

Vilniaus universitetas
Fizikos fakultetas
Lazerinių tyrimų centras

Lina Mačernytė
FEMTOSEKUNDINIS LAZERINIS STIKLO BANDINIŲ MIKROAPDIRBIMAS ORE IR
SKYSTOJE TERPĖJE

Magistratūros studijų baigiamasis darbas

Lazerinės technologijos
studijų programa

Studentas	Lina Mačernytė
Leista ginti	2019-05-23
Darbo vadovas	Doc. Dr. Ona Balachninaite
Konsultantas	dokt. Simas Butkus
Recenzentas	Doc. Dr. Aidan Matijošius
l. e. p. direktorius	Doc. Dr. Rytis Butkus

Vilnius 2019

TURINYS

IVADAS	3
1. TEORIJOS APŽVALGA	4
1.1 Stiklo taikymo galimybės ir jo apdirbimo technologijos.....	4
1.2 Lazerinės spinduliuotės ir stiklo sąveika: vykstantys procesai.....	5
1.3 Lazerio spinduliuotės ir medžiagos energijos mainai. Dviejų temperatūrų modelis	9
1.4 Abliacijos procesas	10
1.4.1 Abliacijos slenkstis.....	11
1.4.2 Abliacija skystoje aplinkoje	12
1.5 Netiesinis pluošto sklidimas	16
1.5.1 Šviesos gijų formavimasis lazerinio mikroapdirbimo metu, palaikant skysčio sluoksnį virš bandinio	17
2. MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ TYRIMO TEMATIKA APŽVALGA	18
3. TYRIMO METODIKA	22
3.1 Eksperimentų schemas ir aparatūrinės įrangos.....	22
3.2 Bandinių paruošimas.....	24
4. REZULTATAI IR JŲ APTARIMAS	25
4.1 Vandens ir tirpalų įtaka lazeriniam mikroapdirbimui. Suformuotų griovelių analizė	25
4.3 Suformuotų griovelių gylio profilių įvertinimas.....	29
4.4 Pažeidimų formavimas, naudojant pluošto keitiklį.....	35
REZULTATAI IR IŠVADOS	36
REZULTATŲ PRISTATYMAS MOKSLINĖSE PUBLIKACIJOSE IR KONFERENCIJOSE	38
LITERATŪROS SĄRAŠAS	39
SANTRAUKA	43
SUMMARY	45

ĮVADAS

Dėl unikalių stiklo savybių šios medžiagos naudojimas tampa optimaliausiu sprendimu įvairiose srityse. Inertiškumas bei geros optinės, termomechaninės charakteristikos stiklą leidžia pritaikyti puslaidininkių ir mikroelektronikos industrijoje. Nemažiau svarbi stiklų savybė – biosuderinimas. Ši ypatybė atveria galimybes stiklo naudojimui biochemijos bei medicinos srityse, mikrofluidikos prietaisų gamyboje. Taigi stiklo pagrindu pagamintas mikrostruktūras galima aptikti daugelyje sričių, todėl šios medžiagos apdirbimui skiriamas ypatingai didelis dėmesys [1–5].

Stiklo apdirbimas vis dar kelia nemažai iššūkių. Femtosekundinis lazerinis mikroapdirbimas leidžia pašalinti kylandčias problemas, tokias kaip: aplinkinių sričių įskilimai, netolygumų, naujų sluoksnių formavimasis. Medžiagų apdirbimas ultratrumpaisiais impulsais pasižymi aukšta kokybe, tikslumu, efektyvumu [6]. Naudojant femtosekundinės trukmės lazerio impulsus, sumažinamas šilumos plitimo efektas bandinyje [6, 7]. Šių impulsų trukmė yra mažesnė nei laikas, per kurį sužadintų elektronų energija virsta šiluma [6–8]. Tai leidžia išvengti įvairių nepageidaujamų defektų susidarymo tiek medžiagos paviršiuje, tiek jos tūryje.

Norint dar labiau abliacijos metu padidinti medžiagos pašalinimo efektyvumą, mikroapdirbimas gali būti atliekamas skystoje terpėje. Dėl lazerio spinduliuotės poveikio susiformavę burbulai lemia skysčio dinamiką. Šis judėjimas medžiagos dalelėms neleidžia grįžti ant bandinio. Tokiu būdu nuosėdos efektyviai pašalinamos iš suformuotų griovelių. Taip pat svarbu pabrėžti, kad papildomas skysčio sluoksnis virš bandinio atlieka medžiagos aušinimo funkciją. Tai leidžia išvengti bandinio įtrūkimų, įskilimų [9].

