

Vilniaus universiteto
Fizikos fakulteto
Lazerinių tyrimų centras

Laimis Zubauskas
STIKLO PADENGTO PLONA VANDENS PLĖVELE PJOVIMAS DIDELIO IMPULSŲ
PASIKARTOJIMO DAŽNIO LAZERINE SPINDULIUOTE

Bakalauro studijų baigiamasis darbas

Energetikos fizikos
studijų programa

Studentas

Laimis Zubauskas

Leista ginti
Darbo vadovas

2019-05-24
Edgaras Markauskas

LTC direktorius

doc. R. Butkus

Vilnius 2019

Turinys

IVADAS.....	3
1. Lazerinės spinduliuotės sąveika su medžiaga	4
1.1. Sąveikos mechanizmai.....	4
1.2. Lazerinės spinduliuotės atspindys ir sugertis medžiagoje	5
1.3. Plazmos susidarymas	5
1.4. Spinduliuotės sąveika su skaidria medžiaga	6
1.5. Daugiafotonė sugertis	7
1.6. Griūtinė jonizacija.....	8
1.7. Slenkstinė pažaidos vertė.....	9
2. Stiklo pjovimo būdai	9
3. Vandens įtaka lazeriniam apdirbimui.....	11
3.1. Vandens panaudojimo nauda	11
3.2. Spinduliuotės sklidimas vandeniui	12
3.3. Vandens tiekimo būdai	13
3.4. Plazmos smūginės bangos	13
3.5. Kavitacijos burbulai	14
4. Įranga ir metodika	16
4.1. Įranga	16
4.2. Stiklo pažeidimo slenksčio radimas.....	17
4.3. Savitoji abliacijos sparta ir prapjovimo greitis	18
4.4. Vandens sluoksnio storio matavimai	18
5. Eksperimento rezultatai.....	19
5.1. Pjūvio formavimo būdai	19
5.2. Vandens tiekimo būdo parinkimas.....	21
5.3. Slenkstinė pažaidos vertė.....	22
5.4. Pjovimo, vandens ir oro sąlygomis, palyginimas	23
5.5. Vandens srauto greitis.....	24
5.6. Stiklo pjovimas didelio impulsų pasikartojimo dažnio spinduliuote	25
5.7. Stiklų kokybės palyginimas	28
5.8. Detalės pjovimas.....	32
6. Pagrindiniai rezultatai ir išvados	33
7. Rezultatų viešinimas	34
LITERATŪRA.....	35

ĮVADAS

Itin tikslus bekontaktis lazerinis skaidrių medžiagų apdirbimas ultratrumpo trukmės impulsais yra vis plačiau taikomas ekranų gamybos, dirbinių restauracijos bei fotonikos srityse. Įvairiose pramonės srityje atsiranda vis didesnis mažų, aukštos apdirbimo kokybės, skaidrių optinių elementų pjovimo poreikis. Tokie, kelių milimetrų dydžio optiniai elementai dažnu atveju yra pjaunami iš didesnių padėklų, kurie gali būti padengti atspindinčiomis, skaidrinančiomis, ar kitomis dangomis.

Medžiagų pjovimui yra vystomos įvairios lazerinės technologijos tokios kaip tiesioginė abliacija, pjovimas iš apatinės bandinio pusės bei trūkių generavimas. Pastarosios dvi pasižymi didesne pjovimo sparta nei tiesioginė abliacija, tačiau turi svarbių trūkumų. Pirma, lazerinio proceso iš apatinės bandinio pusės metu gali susidaryti dideli pjūvio kraštų apskeldėjimai. Taip pat šis metodas netinka stiklams su atspindinčiomis dangomis. Antra, trūkių generavimas netinka sudėtingos geometrijos pjūviams ir šia technologija negalima pjauti vidinių dalių. Taigi, proceso universalumu, tiesioginė abliacija būtų optimalus metodas pjauti stiklus, tačiau bėda yra labai mažoje pjovimo spartoje. Nors šiuolaikiniai ultratrumpų impulsų trukmės lazeriai gali užtikrinti pakankamą impulsų energiją skaidrių terpių apdirbimui esant didesniems nei 1 MHz impulsų pasikartojimo dažniams, tačiau, maksimalus pjovimo greitis apribojamas apdirbamos medžiagos nuolaužų pašalinimo sparta iš abliuojamo kanalo, bei didėjančiais mikrotrūkiais dėl terminės akumuliacijos medžiagoje [1]. Problemai spręsti, buvo pademonstruota, kad plono vandens sluoksnio panaudojimas lazeriniame medžiagų apdirbime lemia didesnę abliacijos efektyvumą bei aukštesnę apdirbimo kokybę [1, 2]. Medžiaga mažiau apskeldėja, gaunami pjovimo kanalai su statesniais kraštais (kas naudingiau apdirbant storesnes medžiagas) bei didesnę apdirbimo spartą [1, 3]. Tuo tarpu, vanduo į lazerinės abliacijos sritį gali būti tiekiamas skirtingais būdais: apipurškiant detalę vandeniu, sudarant nuožulnią plokštumą ar pilnai panardinant detalę į vandenį [3]. Kiekvienas iš šių būdų, tikimasi, kad sumažins minėtus lazerinio apdirbimo trūkumus bei padidins apdirbimo kokybę ir efektyvumą.

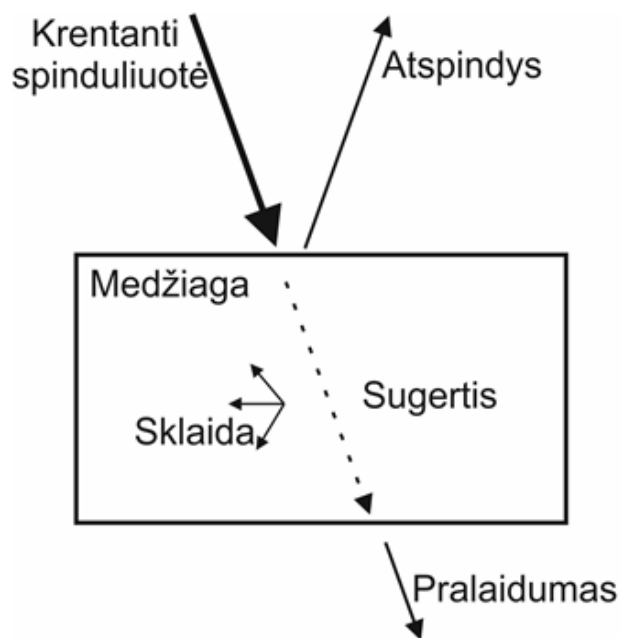
Šio darbo tikslas yra įvertinti kokią įtaką stiklo pjovimo spartai, savitajai abliacijos spartai bei kokybei turi pjovimas didelio impulsų pasikartojimo dažnio lazeriu pro vandens sluoksnį, lyginant su pjovimu ore.

1. Lazerinės spinduliuotės sąveika su medžiaga

1.1. Sąveikos mechanizmai

Elektromagnetinei bangai sąveikaujant su medžiaga galimi skirtingi sąveikos mechanizmai: elektromagnetinės spinduliuotė gali būti atspindėta, lūžti, būti sugerta ar išsklaidyta medžiagoje bei sklisti medžiaga be nuostolių (žr. 1 pav.). Lazerinei abliacijai vykti svarbiausias mechanizmas yra spinduliuotės sugertis, kuri gali lemti medžiagos kaitimą, lydymąsi, garavimą ar sublimaciją bei plazmos formavimąsi. Šių procesų atsiradimą lemia elektromagnetinės bangos ir medžiagos elektronų sąveika, kuri pasireiškia tuo, kad elektronai sugeria elektromagnetinę bangą ir peršoka į aukštesnį energijos lygmenį (sužadintą lygmenį). Dėl smūgių su gardele, elektrono perteklinė kinetinės energijos dalis atiduodama gardelei, tai yra ji pradeda šilti, o elektronas grįžta į pagrindinę būseną. Tolesnis medžiagos kaitinimas gali lemti fazinius virsmus medžiagoje [4].

Lazerinės spinduliuotės ir medžiagos sąveika priklauso nuo įvairių veiksnių: nuo aplinkos, kurioje vyksta medžiagos apdirbimas lazerine spinduliuote, lazerio parametrų – impulso trukmė, energija, impulsų pasikartojimo dažnio bei nuo optinių ir termomechaninių medžiagos savybių [5].



1 pav. Lazerinės spinduliuotės sąveikos su medžiaga mechanizmai [4].

1.2. Lazerinės spinduliuotės atspindys ir sugertis medžiagoje

Krintant elektromagnetinei spinduliuotei į medžiagą, dalis spinduliuotės gali būti atspindėta. Atspindėtos spinduliuotės dalis apibūdinama atspindžio koeficientu R , kuris parodo atspindėtos ir kritusios spinduliuotės dalių santykį. Bendru atveju atspindžio koeficientas gali būti įvertinamas taip:

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

kur n_1 – terpės, iš kurios krinta lazerinė spinduliuotė, lūžio rodiklis, κ_1 – tos pačios terpės ekstinkcijos koeficientas, n_2 – terpės, į kurią krenta lazerio spinduliuotė, lūžio rodiklis, o κ_2 – jos ekstinkcijos koeficientas. Likusi spinduliuotės dalis patenka į medžiagą. Bendrai, jei nėra sugerties ir sklaidos mechanizmų, ši dalis nusakoma įvedant medžiagos pralaidumą T , kuris lygus praėjusios spinduliuotės ir kritusios spinduliuotės santykiui, o R ir T suma lygi vienetui:

$$R + T = 1. \quad (2)$$

Šviesos sugertis medžiagoje yra apibūdinama sugerties koeficientu α , kuris nusako sugertos galios dydį vienetiniame terpės ilgyje. Jeigu elektromagnetinė spinduliuotė sklinda z kryptimi medžiagoje, tai jos intensyvumo slopinimas dėl sugerties gali būti išreikštas taip:

$$I(z) = I \cdot (1 - R) \cdot \exp(-\alpha z), \quad (3)$$

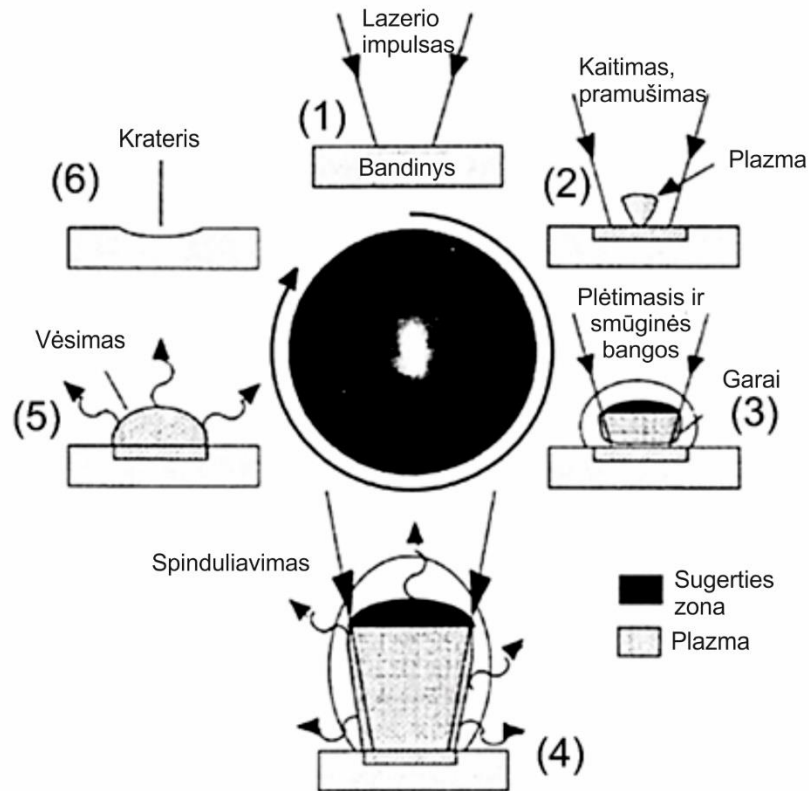
kur I – kritusios ant medžiagos paviršiaus spinduliuotės intensyvumas, o $I(z)$ – intensyvumas prasklidus ilgį z terpėje. Taigi spinduliuotės intensyvumas yra didžiausiais medžiagos paviršiuje, o skverbiantis gilyn į medžiagą, dėl sugerties, mažėja eksponentiškai. Gylio, kuriame spinduliuotės intensyvumas sumažėja e kartų (apie 2,7) yra vadinamas sugerties gyliu L ir yra atvirkščiai proporcingas sugerties koeficientui [6]:

$$L = \frac{1}{\alpha} \quad (4)$$

1.3. Plazmos susidarymas

Reikšmingas procesas atsirandantis dėl spinduliuotės sugerties medžiagoje yra plazmos susidarymas. Plazma - tai aukšto jonizacijos laipsnio garai, kurie susidaro apdirbamos medžiagos garams sąveikaujant su lazerio spinduliuote [4]. Plazma gali sugerti (ekranuoti) didelę dalį krintančios elektromagnetinės bangos energijos. Elektromagnetinės spinduliuotės sugertis plazmoje priklauso nuo plazmos tankio, dydžio, gyvavimo trukmės ir plazmos susiformavimo laiko lazerio impulso pradžios atžvilgiu. Taip pat yra svarbi lazerinių impulsų trukmė: ilgėjant impulsų trukmei, ilgės lazerinės spinduliuotės sąveika su medžiagos garais [7]. Bendru atveju plazmos susidarymas gali daryti neigiamą įtaką apdirbimo proceso kokybei ir spartai [6, 8].

Norint įsivaizduoti plazmos gyvavimo ciklą galima jį išskaidyti į šešias dalis, pavaizduotas 2 paveiksle. Taigi kaip matome paveiksle, medžiaga sugeria lazerio spinduliuotę (1), prasideda medžiagos kaitimas ir garavimas. Lazerio spinduliuotei jonizuojant garus atsiranda plazma (2). Toliau plazma pradeda ekranuoti lazerio spinduliuotę, ją sugeria, kaista ir plečiasi (3, 4). Pasibaigus lazerio impulsui plazma vėsta (5) ir galiausiai išnyksta (6). Mikroapdirbime svarbios plazmos sukuriamos smūginės bangos, kurios padeda pašalinti išabliuotą medžiagą iš apdirbimo srities. Šios bangos yra plazmos plėtimosi kuriamo slėgio pasekmė [9].



2 pav. Lazeriu ant bandinio suformuotos plazmos gyvavimo ciklas [5].

