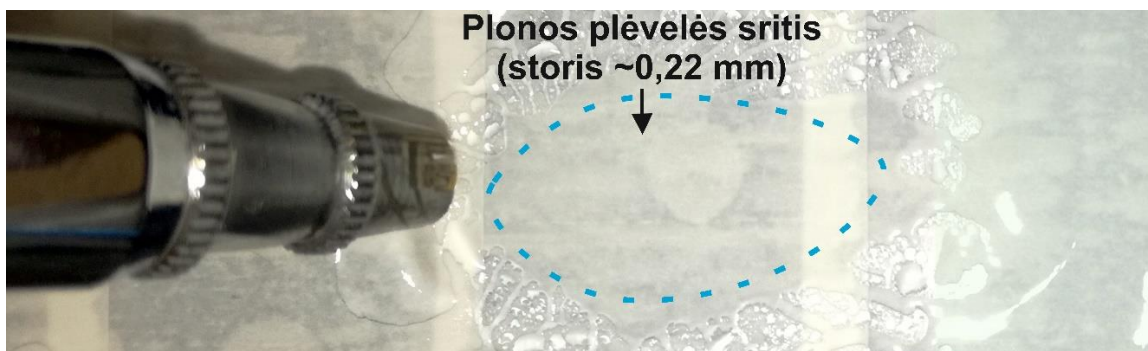


14 Pav. Kavitacijos burbulo suirimas ir vandens čiurkšlės formavimasis. Mėlyni taškai vaizduoja skaitmeninį modelį, kuris atitinka vandens čiurkšlės formavimąsi [41].

7. Eksperimentinė įranga

Eksperimentų metu buvo naudoti pikosekundiniai diodais kaupinami kietakūniai Nd:YVO₄ Atlantic UV ir Atlantic 60 W lazeriai (gamintojas UAB Ekspla). Atlantic 60 W lazeris buvo naudotas eksperimentams su 1064 nm bangos ilgio spinduliuote, o Atlantic UV eksperimentams su 355 nm bangos ilgio spinduliuote. Lazerio pluoštas buvo pozicijuotas galvanometriniiais skeneriais IntelliSCAN 14 (1064 nm bangos ilgiui) ir IntelliSCAN_{de}14 (355 nm bangos ilgiui) x ir y kryptimis, o pozicionavimui z kryptimi buvo naudojama linijinė poslinkio sistema Aerotech. Lazerio galia

matuota Nova II Ophir matuokliu. Eksperimentai atlikti su 0,41 ir 0,55 mm storio borosilikatiniais (d263m), 1 mm storio silikatiniais stiklais bei 5 mm storio nerūdijančiu plienu (EN 1,4301), ore ir pro vandens sluoksnį. Distiliuoto vandens sluoksnis buvo sudaromas purškiant vandens miglą aerografu (į aerografą buvo tiekiamas 3 atmosferų slėgio oro srautas). Ant bandinio susidariusios plonos vandens plėvelės storis buvo ~220 μm (išmatuotas pasitelkus šviesos lūžio dėsnį), o jos ilgis ir plotis atitinkamai 10 ir 5 mm (eksperimentai buvo atliekami šioje plonoje plėvelės zonoje, žr. 15 pav.). Visų eksperimentų metu, aerografo padėtis pjaunamo kanalo atžvilgiu buvo pastovi. Jis buvo nukreiptas 45 laipsnių kampų bandinio atžvilgiu ir apytiksliai centimetro atstumu virš jo.



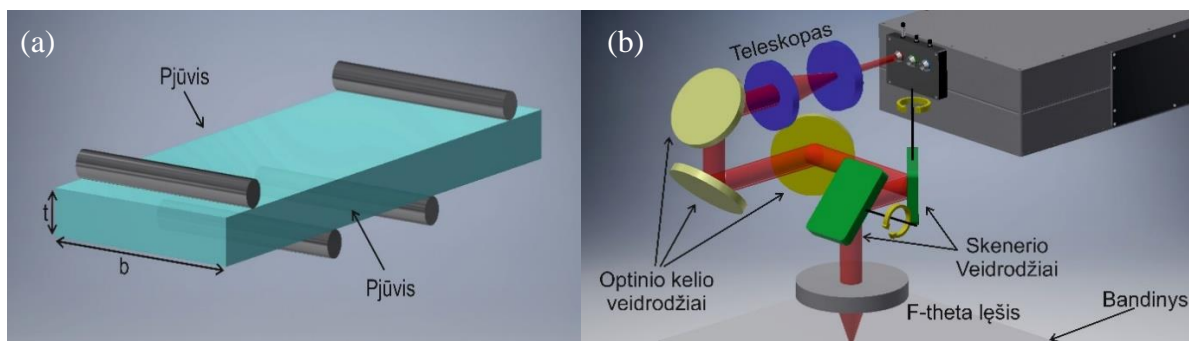
15 Pav. Aerografu suformuota tekanti plona vandens plėvelė.

1 Lentelė. Lazerinių sistemų parametrai.

Lazeris	Atlantic 60	Atlantic UV
Bangos ilgis	1064 nm	355 nm
Impulsų trukmė	13 ps	7 ps
Impulsų pasikartojimo dažnis	400 – 1000 kHz	400 – 1000 kHz
Maksimali lazerio galia	40 W (ties 400 kHz)	23,3 W (ties 400 kHz)
Pluošto pozicionavimas x ir y kryptimis	IntelliSCAN 14	IntelliSCAN _{de} 14
Bandinio pozicionavimas z kryptimi	Aerotech	Aerotech
Pluošto radiusas sąsmaukoje	16,5 μm (vandenyje); 13,5 μm (ore)	15 μm (vandenyje); 11 μm (ore)
Objektyvas	+100 mm	+100 mm
Aerografo darbinis slėgis	3 atmosferos	3 atmosferos

Lazeris ir pluošto pozicionavimo sistemos buvo valdomi kompiuteriu (DMC programiniu paketu). Išpjautų kanalų profiliai ir patys kanalai tirti optiniu mikroskopu BX51 (Olimpus). Abliacijos produktai nagrinėti skenuojančiu elektronų mikroskopu (SEM) JSM6490LV (JEOL). Kanalų sienelių

šurkštumai įvertinti adatinio profilometru Dektak 150 (Veeco) ir optiniu profilometru Sensofar Metrology. Galiausiai, išpjauti stiklo bandiniai buvo laužomi 4 taškų lenkimo sistemoje (žr. 16a pav.). Jėga reikalinga sulaužyti bandiniui matuota su skaitmeniniu dinamometru FMI-S30A5 (iš Alluris). Naudota optinė schema pavaizduota 16b paveiksle, o sistemos duomenys pateikti pirmoje lentelėje:



16 pav. Keturių taškų lenkimo sistemos schema (a) [42] ir lazerinės sistemos schema (b).

8. Eksperimentų metodika

8.1. Pluošto radiusas sąsmaukoje

Siekiant rasti naudojamo pluošto dėmės dydį sąsmaukoje, buvo atliktas eksperimentas remiantis J. M. Liu aprašyta metodika [43]. Pluošto fokuso plokštumoje buvo įstatytas chromu dengtas stiklas taip, kad pluošto fokusas būtų ties viršutiniu stiklo paviršiumi. Keičiant lazerinio impulso energiją, vienu lazerinio impulso šūviu, buvo išabliuojami krateriai stikle. Impulsų energijos E_p buvo randamos matuojant lazerio galią P :

$$E_p = \frac{P}{\nu}, \quad (23)$$

čia ν – lazerio impulsų pasikartojimo dažnis. Impulso energija buvo mažinama tol, kol nebebūdavo suformuojami krateriai, tai yra kol spinduliuotės energijos tankis tampa mažesnis už slenkstinį energijos tankį F_{th} . Slenkstinis energijos tankis, tai yra minimalus tankis, kurio reikia pažeisti medžiagą. Suformavus bandinyje kraterių matricą, jų diametrai D išmatuoti optiniu mikroskopu. Atidėjus kraterių diametrų kvadrato priklausomybę nuo impulsų energijos natūrinio logaritmo ($D^2(\ln(E_p))$) ir ją aproksimavus tiese, iš tiesės polinkio kampo φ galime surasti pluošto radiusą ω [44]:

$$\text{tg}(\varphi) = 2\omega_0^2. \quad (24)$$

8.2. Abliacijos efektyvumas ir pjovimo sparta

Tirtų medžiagų abliacijos eksperimentai buvo atliekami pjaunant 3 mm ilgio ir iki 500 μm gylio kanalus. Vagos buvo formuojamos lazerio pluoštą skenuojant gretimomis lygiagrečiomis

linijomis. Tai buvo atliekama tam, kad siekiant pjauti storesnes medžiagas yra svarbus abliuojamo kanalo gylio ir pločio santykis. Didėjant šiam santykiui mažėja lazerinės spinduliuotės energijos tankis pasiekiantis formuojamo kanalo dugną, tai yra energijos tankis gali būti mažesnis negu reikia stiklui abliuoti. Energijos nuostoliai, lazerio spinduliuotei skverbiantis gilyn į kanalą, atsiranda dėl lazerinės spinduliuotės atspindžių nuo kanalo sienelių, spinduliuotės ekranavimo plazma ir abliacijos produktais [31, 32]. Taigi, abliuojamo kanalo gylis gali įsisotinti, o medžiaga nebus prapjauta. Tam, kad to išvengti, kanalai buvo platinami.

Stiklas su išpjautais kanalais buvo perlaužiamas, o kanalų profilių plotas S matuojamas optiniu mikroskopu. Tuo tarpu, metale išabliuoto kanalo profilio plotas buvo išmatuojamas optiniu profilometru. Turint skerspjūvio plotą ir kanalo ilgį, buvo randamas pašalintos medžiagos tūris V [mm^3] ir apskaičiuojamas abliacijos efektyvumas η [$\mu\text{m}^3/\mu\text{J}$]:

$$\eta = \frac{V}{P \cdot t}, \quad (25)$$

čia t – kanalui išpjauti reikalingas laikas [s], o P – vidutinė lazerio galia [W]. Pjovimo sparta įvertinta padalijus pluošto skenavimo greitį iš skenavimų skaičiaus. Eksperimentų metu pjaunant kanalus ore ir pro vandens sluoksnį buvo optimizuojami tokie parametrai, siekiant gauti didžiausią abliacijos efektyvumą: pjaunamos vagos plotis, tarpas tarp gretimų skenuojamų linijų, fokuso padėtis, spinduliuotės energijos tankis, impulsų pasikartojimo dažnis ir skenavimo greitis.

8.3. Stiklų lūžimo riba

Stikle atlikto pjūvio kokybė gali būti įvertinama matuojant pjūvio kraštų apskeldėjimo dydį, sienelių šiurkštumą ir matuojant jėgą, reikalingą sulaužyti stiklą. Stiklo atsparumą laužimui lemia paviršiniai pažeidimai (įrėžimai, pjūvio krašto apskeldėjimai), tūriniai defektai (trūkliai, priemaišos). Idealaus stiklo, be pažeidimų ir be priemaišų atsparumas prilygsta metalams ir teoriškai yra didesnis nei 20 GPa, tačiau realiai po stiklo gamybos proceso jo atsparumas yra mažesnis nei 1 GPa [45].

Stiklo atsparumas lenkimui gali būti matuojamas 4 taškų lenkimo sistema (žr. 16a pav.). Šiam eksperimentui bandiniai buvo išpjunami iš 410 μm ir 1 mm storio stiklų. Siekiant įvertinti tik pjūvio įtaką stiklo atsparumui, pjūviai buvo atlikti iš abiejų bandinio pusių taip, kad jis patektų į laužimo zoną (žr. 16a pav. laužimo zona yra bandinio centre tarp cilindrinų laikiklių). Laužimo metu vidiniai laikikliai juda link stacionarių išorinių laikiklių ir lenkia bandinį. Procesu metu lenkimo jėga F yra matuojama dinamometru ir fiksuojama vertė, kuriai esant stiklas sudūžta.