Skysta terpė, kurioje dažniausiai atliekamas medžiagos femtosekundinis mikroapdirbimas, yra vanduo [10]. Vis daugiau eksperimentų yra atliekama, naudojant ne vandenį, o įvairių koncentracijų tirpalus. Šiuo atveju sąveikos su lazerio spinduliuote metu tarp bandinio ir tirpalo pradeda vykti cheminės reakcijos, kurios turi įtakos apdirbimo spartai ir kokybei [11–13].

Šio darbo tikslas – įvertinti vandens, KOH, NaCl tirpalų įtaką stiklo bandinių femtosekundiniam lazeriniam mikroapdirbimui.

Darbo uždaviniai:

1. Atlikti stiklo bandinių femtosekundinį lazerinį mikroapdirbimą ore, vandenyje, KOH ir NaCl tirpaluose.
2. Įvertinti suformuotų griovelių gylio profilio kitimą, kai apdirbimas atliekamas ant sauso stiklo paviršiaus ir bandinį panardinus į skystį.

1. TEORIJOS APŽVALGA

1.1 Stiklo taikymo galimybės ir jo apdirbimo technologijos

Stiklas pasižymi unikaliomis charakteristikomis, kurios šią medžiagą leidžia pritaikyti įvairiose srityse. Pavyzdžiui, dėl savybės praleisti radijo dažnį stiklas yra naudojamas, kuriant jutiklius, energijos perdavimo prietaisus [14]. Geros optinės charakteristikos yra svarbios mikrooptoelektromechaninių (angl. *micro-optical-electro-mechanical systems* – *MOEMS*) [4], visiškos analizės [14] (*total analysis systems* – μ TAS) sistemų gamyboje. Taip pat stiklas gali būti sėkmingai naudojamas kartu su siliciu dėl panašaus plėtimosi koeficiento bei mažo elektros laidumo [15]. Optinis skaidrumas, cheminis stabilumas, biosuderinamumas – kitos savybės, kurios lemia stiklo naudojimą biochemijos, biomedicinos srityse [4]. Taigi, dėl didelių pritaikymo galimybių stiklo mikroapdirbimas yra svarbus procesas įvairių mikroįrenginių gamyboje.

Stiklo apdirbimas gali būti atliekamas, naudojant įvairias technologijas. Mechaninis metodas pasižymi paprastumu, ekonomiškumu [14]. Tai būdas, kuris dažniausiai naudojamas prototipų kūrimui. Pagrindiniai šio metodo trūkumai – įskilimai, įtrūkimai. Mechaniškai gręžiant stiklą, formuojasi 50 μ m diametro plyšiai. Pastaruosius galima sumažinti iki 15 μ m, naudojant mažesnę jėgą. Šiuo atveju apdirbimo procesas taptų ilgesnis ir būtų nepraktiškas. Stiklo mechaninis apdirbimas atliekamas deimantiniais arba cementuotais karbido įrankiais. Taip pat, į bandinį nukreipus dalelių srautą, galima mechaniškai pašalinti tam tikrą medžiagos kiekį [16]. Tam naudojamos smulkios Al_2O_3 (dažniausiai) abrazyvinės dalelės (< 100 μ m) kartu su didelio slėgio oro srove. Šiam procesui nebūdingas mikroįtrūkimų, šilumos poveikio zonos formavimasis aplink veikiamą sritį, tačiau apdirbtas paviršius pasižymi šiurkštumu. Sunkumų tolimesniuose gamybos etapuose sukelia ant ruošinio nusėdusios dalelės. Todėl šis apdirbimas dažnai atliekamas, naudojant vandenį ar kitą suspensiją. Taip pat mechaniniame stiklo apdirbime gali būti taikomas ultragarsas [17]. Tai – abrazyvinis procesas, kurio metu naudojamas suspensijos tiekimo įrenginys, judantis laikiklis, į kurį tvirtinamas bandinys, bei 20 – 40 kHz dažniu vibruojantis specialus įrankis. Virpesių amplitudė – keli mikronai. Judantis įrankis ruošinyje pirmiausia suformuoja įdubimus, įtrūkimus, kol galiausiai pašalinamas norimas medžiagos kiekis. Šiuo metodu galima pragręžti nedidelio diametro (10 μ m) skylutes. Pagrindinis technologijos minusas yra greitai nusidėvintis įrankis, kuris turi būti keičiamas, norint palaikyti aukštą kokybę, o tai reikalauja didesnių investicijų.