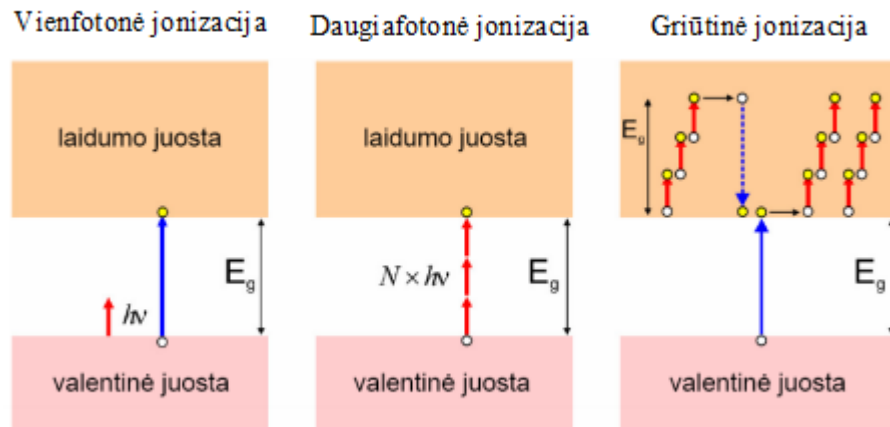
1.4. Spinduliuotės sąveika su skaidria medžiaga

Skaidrios medžiagos kaip, pavyzdžiui, stiklas yra dielektrikai. Jie pasižymi tuo, kad dielektrikų laidumo juosta yra tuščia, o valentinė juosta pilnai užpildyta. Dielektrikų abliacija paremta laisvųjų krūvininkų generavimu ir elektromagnetinės spinduliuotės sugertimi juose. Dėl to, valentinės juostos elektronams reikia suteikti energijos kiekį, reikalingą perkelti elektroną iš valentinės į laidumo juostą, lygų draustiniam energijų tarpui. Tam yra keli mechanizmai: tiesinė jonizacija, kai sugeriamas draustinis energijos tarpas atitinkantis (arba didesnės energijos) fotonas, daugiafotonė jonizacija, kai sugeriami N vienodų fotonų arba griūtinė jonizacija (žr. 3 pav.). Dažniausiai, draustinės energijos tarpas

dielektrikuose yra didesnis nei lazerinės spinduliuotės fotono energija ir tiesinės sugerties pagalba elektrono išlaisvinimas neįvyks, nes:

$$\frac{h\omega}{2\pi} < E_g, \quad (5)$$

čia $\frac{h\omega}{2\pi}$ – fotono energija, kur h yra Planko konstanta, o ω – bangos virpesių dažnis, E_g – draustinės juostos plotis. Tačiau, tokioms medžiagoms sąveikaujant su didesnio intensyvumo spinduliuote gali prasidėti minėtos daugiafotonė ar griūtinė jonizacijos, kurių metu būtų išlaisvinti elektronai. Šių procesų metu pasiekiamas kritinis krūvininkų tankis ir įvyksta medžiagos optinis pramušimas, o dielektrikas laisvųjų optinėmis savybėmis tampa panašus į laidininką. Dėl tolimesnės medžiagos ir spinduliuotės sąveikos, medžiaga šyla ir galiausiai įvyksta faziniai medžiagos virsmai [6].



3 pav. Fotonų sugerties ir elektronų išlaisvinimo mechanizmai [6].

1.5. Daugiafotonė sugertis

Daugiafotonės sugerties atveju, vienu laiko momentu įvyksta N vienodų fotonų sugertis (žr. 3 pav.). Šis procesas tampa svarbus, kai medžiagos draustinės juostos tarpas yra didesnis už fotono energiją ir todėl negali vykti tiesinė sugertis. Taigi daugelio fotonų absorbcijai vykti turi galioti sąlyga:

$$N \frac{h\omega}{2\pi} \geq E_g \quad (6)$$

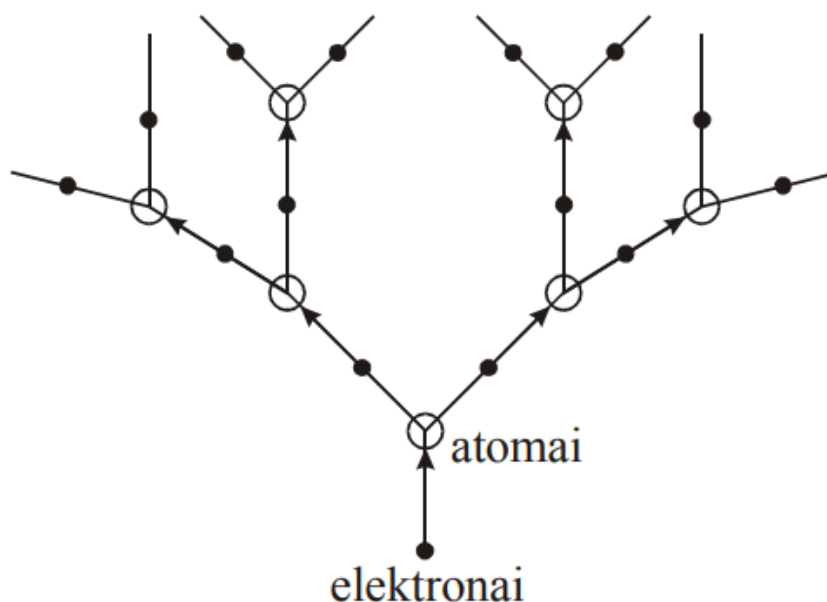
Kvantiniu požiūriu elektrono perkėlimą iš valentinės į laidumo juostą galima aiškinti remiantis pagalbine sąvoka - virtualiais energijos lygmenimis. Valentinėje juostoje esantis elektronas sugerdamas kiekvieną iš N fotonų pakyla į vis aukštesnę virtualią būseną (būseną, kurios gyvavimo trukmė yra žymiai mažesnė nei realaus lygmens) ir, galiausiai, yra išlaisvinamas. Procesio sparta arba tikimybė $P(I)$ užrašoma kaip:

$$P(I) = \sigma_N I^N. \quad (7)$$

Čia I – lazerinės spinduliuotės intensyvumas, σ_N – daugiafotonės sugerties koeficientas arba tiesiog šuolio skerspjūvis. Iš (7) formulės galime pastebėti antrą sąlygą reikalingą įvykti daugiafotonei sugerčiai - tai yra pakankamas intensyvumas I . Nors esant bet kokiam intensyvumui sugerties tikimybė yra nelygi nuliui, tačiau būtinas pakankamai didelis spinduliuotės intensyvumas netiesinei sugerčiai vyrauti. Tai yra siejama su sugerties koeficientu σ_N , kuris mažėja didėjant fotonų skaičiui N [10]. Dėl šio mažėjimo yra laikoma, kad daugiafotonė sugertis yra galima tik kai $N < 7$, tai yra lazerio spinduliuotės bangos ilgiams, kurių fotonų energija yra pakankamai aukšta [6].

1.6. Griūtinė jonizacija

Griūtinė jonizacija vyrauja, kai medžiaga yra veikama lazerio impulsais, kurių trukmės didesnės nei 100 fs [10]. Šis mechanizmas remiasi tuo, kad medžiagoje esantys laisvieji elektronai savo energijos pagalba jonizuoja atomus (vyksta smūginė jonizacija) ir, tokiu būdu išlaisvina elektronus. Prasidėti griūtiniai jonizacijai yra būtini laisvieji elektronai. Nors idealaus dielektriko laidumo juostoje nėra krūvininkų, bet realiomis sąlygomis jų ten gali atsirasti dėl dielektrike esamų priemaišų, taip pat ir dėl tiesinės ar terminės priemaišų jonizacijos [10].



4 pav. Griūtinės jonizacijos schema [11].

Laisvieji elektronai gali turėti pakankamą energiją netampriai sąveikauti su medžiagos atomais. Elektronui sugėrus fotoną smarkiai išauga atomo jonizacijos tikimybė. Netamprios sąveikos metu didelės energijos elektronas e^- jonizuoja atomą A ir, tokiu būdu iš atomo išlaisvina elektroną. Po sąveikos elektronų skaičius padvigubėja (žr. 4 pav.):

$$e^- + A \rightarrow 2e^- + A^+. \quad (8)$$

Tokio proceso metu laidumo juostoje esančio elektrono energija yra panaudojama būtent naujų elektronų generavimui. Neatsižvelgiant į elektronų difuziją iš sąveikos zonos, jų rekombinaciją ar kitas galimas netamprus smūgio baigtis kaip, pavyzdžiui, atomo sužadinimą, kurie lemia laisvųjų elektronų dalyvaujančių smūginėje jonizacijoje mažėjimą (nuostolius), galime užrašyti elektronų N_e kitimo lygtį:

$$\frac{dN_e}{dt} = \vartheta_e N_e, \quad (9)$$

kur ϑ_e – jonizacijos dažnis, kuris priklauso nuo laiko per kurį elektronas įgyja energiją, lygią atomo jonizacijos energijai, o t – laikas. Šios lygties sprendinys yra eksponentinė funkcija, kur N_{e0} yra pradinis laisvųjų elektronų skaičius:

$$N_e = N_{e0} \exp(\vartheta_e t). \quad (10)$$

Šis eksponentinis elektronų skaičiaus augimas, tai yra grandininė smūginė jonizacija, yra bendrai vadinama griūtine jonizacija (žr. 3, 4 pav.). Laisvųjų elektronų tankiui pasiekus kritinę vertę medžiaga taps smarkiai sugeriančia fotonus, ir tai yra vadinama optiniu medžiagos pramušimu [6, 10].

1.7. Slenkstinė pažaidos vertė

Netiesinės fotonų sugerties ar griūtinės jonizacijos metu dielektrike daugėja laisvųjų elektronų. Optinis medžiagos pramušimas prasideda, kai šių elektronų skaičius pasiekia kritinį tankį, kuris sutampa su kritiniu plazmos tankiu. Kritinis plazmos tankis N_{kr} pasiekiamas, kai plazmos dažnis sutampa su elektromagnetinės spinduliuotės dažniu ω :

$$N_{kr} = \frac{\omega^2 m \varepsilon_0}{e^2}, \quad (11)$$

kur ε_0 – vakuumo dielektrinė skvarba, m – elektrono masė, e – elektrono krūvis. Laisvųjų elektronų skaičius įsisotina ties šia verte, o medžiaga virsta stipriai spinduliuotę sugeriančia medžiaga. Toliau sugeriant fotonus medžiaga kaista ir, galiausiai, gali prasidėti medžiagos faziniai virsmai. Taigi galima laikyti, kad optinis medžiagos pramušimas yra slenkstinis procesas, kuris įvyksta viršijus mažiausią reikalingą lazerinės spinduliuotės tankį (slenkstinį tankį F_{th}), kuriam esant yra pasiekiamas kritinis plazmos tankis ir prasideda negrįžtamas medžiagos pažeidimas [6].

2. Stiklo pjovimo būdai

Stiklų lazeriniam apdirbimui yra taikomos įvairios technologijos. Kelios iš plačiausiai taikomų yra tiesioginė abliacija (plazminis garinimas [6]), pjovimas iš apatinės stiklo pusės [10] bei trūkių generavimas medžiagoje [12].

Pjovimas iš apatinės bandinio pusės yra pasiekiamas lazerinę spinduliuotę fokusuojant per bandinį ir pjaunant medžiagą nuo bandinio apačios (žr. 5 pav.). Šio proceso didelė sparta pasiekama išnaudojant lazerinės spinduliuotės energiją medžiagai išskaldyti, o ne ją lydyti ir garinti. Lazerine spinduliuote medžiagoje yra generuojami trūkiai, medžiaga išskaldoma ir pašalinama kietoje būsenoje [13]. Papildomai, abliacijos produktai iškrenta priešingoje pusėje nei lazerinė spinduliuotė patenka į apdirbimo sritį. Plazma irgi susidaro kitoje pusėje, todėl didesnę proceso spartą lemia mažesnis spinduliuotės ekranavimas plazma ir abliacijos produktais [10].

Kita dideliu proceso greičiu pasižyminti technologija yra trūkių generavimas stiklo tūryje (žr. 5 pav.). Šia technologija yra siekiama sugeneruoti kontroliuojamus stiklo pažeidimus tūryje – skylimus, per kuriuos stiklas būtų mechaniškai perlaužiamas [12]. Lyginant su tiesiogine abliacija, tokio pjovimo sparta didesnė, nes nereikia išgarinti medžiagos, taip pat nesusidaro nuolaužos, o pjūvio sienelių apskeldėjimai yra minimalūs. Dėl to gaunama aukšta pjūvių kokybė.

Tačiau abi paminėtos technologijos turi trūkumų. Pjaunant iš apatinės pusės yra gaunami dideli trūkiai, kurie gali siekti iki 400 μm . Kitas metodas neleidžia pjauti sudėtingos geometrijos elementų. Galiausiai, abu metodai yra netinkami pjauti dalinai skaidrius ar spinduliuotę stipriai sugeriančius stiklus, bei stiklus padengtus atspindinčiomis dangomis [13].

Tiesioginės abliacijos metu medžiaga yra pašalinama ją išgarinant pasluoksniui, pradedant nuo viršutinio detalės paviršiaus (žr. 5 pav.). Nepaisant pagrindinio tiesioginės abliacijos trūkumo – mažos spartos, tiesioginė abliacija išlieka perspektyviausia pjauti sudėtingos geometrijos ir mažo dydžio dalinai ar stipriai sugeriančius spinduliuotę stiklus arba stiklus padengtus atspindinčiomis dangomis [14]. Būtent tokių elementų pjovimo paklausa sparčiai auga kompaktiškose optinėse sistemose. Papildomai, tiesioginė abliacija pasižymi ženkliai aukštesne pjūvio kokybe, lyginant su pjovimu iš apatinės pusės. Šio metodo sparta, palyginus su kitais minėtais metodais yra ženkliai mažesnė, nes medžiaga yra pašalinama ją išlydant ar išgarinant. Sparta taip pat kenčia dėl kanalų užsikimšimo nuolaužomis, nuolaužų perlydimo atgal į darbinę zoną ir plazmos ekranavimo. Šioms problemoms spręsti yra pademonstruota, kad vandens panaudojimas gali ženkliai padidinti tiesioginės abliacijos spartą išsaugant aukštą apdirbimo kokybę [1, 3].



5 pav. Stiklų lazerinio apdirbimo technologijos.

3. Vandens įtaka lazeriniam apdirbimui

3.1. Vandens panaudojimo nauda

Vandens panaudojimo lazeriniame procese nauda pasireiškia medžiagos pjovimo spartos ir apdirbimo kokybės padidėjimu [2]. Sartos didėjimui įtakos turi didesnis susiformavusios plazmos slėgis, dėl kurio susidaro stipresnės smūginės bangos bei vandens sprogtamasis garavimas. Šie efektai padeda efektyviau pašalinti abliacijos nuolaužas (žr. 1 lentelę) [15]. Abliacijos produktų pašalinimas yra nulemtas skystyje vykstančių procesų, tokių kaip skysčio cirkuliacija dėl šiluminės konvekcijos [16].

Lentelė 1. Vandens panaudojimo lazeriniame medžiagų apdirbime privalumai ir trūkumai [15].