Iš gautų jėgos verčių buvo apskaičiuojamas stiklą veikiantis įtempis σ [MPa] [42]:

$$\sigma = \frac{3F(L-l)}{2bt^2}, \quad (26)$$

čia $L=16$ mm (30 mm, 1 mm storio stiklo bandiniams) yra atstumas tarp išorinių laikiklių ir $l=7$ mm (16 mm, 1 mm storio stiklo bandiniams) yra atstumas tarp vidinių laikiklių, b – bandinio plotis, o t – bandinio storis. Įvertinti duomenų išsibarstymą, įtempio rezultatai buvo išdėstyti didėjančią tvarka nuo $i=1$ iki K (bandinių skaičiaus). Galiausiai, kiekvienam (išmatuotam) bandinį veikiančiam įtempimui buvo apskaičiuota lūžimo tikimybė G [46]:

$$G_i = \frac{(i-0,5)}{K}. \quad (27)$$

Gauti laužymo eksperimentų duomenys analizuoti apskaičiavus Veibulio pasiskirstymo m (formas) ir σ_0 (skalės) parametrus [42]. Parametras m nurodo duomenų išsibarstymą (kuo didesnis, tuo duomenys mažiau išsibarstę), o σ_0 parametras nurodo labiausiai tikėtiną įtempį, ties kuriuo statistiškai lūš 63 % bandinių [42]. Veibulio pasiskirstymas gali būti išreikštas taip:

$$P(\sigma, \sigma_0, m) = 1 - e^{-\left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^m}. \quad (28)$$

Galime (28) priklausomybę iš abiejų pusių paveikti dvigubu natūriniu logaritmu ir gauti:

$$\ln(-\ln(1 - P)) = m \ln(\sigma) - m \ln(\sigma_0). \quad (29)$$

Taigi, siekiant apskaičiuoti Veibulio parametrus, reikia atidėti $\ln(-\ln(1-P))$ priklausomybę nuo eksperimentiškai gautų $\ln(\sigma)$ verčių ir ją aproksimuoti tiese. Tiesės polinkis bus lygus m parametru, o σ_0 parametras bus gaunamas ekstrapoliavus aproksimuotą tiesę į $\ln(-\ln(1-P))=0$ tašką [42].

9. Eksperimentų rezultatai

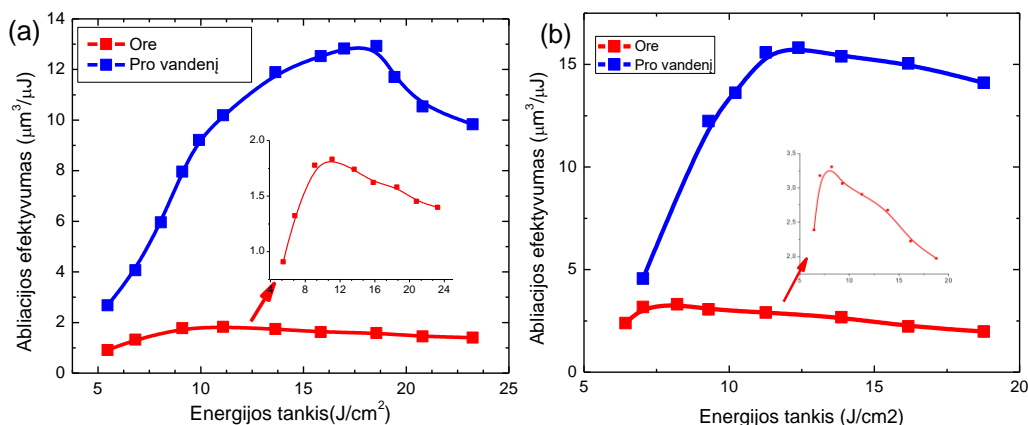
9.1. Vandens sluoksnio įtaka abliacijos efektyvumui

9.1.1. Stiklo abliacija

Pirmiausia, eksperimentų metu buvo abliuojamas 0,55 mm storio borosilikatinis ir 1 mm storio silikatinis stiklai su 1064 nm bangos ilgio spinduliuote. Buvo abliuojami 3 mm ilgio, 0,23 mm pločio, 420 μm gylio kanalai. Buvo pasirinktas 100 kHz impulsų pasikartojimo dažnis, nes naudojant 400 kHz dažnį ir abliuojant ore, plonesnis stiklas dūždavo dėl šiluminės akumuliacijos. Taip buvo dėl to, kad abliuojant ore stiklas labiau kaito, susidarė stikle įtempiai ir jis suduždavo [38]. Todėl, apribojus spinduliuotės pasikartojimo dažnį iki 100 kHz, maksimali lazerio vidutinė galia buvo sumažinta iki 12 W, kas leido stiklą ore abliuoti su 23,5 J/cm² energijos tankiu. Galiausiai, stiklai buvo abliuoti su skirtingais energijos tankiais ir rasti jų abliacijos efektyvumai (žr. 17 pav.). Taigi buvo gauta, kad abliuojant borosilikatinį stiklą ore, optimalus energijos tankis buvo 11 J/cm², atitinkantis, $\sim 2 \mu\text{m}^3/\mu\text{J}$ efektyvumą. Stiklo abliacija pro vandens sluoksnį lėmė, kad efektyvumas buvo didesnis, tai yra siekė $\sim 13 \mu\text{m}^3/\mu\text{J}$. Šis efektyvumas buvo pasiektas ties 18,5 J/cm² energijos tankiu (žr. 17a pav.).

Panašios tendencijos buvo stebimos abliuojant silikatinį stiklą. Ore optimalus energijos tankis buvo $8,3 \text{ J/cm}^2$, atitinkantis, $3,3 \text{ } \mu\text{m}^3/\mu\text{J}$ efektyvumą. Abliuojant silikatinį stiklą pro vandens sluoksnį, efektyvumas buvo iki 4,8 karto didesnis ir siekė $15,8 \text{ } \mu\text{m}^3/\mu\text{J}$ ties $12,3 \text{ J/cm}^2$ energijos tankiu (žr. 17b pav.).

Gautose abliacijos efektyvumo priklausomybėse nuo energijos tankio matome efektyvumo mažėjimą, didėjant energijos tankiui nuo optimalios vertės. Šią tendenciją galima sieti su spinduliuotės ekranavimu plazma ir abliacijos produktais. Didėjant energijos tankiui yra sugeneruojama daugiau abliacijos produktų, o plazma gali sugerti daugiau energijos. Taigi efektyviausią energijos tankį lemia tai, kad toliau didinant lazerio galią, jos energija nebėra išnaudojama abliacijai, o būna ekranuojama [30]. Kitu atveju, abliuojant stiklą pro vandens sluoksnį plazma susidaro kelis kartus mažesnė, o jos gyvavimo trukmė būna apie keturis kartus trumpesnė nei abliuojant ore [17]. Taip pat, vanduo efektyviai pašalina ir abliacijos produktus iš poveikio zonos [36], tai didesnė lazerio spinduliuotės dalis gali būti panaudota stiklo apdirbimui.

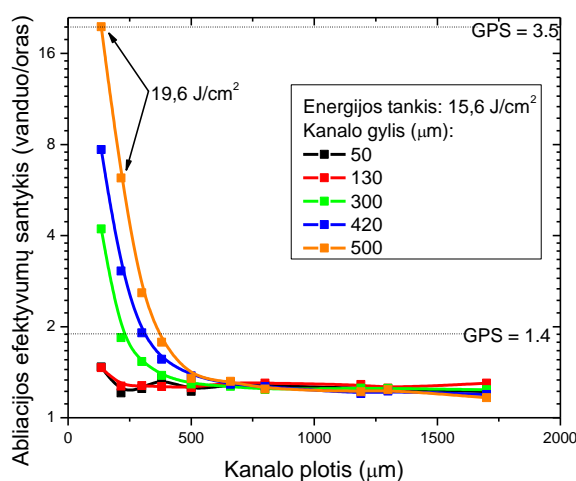


17 Pav. Abliacijos efektyvumo priklausomybė nuo naudoto energijos tankio. Abliuotas borosilikatinis stiklas (a) ir silikatinis stiklas (b), esant 100 kHz impulsų pasikartojimo dažnio spinduliuotei. Abliuoto kanalo plotis buvo $230 \text{ } \mu\text{m}$. Pluošto skenavimo greitis - 2 m/s .

Siekiant detaliau įvertinti vandens įtaką abliacijos efektyvumui, buvo atlikti eksperimentai abliuojant skirtingo pločio ir gylio kanalus borosilikatiniame stikle. Eksperimentų metu buvo išlaikyti pastovūs sistemos parametrai. Lazerio pluoštas buvo sufokusuotas ant stiklo paviršiaus, o pluošto skenavimo greitis buvo lygus 500 mm/s . Naudotas 100 kHz impulsų pasikartojimo dažnis. Abliuoti 3 mm ilgio, $0,13 - 1,75 \text{ mm}$ pločio kanalai. Kanalų gylis buvo kontroliuojamas keičiant skenavimų skaičių. Eksperimentai pakartoti po dešimt kartų ir apskaičiuota vidutinė abliacijos efektyvumo vertė skirtingos formos kanalams.

Gauti rezultatai rodo (žr. 18 pav.), kad abliacijos efektyvumas priklauso nuo kanalo gylio ir pločio santykio (toliau bus žymimas trumpiniu GPS). Matome, kad kanalo pločiui esant didesniai nei $500 \text{ } \mu\text{m}$, stiklo pjovimas pro vandens sluoksnį buvo bent 1,2 karto efektyvesnis. Tai atitiko nuo 0,02 iki 1 GPS santykius. Kai GPS buvo lygus 1,4, pjauti pro vandens sluoksnį buvo apie $(1,9 \pm 0,05)$

kartus efektyviau. Toliau didėjant GPS sparčiai ėmė didėti abliacijos efektyvumų santykis. Esant 0,13 mm pločio ir 0,5 mm gylio kanalui, abliacijos efektyvumas vandenyje tapo 19 kartų didesnis, lyginant su abliacija ore (GPS lygus 3,5). Iš grafiko matome, kad efektyvumų santykis ir toliau turėtų didėti, toliau siaurinant pjaunamą kanalą (žr. 18 pav.). Šie rezultatai gali būti aiškinami tuo, kad išabliuotų kanalų sienelės vandenyje yra statesnės nei ore. Dėl šios priežasties lazerio pluoštas sąveikauja su plokštesniu kanalo dugno paviršiumi, kas leidžia išlaikyti didesnę spinduliuotės energijos tankį kanalo dugne, o tuo pačiu palaikyti spartesnę abliaciją. Buvo gauta, kad vandenyje išabliuotų kanalų sienelės buvo 1.8 ± 0.2 , 1.6 ± 0.2 , ir 1.40 ± 0.19 karto statesnės atitinkamai 420, 300 ir 130 μm gylio kanalams išabliuotiems ore (vidutiniškai sienelės polinkis buvo $8,6 \pm 1,5$ laipsniai vandenyje ir $13,2 \pm 1,5$ laipsniai ore). Papildomai, didesnę spartą lėmė efektyvesnis abliacijos produktų pašalinimas ir mažesnė susiformavusi plazma.



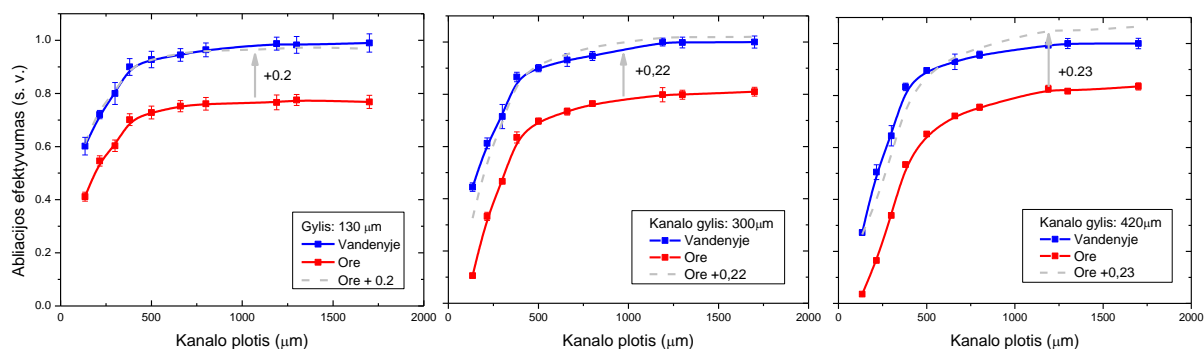
18 Pav. Abliacijos efektyvumų santykio abliuojant borosilikatinę stiklą pro vandens sluoksnį ir abliuojant ore priklausomybė nuo kanalo pločio ir gylio. Siekiant išpjauti 130 ir 200 μm pločio kanalus iki 500 μm gylio, teko padidinti energijos tankį nuo 15,6 iki 19,6 J/cm^2 . Pjaunant mažesniu energijos tankiu, kanalų gylis įsisotindavo nepasiekus 500 μm vertės.