Taip pat stiklą galima apdirbti cheminiu būdu [18]. Viena iš galimybių – ėsdinimas. Šiuo atveju ruošinys yra įmerkiamas į ėsdinančią medžiagą, dažniausiai į vandenilio fluorida (HF) rūgštį. Kaukė apsaugo sritis, kurios turi likti nepažeistos. Po apdirbimo griovelį, skylių sienelėms būdingi

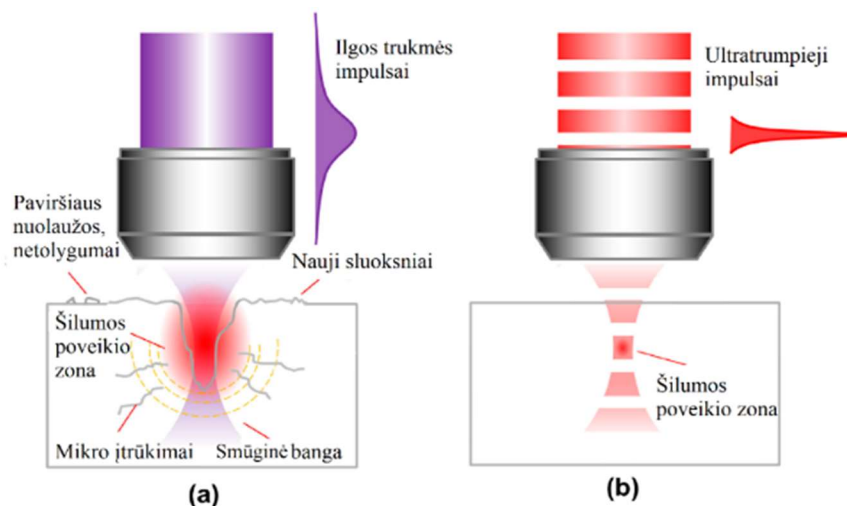
užapvalinti kraštai. Dažniausiai defektai susiformuoja dėl įtempimų, kuriuos sukelia kaukės naudojimas. Paviršiaus šiurkštumą ir ėsdinimo greitį lemia stiklo sudėtis. Kai kuriems oksidams (CaO, MgO, Al₂O₃) sąveikaujant su HF tirpalu, išsiskiria netirpūs produktai. Tai apsunkina apdirbimo procesą. Naudojant šį metodą, galima vienu metu suformuoti daug struktūrų, kurioms nėra būdingi mikroįtrūkimai ar kiti dėl šilumos poveikio susiformavę defektai. Tačiau ėsdinimo procese naudojamos koncentruotos rūgštys (apie 50 %) yra kenksmingos aplinkai ir žmonių sveikatai. Taip pat stiklo apdirbimas gali būti atliekamas, taikant mišrią technologiją, apjungiančią kelis jau aptartus apdirbimo būdus [14].

Kiekvienas iš anksčiau pateiktų metodų turi ne tik privalumų, bet ir tam tikrų trūkumų. Kylančias problemas galėtų padėti išspręsti lazerinis apdirbimas. Tinkamai parinkus parametrus, galima sumažinti apdirbimo sąnaudas bei padidinti proceso efektyvumą, lankstumą. Tai pagrindžia atliekamų tyrimų, eksperimentų naudą ir aktualumą.

1.2 Lazerinės spinduliuotės ir stiklo sąveika: vykstantys procesai

Spinduliuotės ir stiklo sąveiką lemia tiek lazerio charakteristikos, tiek stiklo savybės, cheminė sudėtis, gaminimo būdas. Pagrindiniai lazerio parametrai, turintys įtakos sąveikos mechanizmui, yra bangos ilgis ir impulso trukmė.

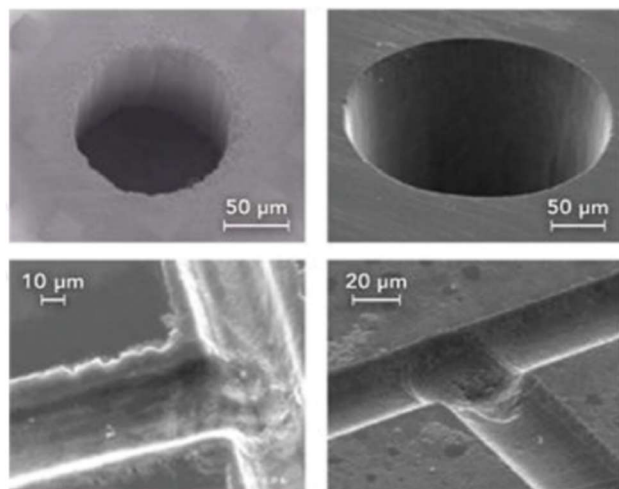
Medžiagų apdirbimui gali būti naudojami trys skirtingi lazerio impulsų trukmės režimai: ultratrumpi (femtosekundiniai), trumpi (pikosekundiniai) ir ilgi (nanosekundiniai) impulsai [6]. Kiekvienas iš šių režimų lemia skirtingą apdirbimo baigtį.