Privalumai	Trūkumai
Didesnis plazmos slėgis	Šviesa sugerama vandenyje
Didesnė šiluminė talpa	Šviesa gali būti sklaidoma vandens paviršiaus, burbulų
Didesnis šiluminis laidumas	Galios praradimas dėl geresnio aušinimo
Konvekcija ir sprogtamas garavimas padeda pašalinti nuolaužas	Kavitacijos burbulų susidarymas ir egzistavimo laikas
Sumažinamas atmosferos teršimas medžiagos garais ir aerozoliais	Galima metalų korozija, vandens garai pavojingi elektronikai, drėgmei jautrioms medžiagoms

Kokybės atžvilgiu, svarbus vandens privalumas, tai gebėjimas efektyviau nei dujos (oras) aušinti medžiagos paviršių [14]. 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 W/m/K) yra didesnis nei oro (0,024 W/m/K), kuris leidžia greičiau nuvesti šilumą nuo bandinio. Tokiu būdu apdirbama detalė mažiau kaista, mažėja šiluminiai įtempiai detalėje [17].

Vandens panaudojimas turi ir trūkumų (žr. 1 lentelę). Vandens sluoksnis gali dalį šviesos išsklaidyti bei sugerti. Taip pat galimas pjovimo spartos sumažėjimas dėl geresnių vandens aušinimo savybių bei kavitacijos burbulų susidarymo, kas irgi gali padidinti spinduliuotės skaidą [16]. Visgi yra

pastebėta, kad vandens suteikiami privalumai atsveria trūkumus. Sudarant ant medžiagos paviršiaus vandens sluoksnį, yra gaunama geresnė apdirbimo sparta bei kokybė nei ore [1, 2, 13]. Pavyzdžiui, [2] šaltinyje femtosekundiniu lazeriu buvo gręžiamas silicis (impulsų trukmė 130 fs, 1 kHz dažnis, 3,5 mJ energija) ir buvo gauta, kad sudarant vandens sluoksnį ant bandinio paviršiaus, skylių gyliai buvo didesni ~2,5 karto, lyginant su rezultatais gautais oro sąlygomis. Kokybė buvo geresnė gręžiant pro vandens sluoksnį, tai yra buvo gaunami lygesnių sienelių kanalai.

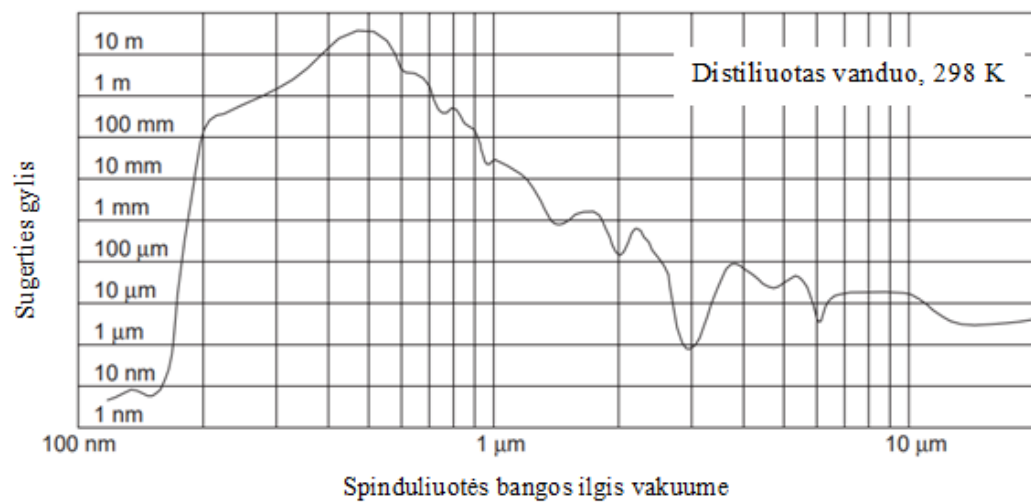
3.2.

3.2. Spinduliuotės sklidimas vandeniui

Aukštai lazerinio mikroapdirbimo spartai išlaikyti yra svarbu, kad vanduo kuo mažiau sugertų lazerinės spinduliuotės. Vadinasi, tuo didesnė jos dalis pasieks medžiagą. Kaip parodyta A. Kruusing straipsnyje [15], vanduo pasižymi mažiausia elektromagnetinės spinduliuotės sugertimi regimosios šviesos ir artimojoje infraraudonųjų bangų srityse (žr. 6 pav.). Nesunkiai galima apskaičiuoti lazerio spinduliuotės intensyvumą vandens sluoksnyje remiantis (2) formulę:

$$I(z) = I_0 \exp\left(-\frac{z}{L}\right), \quad (12)$$

kur L – sugerties gylis, $I(z)$ – spinduliuotės intensyvumas prasklidus ilgį z vandenyje, o I_0 – pradinis spinduliuotės intensyvumas. Norint įvertinti kiek kartų sumažėjo intensyvumas praėjus z ilgio kelią vandenyje, užtenka suskaičiuoti $\frac{I_0}{I(z)}$ santykį [15].

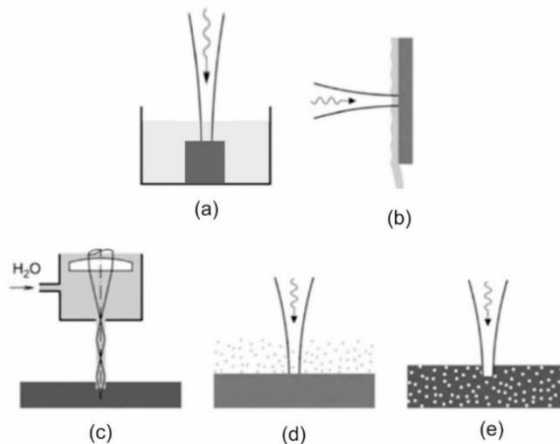


6 pav. Sugerties gylis, kambario temperatūros vandenyje, priklausomybė nuo kritusios lazerinės spinduliuotės bangos ilgio [14].

3.3. Vandens tiekimo būdai

Per ilgą eksperimentavimo laikotarpį buvo išvystyta įvairių vandens tiekimo į darbinę zoną būdų kaip bandinio panardinimas, judančio vandens sudarymas aerografu ar nuožulnia plokštuma, spinduliuotės sklidimas vandens čiurkšle ir kt. [16]. Plačiausiai naudojamas būdas – bandinio panardinimas po vandeniu, nes tai yra paprasčiausias ir pigiausias variantas. Kita vertus, „stovintis“ vanduo ilgesniuose procesuose išyla ir galiausiai gali užvirtti. Šylantis vanduo mažintų apdirbamos detalės aušinimo efektyvumą, o vandens virimas galėtų lemti padidėjusią lazerinės spinduliuotės sklaidą.

Kitas dažnai naudojamas būdas yra vandens srauto sudarymas [16]. Šiam metodui reikia užtikrinti nuolatinį vandens tiekimą. Srauto šaltiniu gali būti nuožulni plokštuma (gravitacinis būdas), aerografas, purškiantis vandens miglą, ar slėginis vandens srauto sudarymas siurbliu uždaroje sistemoje. Pastarasis tinkamas esant apatinės bandinio pusės abliacijai. Galimi vandens panaudojimo būdai lazeriniame procese yra pateikti 7 pav.:



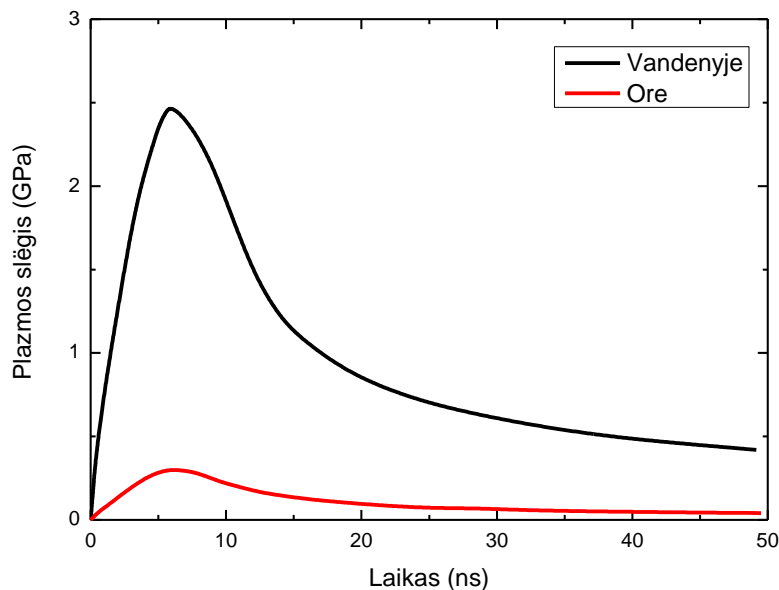
7 pav. Vandens tiekimo būdai: (a) bandinys panardintas vandenyje, (b) vandens srauto sudarymas, (c) lazerinės spinduliuotės sklidimas vandens čiurkšle, (d) abliacija vandens garuose, (e) medžiagos, kuri savyje yra sugėrusi vandenį, abliacija [16].

3.4. Plazmos smūginės bangos

Lazerinės abliacijos metu yra garinama medžiaga. Garams sugeriant lazerio spinduliuotę šie šyla ir jonizuojasi, tai yra virsta plazma. Plazma toliau sugerdama energiją sparčiai plečiasi generuodama smūginės bangas, kurios padeda pašalinti abliacijos produktus iš lazerinio apdirbimo srities [8].

Ant bandinio sudarant vandens sluoksnį susiformuoja mažesnė, tačiau didesnio tankio plazma. Tai lemia 4 – 10 kartų didesnę plazmos slėgį nei ore, o kartu ir stipresnes smūginės bangas (žr. 8 pav.) [16]. Taip pat yra pastebėta, kad sudarant vandens sluoksnį gali pailgėti laiko tarpas tarp lazerio

impulso sąveikos su medžiaga pradžios ir plazmos susidarymo iki 5 ns. Vėlesnis plazmos susiformavimas leidžia sumažinti lazerinės spinduliuotės nuostolius dėl spinduliuotės ekranavimo plazma [8]. Apibendrinant, vandens sluoksnio panaudojimas turėtų padidinti medžiagos abliacijos spartą.



8 pav. Suskaičiuota plazmos slėgio kitimo dinamika apdirbamos medžiagos paviršiuje [16]. Modeliuoti du atvejai – medžiaga yra panardinta vandenyje ir medžiaga yra patalpinta oro aplinkoje. Lazero pluošto dėmės skersmuo 0,75 mm, o energijos tankis 22,6 J/cm²

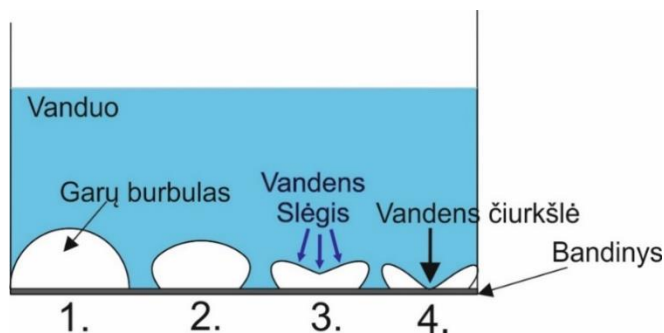
3.5. Kavitacijos burbulai

Abliuojant vandens sluoksniu padengtas medžiagas yra svarbus kavitacijos burbulų susidarymas bei suirimas [8]. Lazerinei spinduliuotei sąveikaujant su vandeniu jis šyla, garuoja, o galiausiai susiformuoja plazma. Dėl didelės plazmos temperatūros aplink ją pradeda garuoti vanduo. Šylant plazmai didėja jos slėgis ir ji sparčiai plečiasi. Po sąveikos su lazerio spinduliuote ji vėsta, o jos vieta užima kavitacijos burbulas, užpildytas vandens ir medžiagos garais. Teoriškai šį burbulą būtų galima įsivaizduoti kaip tuščiaavidurę sferą aprašoma pagal Reilėjaus modelį, jeigu tarsime, kad vandens slėgis ir burbule susidarantis slėgis yra nekintantis burbulo yrimo metu [18]. Galiausiai, burbulas pasiekęs maksimalų savo tūrį suyra ir atsiranda vandens čiurkšlė - tam tikras judesio kiekis nukreiptas statmenai į bandinį, tokiu būdu padidindamas abliacijos produktų pašalinimo greitį. Reilėjaus suirimo trukmė – laikas nuo burbulo susidarymo iki suirimo:

$$T_c = 0,951R_{max}\sqrt{\frac{\rho}{p_0}}, \quad (13)$$

čia ρ – vandens tankis, p_0 – vandens slėgis, o R_{max} – kavitacijos burbulo maksimalus spindulys [18]. Vandens aplinkoje abliuojant medžiagą tokie burbulų susidarymai gali lemti, kad dalį laiko medžiaga bus abliuojama ne pro vandens sluoksnį, bet per dujų burbulą.

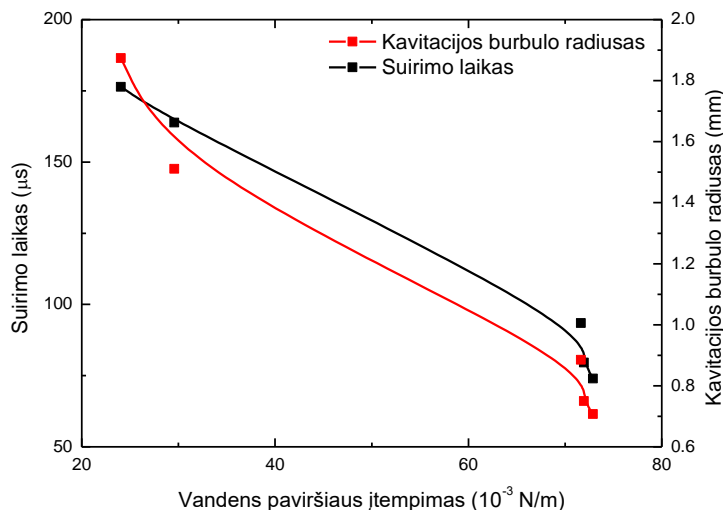
Kavitacijos burbulai abliacijos metu gali turėti ir teigiamą, ir neigiamą įtaką pjovimo spartai ir kokybei. Kaip buvo minėta, susidarantis burbulas prie bandinio paviršiaus (žr. 9 pav.) yra vandens ir medžiagos garai, todėl gali sumažėti medžiagos aušinimas, taip pat toje vietoje plazmos smūginės bangos bus silpnesnės bei ji gali susiformuoti anksčiau. Kita vertus, suirstant burbului susidaro didelio slėgio vandens čiurkšlė (žr. 9 pav.), kuri gali padidinti abliacijos spartą, pašalinant medžiagos dalį iš apdirbimo srities.



9 pav. Kavitacijos burbulo suirimas. Pasidalinant burbului susidaro vandens čiurkšlė nukreipta į bandinį. Paveiksle sunumeruotos burbulo gyvavimo stadijos nuo sferos susidarymo iki suirimo (1 - 4) [19].