Analizuojant rezultatus buvo pastebėta, kad vandens sluoksnio įtaka stiklo abliacijos efektyvumui buvo pastovi ir nepriklausė nuo skersinių abliuojamo kanalo matmenų. (žr. 19 pav.). Paveiksle pavaizduotos abliacijos efektyvumų kreivės vandenyje ir ore atidėtos nuo kanalo pločio, esant trimis kanalo gyliams: 130, 300 ir 420 μm . Grafikuose y ašys yra normuotos ir pateiktos santykiniais vienetais. Iš rezultatų matyti, kad efektyvumų skirtumas tarp abliacijos ore ir vandenyje (efektyvumo poslinkis) buvo išlaikytas pastovus, nepriklausantis nuo kanalo gylio ar pločio (ištiriams kanalų pločiams ir gyliams). Apskaičiavus efektyvumo poslinkius skirtingiems kanalo gyliams buvo gauta vidutinė poslinkio vertė lygi $0,21 \pm 0,01$. Išliekantis pastovus poslinkis įvairiems GPS gali būti aiškinamas tuo, kad tiek mažuose GPS, kai kanalas yra negilus ir (ar) platus, tiek esant dideliems GPS, yra daugiau medžiagos pašalinama iš pjaunamo kanalo dugno dėl vandenyje susidarantių stipresnių smūginių bangų. Visa tai lemia, kad tirtuose kanalų pločiuose ir gyliuose,

išlieka pastovus absoliutinis abliacijos efektyvumo padidėjimas, abliuojant kanalus pro vandens sluoksnį.

Gauti rezultatai rodo, kad galima įvertinti stiklo abliacijos efektyvumą vandenyje $\eta_{vandenysje}$, žinant abliacijos efektyvumo vertę ore η_{ore} bei minėtą efektyvumo poslinkį Δ :

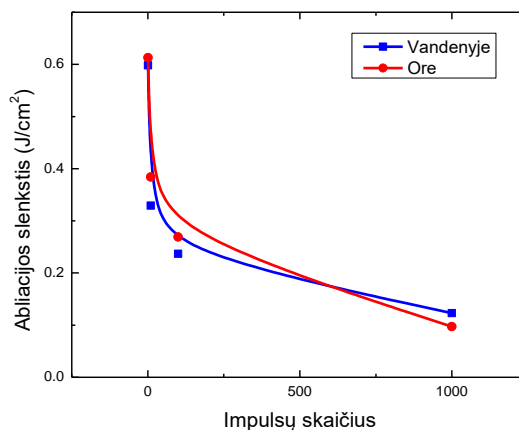
$$\eta_{vandenysje} = \frac{\Delta + \eta_{ore}}{\eta_{ore}} \quad (31)$$



19 Pav. Borosilikatinio stiklo abliacijos efektyvumo priklausomybė nuo kanalo pločio ir esant skirtingam kanalo gyliui. Mėlyni duomenys – rezultatai pjaunant pro vandens sluoksnį, o raudoni - pjaunant ore. Pilki duomenys yra rezultatai gauti ore, tik pastumti per vidutinę efektyvumo poslinkio vertę apskaičiuotą kiekvienam kanalo gyliui atskirai.

9.1.2. Metalo abliacija

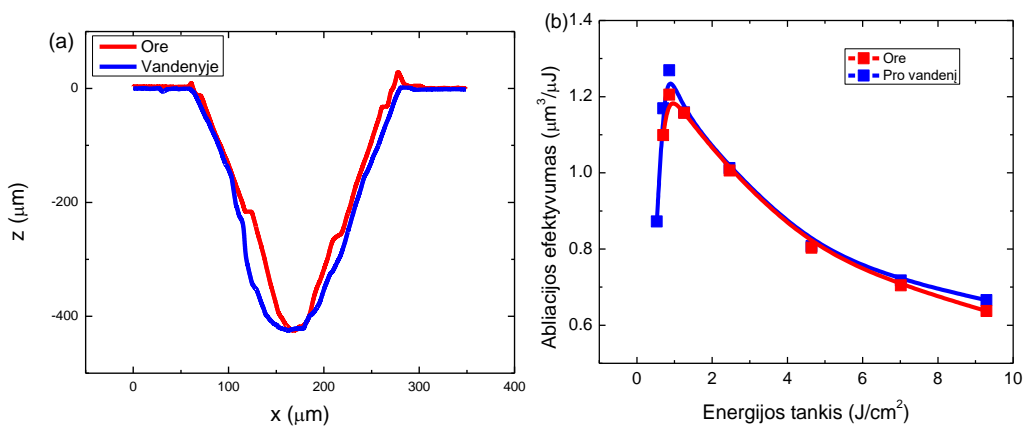
Siekiant įvertinti vandens įtaką abliuojant kitas medžiagas buvo pasirinktas nerūdijantis plienas (EN 1,4301). Pirmiausia, remiantis J. M. Liu aprašyta metodika (žr. 8.1 skyrių) buvo formuojami krateriai stiklo paviršiuje su skirtingomis impulsų energijomis (skirtingais energijos tankiais). Buvo atidedama suformuoto kraterio diametro kvadrato D^2 priklausomybė nuo naudoto energijos tankio F ($D^2(\ln(F))$). Gauta priklausomybė buvo aproksimuojama tiese ir ekstrapoliavus ją į $D^2=0$, buvo randama stiklo pažeidimo slenkstinė energijos tankio vertė F_{th} . Krateriai formuoti su 1, 10, 100 ir 1000 impulsų (žr. 20 pav.).



20 Pav. Plieno abliacijos slenkščio priklausomybė nuo impulsų skaičiaus. Krateriai formuoti nerūdijančio plieno paviršiuje.

Gauta, kad metalo abliacijos slenksčiai tiek ore, tiek vandenyje yra panašūs. Su vienu lazeriniu impulsu gauti slenkstiniai energijos tankiai ore ir vandenyje buvo apytiksliai lygūs $0,60 \text{ J/cm}^2$. Toliau didėjant impulsų skaičiui, dėl impulsų inkubacijos efekto (žr. 3 skyrių ir (21) formulę), abliacijos slenkstis mažėjo iki $0,10$ (ore) ir $0,12 \text{ J/cm}^2$ (vandenyje).

Toliau buvo atskirai tiek ore, tiek vandenyje optimizuojami sistemos parametrai efektyviai plieno abliacijai. Buvo atliktas efektyvaus energijos tankio radimo eksperimentas (kaip ir su stiklais), formuojant 3 mm ilgio, $0,23 \text{ mm}$ pločio ir $420 \mu\text{m}$ gylio kanalus. Gauta, kad abliuojant plieną pro vandens sluoksnį, procesas truko ilgiau – reikėjo daugiau skenavimų norint pasiekti $420 \mu\text{m}$ gylį. Tai galima aiškinti tuo, kad vanduo, proceso metu, ženkliau atšildo plieną ir mažiau jo buvo pašalinama lydalo forma. Taip pat, plienas nėra trapi medžiaga kaip stiklas, o yra plastiškas. Dėl to medžiaga nebuvo pašalinama frakcijomis, kas stiklų abliacijos atveju, ženkliai padidina abliacijos efektyvumą. Kita vertus, abliuojant pro vandens sluoksnį susidarė statesnės pjūvio sienelės (suformuotos pjūvio sienelės – 21° ore ir 17° abliuojant pro vandens sluoksnį, žr. 21a pav.). Statesnės sienelės buvo susietos su stipresnėmis smūginėmis bangomis nukreiptomis į kanalo sienelės, kai medžiaga buvo abliuojama pro vandens sluoksnį. Visa tai lėmė, kad efektyvumas abliuojant pro vandens sluoksnį buvo panašus efektyvumui abliuojant plieną ore. Didžiausias efektyvumas pjaunant pro vandens sluoksnį buvo pasiektas lygus $1,26 \mu\text{m}^3/\mu\text{J}$ ir buvo tik 4 procentais didesnis nei ore ($1,21 \mu\text{m}^3/\mu\text{J}$). Abi vertės gautos ties $0,86 \text{ J/cm}^2$ energijos tankiu (žr. 21b pav.).



21 pav. Metale išabliuotų kanalų profiliai, kai buvo abliuota ore ir pro vandens sluoksnį (a) ir abliacijos efektyvumo priklausomybė nuo naudoto energijos tankio (b). Abliuotas nerūdijantis plienas su 400 kHz impulsų pasikartojimo dažnio spinduliuote. Abliuoto kanalo plotis buvo $230 \mu\text{m}$. Pluošto skenavimo greitis - 750 mm/s .

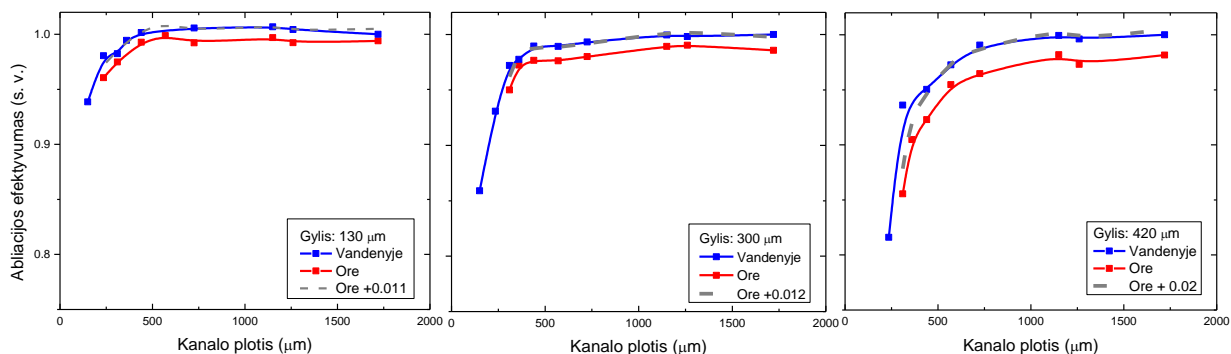
Efektyvumo priklausomybėje nuo energijos tankio, matome, panašias tendencijas kaip ir abliuojant stiklą (žr. 21b pav.). Didėjant energijos tankiui, abliacijos efektyvumas auga iki tam tikros vertės, nes yra pašalinamas vis didesnis plieno tūris (žr. 3 skyrių ir (18) formulę). Toliau didinant energijos tankį, buvo sugeneruojama vis daugiau abliacijos produktų, kurie ekranavo lazerio spinduliuotę ir lėmė efektyvumo kritimą.

Lyginant pjūvio krašto kokybę, buvo padarytos iki 420 μm gylio išpjautų kanalų kraštų optinės nuotraukos (žr. 22 pav.). Pjaunant plieną ore, dėl šiluminio poveikio, šalia pjūvio krašto buvo stebima termiškai paveikta sritis, kurios plotis buvo apie $4,2 \pm 1,5 \mu\text{m}$. Kadangi vanduo efektyviau aušina bandinį, tai ši zona sumažėjo apie 2,4 karto ir buvo iki $1,8 \pm 0,5 \mu\text{m}$ pločio (žr. 22 pav.). Matuojant kanalo dugno šiurkštumą buvo gauta, kad abliuojant plieną pro vandenį ir ore, atitinkamai jis buvo lygus $7,7 \pm 0,6$ ir $5,5 \pm 0,5 \mu\text{m}$. Abliuojant plieną ore, dėl ženklesnio dugno apsilydimo šiurkštumas buvo apie 1,4 karto mažesnis.



22 Pav. Pliene išpjauto kanalo optinės nuotraukos, kai abliuota ore (kairėje) ir pro vandens sluoksnį (dešinėje).

Galiausiai buvo siekiama patikrinti ar borosilikatiniame stikle pastebėti efektyvumų poslinkio dėsningumai, abliuojant skirtingo pločio ir gylio kanalus, egzistuoja ir abliuojant nerūdijantį plieną. Tam buvo optimizuoti sistemos parametrai taip, kad būtų gaunami didžiausi plieno abliacijos efektyvumai tiek abliuojant ore, tiek pro vandens sluoksnį. Abliuojant ore, skenavimo greitis buvo gautas lygus 1500 mm/s, o pro vandenį 1250 mm/s. Abejais atvejais buvo išlaikytas 1 MHz impulsų pasikartojimo dažnis. Gauta, kad abliuojant plieną yra nežymus absoliutinis efektyvumo poslinkis (efektyvumų skirtumas tarp abliacijos ore ir vandenyje) lygus $0,015 \pm 0,0059$ s. v. (žr. 23 pav.), kuris nepriklauso nuo pjūvio geometrijos. Taigi, iš šių rezultatų matome, kad egzistuoja efektyvumų poslinkis abliuojant skirtingas medžiagas (borosilikatinį stiklą ir nerūdijantį plieną) ore ir pro vandens sluoksnį. Gauta, kad visais tirtais atvejais abliacija pro vandens sluoksnį yra efektyvesnė nei ore.



23 Pav. Plieno abliacijos efektyvumo priklausomybė nuo kanalo pločio esant skirtingiems kanalų gyliams. Mėlyni duomenys – rezultatai pjaunant pro vandens sluoksnį, o raudoni - pjaunant ore. Pilkai duomenys yra rezultatai gauti ore tik pastumti per vidutinę efektyvumo poslinkio vertę apskaičiuotą kiekvienam kanalo gyliui atskirai.