1 pav. Lazerinė abliacija ilgais (kairėje) ir ultratrumpais (dešinėje) impulsais [4]

Stikluose geresnė apdirbimo kokybė ir tikslumas pastebimas, naudojant pikosekundinės ir femtosekundinės trukmės lazerio impulsus. Sąveikaujant ultratrumpiems impulsams su bandiniu, šilumos sklidimas medžiaga yra ribotas. Dėl šios priežasties medžiagos abliacija vyksta tiksliai

apibrėžtoje erdvėje. Lazerinės abliacijos metu naudojant nanosekundinius impulsus, stebima šilumos poveikio zona (angl. *heat-affected zone* – HAZ) (1 pav.) [6]. Šis reiškinys lemia nuolaužų, naujų sluoksnių, netolygumų, įskilimų formavimąsi medžiagoje. 2 paveikslas iliustruoja abliacijos kokybės skirtumus, naudojant nanosekundinį ir femtosekundinį lazerius [19].

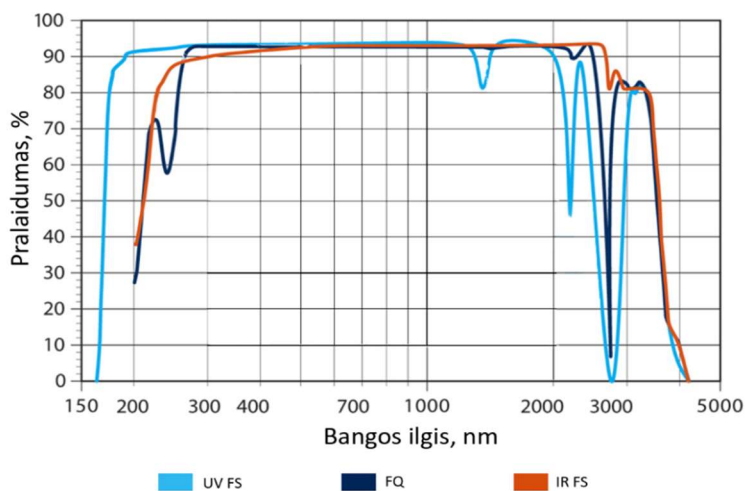


2 pav. Stiklo abliacija, naudojant nanosekundinį (kairėje) ir femtosekundinį (dešinėje) lazerius [6]

Taigi lazerio impulso trukmė – svarbus parametras lazerinės abliacijos procese. Akivaizdūs skirtumai išryškėja tarp femtosekundinės ir nanosekundinės abliacijos. Pastaruoju atveju plazma formuojasi lazerio veikimo metu, o bandinį žadinant ultratrumpaisiais impulsais, plazma stebima jau po lazerio veikimo. Taip pat nemažai įtakos abliacijos procesui turi žadinančios spinduliuotės bangos ilgis [6]. Tai ryšku, esant tiek nanosekundinei, tiek femtosekundinei abliacijai.

Bangos ilgis lemia abliacijos greitį, spinduliuotės įsiskverbimo gylį į medžiagą bei plazmos optines savybes. Dėl didesnio plazmos kritinio tankio, esant trumpesniems bangos ilgiams, sumažėja plazmos ekranavimas. Taip pat šią priklausomybę lemia šilumos laidumo trukmė (elektrono-fonono relaksacijos trukmė), kuri yra didesnė už impulso trukmę [20].

Stiklai pasižymi pralaidumu regimajame spektro diapazone (3 pav.). Ši savybė sumažina lazerių pasirinkimą stiklo apdirbimui. Dažniausiai dirbama UV arba IR srityse. Pastarajame regione stebime absorbciją dėl elektronų sugerties bei dėl atominių ir molekulinų virpesių, vykstančių gardelėje. UV srityje absorbciją lemia elektronų šuoliai (vienfotonis ir daugiafotonis efektai) [21].