Vienas iš pagrindinių veiksnių nustatantis kavitacijos burbulo dydį ir jo gyvavimo laiką, yra skysčio, kuriame jis susidaro, paviršiaus įtempis. Šis parametras turi įtakos maksimaliam burbulo skersmeniui ir jo suirimo trukmei T_c . Šaltinyje [20] buvo atlikti vario plokštelės abliacijos eksperimentai siekiant nustatyti susiformuojančių burbulų spindulio ir gyvavimo trukmės priklausomybę nuo skysčio paviršiaus įtempio. Eksperimentų metu buvo naudojamas 10 ns impulsų trukmės ir 1064 nm spinduliuotės bangos ilgio lazeris, kurio pluoštas buvo sufokusuotas į vario plokštelę. Bandymai atlikti su penkiais skirtingų paviršiaus įtempių skysčiais. Gauti rezultatai (žr. 10 pav.) rodo, kad didėjant skysčio paviršiaus įtempiui mažėja burbulų dydis bei trumpėja jų suirimo trukmė. Pastebėta, kad distiliuotame vandenyje, kurio paviršiaus įtempis esant 25°C yra 0.073 N/m, susidarančio burbulo maksimalus skersmuo gali būti apie 1,4 mm, o suirimo trukmė siekti iki 80 μ s (vandens sluoksnio storis eksperimento metu buvo ~150 mm). Taigi, didinant lazerio dažnį, vis daugiau impulsų yra išaunama dar neiširus kavitacijos burbului, todėl vis daugiau impulsų sąveikauja su

medžiaga ne pro skystį, o pro dujas. Tai gali lemti suprastėjusį detalės aušinimą, sumažėjusią abliacijos produktų pašalinimo spartą bei apdirbimo kokybę.



10 pav. Burbulo suirimo laiko (juoda linija) ir maksimalaus jo spindulio (raudona linija) priklausomybė nuo skysčio paviršiaus įtempimo [19].

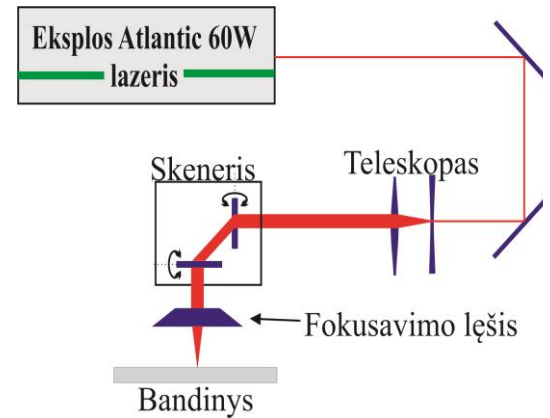
4. Įranga ir metodika

4.1. Įranga

Darbe buvo naudojamas pikosekundinis diodu kaupinamas kietakūnis Nd:YVO₄ lazeris Atlantic 60 W (Ekspla). Buvo naudojama 1064 nm bangos ilgio spinduliuotė. Pluošto pozicionavimas bandinio x ir y kryptimis buvo atliekamas IntelliSCAN 14 galvanometriniu skeneriu, o z kryptimi - Aerotech pozicionavimo sistema. Lazero galia matuota Nova II Ophir matuokliu. Eksperimentai atlikti su 0,4 mm storio borosilikatiniu (D263M) ir 1 mm storio SLG (angl. *soda-lime glass*) silikatiniais stiklais ore ir pro vandens sluoksnį. Vandens sluoksnis buvo suformuotas dviem būdais: purškiant vandens miglą aerografu (į aerografą buvo tiekiamas iki 2 atmosferų suslėgtas oras, suformuota plona tekanti vandens plėvelė) ir panardinus bandinį stovinčiame vandenyje. Lazeris, pluošto pozicionavimas, pozicionavimo staliukas buvo valdomi kompiuteriu (SCA programiniu paketu). Bandinių nuotraukos darytos optiniu mikroskopu BX51 (Olimpus), skenuojančiu elektronų mikroskopu (SEM) JSM-6490LV (JEOL). Pjūvių profiliai matuoti perlaužiant bandinį pusiau ir dedant jį po optiniu mikroskopu. Išpjautų vagų kraštų šiurkštumai išmatuoti Dektak 150 (Veeco) adatinis profilometru. Eksperimentinės įrangos charakteristikos bei schema pateiktos 2 lentelėje ir 11 paveiksle.

Lentelė 2. Lazerinės sistemos parametrai.

Sistemos parametrai (Lazeris Atlantic 60W)	Informacija
Bangos ilgis	1064 nm
Impulso trukmė	10 ps
Pasikartojimų dažnis	400 kHz - 1 MHz
Pluošto pozicionavimas	IntelliSCAN 14
Bandinio pozicionavimo sistema z kryptimi	Aerotech
Pluošto spindulys sąsmaukoje	13,3 μm (ore)
Objektyvas	100 mm
Aerografo darbinis slėgis	2 atmosferos



11 pav. Eksperimento schema.

4.2. Stiklo pažeidimo slenkščio radimas

Abliacijai vykti reikia, kad medžiaga sugertų fotonų skaičių tūrio vienetė, viršijantį ribinę vertę, t. y. slenkstį. Kitaip tariant, įskaitant visus lazerio spinduliuotės galimus nuostolius energijos tankis paviršiuje turi pasiekti ribą – slenkstinį energijos tankį F_{th} (ablacijos slenkstis), kuris priklauso nuo medžiagos savybių ir lazerio spinduliuotės parametru kaip, pavyzdžiui, spinduliuotės bangos ilgis ar lazerio impulso trukmė.

Šiame darbe ablacijos slenkstis buvo nustatomas eksperimentiškai iš santykio tarp bandinio paviršiuje suformuotų kraterių skersmens ir impulsų energijos. Mažinant impulsų energiją iki ribos, kada paviršius nebebuvo pažeidžiamas, gauti krateriai, kurių skersmenys buvo išmatuoti optiniu mikroskopu. Žinant lazerio galią ir impulsų pasikartojimo dažnį galima apskaičiuoti lazerinio impulso energiją E_p :

$$E_p = \frac{P}{\vartheta}, \quad (14)$$

kur P – lazerio galia, ϑ – impulsų pasikartojimo dažnis. Atidėjus $D^2(\ln(E_p))$ priklausomybę ir ją aproksimavus tiese, (iš tos tiesės polinkio) nustatome pluošto skersmenį sąsmaukoje, t. y. tiesės polinkis lygus pluošto skersmeniui:

$$tg(\varphi) = 2\omega_0, \quad (15)$$

kur φ – tiesės polinkio kampas, o ω_0 – lazerio pluošto spindulys sąsmaukoje. Žinant ω_0 gauname energijos tankį iš sąryšio:

$$F = \frac{2 \cdot E_p}{\pi \cdot \omega_0^2} \quad (16)$$

Galiausiai, atidedama priklausomybė $D^2(\ln(F))$ ir aproksimuojama tiese. Ekstrapoliavus šią tiesę į nulį, gauname abliacijos slenkstį – energijos tankį nuo kurio prasideda medžiagos pažeidimas [21].

4.3. Savitoji abliacijos sparta ir prapjovimo greitis

Vienas pagrindinių stiklų pjovimo pramonės reikalavimų yra itin aukšta sparta. Šiam tikslui pasiekti šiame darbe atliktuose eksperimentuose buvo optimizuoti lazerinės sistemos parametrai ieškant maksimalių stiklo prapjovimo greičio ir savitosios abliacijos spartos verčių. Prapjovimo greitis, tai lazerinio pluošto skenavimo greičio ir skenavimų skaičiaus, reikalingo prapjauti stiklą, santykis. Tuo tarpu, savitoji abliacijos sparta yra lygi pašalintos medžiagos tūriui V [mm³] per laiko vienetą t [min] esant tam tikrai lazerio galiai P [W] [22]:

$$\eta = \frac{V}{t \cdot P} \quad (17)$$

Išpjautų vagų tūriai buvo apskaičiuojami kaip vagos skerspjūvio ploto ir jos ilgio sandauga. Pagal gautus tūrius buvo apskaičiuojamos savitosios abliacijos spartos η priklausomybė nuo lazerinės spinduliuotės energijos tankio [21].

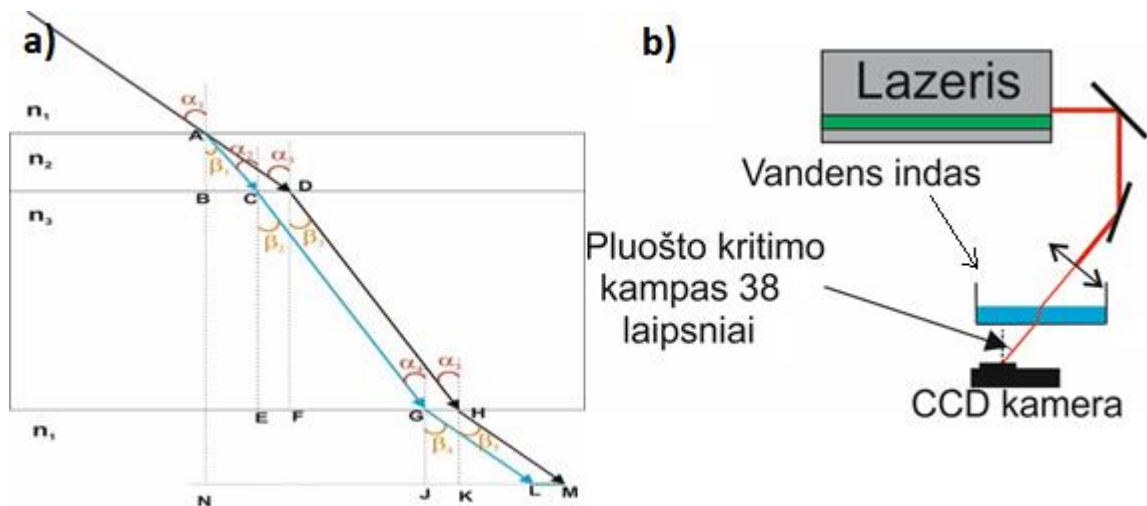
4.4. Vandens sluoksnio storio matavimai

Aerografu purškiant vandens miglą buvo suformuojamas plonas tekančio vandens sluoksnis. Tam, kad išmatuoti šio vandens sluoksnio storį, buvo pasinaudota šviesos lūžio dėsnio, kuris teigia, kad šviesai sklindant iš vienos aplinkos į kitą, kurių lūžio rodikliai skiriasi – skiriasi ir šviesos kritimo bei lūžio kampai. Taigi, šviesai sklindant pro stiklo plokštelę ir stiklo plokštelę padengtą plonu vandens sluoksniu, atsiranda šviesos pluošto poslinkis, kuris priklauso nuo vandens sluoksnio storio (žr. 12a pav.).

Šviesos kritimo ir lūžio kampai gali būti apskaičiuoti remiantis Snelio dėsniu:

$$\frac{\sin(\alpha)}{\sin(\beta)} = \frac{n_k}{n_i} \quad (18)$$

kur α – lazerio pluošto kritimo kampas, β – spinduliuotės lūžimo kampas, n_k – terpės į kurią krinta spindulys lūžio rodiklis, n_i – terpės iš kurios krinta spindulys lūžio rodiklis. Poslinkis buvo išmatuotas CCD kamera, o eksperimento schema pavaizduota 12b paveiksle.



12 pav. (a) Stiklo ir vandens sluoksnių schema su pavaizduotu lazerio pluošto keliu bei poslinkiu. $n_1 < n_2 < n_3$ – terpių lūžio rodikliai. α_i – spindulio kritimo kampai, kur $i \in [1;5]$, β_i – spindulio lūžimo kampai, kur $i \in [1;5]$, $\triangle ABC$, $\triangle ABD$, $\triangle CEG$, $\triangle DFH$, $\triangle GJL$, $\triangle HKM$ – statieji trikampiai. (b) Vandens plėvelės storio matavimo eksperimento schema.

Terpėje įvykusio spindulio lūžio kampas priklauso nuo lūžio rodiklių n_i ir kritimo kampo α , o lūžimo kampas lygus kritimo kampui toje pačioje terpėje, t. y. $\alpha_2 = \beta_1$. Pritaikius Snelio dėsnį (18) galime gauti visus reikiamus kritimo ir lūžimo kampus žinant tik pradinį kritimo kampą α_1 ir medžiagų lūžio rodiklius. Medžiagų lūžio rodikliai: stiklo 1,5, vandens 1,33, oro 1 [23]. Stiklas buvo 1 mm storio, o CCD kamera laikoma po stiklu. Spindulio kritimo kampas $\alpha_1 = 38^\circ$. Vandens sluoksnio storis AB (žr. 12a pav.) apskaičiuotas pagal spindulių poslinkį LM (žr. 12a pav.) geometriškai išsivedus formulę:

$$AB = \frac{2 \cdot LM}{\operatorname{tg}(\alpha_1) - \operatorname{tg}(\beta_1)}. \quad (19)$$

Apskaičiuotas vandens storis pagal (19) formulę buvo 220 μm . Matavimų paklaida siekė 7,5 %.

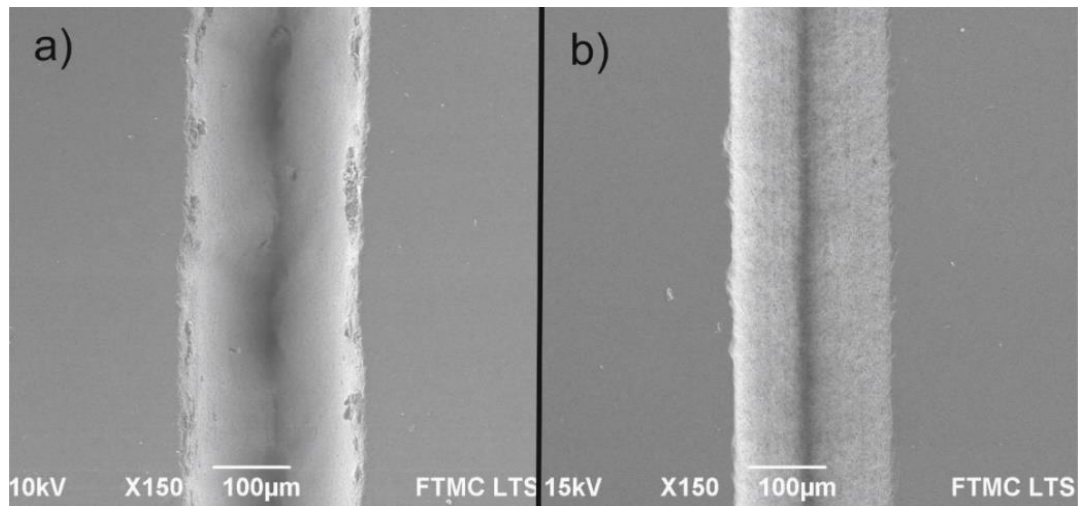
5. Eksperimento rezultatai

5.1. Pjūvio formavimo būdai

Lazeriu pjaunant storas medžiagas sparčiai krinta pjovimo sparta. Tai yra dėl to, kad didėjant pjūvio gylio ir pločio santykiui, mažėja lazerinės spinduliuotės intensyvumas pasiekiantis formuojamo kanalo dugną. Nuostoliai atsiranda dėl lazerinės spinduliuotės atspindžių nuo kanalo sienelių, spinduliuotės ekranavimo plazma. Bendru atveju, pjovimo procesas gali ir sustoti, t.y. vagos ar kraterio gylis įsisotins nepaisant medžiagos pjovimo laiko [24]. Taigi, siekiant prapjauti storesnes nei keli šimtai mikrometrų detales, būtina mažinti kanalo gylio ir pločio santykį. Tą galima padaryti lazeriu

abliuojant platesnius kanalus. Taigi, šiame darbe buvo tiriami du kanalo praplėtimo būdai, tai yra skenavimas gretimomis, lygiagrečiomis linijomis ir skenavimas spirale (angl. wobble).