9.2. Plonų stiklų pjovimas: borosilikatinis stiklas

Darbe tiriami stiklai buvo padalinti į dvi grupes (ploni ir stori). Ploniems stiklams buvo priskirti tokie stiklai, kurių pjovimo sparta išlieka aukšta, kai pjovimo metu lazerio pluošto fokuso plokštuma yra fiksuota ir nekeičiama pjovimo metu. Storiems stiklams buvo priskirti tokio storio stiklai, kada juos pjaunant, esant fiksuotai lazerio pluošto fokuso pozicijai, efektyvumas krenta ženkliai (keletą kartų ar daugiau), o fokuso padėtį yra būtina keisti pjovimo metu, kad palaikyti aukštą pjovimo spartą. Buvo laikoma, kad plonas stiklas yra tas, kurio storis mažesnis nei 0,41 mm.

9.2.1. 1064 nm bangos ilgis

Kartu be stiklo frezavimo (žr. 10.1.1. skyrių), buvo tiriamas ir stiklų prapjovimas. Ankstesniame tyrime [47] buvo atlikti eksperimentai su 1064 nm bangos ilgio spinduliuote, kai 0,41 mm storio borosilikatinis stiklas buvo pjaunamas ore ir pro vandens sluoksnį [47]. Toliau šie rezultatai bus trumpai aptarti, kad palyginti su eksperimentais gautais naudojant 355 nm bangos ilgio spinduliuotę. Eksperimentų metu buvo optimizuoti sistemos parametrai taip, kad būtų gaunama didžiausia pjovimo sparta. Atliekant optimizavimą buvo svarbu atsižvelgti į tai, kad ore stiklas galėjo būti pjaunamas tik mažesne nei 16 W vidutine galia. Esant didesnėms galioms, dėl šiluminės akumuliacijos, stiklo bandinys sudūždavo.

Atskirai abejiems atvejams buvo optimizuota fokuso padėtis, kuri buvo fiksuota (padėtis nebuvo keičiama pjovimo metu). Taip pat atskirai buvo optimizuoti tokie parametrai kaip impulsų pasikartojimo dažnis, energijos tankis, skenavimo greitis, pjaunamo kanalo plotis bei tarpas tarp gretimų skenuojamų linijų. Surasti optimalūs sistemos parametrai:

- 1) Kai buvo pjauta pro vandens sluoksnį, impulsų pasikartojimo dažnis buvo 520 kHz, energijos tankis lygus $18,5 \text{ J/cm}^2$, pjaunamo kanalo plotis buvo lygus 0,15 mm, skenavimo greitis buvo 2500 mm/s.
- 2) Kai buvo pjauta ore, impulsų pasikartojimo dažnis buvo 520 kHz, energijos tankis lygus 6 J/cm^2 , pjaunamo kanalo plotis buvo lygus 0,2 mm, skenavimo greitis buvo 3500 mm/s.

Naudojant šiuos parametrus buvo gauta, kad pro vandens sluoksnį pjauti stiklą buvo iki 10 kartų sparčiau, tai yra pjaunant pro vandens sluoksnį, pjovimo sparta buvo ~5 mm/s, o ore ~0,5 mm/s.

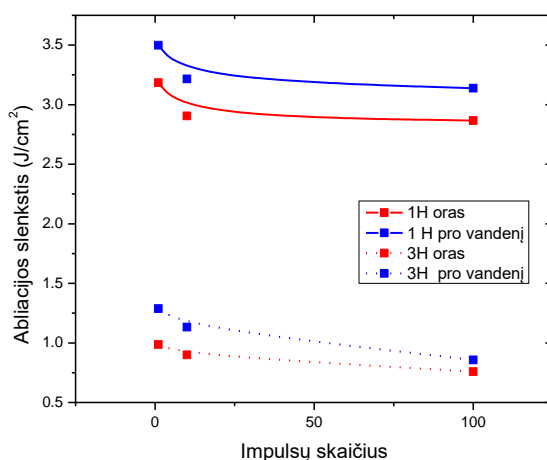
Vertinant pjūvio kokybę buvo matuojamas krašto apskeldėjimo plotis ir pjūvio sienelės šiurkštumas. Šiurkštumas (iki 520 kHz dažnio) tiek ore, tiek vandenyje buvo panašūs ir siekė apie $2 \pm 0,4 \text{ } \mu\text{m}$. Toliau didėjant dažniui, ore pjautų bandinių sienelių šiurkštumai pradėjo didėti.

Apskeldėjimas pjaunant pro vandens sluoksnį buvo mažesnis negu pjaunant stiklą ore. Stiklo apskeldėjimas pjaunant pro vandenį buvo $2,3 \pm 0,8 \text{ } \mu\text{m}$ ir nepriklausė nuo impulsų pasikartojimo

dažnio. Kita vertus, pjaunant stiklą ore apskeldėjimo plotis sumažėjo ~3,2 karto didinant dažnį nuo 400 kHz iki 650 kHz, t. y. ties 400 kHz buvo $7,7 \pm 2,7 \mu\text{m}$, o ties 653 kHz nukrito iki $2,3 \pm 0,78 \mu\text{m}$. Tačiau ėmė formuotis skylimai statmeni išpjautiems kanalams dėl šiluminės akumuliacijos stikle. Esant judančiam vandens sluoksniui perteklinė šiluma buvo nunešama, tai yra buvo efektyviai aušinamas bandinys, kad skylimai jame nesusidarytų.

9.2.2. 355 nm bangos ilgis

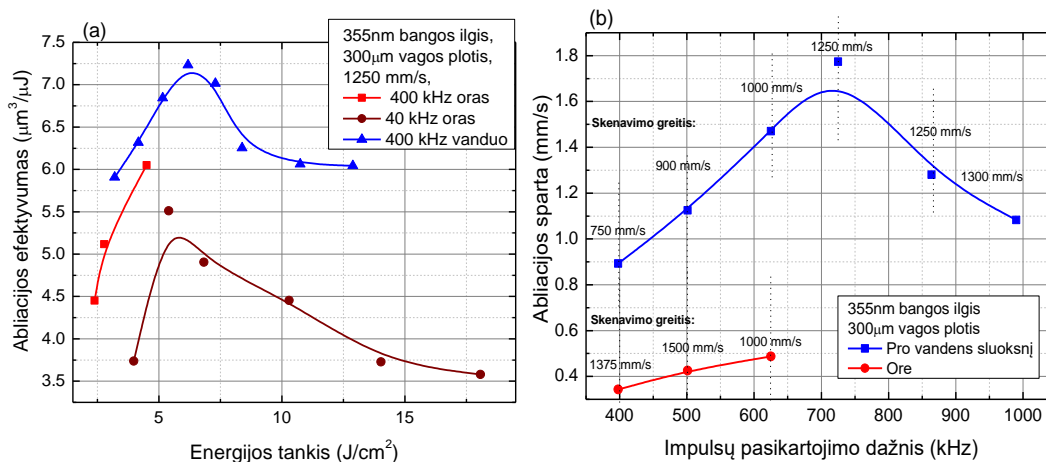
Siekiant įvertinti bangos ilgio įtaką efektyvumui ir pjūvio kokybei buvo atlikti eksperimentai pjaunant borosilikatinį stiklą su 355 nm bangos ilgio spinduliuote. Pirmiausia, buvo palyginti, abejais bangos ilgiais gauti abliacijos slenksčiai su 1, 10 ir 100 lazerio šūvių (žr. 24 pav.). Gauta, kad esant trumpesnio bangos ilgio spinduliuotei, gaunamas apie 3.2 kartus mažesnis slenkstinis energijos tankis (ore ir vandenyje su 1 impulsu atitinkamai lygus 1 ir $1,3 \text{ J/cm}^2$) nei abliuojant ilgesnio bangos ilgio spinduliuote (ore ir vandenyje su 1 impulsu atitinkamai lygus 3,2 ir $3,5 \text{ J/cm}^2$). Slenkstinio energijos tankio sumažėjimą lėmė trigubai didesnė fotono energija ties 355 nm bangos ilgiu. Esant didesnei fotono energijai reikia mažesnio skaičiaus fotonų sugerti, kad elektronas būtų perkeltas iš valentinės juostos į laidumo juostą (didesnė netiesinės sugerties tikimybė).



24 Pav. Borosilikatinio stiklo abliacijos slenkščio priklausomybė nuo impulsų skaičiaus.

Toliau kaip ir esant ilgesniam bangos ilgiui buvo optimizuoti lazerinės sistemos parametrai, pjaunant borosilikatinį stiklą ore ir pro vandens sluoksnį. Buvo optimizuoti energijos tankis, impulsų pasikartojimo dažnis, skenavimo greitis bei fokuso padėtis. Pirmiausia, buvo abliuojami kanalai stikle keičiant energijos tankio vertę. Buvo gauta, kad abliuoti pro vandens sluoksnį, optimalus energijos tankis buvo apie $6,2 \text{ J/cm}^2$ (žr. 25a pav.). Ties šia energijos tankio verte, efektyvumas buvo lygus $\sim 7,25 \mu\text{m}^3/\mu\text{J}$. Tuo tarpu, abliuojant stiklą ore 400 kHz dažnio lazerine spinduliuote, gauti optimalią energijos tankio vertę nepavyko, nes stiklas suduždavo dėl per didelės lazerio vidutinės galios

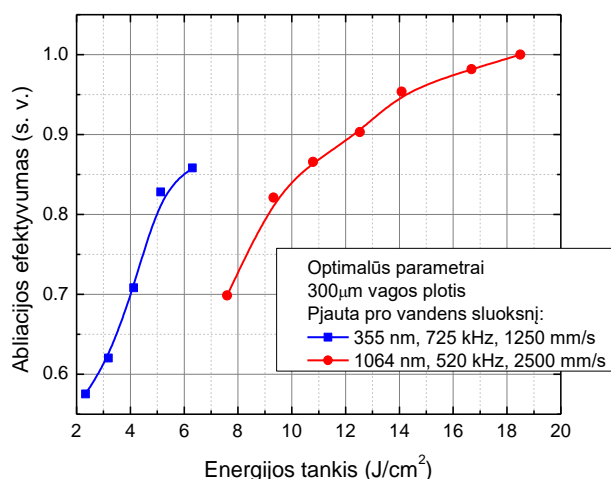
išspinduliuotos į bandinį. Sumažinus maksimalią vidutinę lazerio galią iki 4 W, tai yra apribojus maksimalų impulsų pasikartojimo dažnį iki 40 kHz, eksperimentas buvo pakartotas. Gautas efektyvumo maksimumas buvo ties 5,4 J/cm² energijos tankiu ir siekė ~5,5 μm³/μJ. Taigi abliuoti stiklą pro vandens sluoksnį buvo ~1,3 karto efektyviau negu abliuoti stiklą ore.



25 Pav. Abliacijos efektyvumo priklausomybė nuo energijos tankio (a) ir abliacijos spartos priklausomybė nuo impulsų pasikartojimo dažnio (b). Buvo pjautas borosilikatinis stiklas su 355 nm bangos ilgio spinduliuote ore ir pro vandens sluoksnį.

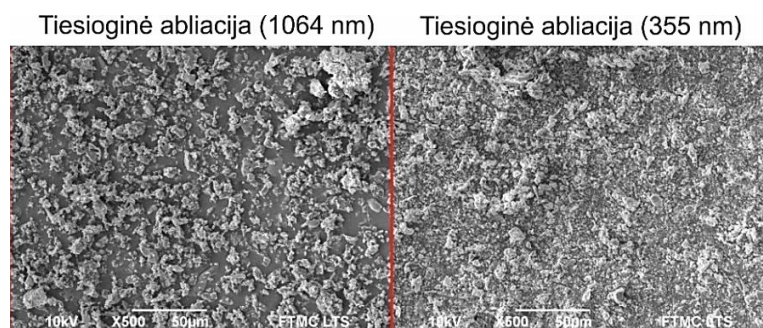
Siekiant išnaudoti pilną lazerinės sistemos potencialą, buvo naudojamas didžiausias galimas impulsų pasikartojimo dažnis, kada dar buvo pasiekiamas optimalus energijos tankis. Šiuo atveju, pjaunant pro vandens sluoksnį, jis buvo gautas lygus 725 kHz esant 16 W vidutinei galiai (žr. 25b pav.). Toliau didinant impulsų pasikartojimo dažnį nuo 725 kHz, abliacijos efektyvumas mažėjo, dėl ties tais dažniais pasiekiamo mažesnio energijos tankio. Didžiausias dažnis su kuriuo dar pavyko prapjauti stiklą ore buvo 625 kHz. Toliau didinant dažnį ir (ar) galią (naudojant daugiau nei 4W) – stiklas dūždavo dėl šiluminės akumuliacijos jame. Galiausiai, ties minėtais impulsų pasikartojimo dažniais buvo rasti optimalūs skenavimo greičiai lygūs 1250 mm/s (abliuojant pro vandenį) ir 1000 mm/s (abliuojant stiklą ore), o ties šiais skenavimo greičiais gautos prapjovimo spartos lygios atitinkamai 1,8 mm/s ir 0,5 mm/s. Gauta prapjovimo sparta vandenyje su 355 nm bangos ilgio spinduliuote buvo 2,8 kartų mažesnė nei pjaunant stiklą vandenyje su 1064 nm bangos ilgio spinduliuote. Toliau tęsiant eksperimentus, stiklas buvo pjaunamas tik pro vandens sluoksnį, kada buvo gaunami efektyvumai ir spartos didesni nei ore.