3 pav. Stiklo pralaidumo spektras [22]

Abliacija nanosekundinės trukmės lazerio spinduliuote yra tiesinis procesas, kuriam galioja *Beer-Lambert* dėsnis [20].

$$I(z) = I_0 e^{-\alpha_{abs} z}, \quad (1)$$

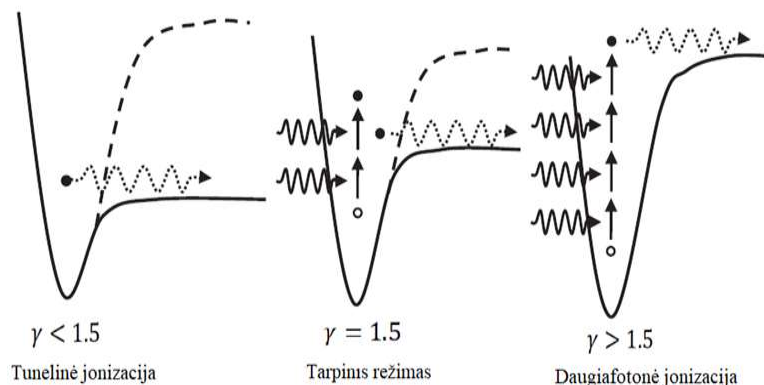
čia $I(z)$ – pro medžiagą praėjusios spinduliuotės intensyvumas, I_0 – kritusios spinduliuotės intensyvumas, z – optinio kelio ilgis, α_{abs} – sugerties koeficientas [23]. Tiesinės sugerties metu dėl plačios draustinės juostos stiklams nepakanka fotonų energijos tam, kad elektronai galėtų peršokti iš valentinės juostos į laidumo [24]. Tačiau dėl didelio spinduliuotės intensyvumo, naudojant ultratrumpuosius impulsus, netiesiniai procesai medžiagoje tampa itin ryškūs. Smūginė elektronų jonizacija ir fotojonizacija – tai pagrindiniai reiškiniai, kurie lemia laisvųjų elektronų generaciją femtosekundinės abliacijos metu [20].

Netiesinės jonizacijos mechanizmai: fotojonizacija ir griūtinė jonizacija. Fotojonizacija yra skirstoma į daugiafotonę ir tunelinę jonizacijas. Pastarasis reiškinys vyksta tada, kai elektrinis laukas yra pakankamai stiprus. Dėl šios priežasties yra iškreipiamas potencinis barjeras. Šiuo atveju elektronai tuneliuodami gali įveikti potencinį barjerą ir atsiskirti nuo atomo. Vykstant daugiafotoninei jonizacijai, elektronai vienu metu sugeria daugiau nei vieną fotoną. Elektronai yra išlaisvinami, kai jų energija tampa didesnė už draustinę juostos tarpą. Šiuo atveju spinduliuotės intensyvumas yra nuo 10^{12} iki 10^{16} W/cm².

Keldysh parametras (γ) gali būti naudojamas, norint identifikuoti daugiafotonę ir tunelinę jonizacijas (4 pav.). Iš formulės (2) matyti, kad šį dydį (γ) lemia lazerio spinduliuotės dažnis (ω) ir intensyvumas (I) bei medžiagos draustinis juostos tarpas (E_g).

$$\gamma = \frac{\omega}{e} \left[\frac{m c n \varepsilon_0 E_g}{I} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

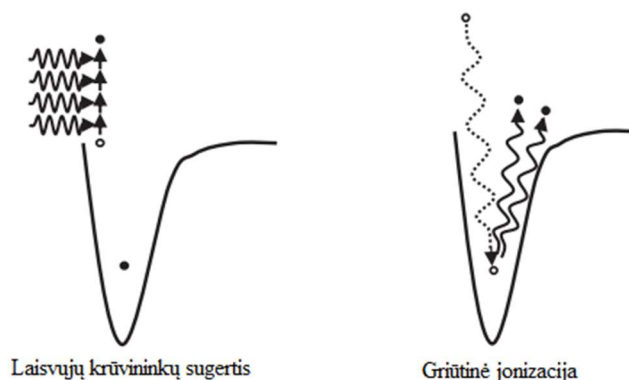
čia m – redukuota masė, e – elektrono krūvis, c – šviesos greitis, n ir ε_0 – medžiagos lūžio rodiklis ir dielektrinė skvarba.



4 pav. Medžiagos jonizacijos režimai [25]

Tunelinė jonizacija yra stebima, kai *Keldysh* parametras yra mažesnis nei 1,5, tačiau jei šis adiabatinis parametras yra didesnis nei 1,5, medžiagoje pasireiškia daugiafotonė jonizacija. Abu šie efektai gali būti stebimi tarpinėje būsenoje. Šiuo atveju medžiaga yra veikiamą nedidelio dažnio ir aukštos galios lazerine spinduliuote [25].