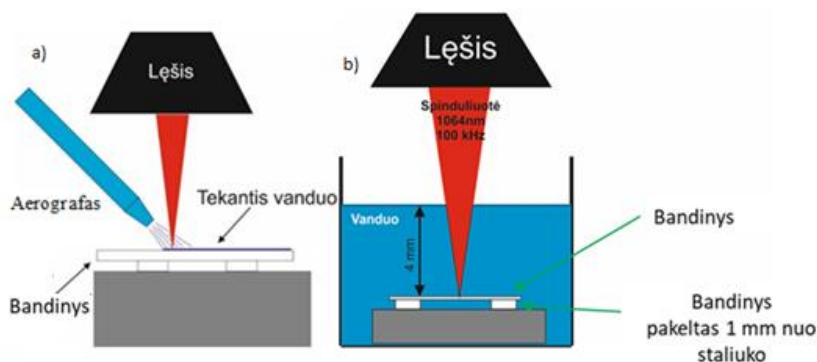
Abiem minėtais metodais ir tomis pačiomis sąlygomis ant stiklo paviršiaus buvo išabliuotos vienodo pločio vagos (žr. 13 pav.). Pagal 4.3 skyriuje aprašytą metodiką buvo skaičiuojamos savitosios abliacijos spartos. Gauta, kad abiem metodais abliacijos spartos buvo panašios, todėl pasirenkant metodą tolimesniems tyrimams buvo remiamasi pjūvių kokybe. Taigi, iš 13 paveikslo matome, kad geresnė vagų kokybė buvo gauta skenuojant gretimas linijas. Galime išskirti, kad 13a paveiksle formuojasi netiesus, vingiuotas dugnas. Išabliuotų kanalų sienelės taip pat buvo banguotos, nes spiralinio pjovimo metu, dėl vienoje pusėje susidarantių kilpų, lazerio pluoštas netolygiai persidengė išilgai pjūvio. Tuo tarpu, 13b paveiksle formuojant vagą gretimomis linijomis gautas tiesus kanalo dugnas bei švaresni kraštai. Taigi, tolimesniems eksperimentams buvo pasirinktas tiesių gretimų linijų skenavimo metodas.



13 pav. Vagų išpjautų 1 mm storio stikle su spiralinio pjovimo funkcija (a) ir su gretimomis linijomis (b) SEM nuotraukos.

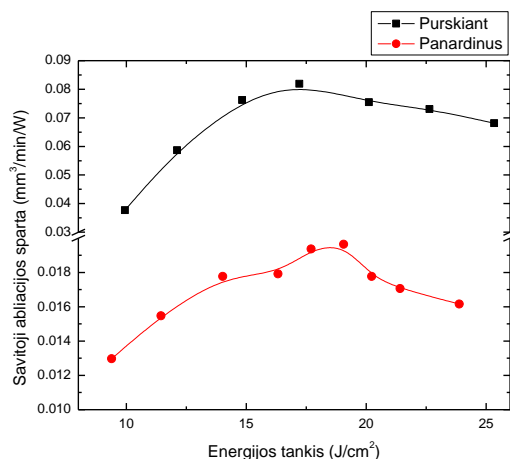
5.2. Vandens tiekimo būdo parinkimas

Toliau, buvo ieškomas optimalus vandens tiekimo į abliacijos sritį metodas, užtikrinantis didžiausią abliacijos spartą. Šiame tyrime buvo palyginti du metodai: stovinčio vandens (žr. 14b pav.) ir plonos tekančios vandens plėvelės sudarymas aerografu (žr. 14a pav.). Stovinčio vandens atveju, bandinys buvo panardintas į 4 mm gylį, kuris pagal [1] šaltinį yra artimas optimaliam vandens sluoksnio storiui, ties kuriuo pašalinamas didžiausias medžiagos kiekis. Eksperimente buvo pjaunamos tiesios vagos stiklo paviršiuje. Abiem atvejais skenavimo greitis ir impulsų pasikartojimo dažnis buvo vienodas.



14 pav. Vandens tiekimo į abliacijos sritį metodai: a) vandens sluoksnis sudaromas aerografu, b) stovinčio vandens sluoksnis.

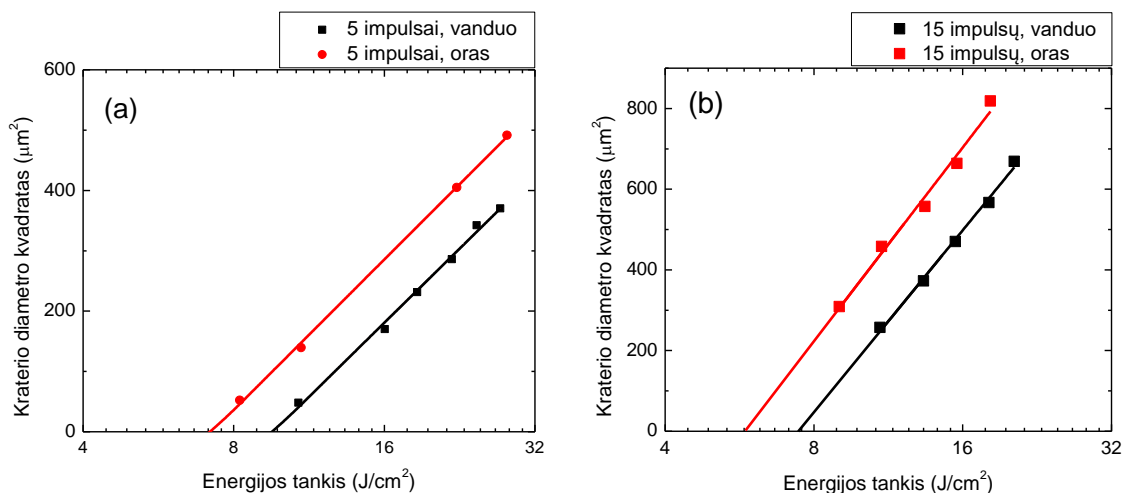
Didžiausia abliacijos sparta buvo gauta sudarant ploną tekančio vandens plėvelę aerografu. Bandinį padengus plona vandens plėvele ties $17,2 \text{ J/cm}^2$ energijos tankiu buvo gauta didžiausia $0,08 \text{ mm}^3/\text{min/W}$ savitoji abliacijos sparta (žr. 15 pav.), kai stovinčio vandens atveju ji buvo $0,02 \text{ mm}^3/\text{min/W}$ ties $19,1 \text{ J/cm}^2$ (žr. 15 pav.). Taigi plonos, judančios vandens plėvelės zonoje savitoji abliacijos sparta buvo, apytiksliai, keturis kartus didesnė. Šį rezultatą būtų galima aiškinti keliais aspektais. Pirma, stovinčio vandens atveju vanduo ties pjaunama vaga užverda (atsiranda burbulai), todėl savitosios abliacijos spartos pokytis galėjo atsirasti dėl spinduliuotės sklaidos kavitacijos burbulais. Antra, judantis vanduo galėjo nulemti tai, kad išabliuota medžiaga buvo sparčiau nunešama iš darbinės zonos, tokiu būdu sumažinant spinduliuotės ekranavimą.



15 pav. Savitosios abliacijos spartos priklausomybė nuo energijos tankio bandinį apipurškiant vandeniu ir panardinant jame.

5.3. Slenkstinė pažaidos vertė

Šio eksperimento metu buvo siekiama surasti mažiausią energijos tankį nuo kurio prasideda stiklo pažeidimas. Bandymai buvo atlikti su 1 mm storio silikatinium ir 0,4 mm storio borosilikatinium stiklais. Storesnio stiklo atveju krateriai stikle buvo suformuoti iššovus penkis impulsus. Gauta, kad ore pažaidos slenkstinė vertė yra mažesnė, tai yra 7,2 J/cm² nei bandinį padengiant vandens plėvele, kur gauta 9,6 J/cm² (žr. 16a pav). Panašus slenkstinės vertės padidėjimas gautas ir su plonesniu stiklu (iššovus 15 impulsų), tai yra sudarius vandens sluoksnį slenkstinė vertė padidėjo nuo 5,8 J/cm² iki 7,4 J/cm² (žr. 16b pav.). Abiem atvejais, slenkstinė pažaidos vertė didėjo vienodai – apie 30 %.



16 pav. Kraterio skersmens kvadrato priklausomybė nuo energijos tankio iššovus 5 impulsus į 1 mm storio silikatinį stiklą (a) ir iššovus 15 impulsų į 0,4 mm storio borosilikatinį stiklą (b).

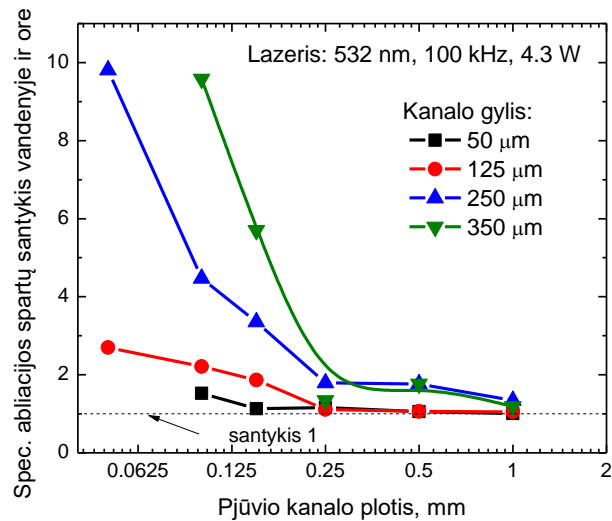
Ant stiklo sudarius vandens sluoksnį slenkstiniai energijos tankiai galėjo padidėti dėl to, kad vandens sluoksnis dalį spinduliuotės galėjo atspindėti, o dalį sugerti dėl netiesinės sugerties esant

dideliam lazerinės spinduliuotės intensyvumui. Iš 16a ir 16b paveikslų matyti, kad dirbant su vandeniu gauti mažesnio skersmens krateriai esant tam pačiam energijos tankiui.

Galiausiai, vandens sluoksnis sklaidė vandeniu sklindantį lazerio pluoštą. Išmatuotas pluošto spindulys sąsmaukoje ore buvo 13,3 μm , o su vandeniu – padidėjo iki 15,4 μm .

5.4. Pjovimo, vandens ir oro sąlygomis, palyginimas

Toliau buvo pjaunami įvairaus pločio ir gylio kanalai 1 mm storio silikatiniam stikle. Atliekant bandymus buvo pastebėta, kad ne visais atvejais vandens panaudojimas lėmė didesnę savitą abliacijos spartą. Esant pakankamai platiems ir negiliems pjūviams stikle, savitosios stiklo abliacijos spartos oro ir vandens aplinkose susilygino.



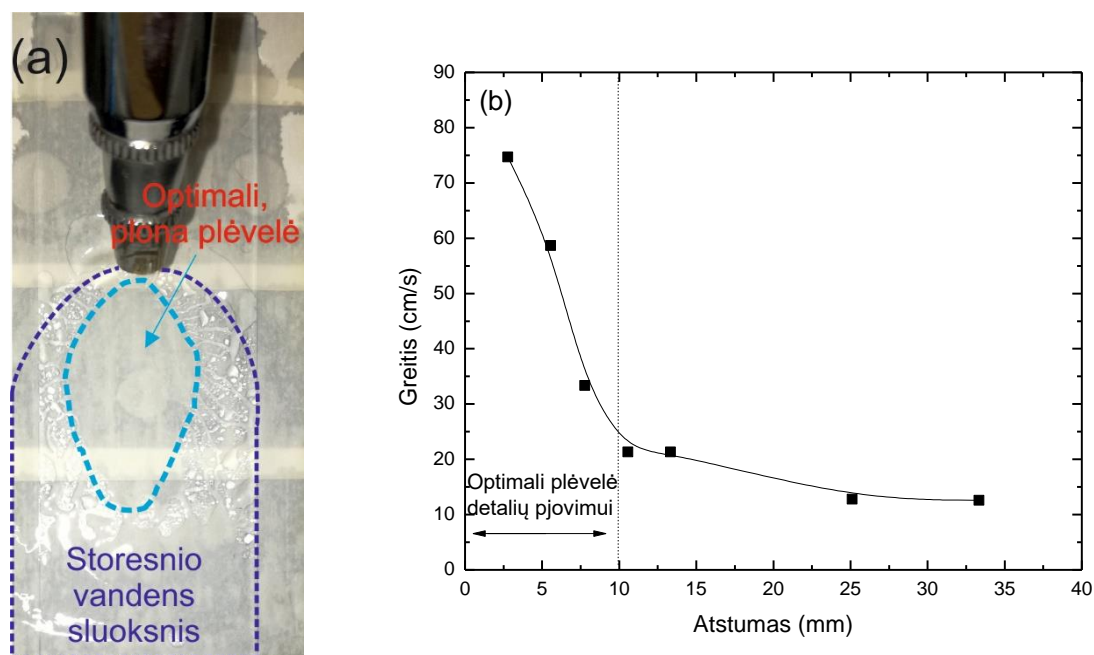
17 pav. Stiklo savitosios abliacijos spartos vandenyje ir ore santykio priklausomybė nuo išabliuoto kanalo pločio. Pateikti santykiai įvairių gylių kanalams.

Buvo ištirta, kad vandens sluoksnį ant stiklo yra naudinga sudaryti pjaunant jį lazeriu esant siauresniems nei 0,150 mm bei gilesniems nei 0,250 mm (žr. 17 pav.). Šiomis sąlygomis su vandens sluoksniu ant bandinio buvo gaunamos iki 10 kartų didesnės savitosios abliacijos spartos nei pjaunant tais pačiais parametrais ore. Tokį rezultatą būtų galima paaiškinti tuo, kad siauresniems ir gilesniems kanalams vanduo padeda lengviau pašalinti susidariusius abliacijos produktus iš abliacijos sritys. Taigi, padidėjus kanalo pločiui ir sumažėjus jo gyliui – vandens nauda irgi sumažėja, nes yra lengviau pašalinti abliacijos produktus.

5.5. Vandens srauto greitis

Siekiant nustatyti vandens srauto greitį, ties ta vieta, kurioje susiformuoja plona (200 μm storio) tekanti vandens plėvelė (žr. 18a pav.), buvo pragrežta skylė stiklo plokštelėje ir tiekiamas dažų srautas iš stiklo plokštelės apačios. Dažų sklidimas vandens srautu buvo filmuojamas vaizdo kamera 480 kadru per sekunde greičiu. Pagal filmuotą medžiagą, t. y. suskaičiuotą kadru skaičių, per kurį dažai nusklinda tam tikrą atstumą, buvo išmatuotas vandens srauto greitis (žr. 18 pav.).