Siekiant palyginti efektyvumus pjaunant stiklą su abiejų bangos ilgių spinduliuotėmis ir gautais optimaliais parametrais, stikle buvo abliuojami vienodo pločio (300 μm) ir gylio (400 μm) kanalai. Vienodo pločio kanalų abliacija leido įvertinti, gaunamus efektyvumus abejais bangos ilgiais, pašalinant, apytiksliai, vienodą medžiagos tūrį. Gauta, kad abliuojant su 1064 nm bangos ilgio spinduliuote buvo gautas ~1,2 karto didesnis abliacijos efektyvumas nei abliuojant stiklą trumpesnio bangos ilgio spinduliuote (žr. 26 pav.).



26 Pav. Ablacijos efektyvumo priklausomybė nuo naudoto energijos tankio. Pjauta pro vandens sluoksnį su 1064 ir 355 nm bangos ilgių spinduliuotėmis.

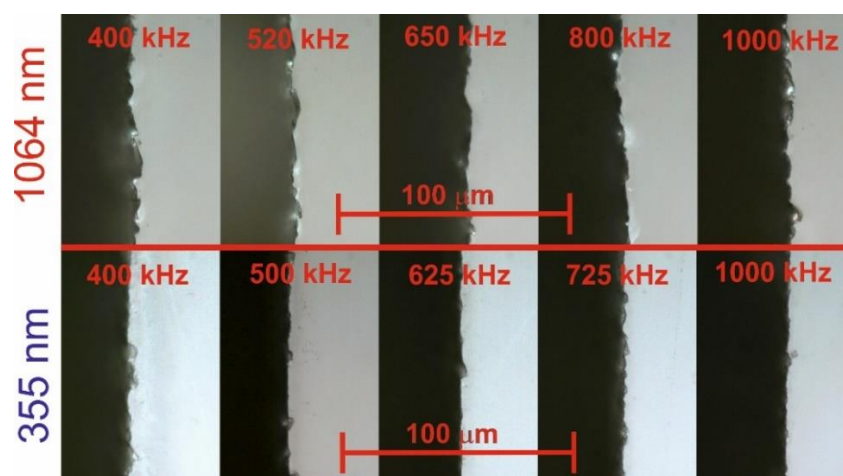
Pakartotinai pjaunant borosilikatinį sticlą su abejų bangos ilgių spinduliuotėmis pro vandens sluoksnį buvo surenkamos abliacijos metu sugeneruojamos stiklo nuolaužos. Pjovimai atlikti su efektyviausiais režimais (žr. 26 pav.). Eksperimento metu buvo surenkamas procese panaudotas vanduo su jame esančiais abliacijos produktais. Surinktas skystis buvo išgarintas, o likusios nuosėdos – stiklo dalelės analizuotos skenuojamuoju elektronų mikroskopu (žr. 27 pav.). Iš nuotraukų buvo pastebėta, kad pjaunant su 355 nm bangos ilgio spinduliuote buvo sugeneruotos mažesnių matmenų dalelės. Naudojantis nuotraukomis buvo išmatuoti susidariusių dalelių dydžiai. Taigi, abliuojant sticlą su 1064 nm bangos ilgio spinduliuote susidarė $9,2 \pm 3,8 \mu\text{m}$ dydžio dalelės. Pjaunant su trumpesnio bangos ilgio spinduliuote (355 nm), dalelės buvo apie 2 kartus mažesnės, o jų dydis siekė $4,1 \pm 1,8 \mu\text{m}$. Matome, kad pjaunant su ilgesnio bangos ilgio spinduliuote, yra sugeneruojamos didesnės dalelės. Tai leidžia daryti prielaidą, kad didesnę abliacijos efektyvumą, gautą abliuojant sticlą 1064 nm bangos ilgio spinduliuote, lėmė stiklo skaldymas didesnėmis frakcijomis. Tą galėjo nulėmti mažesnė medžiagos jonizacijos tikimybė, lyginant su 355 nm bangos ilgio spinduliuote. Dėl to spinduliuotė galėjo prasiskverbti į gilesnius medžiagos sluoksnius ir išskaldyti didesnes frakcijas.



27 Pav. Dalelių sugeneruotų pjaunant sticlą (skirtingomis lazerinėmis technologijomis) SEM nuotraukos. Kairėje nuotraukoje tiesiogiai abliuojant sticlą su 1064 nm bangos ilgio spinduliuote (x500 didinimas), o dešinėje – tiesiogiai abliuojant sticlą su 355 nm bangos ilgio spinduliuote (x500 didinimas).

9.2.3. Spinduliuotės bangos ilgio įtaka pjūvio kokybei

Pjūvių kokybė buvo vertinama atsižvelgiant į pjūvio krašto apskeldėjimą, sienelės šiurkštumą ir atsparumą lenkimui. Visi šie parametrai yra svarbūs vertinant atliktą pjūvį stikle, nes stiklas yra trapi medžiaga ir sugeneruoti pažeidimai gali turėti didelę įtaką išpjauto elemento mechaniniam tvirtumui. Taigi, išpjovus stiklus su optimizuotais sistemos parametrais, esant 1064 nm ir 355 nm bangos ilgiams ir įvairiems impulsų pasikartojimo dažniams, buvo gauta, kad pjūvio krašto vidutinis apskeldėjimas yra mažiausias pjaunant stiklą su 355 nm bangos ilgio spinduliuote ir apytiksliai buvo lygus $2,0 \pm 0,7 \mu\text{m}$ (žr. 28 pav.). Krašto apskeldėjimas nepriklausė nei nuo impulsų pasikartojimo dažnio, nei nuo aplinkos, kurioje buvo pjaunamas stiklas (oras ar vanduo). Pjaunant su ilgesnio bangos ilgio spinduliuote apskeldėjimas ore buvo iki 3,85 karto, o pjaunant pro vandens sluoksnį iki 1,25 karto didesni (žr. 10.2.1. skyrių).



28 Pav. Borosilikatiniame stikle su 1064 nm (viršutinės nuotraukos [47]) ir 355 nm (apatinės nuotraukos) bangos ilgių spinduliuotėmis išpjautų kanalų optinės nuotraukos. Pjauta pro vandens sluoksnį.

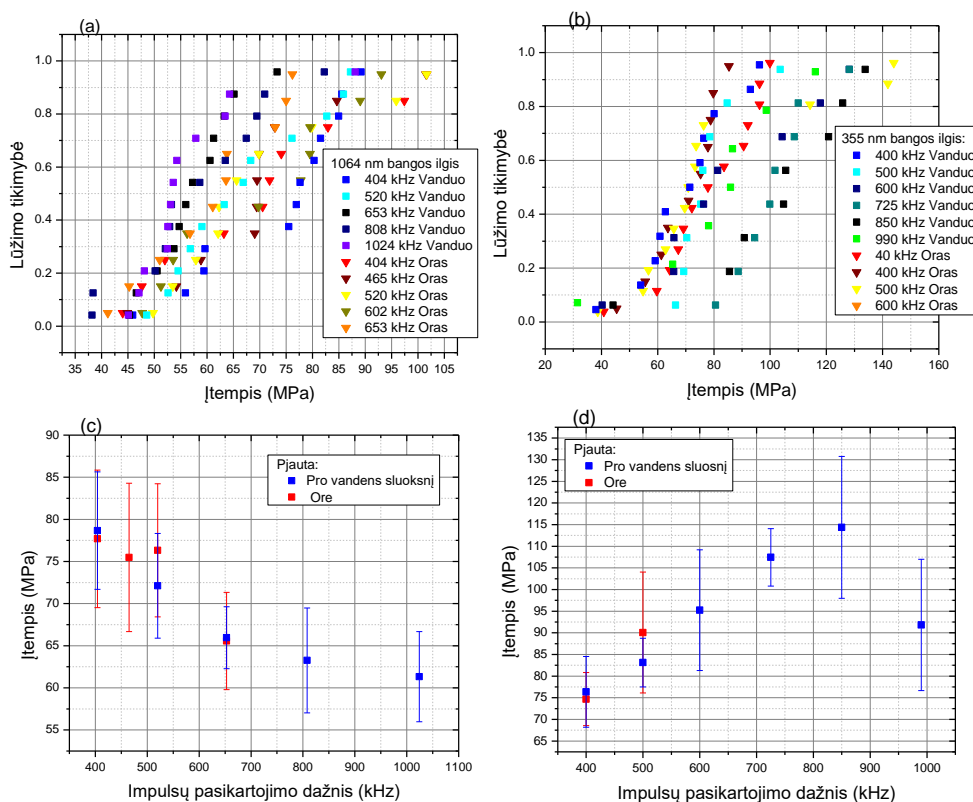
Pjūvio sienelių šiurkštumai taip pat buvo gauti mažesni, kai stiklas buvo pjautas 355 nm bangos ilgio spinduliuote. Pjaunant pro vandenį jis buvo 1,7 karto mažesnis nei stiklą pjautų ore ir lygus $1,1 \pm 0,16 \mu\text{m}$. Šiurkštumo vertės irgi nepriklausė nuo impulsų pasikartojimo dažnio. Šiuos rezultatus lyginant su ankščiau gautais rezultatais pjaunant stiklą ilgesniu bangos ilgiu (žr. 10.2.1. skyrių) gauta, kad pjaunant 1064 nm bangos ilgio spinduliuote, šiurkštumas buvo apytiksliai 1,8 karto didesnis. Tai buvo susieta su tuo, kad pjaunant trumpesniu bangos ilgiu, medžiaga yra pašalinama smulkesnėmis frakcijomis (žr. 27 pav.), o dėl to ir pjūvio sienelės turėjo mažesnę paviršiaus šiurkštumą.

9.2.4. Atsparumas lenkimui

Galiausiai buvo išpjautos 26 mm ilgio, 5 mm pločio ir $410 \mu\text{m}$ storio stiklo juostelės, kurios buvo laužomos siekiant nustatyti išpjautų bandinių atsparumą lenkimui – lūžimo ribą. Buvo sulaužyta

po 10 bandinių esant skirtingiems impulsų pasikartojimo dažniams ir naudojant abu tirtus bangos ilgius. Taip buvo įvertinta pjūvio įtaka stiklo atsparumui, o rezultatai buvo atvaizduoti pagal Veibulio kaupiamąjį pasiskirstymą (žr. 8.3 skyrių ir 29a, ir 29b pav.).

Iš duomenų, buvo pastebėta, kad pjaunant su 355 nm bangos ilgio spinduliuote ir didinant impulsų pasikartojimo dažnį, įtempis, kuriam esant statistiškai lūžtų 63 % bandinių, didėjo iki 850 kHz. Ties šiuo dažniu jis buvo $\sigma_0=114$ MPa (žr. 29d pav.). Tokius rezultatus galima aiškinti remiantis efektyvia abliacija. Atitinkamai ilgesniam ir trumpesniam bangos ilgiams gautas optimalus energijos tankiai buvo $18,5 \text{ J/cm}^2$ (žr. 10.2.1. skyrių) ir $6,2 \text{ J/cm}^2$ (žr. 10.2.2. skyrių). Taigi stiklą, pjautų su 355 nm bangos ilgio spinduliuote, įtempis pasiekė maksimalią vertę, apytiksliai, ties optimaliu impulsų pasikartojimo dažniu, kas reiškia, kad esant didesniam ar mažesniam dažniams, stiklas buvo pjaunamas nebe optimaliu energijos tankiu ir dėl to labiau kaito, o didesni šiluminiai efektai galėjo lemti didesnius pažeidimus stikle. Stiklą, pjautų su 1064 nm bangos ilgio spinduliuote, įtempis mažėjo didėjant dažniui (žr. 29c pav.). Taip yra, nes bandinių pjovimo metu, ties mažiausiu dažniu energijos tankis buvo optimalus, o didinant dažnį energijos tankis mažėjo (tolo nuo optimalios vertės).



29 Pav. Lūžimo tikimybės priklausomybė nuo lenkimo apkrovos, kai pjauta buvo su 1064 nm bangos ilgio (a) ir 355 nm bangos ilgio (b) spinduliuotėmis. Taip pat įtempio, kuriam esant statistiškai lūžtų 63 % bandinių, priklausomybė nuo impulsų pasikartojimo dažnio, kuriuo pjauti stiklai su 1064 nm bangos ilgio (c) ir su 355 nm bangos ilgio (d) spinduliuotėmis.