Sąveikos su lazerine spinduliuote metu fotono energija yra perduodama elektronams. Jei sugėrus fotoną, laisvojo elektrono kinetinė energija yra pakankamai didelė, jis per susidūrimą su surištuosiu elektronu atiduoda jam energiją ir įveikia jonizacijos potencialą. Šis procesas yra vadinamas smūgine jonizacija. Dėl jos gali padvigubėti laisvųjų elektronų skaičius. Pasikartojanti fotono energijos sugertis ir susidūrimai sukelia elektronų griūtį (5 pav.). Griūtinės jonizacijos metu spinduliuotės intensyvumas yra nuo 10^9 iki 10^{12} W/cm² [20].



5 pav. Griūtinės jonizacijos schema [20]

Pakankamas laisvųjų elektronų kiekis yra būtina sąlyga, tam kad stikluose galėtume stebėti lazerinės spinduliuotės sugertį ir abliaciją. Laisvųjų elektronų tankio augimas stikluose vyksta dėl daugiafotonės ir griūtinės jonizacijų. Pasiekus kritinę elektronų koncentraciją, stiklų savybės tampa panašios į metalų. Taip pat šiuo atveju plazma pradeda stipriai atspindėti ir sugerti spinduliuotę.

Kritinį elektronų tankį galima užrašyti formule:

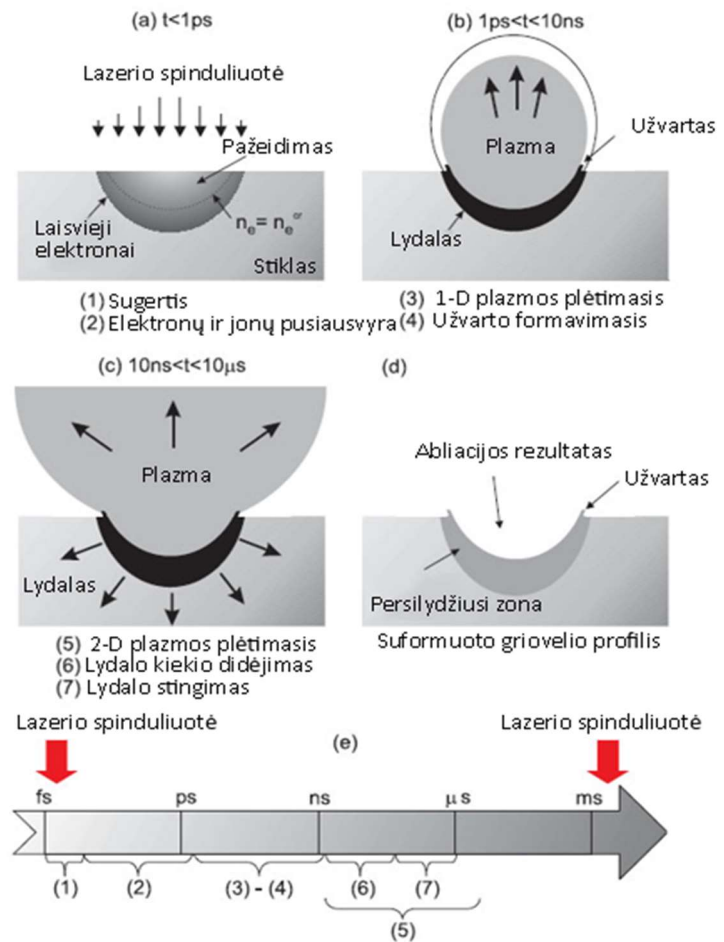
$$\rho_{krit} = \omega^2 \frac{m_e \epsilon_0}{e^2}. \quad (3)$$

Iš išraiškos (3) matyti, kad laisvųjų elektronų tankį lemia lazerio dažnis (ω), efektinė laisvųjų elektronų masė (m_e) ir krūvis (e), dielektrinė konstanta (ϵ_0) [24].

1.3 Lazerio spinduliuotės ir medžiagos energijos mainai. Dviejų temperatūrų modelis

Netiesinė sugertis, plazmos formavimasis, smūginės bangos plėtimasis, bandinio lydymasis, stingimas – tai lazerinės abliacijos metu dielektrinėse medžiagose, tokiose kaip stiklas, vykstantys pagrindiniai reiškiniai, bandinį veikiant ultratrumpaisiais impulsais. Visus išvardintus procesus galima sugrupuoti pagal trukmę (6 pav.) [26].