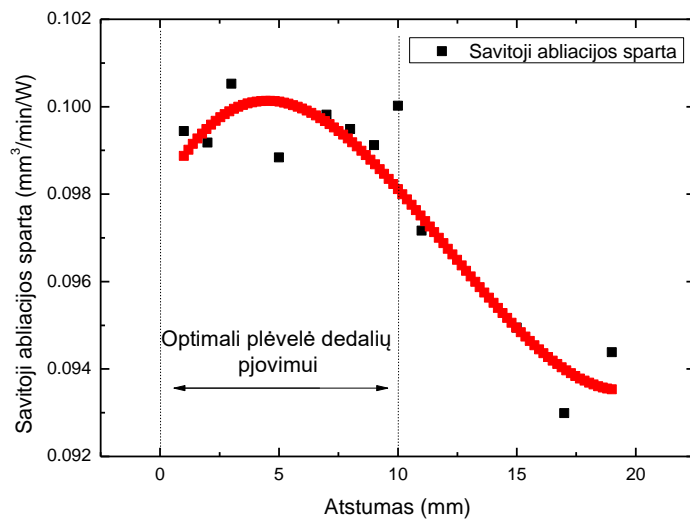
Iš greičio rezultatų matome, kad plėvelės greitis buvo 75 cm/s 2,5 mm atstumu nuo plonos plėvelės susiformavimo pradžios. Tačiau tolstant nuo aerografo (kur oro srautas sulėtėjo) galvutės greitis sparčiai krito ir ties 10 mm nuotoliu pasiekė 25 cm/s. Čia, susiformavo storesnė, kelių milimetrų storio vandens plėvelė. Storesnės plėvelės greitis tolstant nuo aerografo mažėjo toliau, tačiau nežymiai.



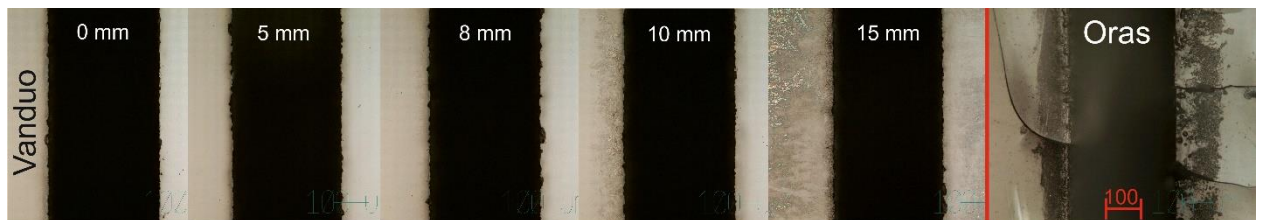
18 pav. Vandens plėvelė ant bandinio (a) ir vandens srauto greičio priklausomybė nuo vandens nusklidimo atstumo (b). 0 mm rodo skylės padėtį, kuri yra, apytiksliai, ties plonos plėvelės susiformavimo pradžia. Atstumo didėjimas reiškia tolimą nuo minėtos skylės stiklo.

Toliau buvo išmatuota vandens srauto greičio įtaka stiklo abliacijos efektyvumui ir kokybei. Pagal (17) formulę buvo apskaičiuotos savitosios abliacijos spartos (žr. 19 pav.) ir optiniu mikroskopu iširta vagų kokybė (žr. 20 pav.). Gauta, kad plonos plėvelės zonoje savitoji abliacijos sparta yra didžiausia ir išlieka apytiksliai vienoda, nepaisant sparčiai krentančio vandens plėvelės tekėjimo greičio (žr. 19, 20 pav. atstumai 0 – 10 mm). Plonos vandens plėvelės zonoje suformuotų kanalų kokybė buvo aukšta, beveik nepriklausė nuo vandens tekėjimo greičio. Kanalų kokybė suprastėjo (padidėjo

apskeldėjimas, kanalų kraštuose nusėdo abliacijos produktai) juos formuojant zonoje, kurioje vandens plėvelės storis padidėjo, apytiksliai, iki 2-4 mm (atstumas 10 – 35 mm, žr. 20 pav.).



19 pav. Savitosios abliacijos spartos priklausomybė nuo atstumo. 0 mm atstumas žymi vandens plėvelės susiformavimo pradžią. Atstumo didėjimas rodo tolimą nuo aerografo galvutės.



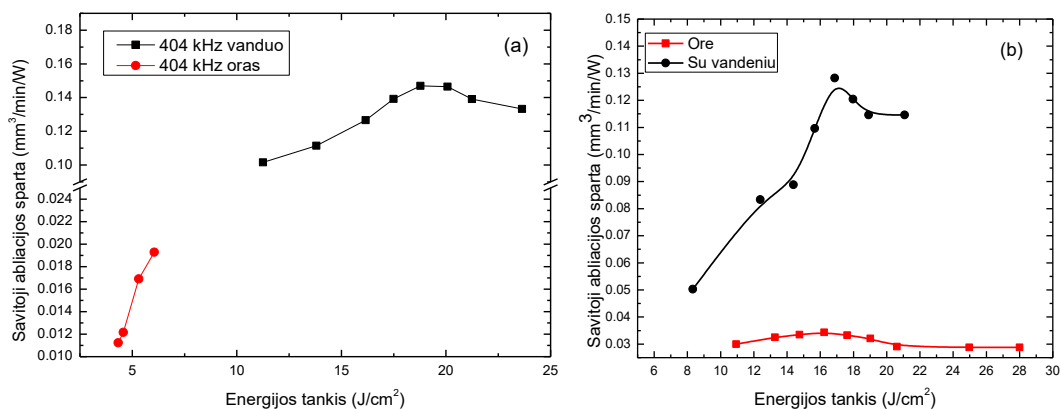
20 pav. Išabliuoti kanalai per tekančią vandens plėvelę sudarytą aerografu ir ore. Matmenys nuotraukose žymi atstumą nuo vandens plėvelės susidarymo pradžios (0 mm). Darbinės zonos – plėvelės ilgis 10 mm. Vandenyje atлита 100 skenavimų, ore 20. Dažnis 404 kHz, skenavimo greitis 1000 mm/s, lazerio galia 42 W. Kanalo plotis 0,3 mm.

5.6. Stiklo pjovimas didelio impulsų pasikartojimo dažnio spinduliuote

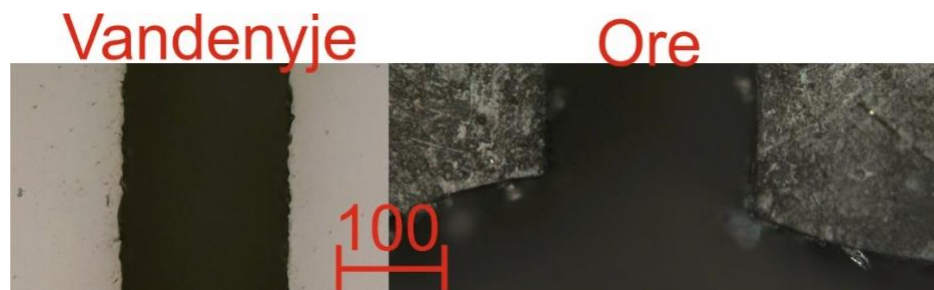
Siekiant rasti maksimalias savitosios abliacijos ir stiklo prapjovimo spartas, buvo atlikti 0,4 mm storio stiklo abliacijos eksperimentai keičiant lazerinės spinduliuotės impulsų pasikartojimo dažnį. Tolimesniems bandymams pasirinktas plonesnis stiklas, nes būtent plonesni stiklai yra vis plačiau naudojami įvairiose pramonės srityse, pavyzdžiui, gręžti mažo skersmens skylės garsiakalbiams telefonų ekranuose.

Buvo atlikti eksperimentai pagal 4.3. skyrelyje aprašytą metodiką ir buvo ieškoma didžiausių savitosios abliacijos spartos bei prapjovimo greičio verčių ore ir ant stiklo sudarius ploną tekančią vandens plėvelę. Suformuotų pjūvių plotis buvo 150 μm ir 200 μm , atitinkamai abliuojant stiklą pro

vandens sluoksnį (tarpas tarp gretimų linijų 12,5 μm) ir oro aplinkoje (tarpas 15 μm). Pjaunant ore linijas su tarpu mažesniu nei 15 μm , stiklinis bandinys suskildavo. Lazerio pluošto fokuso padėtis buvo laikoma žemiau bandinio paviršiaus ir individualiai optimizuota pjovimui ore ir pro vandens sluoksnį. Oro aplinkoje Savitosios abliacijos spartos bandymuose (visais dažniais) kanalai buvo skenuojami 1000 mm/s greičiu. Pjaunant stiklą pro vandens sluoksnį 404 kHz dažniu gauta, kad optimalus energijos tankis yra 18,8 J/cm² (žr. 21a pav.). Iki optimalios vertės, savitosios abliacijos spartos augimas gali būti siejamas su didėjančiu pašalinamos medžiagos kiekiu didėjant energijos tankiui. Už optimalios energijos tankio vertės - toliau didėjant energijos tankiui, savitosios abliacijos spartos mažėjimas gali būti aiškinamas keliais aspektais išskirais [25] straipsnyje. Pirma, didėjant energijos tankiui savitosios abliacijos mažėjimą gali lemti lazerinės spinduliuotės ekranavimas išabliuotomis dalelėmis. Antra, dėl stiprėjančių terminių efektų gali apsilydyti abliuojamas paviršius bei atsirasti mikrotrūkiai, kurie gali sklaidyti spinduliuotę.



21 pav. Savitosios abliacijos spartos priklausomybės nuo energijos tankio, kai pjaunamas borosilikatinis 0,4 mm storio stiklas (a) ir silikatinis 1 mm storio stiklas (b).



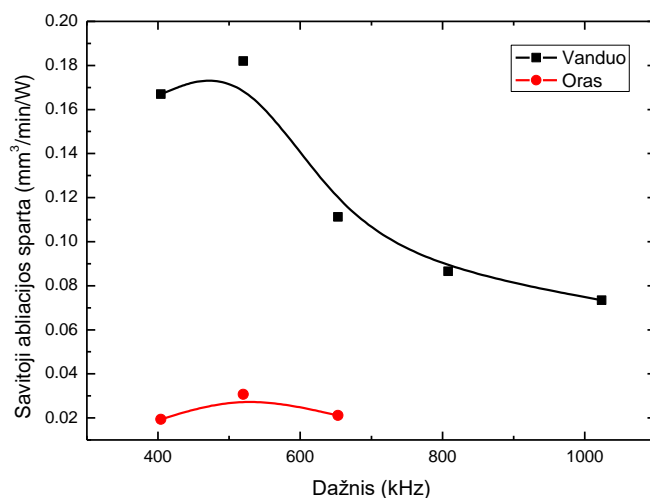
22 pav. Optinės kanalų nuotraukos. Kanalai pjauti ore ir pro vandens sluoksnį. Pjaunant ore stiklas sudužo. Abiem atvejais 404 kHz ir 25 W

Atliktų eksperimentų ore rezultatus riboja tai, kad maksimali lazerio galia, kuria buvo galima pjauti stiklą buvo 16 W. Toliau keliant vidutinę lazerio galią - stiklas skildavo (žr. 22 pav.). Esant

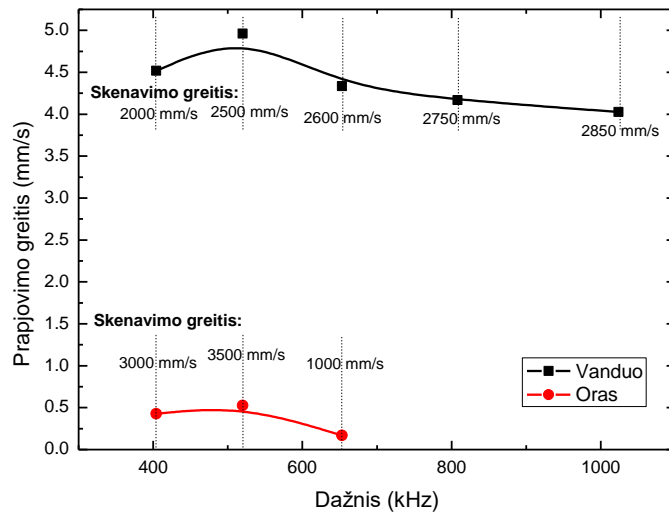
šiems ribojimams su 404 kHz pasiekta didžiausia savitoji abliacijos sparta buvo $\sim 0,02 \text{ mm}^3/\text{min}/\text{W}$ – apie 6 kartus mažesnė nei pjaunant pro vandens sluoksnį (žr. 21a pav.).

Siekiant įvertinti tik vandens sluoksnio įtaką savitajai abliacijos spartai buvo pakartoti eksperimentai ant storesnio 1 mm storio silikatinio stiklo (žr. 21b pav.). Storesnis stiklas ir mažesnis impulsų pasikartojimo dažnis leido stiklą abliuoti didesniu energijos tankiu ore nesudaužant bandinio. Gauta, kad šio stiklo optimalios abliacijos energijos tankis yra $16,9 \text{ J}/\text{cm}^2$. Ties šiuo energijos tankiu pjaunant kanalus pro vandens sluoksnį buvo pasiekta maksimali abliacijos sparta lygi $0,13 \text{ mm}^3/\text{min}/\text{W}$ – keturis kartus didesnė nei stiklą pjaunant ore. Padidėjęs abliacijos efektyvumas vandenyje galėtų būti aiškinamas spartesniu abliacijos produktų pašalinimu iš abliacijos srities.

Didėjant dažniui tiek savitosios abliacijos spartos, tiek prapjovimo greičio vertės auga iki 520 kHz dažnio, tai yra didžiausio dažnio ties kuriuo dar galima pasiekti optimalią energijos tankio vertę ($18,8 \text{ J}/\text{cm}^2$) (žr. 23, 24 pav.). Toliau didinant dažnį buvo pastebėtas ieškomų verčių mažėjimas. Tą galėjo lemti mažėjantis spinduliuotės energijos tankis (impulsų energija) didėjant dažniui, kurio nepakako efektyviai abliuoti stiklą. Taip pat, didėjant dažniui mažėjo laiko intervalai tarp impulsų šūvių, todėl galėjo didėti lazerio impulsų ekranavimas dėl išabliuotų dalelių bei susiformavusios plazmos ankstesniais impulsais.



23 pav. Savitosios abliacijos spartos priklausomybė nuo impulsų pasikartojimo dažnio borosilikatiniame stikle. Maksimalios spartos vertės gautos apytiksliai ties $18,8 \text{ J}/\text{cm}^2$ energijos tankiu.