Bendrai palyginant rezultatus gautus su abejomis naudotomis bangos ilgių spinduliuotėmis buvo gauta, kad bandinių pjautų su trumpesniu bangos ilgiu laužimo įtempiai yra iki 1,5 karto didesni (77 MPa 1064 nm atveju ir 114 MPa 355 nm atveju, žr. 29 pav.). Taip yra dėl to, kad laužiant stiklą

dažniausiai trūkis pradeda formuotis nuo pjūvio krašto, o tam turi įtakos krašto apskeldėjimas (žr. 10.3 skyrių). Šiuo atveju, buvo gauta, kad su trumpesnio bangos ilgio spinduliuote, pjūvio kraštų apskeldėjimas buvo 1,15 karto mažesnis. Taip pat, kadangi su trumpesnio bangos ilgio spinduliuote medžiaga yra pašalinama mažesnėmis dalelėmis (žr. 27 pav.), tai galėjo lemti, kad stikle susidarė ir mažesni tūriniai pažeidimai.

Kitas svarbus gautas rezultatas, kad pjaunant stiklą pro vandens sluoksnį, stiklų stiprumas nesumažėjo lyginant jį su rezultatais gautais ore (žr. 29c ir 29d pav.). Tai reiškia, kad vandens sluoksnis padeda pagerinti pjovimo spartą, bet nekenkia stiklo atsparumui. Šiems rezultatams galėjo turėti įtakos tai, kad ore lazerio vidutinė galia buvo apribota ties 16 W (1064 nm bangos ilgiui) ir 4 W (355 nm bangos ilgiui), nes esant didesnėms galioms, stiklas dūždavo. Mažesnė vidutinė galia reiškia, kad stikle pasireiškia mažesni šiluminiai efektai nei pjaunant visa lazerio galia, dėl ko galėjo susidaryti mažesni bandinio pažeidimai. Tokiu atveju, jei pjaunama būtų su vienoda vidutine galia, tai pro vandens sluoksnį pjauti bandiniai turėtų būtų stipresni.

9.3. Storų stiklų pjovimas. Silikatinis stiklas

Greta plonų stiklų abliacijos eksperimentų buvo atliekami ir 1 mm storio silikatinio (angl. soda-lime glass – SLG) stiklo pjovimo tyrimai. Eksperimentams buvo pasirinktas 1064 nm bangos ilgis su kuriuo buvo gaunamas didesnis abliacijos efektyvumas (žr. 10.2 skyrių). Stiklas buvo pjaunamas ore ir pro vandens sluoksnį. Abejais atvejais buvo optimizuoti sistemos parametrai ieškant didžiausios pjovimo spartos. Kadangi buvo pjaunamas storesnis stiklas, kurį pjaunant pluoštas labiau išsifokusuoja, tai pjovimo metu buvo keičiama ir fokuso padėtis. Gauta, kad pjauti 1 mm storio silikatinį stiklą yra sparčiausia esant tokiems sistemos parametrams:

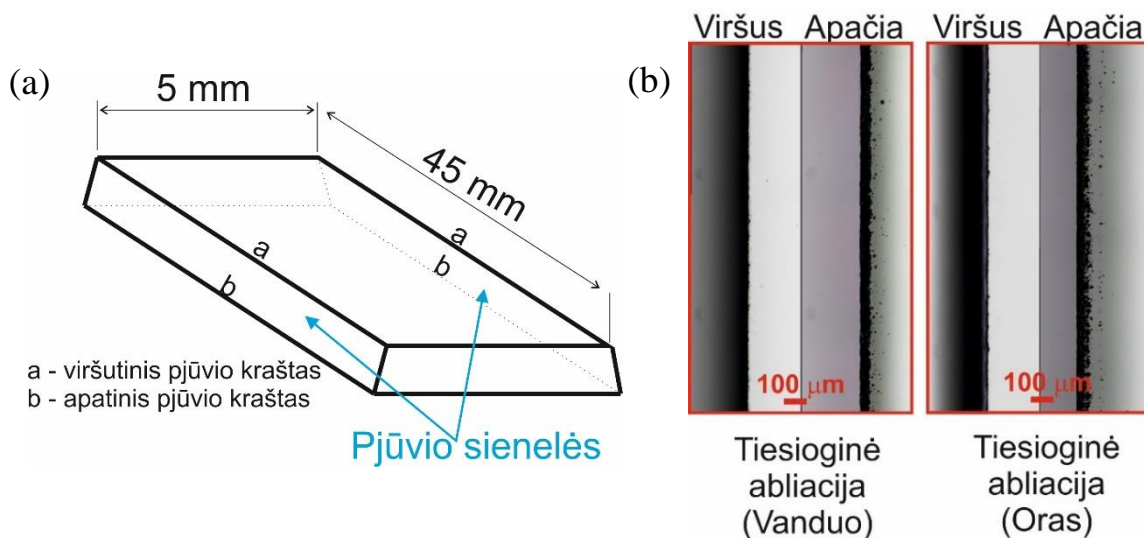
- a) Pjaunant pro vandens sluoksnį: skenavimo greitis 4300 mm/s, impulsų pasikartojimo dažnis 900 kHz, fokusas paslenkamas kas skenavimą gilyn į bandinį po 4,4 μm, tarpas tarp gretimų skenuojamų linijų lygus 15 μm, o kanalo plotis buvo 0,42 mm. Gauta prapjovimo sparta siekė 0,34 mm/s.
- b) Pjaunant ore: skenavimo greitis 2650 mm/s, impulsų pasikartojimo dažnis 850 kHz, fokusas paslenkamas kas skenavimą gilyn į bandinį po 7 μm, tarpas tarp gretimų skenuojamų linijų lygus 20 μm, o kanalo plotis buvo 0,85 mm. Gauta prapjovimo sparta siekė 0,26 mm/s.

Abliuojant stiklą ore aukščiau pateiktais parametrais stiklas skildavo, kai buvo pjaunamos kelios, viena šalia kitos, lygiagrečios linijos. Tą lėmė šiluminė akumuliacija stikle dėl didelio lazerinės spinduliuotės impulsų pasikartojimo dažnio. Dėl šios priežasties, nebuvo galima atlikti kelių

gretimų pjūvių. Taigi tolimesiems eksperimentams buvo naudotas maksimalus impulsų pasikartojimo dažnis su kuriuo stiklas nedūždavo pjaunant kelis, vienas nuo kito per 5 mm nuotolius kanalus ir išlaikant optimalų energijos tankį. Šis impulsų pasikartojimo dažnis buvo lygus 560 kHz (vidutinė lazerio galia 19,2 W). Skenavimo greitis buvo 1730 mm/s (išlaikytas impulsų persiklojimas gautas ties 850 kHz). Naudojant šį režimą, kanalo išpjovimo sparta siekė 0,19 mm/s.

9.3.1. Pjūvio kokybė

Siekiant įvertinti pjūvio kokybę, pirmiausia, buvo padarytos pjūvių kraštų optinės nuotraukos. Fotografuojami buvo kiekvieno bandinio viršutinis ir apatinis (visi keturi, žr. 30a pav.) pjūvių kraštai (fotografuojamo krašto ilgis buvo lygus 20 mm) ir išmatuojamas didžiausias išskylimo plotis. Pjaunant ore, pjūvio viršutinės dalies, tokių išskylimų 40 bandinių vidurkis, buvo $11,8 \pm 6,7 \mu\text{m}$, o apatinės dalies $50,0 \pm 23,4 \mu\text{m}$ (žr. 30b pav.). Vidutinė išskylimu vertė 10 mm ilgyje buvo $4,0 \pm 1,7 \mu\text{m}$. Pjaunant pro vandenį, didžiausių išskylimų vidurkis viršutinėje dalyje buvo $21,6 \pm 11,0 \mu\text{m}$, o apatinėje dalyje pažeidimai siekė $57,7 \pm 20,2 \mu\text{m}$ (žr. 30b pav.). Vidutinė išskylimu vertė 10 mm ilgyje buvo $4,2 \pm 3,5 \mu\text{m}$. Apskeldėjimas didesnis pjaunant pro vandens sluoksnį, nes ore stiklo kraštai labiau apsilydė dėl šiluminės akumuliacijos.

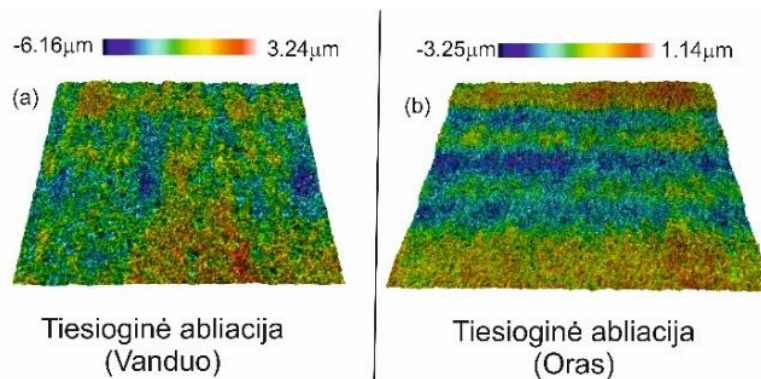


30 Pav. Fotografuoto bandinio schema (a) ir pjūvio kraštų optinės nuotraukos, kai silikatinis stiklas pjautas ore ir pro vandenį (b). Viršutinis paviršius atitinką tą, kurį pirmiausia pasiekia lazerinė spinduliuotė.

2 Lentelė. Pjūvio, suformuoto tiesioginės abliacijos būdu, vidutinis sienelės šiurkštumas R_a .

Aplinka	R_a (μm)
Oras	$0,29 \pm 0,05$
Vanduo	$0,77 \pm 0,06$

Tęsiant matavimus, kiekvienam išpjautam bandiniui buvo išmatuotas pjūvio sienelės šiurkštumas. Pjūvio sienelių topografijos pateiktos 31 paveiksle. Mažiausias šiurkštumas buvo gautas ore pjautuose bandiniuose (dėl šiluminės akumuliacijos lemto krašto apsilydimo). Ore gautas šiurkštumas buvo ~2,66 karto mažesnis nei gautas išpjovus bandinius pro vandens sluoksnį (žr. 2 lentelę).

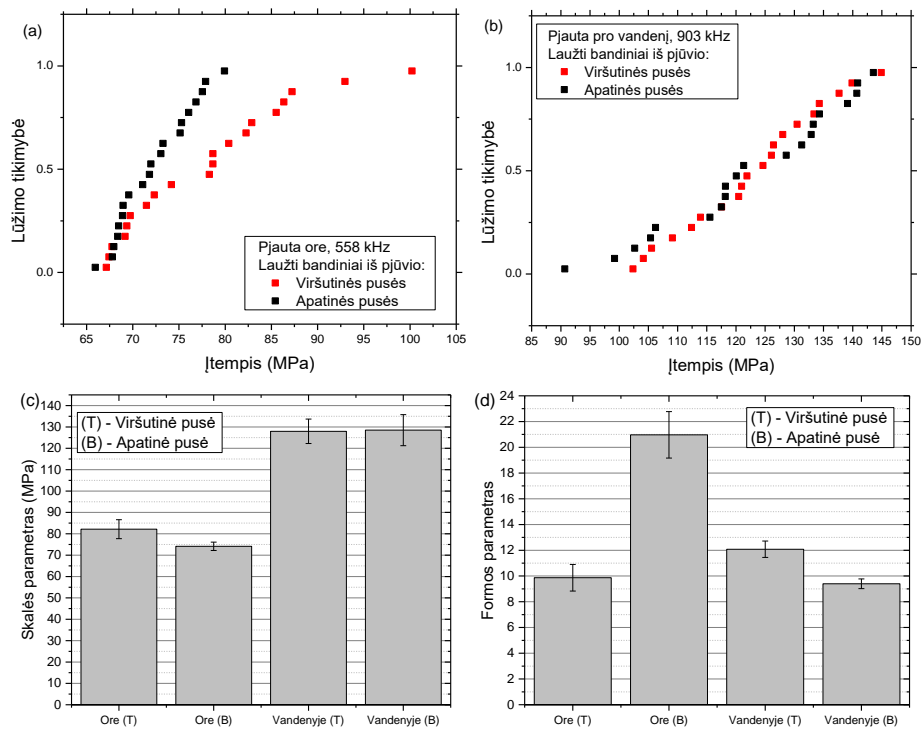


31 Pav. Išmatuotos pjūvio sienelių topografijos, kai silikatinis stiklas buvo pjaunamas nuo viršaus pro vandenį (a) ir ore (b).