Per pirmąsias pikosekundes (6 pav. a), vykstant duagiafotonei ir griūtinei jonizacijoms, lazerio spinduliuotės energiją sugeria medžiagos elektronai. Vėliau energija yra perduodama gardelei. Kai pasiekiamas terminis elektronų ir jonų pusiausvyra, virš bandinio susiformuoja aukšto slėgio ir didelės temperatūros plazma. Kito etapo metu (6 pav. b) medžiagos paviršiui statmena kryptimi prasideda plazmos plėtimasis, kuris vėliau tęsiasi įvairiomis kryptimis (6 pav. c), kol galiausiai pašalinamas norimas medžiagos kiekis.



6 pav. Stiklo lazerinės abliacijos metu vykstantys procesai [26]

Didžiąją dalį sugertos energijos sunaudoja besiplečianti plazma. Bandinyje likusi sukaupta šiluminė energija suformuoja išlydytos medžiagos zoną. Lydalo kiekis didėja dėl šilumos difuzijos. Lydalas pradeda stingti, kai temperatūra tampa mažesnė už lydymosi. Termokapiliarinės ir didelio plazmos slėgio sukeltos jėgos veikia išlydytą medžiagą ir stumia lydą nuo formuojamo griovelio centro į kraštus [26].

Į bandinį krintanti lazerio spinduliuotė padidina medžiagoje esančių elektronų kinetinę energiją. Sužadinti elektronai perduoda įgytą energiją gardelei. Dėl šios priežasties padidėja medžiagos temperatūra. Elektronai sugeria spinduliuotę per keletą femtosekundžių (sąveika tarp fotonų ir elektronų). Įgytos energijos perdavimas gardelei yra ilgas procesas, kuris gali tęstis dešimtis pikosekundžių. Šią sąveiką galima aprašyti dviejų temperatūrų modeliu:

$$\begin{cases} C_e \frac{\partial T_e}{\partial t} = K \nabla^2 T_e - g(T_e - T_i) + A(r, t) \\ C_i \frac{\partial T_i}{\partial t} = g(T_e - T_i) \end{cases}, \quad (4)$$

čia C_e ir C_i – atitinkamai elektronų ir gardelės šiluminės talpos, K – medžiagos laidumas, A – narys, apibūdinantis šilumos šaltinį, g – elektronų ir fotonų sąryšio koeficientas, T_e, T_i – elektronų ir gardelės temperatūra [25].

Pirmoji sistemos lygtis nusako lazerio spinduliuotės energijos perdavimą elektronams, antroji – įgytos energijos atidavimą medžiagos gardelei. Dielektrikai turi nedaug laisvųjų elektronų, todėl šiuo atveju svarbūs dideli spinduliuotės intensyvumai. Tai yra būtina sąlyga daugiafotoninei ir griūtinei jonizacijoms įvykti.

Elektronų ir gardelės temperatūros per tam tikrą laiką tampa vienodos. Tai lemia elektronų ir fotonų sąveika. Femtosekundinės abliacijos metu elektronų temperatūra labai išauga, o tai paspartina energijos perdavimą. Elektronai greičiau perduoda šilumą, nei ji pasiskirsto gardeleje. Tai priežastis, kodėl apdirbimas ultratrumpaisiais impulsais pasižymi aukšta kokybe. Naudojant nanosekundinės trukmės impulsus, lazeris veikia kaip šilumos šaltinis, todėl stebimas šilumos plitimas medžiaga. Šis procesas sukelia defektus aplink apdirbamą sritį [25].

1.4 Abliacijos procesas

Koncentruota lazerio energija, patekusi į bandinį, pašalina medžiagą iš poveikio zonos. Šis procesas yra vadinamas abliacija. Plazma susiformuoja tada, kai didelės galios lazerio impulsas, kurio energijos tankis yra didesnis už medžiagos abliacijos slenkstį, yra sufokusuojamas į bandinį. Esant nanosekundinei abliacijai, didžioji dalis sugertos energijos yra išsklaidoma ir medžiagos pašalinimas vyksta lazerio impulso metu. Ultratrumpųjų impulsų abliacijos atveju lazerio impulsas yra trumpesnis nei tipinės relaksacijos trukmės. Pavyzdžiui, elektronų energijos perdavimo jonams laikas bei elektronų šilumos laidumo trukmė.