24 pav. *Maksimalių prapjovimo greičių priklausomybė nuo impulsų pasikartojimo dažnio.*

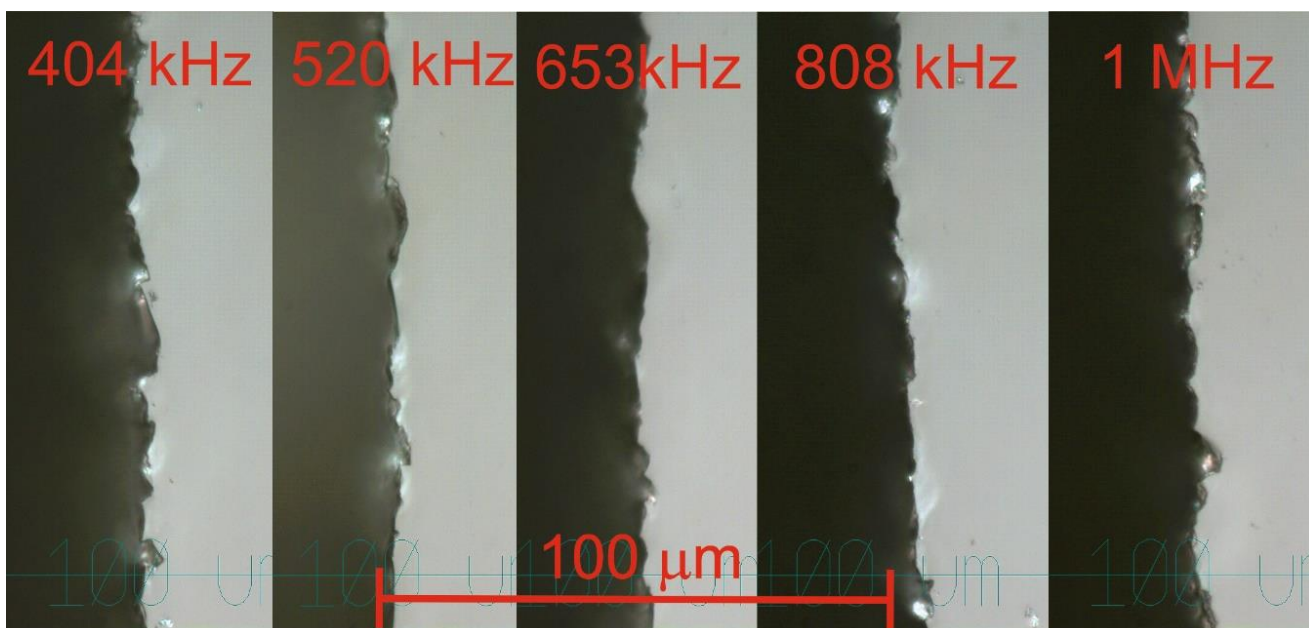
Abliuojant stiklą pro vandens sluoksnį (optimaliu) 520 kHz dažniu, buvo gauta, kad savitoji abliacijos sparta buvo didesnė beveik 6 kartus, lyginant su rezultatais gautais ore. Esant 520 kHz dažniui, savitoji abliacijos sparta pjaunant pro vandens sluoksnį gauta 0,18 mm³/min/W, o ore 0,03 mm³/min/W (žr. 23 pav.). Lyginant prapjovimo greičius, vandens sąlygomis buvo pasiektas ~10 kartų didesnis prapjovimo greitis nei ore, t. y. pjaunant pro vandenį jis buvo lygus 5 mm/s, o ore 0,5 mm/s (žr. 24 pav.). Oro sąlygomis, maksimalus dažnis, kada stiklas dar buvo prapjaunamas, buvo 653 kHz. Ties šiuo dažniu, energijos tankis buvo 4.6 J/cm².

5.7. Prapjautų stiklų kokybės palyginimas

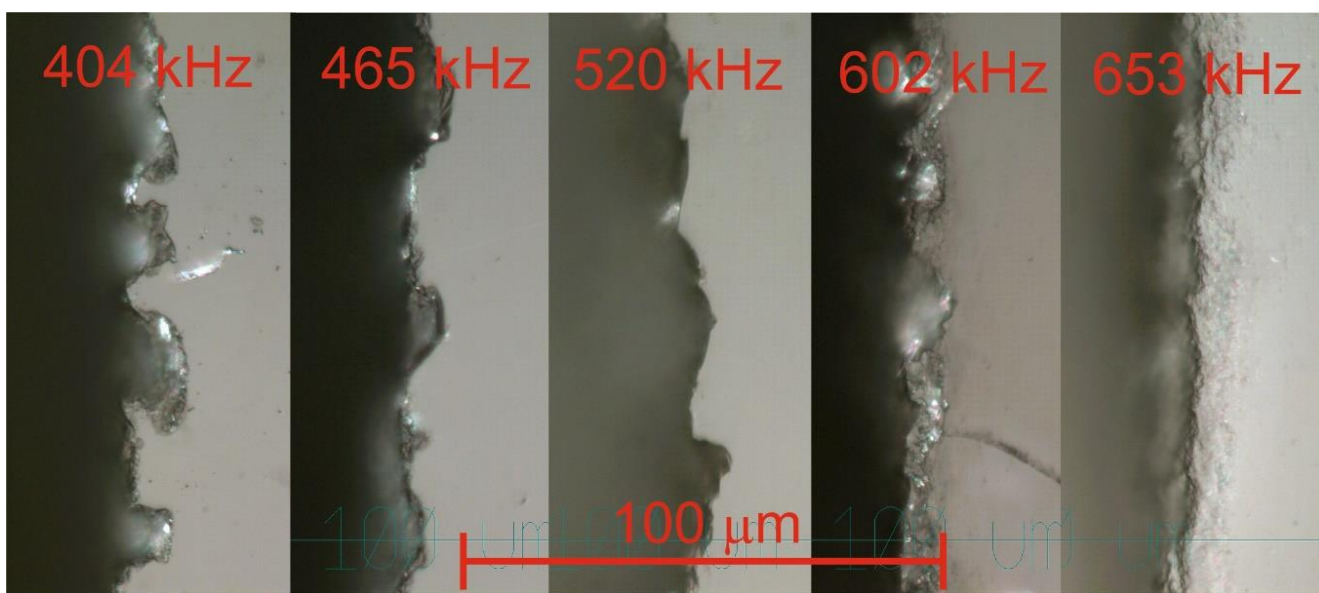
Lyginant stiklo paviršiaus kokybę gauta, kad bandinį apipurškiant vandeniu pjautų vagų kraštai mažiau apskeldėjo nei pjaunant ore, nors oro sąlygomis buvo pjaunama apie 2,6 karto mažesne galia (žr. 25, 26 pav.). Bandinį padengiant plona vandens plėvele ir didinant dažnį nuo 404 kHz iki 1024 kHz kraštų apskeldėjimo pločio vidurkiai apytiksliai nepakito, kaip ir pjūvio sienelių šiurkštumo atveju. Vidutinė apskeldėjimų vertė siekė $(2,31 \pm 0,83) \mu\text{m}$.

Oro sąlygomis didinant dažnį buvo pastebėtas pjūvio krašto apskeldėjimo sumažėjimas. Apskeldėjimo plotis sumažėjo ~3,2 karto didinant dažnį nuo 404 kHz iki 653 kHz, t. y. ties 404 kHz buvo $(7,37 \pm 2,70) \mu\text{m}$, o ties 653 kHz nukrito iki $(2,32 \pm 0,79) \mu\text{m}$. Tačiau ėmė formuotis skylimai statmeni išpjautiems kanalams. Pastebėta, kad dirbant vandens aplinkoje iki 600 kHz, apskeldėjimo plotis yra ~2 kartus mažesnis nei pjaunant ore, o ties 653 kHz, apytiksliai, susilygino. Didesnis apskeldėjimas ore gali būti lemiamas terminės akumuliacijos stikle. Esant judančiam vandens sluoksniui perteklinė šiluma buvo efektyviai nunešama, t. y. stiklas ataušinamas. Nuo 600 kHz kraštų apskeldėjimo pločio sumažėjimą ore būtų galima aiškinti taip pat terminiais efektais. Tai yra, dėl

didėjančio impulsų pasikartojimo dažnio ir neefektyvaus šilumos nunešimo sritys, greta pjūvio krašto, apsilydė.



25 pav. Optinės pjautų vagų nuotraukos dirbant 404 – 1024 kHz dažnių režiuose ant borosilikatinio stiklo sudarant ploną, judantį vandens sluoksnį. Pjauta 42 W galia. Skenavimo greičiai atitinkantys tam tikrus dažnius nurodyti 24 paveiksle. 0,4 mm storio stiklas.

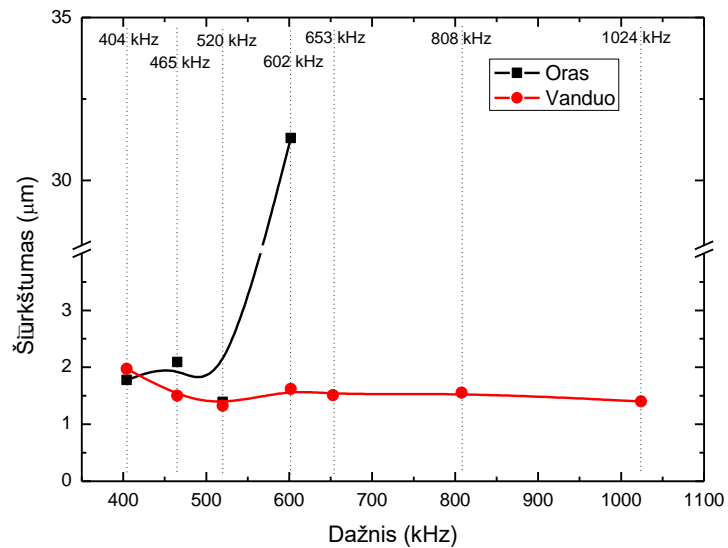


26 pav. Optinės pjautų vagų nuotraukos dirbant 404 – 653 kHz dažnių režiuose oro sąlygomis. Pjauta 16 W galia. Skenavimo greičiai atitinkantys tam tikrus dažnius nurodyti 24 paveiksle. 0,4 mm storio stiklas.

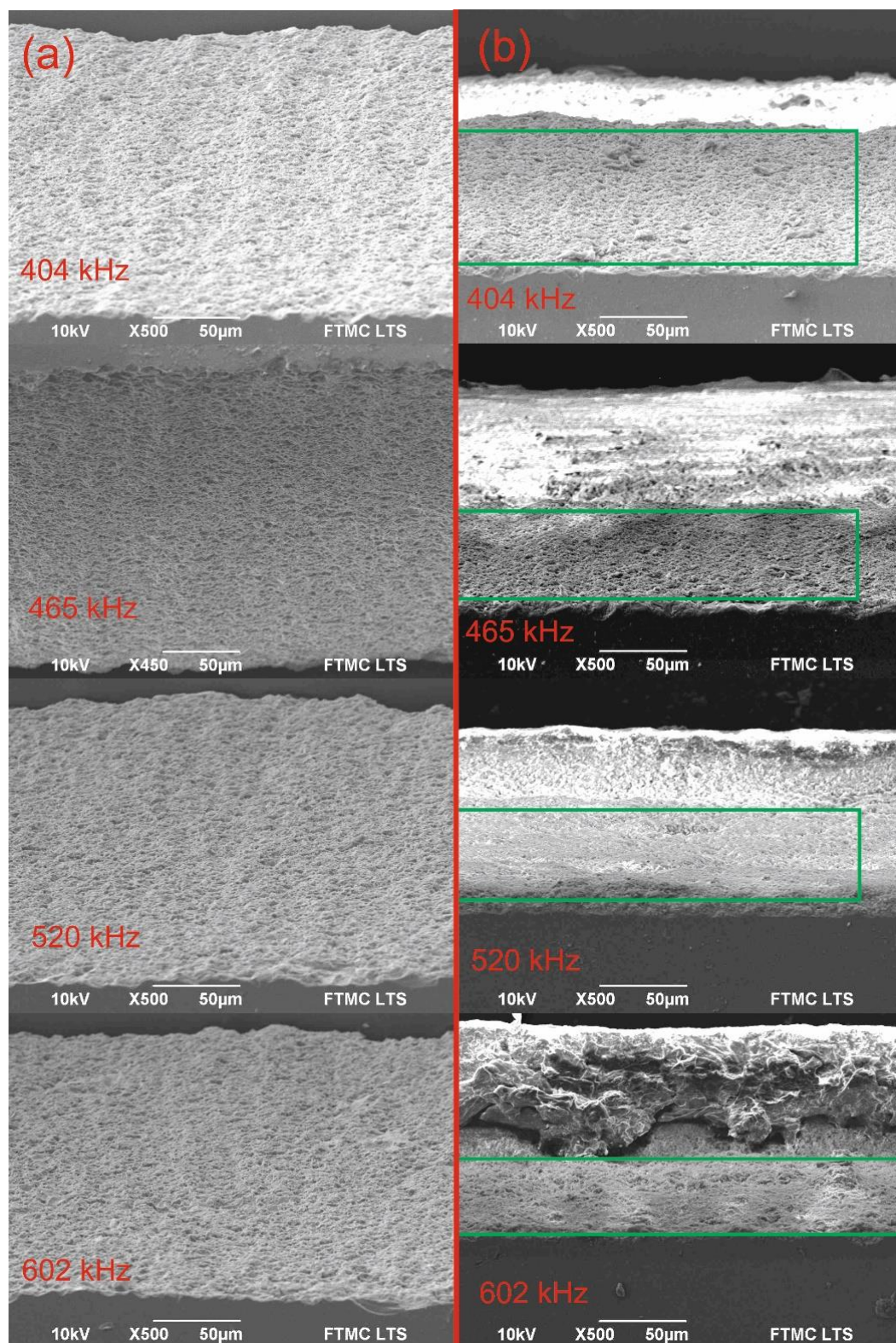
Toliau, buvo išmatuoti prapjautų vagų ore ir pro vandens sluoksnį sienelių šiurkštumai (žr. 27, 28 pav.). Pjūviai formuoti naudojant 404 – 1024 kHz dažnio spinduliuotę. Šiurkštumams matuoti buvo pjaunami 1 cm ilgio kanalai, stiklas perlaužiamas išilgai pjūvio, o matavimai atlikti adatiniais

profilometru. Prapjovus stiklą 404 kHz dažniu pro vandens plėvelę, buvo gautas pjūvio krašto šiurkštumas lygus $(1,97 \pm 0,61) \mu\text{m}$. Didinant impulsų pasikartojimo dažnį, sienelių šiurkštumas kito nežymiai – sumažėjo iki $(1,55 \pm 0,39) \mu\text{m}$.

Pjaunant ore su 404 kHz dažniu, pjūvio sienelių šiurkštumas buvo panašus kaip ir pjaunant pro vandens plėvelę, t. y. $(1,77 \pm 0,54) \mu\text{m}$. Didinant dažnį, oro sąlygomis, krašto šiurkštumas didėjo ir viršijo vandens sąlygomis gautus rezultatus. Ties 602 kHz, gautas ~19 kartų didesnis šiurkštumas ore nei pjaunant vandens sąlygomis (žr. 28b pav. žaliame stačiakampyje esančias dalis). Šis šiurkštumo padidėjimas galėjo atsirasti dėl didėjančių terminių efektų didėjant impulsų pasikartojimo dažniui. Ypač didelis krašto nelygumas – banguotas apsilydimas matosi ties 602 kHz dažniu (žr. 28b pav. stiklo dalį žaliame stačiakampyje). Taip pat, buvo pastebėta, kad pjaunant susiformavo kanalo krašte slenkstis (paaukštėjusi sritis), kuris didėjo didėjant dažniui (žr. 28b pav. viršutinė stiklo dalis).