9.3.2. Atsparumas lenkimui

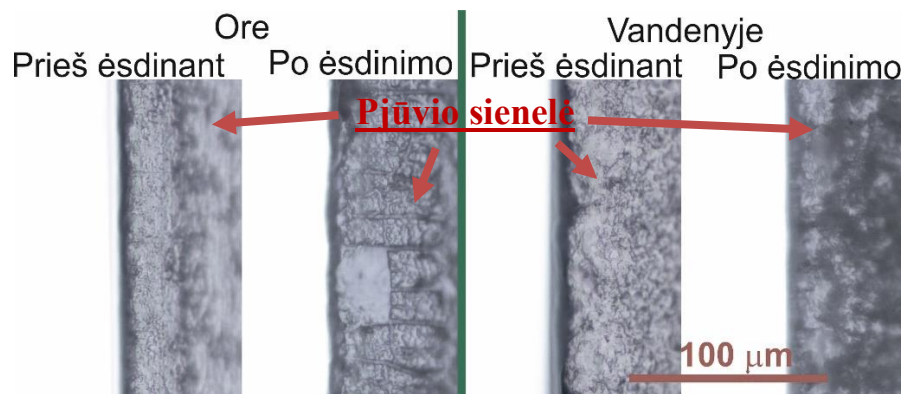
Galiausiai pjūvio kokybė buvo įvertinta matuojant optimaliais parametrais lazeriu išpjautų stiklo juostelių atsparumą lenkimui – lūžimo ribą. Tam tikslui buvo išpjauta po 40 stiklo juostelių ore ir pro vandens sluoksnį. Išpjautų juostelių ilgis buvo 45 mm, o plotis lygus 5 mm (žr. 30a pav.). Kiekvienai pjovimo aplinkai buvo sulaužyta po 20 bandinių iš viršutinės ir 20 iš apatinės pjūvio pusių. Rezultatai buvo atvaizduoti pagal Veibulio kaupiamąjį pasiskirstymą (žr. 8.3 skyrių ir 32a ir 32b pav.).

Iš duomenų, buvo pastebėta, kad išpjovus stiklą pro vandens sluoksnį, įtempis, kuriam esant statistiškai lūžtų 63 % bandinių, buvo apie 1,7 karto didesnis nei stiklą išpjautų ore ir siekė apie 127,8 MPa (žr. 32c pav.). Įtempio vertė buvo didesnė nepaisant to, kad pjūvio kraštų maksimalus apskeldėjimas ir sienelės šiurkštumas buvo didesnis. Pjaunant stiklą ore, dėl mažesnio bandinio aušinimo efektyvumo, susidarę terminiai įtempiai galėjo suformuoti popaviršinius pažeidimus, kurių nepavyko fiksuoti optiniu bei elektronų mikroskopais ar profilometru.



32 Pav. Silikatinų stiklų, išpjautų ore (a) ir pro vandens sluoksnį (b), lūžimo tikimybės priklausomybė nuo stiklui sulaužyti reikalingo įtempio bei Veibulio skalės (c) ir formos (d) parametrai. Stiklai pjauti naudojant tiesioginę abliaciją.

Tai patvirtinti, išpjauti bandiniai 1 minutę buvo ęsdinami 5 proc. vandenilio fluorida rūgšties tirpale (HF), kad atsidengtų paslėpti pažeidimai. Buvo pastebėta, kad po ęsdinimo, ore pjautuose bandiniuose, išryškėjo trūkiai išsidėstę ant pjūvio sienelių, o jų kryptis buvo statmena viršutiniam ir apatiniam stiklinio bandinio paviršiams. (žr. 33 pav.).



33 Pav. Pjūvio sienelių optinės nuotraukos, kai silikatinis stiklas pjautas ore ir vandenyje. Pateiktos nuotraukos yra prieš bandinių ęsdinimą ir po jo. ęsdinta vieną minutę 5 proc. HF rūgšties tirpale.

Vertinant duomenų išsibarstymą, buvo atsižvelgiama į Veibulio formos parametą m . Kuo jis didesnis, tuo duomenų išsibarstymas yra mažesnis, tai yra turime geresnį rezultatų atsikartojamumą. Pastebėta, kad stiklams pjautiems pro vandens sluoksnį, Veibulio formos parametras yra vidutiniškai lygus $10,7 \pm 0,5$ (laužiant bandinius iš abiejų pusių, žr. 32b ir 32d pav.). Tuo tarpu, kai bandiniai buvo pjauti ore, juos laužiant iš apatinės pusės, rezultatų išsibarstymas buvo apie 2 kartus mažesnis (Veibulio formos parametras m didesnis) ir siekė $21,0 \pm 1,8$ (vidutinė, iš viršaus

ir apačios laužtų bandinių, vertė lygi $15,4 \pm 1,4$). Galime matyti, kad nors stiklų pjautų pro vandens sluoksnį, rezultatų atsikartojamumas yra 1,44 karto mažesnis nei pjautų ore, tačiau minimalūs gauti įtempiai yra vis tiek didesni už didžiausius, ore pjautų stiklų, įtempius.

9.3.3. Pjovimo technologijų palyginimas

Galiausiai, buvo palygintos tiesioginės abliacijos pro vandens sluoksnį technologija su trūkių generavimo ir pjovimo nuo apatinės pusės technologijomis. Darbe gauti rezultatai buvo palyginti su straipsnyje [42] pateiktais pjūvių kokybės rezultatais ir įtempiais reikalingais sulaužyti bandinius.

Pirmiausia, stiklo pjovimo sparta, naudojant tiesioginę abliaciją, buvo mažesnė nei pjaunant kitomis technologijomis. Ji buvo 300 ir 26 kartus mažesnė nei pjaunant stiklą atitinkamai trūkių generavimo ir pjovimo nuo apatinės pusės būdais. Taip yra, nes trūkių generavimo ir pjovimo nuo apatinės pusės technologijos yra paremtos trūkių generavimu per kuriuos stiklas yra mechaniškai perlaužiamas arba dėl kurių medžiaga išbyra didesnėmis dalelėmis (žr. 2 skyrių). Tokiu būdu, minėtose technologijose, sunaudojama mažiau energijos stiklui perpjauti nei tiesioginės abliacijos metu, kai medžiaga yra garinama pasluoksniui.

Vertinant pjūvio krašto kokybę buvo stebimas tiesioginės abliacijos pranašumas. Atkreipiant dėmesį į stiklo juostelių laužimo eksperimentus ir sulyginant juo su rezultatais gautais stiklą išpjovus su kitomis lazerinėmis technologijomis [42], gauta, kad abliuojant stiklą pro vandens sluoksnį, jis yra atsparesnis lenkimui – gauti didesni įtempiai reikalingi jam sulaužyti. Stiklams išpjautiems su trūkių generavimo technologija sulaužyti reikalingas Veibulio įtempis laužiant iš viršutinės ir apatinės pjūvio pusių atitinkamai buvo apytiksliai lygus (127,2 MPa) ir 1,92 karto mažesnis (66,8 MPa, vidutinis formos parametras $\sim 12,5$) [42]. Pjaunant nuo apatinės stiklo pusės šie įtempiai buvo atitinkamai 1,26 karto (101,3 MPa) ir 1.55 karto (83,2 MPa) mažesni nei stiklų išpjautų tiesioginės abliacijos technologija. Šiuos rezultatus galime sieti su krašto apskeldėjimais, rodančiais stiklo paviršiaus pažeidimus ir pjūvio sienelės šiurkštumu – galimais pažeidimais tūryje. Taigi, tiek sienelės šiurkštumas, tiek ir krašto apskeldėjimas vidutiniškai yra mažiausi, kai stiklai buvo pjaunami tiesioginės abliacijos būdu. Sienelės apskeldėjimas iki 7 kartų mažesnis lyginant su pjovimu nuo apatinės pusės (šiurkštumas $\sim 1,8$ karto mažesnis) ir iki 2,7 karto mažesnis lyginant su trūkių generavimo (šiurkštumas $\sim 5,3$ karto mažesnis) technologijomis.

Pagrindiniai rezultatai ir išvados

- 1) Parodyta, kad abliacijos efektyvumas ženkliai padidėjo abliuojant stiklą pro vandens sluoksnį. Abliacijos efektyvumas borosilikatiniame stikle padidėjo 550 % iki $13 \mu\text{m}^3/\mu\text{J}$, o silikatiniame stikle 380 % iki $15,8 \mu\text{m}^3/\mu\text{J}$, kai buvo abliuojami $420 \mu\text{m}$ gylio ir $230 \mu\text{m}$ pločio kanalai. Tuo tarpu plieno abliacijos efektyvumas beveik nekito (ore $1,21 \mu\text{m}^3/\mu\text{J}$, o pro vandenį $1,26 \mu\text{m}^3/\mu\text{J}$).
- 2) Gauta, kad borosilikatinio stiklo ir nerūdijančio plieno abliacijos (ore ir vandenyje) efektyvumo priklausomybės nuo kanalo pločio buvo tapačios – išlaikė tą pačią kreivės formą. Pjaunant vandenyje abliacijos efektyvumas buvo didesnis per pastovią vidutinę poslinkio vertę, kuri nepriklausė nei nuo kanalo pločio, nei nuo gylio.
- 3) Borosilikatinių stiklų abliacija 1064 nm bangos ilgio spinduliuote, dėl abliacijos metu pašalinamų didesnės frakcijos stiklo dalelių, yra 14 % efektyvesnė už abliaciją 355 nm bangos ilgio spinduliuote.
- 4) Abliuojant borosilikatinį stiklą 355 nm bangos ilgio spinduliuote pro vandens sluoksnį, gauti aukštesnės kokybės pjūviai (mažesnis sienelių šiurkštumas, mažesni pjūvio krašto apskeldėjimai), lyginant su juostelėmis išpjautomis 1064 nm bangos ilgio spinduliuote toje pačioje aplinkoje. Tai lėmė 48 % didesnę laužimo jėgą (nuo 77 MPa iki 114 MPa).
- 5) Laužimo eksperimentai parodė, kad stikliukai išpjauti optimaliomis sąlygomis (esant efektyviausiai abliacijai), pasižymėjo didžiausia laužimo jėga, o tolstant nuo optimalių pjovimo sąlygų – jėga mažėjo.
- 6) Pro vandens sluoksnį išpjautų silikatinių stiklo juostelių atsparumas lenkimui buvo didesnis nei išpjautų ore nepaisant to, kad pjūvio sienelės šiurkštumas ir maksimalūs pjūvio krašto apskeldėjimai buvo didesni. Tai lėmė ore pjautuose bandiniuose besiformuojantys po paviršiniai pažeidimai.

Pranešimai mokslinėse konferencijose ir publikacijų sąrašas

Konferencijos (šio darbo tema):

1. **L. Zubauskas**, E. Markauskas, Thin water film assisted glass ablation with a picosecond laser, APPOLO Summer School on Ultra-short Pulse Lasers Applications in Material Processing, Liepos 8 – 10 (2019), Vilnius, Lietuva.
2. E. Markauskas, **L. Zubauskas**, P. Gečys, Picosecond laser ablation of borosilicate glass plates through the thin flowing water layer, Laser Precision Microfabrication (LPM), Birželio 23-26 (2020), Dresdenas, Vokietija.

Konferencijos (nesusijusios su šio darbo tema):

3. E. Markauskas, **L. Zubauskas**, G. Račiukaitis, P. Gečys, Formation of p3 scribes in cigs solar cells with nanosecond and picosecond pulses, SPIE. Photonics West Lase, Kovo 6 – 11, (2021), San Franciskas, JAV.

Straipsniai (nesusiję su šio darbo tema):

1. E. Markauskas, **L. Zubauskas**, G. Račiukaitis, P. Gečys, Damage-free patterning of thermally sensitive cigs thin-film solar cells: can nanosecond pulses outperform ultrashort laser pulses?, Solar Energy, 202, p. 514-521 (2020).