27 pav. Pjūvio kanalo krašto šiurkštumo priklausomybė nuo impulsų pasikartojimo dažnio.

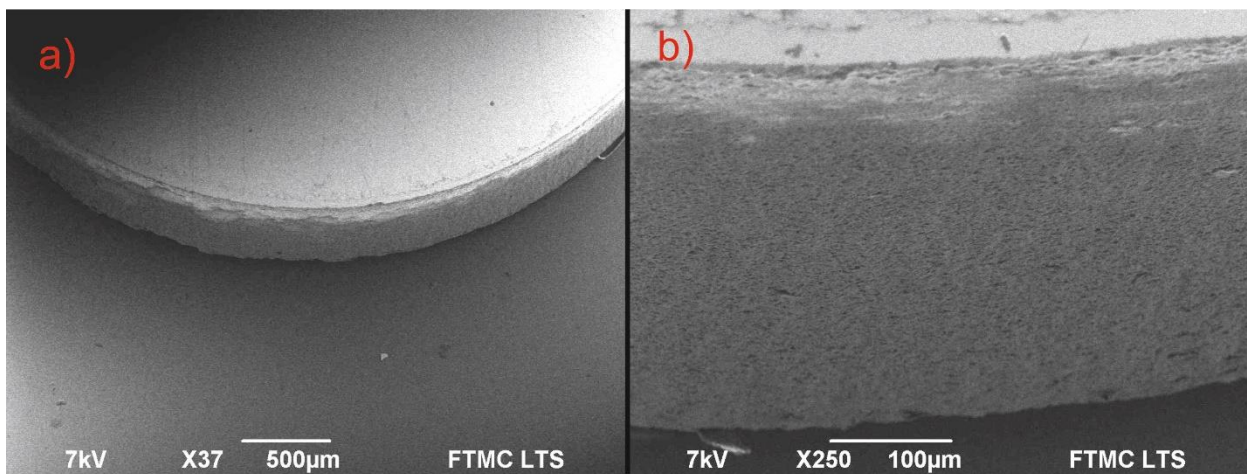


28 pav. Kanalų kraštų SEM nuotraukos esant įvairiems dažniams. Pjauti kanalai pro vandens sluoksnį (a) stulpelis ir ore (b) stulpelis. Žali stačiakampiai oro stulpelio nuotraukose žymi vietą, kurioje buvo matuoti šiurkštumai.

5.8. Detalės pjovimas

Iš milimetro storio stiklo padėklo, terminio garinimo būdu padengto dielektrine atspindinčia danga 1064 nm bangos ilgio spinduliuotei, buvo išpjauti 5 mm skersmens optiniai elementai. Jie pjauti optimizuotais parametrais (dažnis 520 kHz, skenavimo greitis 2500 mm/s, pluoštas sufokusuotas 600 μm po bandiniu, galia 42 W) pro vandens sluoksnį iš danga dengtos pusės.

5 mm skersmens ir 1 mm storio veidrodis buvo išpjautas per 1,5 minutės (pjovimo sparta siekė 0,16 mm/s). Išpjautų veidrodžių kokybinės nuotraukos padarytos skenuojančiu elektronų mikroskopu (žr. 29 pav.). Pjūviai gauti aukštos kokybės (žr. 29a ir 29b pav.): viršutiniai pjūvio kraštai buvo aštrūs, o detalės apatinėje dalyje (žr. 29a pav.) pjūvio krašto nelygumas buvo nežymus. Vidutinis dielektrinės dangos pažeidimas siekė vos 100 μm nuo pjūvio krašto. Tai yra kelis kartus mažesnis atstumas (apie 3,5 karto) nuo išpjauto elemento krašto iki dangos, lyginant su tuo ką galima pasiekti terminio garinimo metu, dėl dengiamo optinio elemento kraštų šešėliavimo to elemento laikikliu.



29 pav. Išpjautos detalės SEM nuotraukos. Išpjautas 5 mm skersmens optinis elementas (a) ir jo kraštas (b).

6. Pagrindiniai rezultatai ir išvados

1. Nustatyta, kad abliuojant stiklą pro tekantį ploną vandens sluoksnį, stiklo abliacijos sparta silikatiname stikle padidėjo keturis kartus, lyginant su abliacija ore tomis pačiomis sąlygomis. Maksimali savitoji abliacijos sparta, padengus stiklą plona tekančia vandens plėvele, buvo lygi $0,13 \text{ mm}^3/\text{min}/\text{W}$.
2. $0,4 \text{ mm}$ storio borosilikatinės stiklo plokštelės maksimalus prapjovimo greitis buvo 5 mm/s esant optimaliam energijos tankiui ir 520 kHz impulsų pasikartojimo dažniui padengus bandinį vandens plėvele.
3. Pjaunant stiklą ore buvo stebimi didėjantys šiluminės akumuliacijos reiškiniai didėjant lazerinės spinduliuotės dažniui: didėjo pjūvio sienelių šiurkštumas nuo $1,77$ iki $31,3 \text{ }\mu\text{m}$, pjūvio kraštas apsilydė, formavosi skilimai stikle.
4. Lazериu pjaunant stiklą pro vandens sluoksnį, gautų kanalų kokybė buvo aukštesnė, lyginant su abliacija ore. Pjūvio sienelių šiurkštumas ir pjūvio krašto apskeldėjimai buvo minimalūs (apie $2 \text{ }\mu\text{m}$). Dėl efektyvaus detalės aušinimo vandeniu, stiklo apdirbimo kokybė nepriklausė nuo impulsų pasikartojimo dažnio.
5. Parodyta, kad stiklą pjovimas tiesioginės abliacijos būdu, panaudojant didelio dažnio ir didelės vidutinės galios pikosekundinį lazerį bei padengus detalės paviršių plonu tekančiu vandens sluoksniu, yra tinkamas metodas pjauti 1 mm storio mažų matmenų optinius elementus iš stiklo, padengto lazerinę spinduliuotę atspindinčiomis dangomis.

6. Rezultatų viešinimas

Darbo rezultatai buvo paskelbti šiose konferencijose:

- Tarptautinės konferencijos:

[1] L. Zubauskas, E. Markauskas: THIN WATER FILM ASSISTED GLASS ABLATION WITH A PICOSECOND LASER, 62nd International Conference for Students of Physics and Natural Sciences, Open Readings, Kovo 19-22, (2019), Vilnius.

- Kitos konferencijos:

[2] L. Zubauskas, E. Markauskas: STIKLO PADENGTO PLONA VANDENS PLĖVELE PJOVIMAS PIKOSEKUNDINIŲ LAZERIŲ, 8-oji Fizinių ir technologijos mokslų centro doktorantų ir jaunųjų mokslininkų konferencija — FizTech 2018, Vilnius, FTMC.

- Praktikos:

[3] L. Zubauskas, E. Markauskas: STIKLO PADENGTO PLONA VANDENS PLĖVELE PJOVIMAS DIDELIO IMPULSŲ PASIKARTOJIMO DAŽNIO LAZERINE SPINDULIUOTE, studentų mokslinė vasaros praktika 2018 m. (projekto kodas: 09.3.3.-LMT-K-712-09-0273), Vilnius.

LITERATŪRA

- [1] N. Krstulović, S. Shannon, R. Stefanuik, C. Fanara, Underwater-laser drilling of aluminum, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, **69**, 1765–1773 (2013).
- [2] M. Silvennoinen, J. J. J. Kaakkunen, K. Paivasaari, P. Vahimaa, Water spray assisted ultrashort laser pulse ablation, *Applied Surface Science*, **265**, 865–869 (2013).
- [3] W. Charee, V. Tangwarodomnukun, Dynamic features of bubble induced by a nanosecond pulse laser in still and flowing water, *Optics & Laser Technology*, **100**, 230–243 (2018).
- [4] N. B. Dahotre, S. P. Harimkar, *Laser fabrication and machining of materials*, (Springer, New York, 2008).
- [5] O. Balachninitė *et al.*, *Lazeriai ir jų taikymai. Laboratoriniai darbai*, Vilnius, 2016.
- [6] O. Balachninitė, A. Bargelis, D. Aleksandr, R. Jonušas, G. Račiukaitis, V. Sirutkaitis, *Lazerinė technologija*, (Vilniaus universiteto leidykla, Vilnius, 2008).
- [7] C. Boulmer-Leborgne, J. Hermann, B. Dubreuil, Plasma formation resulting from the interaction of a laser beam with a solid metal target in an ambient gas, *Plasma Sources Sci. Technol.*, **2**, 219–226 (1993).
- [8] G. Y. Mak, E. Y. Lam, H. W. Choi, Liquid-immersion laser micromachining of GaN grown on sapphire, *Appl Phys A Material Science and. Processing*, **102**, 441–447 (2011).
- [9] J. M. Lee, K. G. Watkins, Removal of small particles on silicon wafer by laser-induced airborne plasma shock waves, *Journal of Applied Physics*, **89**, 6496–6500 (2001).
- [10] P. Holmberg, *Laser processing of Silica based glass*, (Royal Institute of Technology, Stockholm, 2015).
- [11] A. Poškus, *Eksperimentinė branduolio fizika*, (Vilniaus Universitetas, Vilnius, 2014).
- [12] J. Dudutis, R. Stonys, G. Račiukaitis, P. Gečys, Glass dicing with elliptical Bessel beam, *Optics & Laser Technology*, **111**, 331–337 (2019).
- [13] P. Gečys, Nanosecond Laser Processing of Soda-Lime Glass, *Journal of Laser Micro/Nanoengineering*, **10**, 254–258 (2015).
- [14] S. Nikumb *et al.*, Precision glass machining, drilling and profile cutting by short pulse lasers, *Thin Solid Films*, **477**, 216–221 (2005).

- [15] A. Kruusing, Underwater and water-assisted laser processing: Part 1 - General features, steam cleaning and shock processing, *Optics and Lasers in Engineering*, **41**, 307–327 (2004).
- [16] A. Kruusing, *Handbook of Liquids-Assisted Laser Processing*, (Elsevier, Amsterdam, 2008).
- [17] D. R. Lide, *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, (National Institute of standards and Technology, Gaithersburg, 2002).
- [18] P. Gregorčič, R. Petkovšek, J. Možina, Investigation of a cavitation bubble between a rigid boundary and a free surface, *Journal of Applied Physics* **102**, 094904 (2007).
- [19] Lidingo, *Cavitation bubble implosion*, 2007. [Tiklalapis]. Galimas: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cavitation_bubble_implosion.png.
- [20] X. M. Liu, J. He, J. Lu, X. W. Ni, Effect of surface tension on a liquid-jet produced by the collapse of a laser-induced bubble against a rigid boundary, *Optics & Laser Technology* **41**, 21–24 (2009).
- [21] G. Račiukaitis, *Lazerinio mikroapdirbimo laboratoriniai darbai*, (TEV, Vilnius, 2008).
- [22] B. Lauer, B. Jäggi, B. Neuenschwander, Influence of the pulse duration onto the material removal rate and machining quality for different types of steel, *Physics Procedia*, **56**, 963–972 (2014).
- [23] E. Hecht, *Optics 4th edition*, (Adelphi University, New York, 1998)
- [24] J. Gabzdyl, M. Brodsky, Micro-cutting with nanosecond pulsed fiber lasers, in: Pacific International Conference on Applications of Lasers & Optics, (LIA, Wuhan, 2010).
- [25] M. Gaidys, A. Žemaitis, P. Gečys, M. Gedvilas, Efficient picosecond laser ablation of copper cylinders, *Applied Surface Science*, **483**, 962–966 (2019).

Santrauka
Stiklo padengto plona vandens plėvele pjovimas didelio impulsų pasikartojimo dažnio
lazerine spinduliuote
Laimis Zubauskas

Fizikos fakultetas, Vilniaus Universitetas, Fizinių ir technologijos mokslų centras

Lazerinis stiklų mikroapdirbimas ultratrumpo trukmės impulsais yra vis plačiau taikomas įvairiose elektronikos ir fotonikos pramonės srityse. Šie lazeriai pasižymi aukšta vidutine galia ties dideliais impulsų pasikartojimų dažniais, kas leidžia padidinti stiklų pjovimo spartą išlaikant aukštą jų kokybę. Kita vertus, pjovimo sparta ribojama apdirbamos medžiagos nuolaužų pašalinimo greičiu iš abliuojamo kanalo bei didėjančiais mikrotrūkiškais. Šioms problemoms spręsti buvo pastebėta, kad plono vandens sluoksnio panaudojimas lazeriniame medžiagų apdirbime lemia efektyvesnę apdirbamos detalės aušinimą, spartesnę nuolaužų pašalinimą iš lazerinio pjovimo zonos bei gali padidinti apdirbimo kokybę.

Šiame tyrime buvo naudojamas 13 ps impulsų trukmės ir 1 MHz impulsų pasikartojimo dažnio lazeris. Atlikti eksperimentai su 1064 nm bangos ilgiu. Buvo palyginta savitoji tiesioginio lazerinio apdirbimo sparta ir kokybė abliuojant SLG ir borosilikatinius stiklus ore ir padengus juos plona vandens plėvele.

Eksperimentų metu buvo optimizuoti lazerio parametrai stiklo abliacijai, parinktas vandens tiekimo būdas į darbinę zoną bei rasti gaunamo vandens sluoksnio parametrai. Atlikus tyrimus nustatyta, kad padengus stiklą tekančia vandens plėvele, padidėjo savitoji abliacijos sparta ir pjovimo sparta. Optimaliais parametrais, vandens sluoksnis pagerino savitąją abliacijos spartą 6 kartais (lyginant su rezultatais gautais oro sąlygomis) ir buvo pasiektas 0.18 mm³/min/W maksimumas. Taip pat, vandens sluoksnio panaudojimas pagerino apdirbimo kokybę, t. y. sumažėjo kraštų apskeldėjimas.

Summary

Thin Water Film Assisted Glass Ablation with High Pulse Repetition Rate Laser

Laimis Zubauskas

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

Electronic, and photonic industries demand fast and high-quality processing of glasses. Modern ultra-short pulsed lasers offer high average power at high-pulse repetition rates allowing fast production of high-quality parts. However, full laser potential is rarely used during the glass cutting applications. Some laser parameters are limited to avoid glass overheating and generation of cracks. Therefore, many studies were done and their results have shown that the water layer introduced onto the surface of the workpiece could improve both the process quality and the laser cutting speed.

In this work, picosecond laser working at 1064 nm wavelength was used to evaluate the direct laser ablation efficiency and process quality of soda-lime and borosilicate glass samples in ambient air and water-assisted environments. Ablated grooves and complete cutting of glass plates were investigated.

Optimal laser parameters for ablation and water supply method were defined. Thin water film parameters were found and the most efficient glass cutting was performed. Results showed that the applied water layer improved the ablation efficiency. At optimal conditions, water improved the glass ablation efficiency 6 times compared to the ablation in ambient air, reaching $0.18 \text{ mm}^3/\text{min}/\text{W}$. Finally, applied water layer improved the cut-line sharpness and reduced the chipping of glass material at the edges of the groove.