Literatūra

- [1] O. Balachninitė, A. Bargelis, D. Aleksandr, R. Jonušas, G. Račiukaitis, V. Sirutkaitis, *Lazerinė technologija*, (Vilniaus universiteto leidykla, Vilnius, 2008).
- [2] S. Nisar, L. Li, M. A. Sheikh, Laser glass cutting techniques - a review, *Journal of Laser Applications*, 25(4), (2013).
- [3] K. M. Davis, K. Miura, N. Sugimoto, and K. Hirao, Writing waveguides in glass with a femtosecond laser, *Opt. Lett.*, 21(21), p. 1729–1731 (1996).
- [4] M. G. Thompson, A. Politi, J. C. F. Matthews, J. L. O'Brien, Integrated waveguide circuits for optical quantum computing, *IET Circuits, Devices and Systems*, 5(2), p. 94-102 (2011).
- [5] H. Shin, D. Kim, Cutting thin glass by femtosecond laser ablation, *Optics and Laser Technology*, 102, p. 1-11 (2018).
- [6] K. Plat, P. Witzendorff, O. Suttmann, L. Overmeyer, Process strategy for drilling of chemically strengthened glass with picosecond laser radiation, *Journal of Laser Applications*, 28(2), p. 1-6 (2016).
- [7] J. Noh, J. H. Lee, S. Na, H. Lim, D. H. Jung, Fabrication of hierarchically micro- and nano-structured mold surfaces using laser ablation for mass production of superhydrophobic surfaces, *Japanese Journal of Applied Physics*, 49, 106502 (2010).
- [8] A. Žemaitis, A. Mimidis, A. Papadopoulos, P. Gečys, G. Račiukaitis, E. Stratakis, M. Gedvilas, Controlling the wettability of stainless steel from highly-hydrophilic to super-hydrophobic by femtosecond laser-induced ripples and nanospikes, *RSC Advances*, 10(62), p. 37956-37961 (2020).
- [9] A. Žemaitis, J. Mikšys, M. Gaidys, P. Gečys, M. Gedvilas, High-efficiency laser fabrication of drag reducing riblet surfaces on pre-heated Teflon, *Materials Research Express*, 6(6), p. 1-8 (2019).
- [10] B. Antoszewski, The effect of laser surface texturing on frictional performance of sliding pair, *Scientific Journals*, 31(103), p. 14-18 (2012).
- [11] P. Gečys, J. Dudutis, and G. Račiukaitis, Nanosecond laser processing of soda-lime glass, *Journal of Laser Micro/Nanoengineering*, 10(3), p. 254-258 (2015).
- [12] J. Dudutis, P. Gečys, and G. Račiukaitis, Modification of glass using an axicon-generated non-symmetrical Bessel-Gaussian beam, *Proc. SPIE*, 10091 (2017).
- [13] S. Nikumb, Q. Chen, C. Li, H. Reshef, H.Y. Zheng, H. Qiu, and D. Low, Precision glass machining, drilling and profile cutting by short pulse lasers, *Thin Solid Films*, 477(1), p. 216-221 (2005).
- [14] N. Krstulović, S. Shannon, R. Stefanuik, C. Fanara, Underwater-laser drilling of aluminum, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 69(5), p. 1765-1773 (2013).

- [15] W. Charee and V. Tangwarodomnukun, Dynamic features of bubble induced by a nanosecond pulse laser in still and flowing water, *Optics & Laser Technology*, 100, p. 230-243 (2018).
- [16] G. Y. Mak, E.Y. Lam, H.W. Choi, Liquid-immersion laser micromachining of GaN grown on sapphire, *Applied Physics A: Materials Science & Processing*, 102(2), p. 441–447 (2011).
- [17] 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*, Vol. 197–198, p. 911-914 (2002).
- [18] N. B. Dahotre, S. P. Harimkar, *Laser Fabrication and Machining of Materials*, (Springer, New York, 2008).
- [19] M. Fox, *Optical Properties of Solids*, (Oxford University Press Inc., New York, 2001).
- [20] N. M. Bulgakova, A. V. Bulgakov, Pulsed laser ablation of solids: transition from normal vaporization to phase explosion, *Appl. Phys. A*, 73(2), p. 199–208 (2001).
- [21] A. Dubietis, *Netiesinė optika*, (Vilniaus universitetas, Vilnius, 2011).
- [22] A. Poškus, *Eksperimentinė branduolio fizika*, (Vilniaus Universitetas, Vilnius, 2014).
- [23] P. Holmberg, *Laser Processing of Silica Based Glass*, (Royal Institute of Technology, Stockholm, 2015).
- [24] J. Dudutis, Stiklo pjovimas kūgine prizme suformuotu Beselio-Gauso pluoštu, Magistrantūros studijų baigiamasis darbas, Vilniaus universitetas, Fizikos fakultetas, Kvantinės elektronikos katedra (2016).
- [25] J. Lopez, K. Mishchik, B. Chassagne, C. Leger, C. Honninger, E. Mottay, R. Kling, Glass cutting using ultrashort pulsed Bessel beams, *ICALEO*, 60, (2015).
- [26] V. Sirutkaitis, R. Jonušas, A. Bargelis, J. Kalpokas, K. Juzėnas, O. Balachninaite, M. Peckus, V. Kudriašov, M. Barkauskas, *Lazerinių technologijų laboratoriniai darbai*, Vilniaus Universitetas, Fizikos institutas, 2008.
- [27] B. N. Chichkov, C. Momma, S. Nolte et al., Femtosecond, picosecond and nanosecond laser ablation of solids, *Appl. Phys. A*, 63, p. 109-115 (1996).
- [28] 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).
- [29] 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?, *JLMN-Journal of Laser Micro/Nanoengineering*, 4(3), p. 186-191 (2009).
- [30] M. Gaidys, A. Žemaitis, P. Gečys, M. Gedvilas, Efficient picosecond laser ablation of copper cylinders, *Applied Surface Science*, 483, p. 962-966 (2019).
- [31] J. Gabzdyl, M. Brodsky, Micro-cutting with nanosecond pulsed fiber lasers, *Pacific International Conference on Applications of Lasers & Optics*, (LIA, Wuhan, 2010).

- [32] S. Butkus, D. Paipulas, E. Gaižauskas, D. Kaškelytė, V. Sirutkaitis, Microfabrication of transparent materials using filamented femtosecond laser beams, *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 9135:91351E, (2014).
- [33] 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), (2018).
- [34] 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), (2013).
- [35] W. Chaoran, Y. Ito, R. Shinomoto, K. Nagato, Simulation of ultrashort pulse laser drilling of glass considering heat accumulation, *Optics Express*, 28(10), p. 15240-15249 (2020).
- [36] A. Kruusing, Underwater and water-assisted laser processing: Part 2 - etching, cutting and rarely used methods, *Optics and Lasers in Engineering*, 41(2), p. 329-352 (2004).
- [37] E. Markauskas, P. Gečys, Thin water film assisted glass ablation with a picosecond laser, *Science Direct*, 74, p. 328-332 (2018).
- [38] S. Butkus, A. Alesnikov, D. Paipulas, E. Gaižauskas, A. Melninkaitis, D. Kaškelytė, M. Barkauskas, V. Sirutkaitis, Analysis of the micromachining process of dielectric and metallic substrates immersed in water with femtosecond pulses, *Micromachines*, 6(12), p. 2010-2022 (2015).
- [39] D. R. Lide, *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, (National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, 2002).
- [40] A. Kruusing, *Handbook of Liquids-Assisted Laser Processing*, (Elsevier, Amsterdam, 2008).
- [41] O. Supponen, D. Obreschkow, M. Tinguely, P. Kobel, N. Dorsaz, M. Farhat, Scaling laws for jets of single cavitation bubbles, *J. Fluid Mech.*, 802, p. 263-293 (2016).
- [42] J. Dudutis, J. Pipiras, R. Stonys, E. Daknys, A. Kilikevicius, 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), (2020).
- [43] J. M. Liu, Simple technique for measurements of pulsed gaussian-beam spot sizes, *Optics Letters*, 7(5), p. 196-198 (1982).
- [44] G. Račiukaitis, *Lazerinio mikroapdirbimo laboratoriniai darbai*, (TEV, Vilnius, 2008).
- [45] F. Mitschke, *Fiber Optics 2nd Ed.*, (Springer, Heidelberg, 2016).
- [46] J. D. Sullivan, P. H. Lauzon, Experimental probability estimators for weibull plots, *J. Mater. Sci. Lett.* 5(12), p. 1245–1247 (1986).

[47] L. Zubauskas, Stiklo padengto plona vandens plėvele pjovimas didelio impulsų pasikartojimo dažnio lazerine spinduliuote, Bakalauro studijų baigiamasis darbas, Vilniaus universitetas, Fizikos fakultetas, Lazerinių tyrimų centras (2019).

Santrauka

INŽINERINIŲ MEDŽIAGŲ ABLIACIJA ORE IR VANDENYJE SU DIDELIO DAŽNIO ULTRATRUMPŲ IMPULSŲ LAZERIU

Laimis Zubauskas

Fizikos fakultetas, Vilniaus Universitetas, Fizinių ir technologijos mokslų centras

Aukštos kokybės stiklų ir metalų apdirbimui yra vis plačiau taikomos įvairios lazerinės technologijos. Lazeris įgalina tikslesnį apdirbimą ir mažesnę medžiagos eikvojimą. Prietaisų matmenys yra mažinami ir dėl to atsiranda poreikis ir mažų matmenų stikliniams optiniams elementams gaminti. Taip pat, yra plačiai formuojamos aukštos kokybės liejimo formos iš metalų ar struktūrinami metalų paviršiai, siekiant išgauti paviršius, kurie pasižymi hidrofobinėmis savybėmis ar turinčius modifikuotą paviršiaus trinties koeficientą.

Šiuolaikiniai lazeriai pasižymi aukšta vidutine galia ties dideliais impulsų pasikartojimų dažniais, kas turėtų leisti padidinti įvairių medžiagų pjovimo spartą išlaikant aukštą jų kokybę. Kita vertus, pjovimo sparta ir apdirbimo kokybė nukenčia dėl didėjančios šiluminės akumuliacijos bandinyje (perkaitymas, padidėjęs lydymasis, trūkių formavimasis ar net bandinio sudūžimas). Taip pat, krinta proceso efektyvumas dėl riboto medžiagos nuolaužų pašalinimo greičio, plazmos formavimosi. Šioms problemoms spręsti buvo pastebėta, kad vandens sluoksnio panaudojimas lazeriniame medžiagų apdirbime lemia efektyvesnį apdirbamos detalės aušinimą, sumažina lazerio spinduliuotės ekranavimą abliacijos produktais ir plazma bei gali padidinti apdirbimo kokybę ir spartą.

Šiame tyrime buvo naudojami pikosekundiniai 355 ir 1064 nm bangos ilgio lazeriai. Buvo palyginta tiesioginio lazerinio apdirbimo sparta ir kokybė abliuojant borosilikatinius ir silikatinius stiklus ore ir padengus juos plona vandens plėvele. Taip pat, buvo įvertinta vandens įtaka abliacijos efektyvumui abliuojant nerūdijantį plieną.

Eksperimentų metu buvo optimizuoti lazerio parametrai, minėtų medžiagų, abliacijai. Atlikus tyrimus nustatyta, kad padengus medžiagą tekančia vandens plėvele, padidėjo pjovimo sparta ir abliacijos efektyvumas. Borosilikatinio stiklo abliacija buvo efektyvesnė ir spartesnė naudojant 1064 nm bangos ilgio spinduliuotę. Buvo pastebėta, kad vandens sluoksnio įtaka borosilikatinio stiklo ir plieno abliacijų efektyvumams nepriklausė nuo kanalo pločio ar gylio – abliacijos efektyvumo priklausomybės buvo tapačios, tik paslinktos per pastovią efektyvumo vertę (0,21 borosilikatiniame stiklui ir 0,015 plienui).

Summary

COMPARISON OF DIFFERENT MATERIALS ABLATION IN AIR AND WATER-ASSISTED ENVIRONMENTS

Laimis Zubauskas

Faculty of Physics, Vilnius University, Center for Physical Sciences and Technology

In recent years, the use of laser technologies in high-quality glass and metal component fabrication is proliferating. The laser allows achieving higher precision processing and reduces manufacturing waste. Furthermore, as the devices shrink in size with technology advancing, the need for small-sized components, such as optical elements made from glass, is growing rapidly. Additionally, the demand for high-quality metallic moulds or metal surfaces with unique properties (hydrophobicity, reduced surface friction) is increasing.

New ultra-short pulsed lasers offer high average power at high-pulse repetition rates allowing fast and high-quality production of materials. However, cutting speed and ablation efficiency frequently suffers from heat accumulation in the material. Laser parameters are usually limited to avoid overheating or generating cracks in heat-affected zones, depending on the material. Furthermore, excessive laser power can also lead to glass fractures. Also, the processing efficiency can suffer from slow debris removal rate and excessive plasma formation. Fortunately, studies have shown that the introduced water layer onto the surface of the workpiece can improve both the laser processing quality and cutting speed of various materials.

In this work, picosecond lasers working at 1064 nm and 355 nm wavelengths were used to evaluate the direct laser ablation efficiency and processing quality of borosilicate and silicate glasses and stainless-steel samples in ambient air and water-assisted environments.

First, laser parameters were optimized for ablation of both glass types and stainless steel. Results showed that the applied water layer improved the ablation efficiency and cutting rate. Borosilicate glass ablation was more efficient and faster using the 1064 nm wavelength. Furthermore, findings revealed that the ablation efficiency increase provided by the water layer did not depend on the depth or the width of the groove and remained constant (0.21 for borosilicate glass and 0.015 for stainless steel).