Bandinį veikiant femtosekundinės trukmės impulsais, galima išskirti du konkuruojančius mechanizmus, kurių rezultatas – medžiagos pašalinimas ir abliacija. Pirmasis – Kuloninis sprogimas,

antrasis – terminis garinimas. Šie du procesai atitinkamai apibūdina švelnią ir stiprią abliacijas. Kuloninis sproginimas ryškus, medžiagą veikiant mažesnio intensyvumo lazerio spinduliuote. Sužadinti elektronai yra išmetami iš bandinio paviršiaus, kuriame yra sukuriamas elektrinis laukas tarp skirtingo krūvio sužadintų elektronų ir jonizuotų atomų. Krūvių skirtumas susiformuoja, jei elektronų sugerta energija yra didesnė už Fermi. Ši energija – tai elektronų ryšio energijos (dielektrikams) ir darbo funkcijos suma. Ji leidžia elektronams ištrūkti iš bandinio. Jei elektronų energija yra didesnė už gardelės jonų ryšio energiją, elektrinis laukas jonus ištraukia iš bandinio. Tokiu būdu yra pašalinami pirmieji keli medžiagos monosluoksniai. Kai lazerio spinduliuotės intensyvumas yra pakankamai didelis ir viršija abliacijos slenkstį, šiluminis garavimas tampa pagrindiniu mechanizmu abliacijos procese [20].

Terminis garavimas ir Kulono sproginimas pasižymi keliais skirtumais. Švelnios abliacijos metu per vieną lazerio impulsą pašalinami keli nanometrai medžiagos. Šiuo atveju bandinio paviršius lieka lygus. Didesnis medžiagos pašalinimo lygis per vieną impulsą yra stebimas, esant stipriai abliacijai. Tiek terminis garavimas, tiek Kulono sproginimas priklauso nuo bandinį veikiančių lazerio impulsų skaičiaus. Po terminio garinimo režimo pašalintos medžiagos temperatūra yra panaši į bandinio garavimo temperatūrą. Tai pat jonų srauto ir kinetinės energijos tyrimai parodė, kad femtosekundiniu lazeriu sukurta plazma pasižymi siauresniu kampiniu pasiskirstymu, o siauresnis energijos pasiskirstymas yra būdingas plazmai, sukurtai nanosekundiniu lazeriu [20].

1.4.1 Abliacijos slenkstis

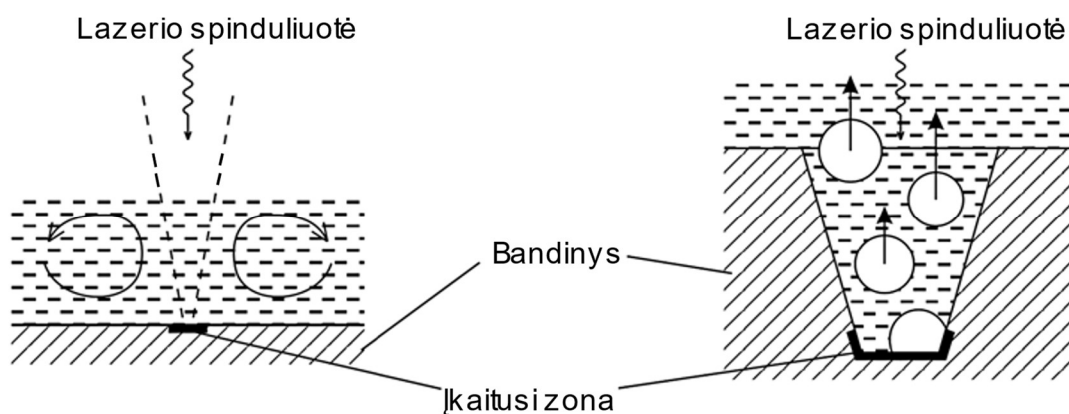
Apšviečiant medžiagas didelės energijos lazerio spinduliuote, jos pradeda lydėtis. Kai intensyvus šviesos impulsas bandinio paviršiuje sukelia morfologinius, mikrostruktūrinius, negrįžtamus pokyčius, yra stebima optinė pažaida [27].

Norint nustatyti abliacijos slenkstį, yra naudojami keli eksperimentiniai metodai: plazmos spinduliavimo stebėjimas, fototerminis nuokrypis, susiformavusių kraterių analizė ir kiti. Tiek nanosekundinės, tiek pikosekundinės lazerinės abliacijos metu galioja priklausomybė: $F_{th} \sim \tau_p^{1/2}$, čia F_{th} – abliacijos slenkstis, τ_p – lazerio impulso trukmė. Femtosekundinės abliacijos atveju fotonų sugerties gylis turi įtakos tūriniam medžiagos šilumai, o ne šilumos difuziniam gyliui, kuris proporcingas $\tau_p^{1/2}$. Žymus abliacijos slenkščio nuokrypis nuo $\tau_p^{1/2}$ vertės pastebėtas, esant mažesnei impulsų trukmei nei 10 ps. Tai galioja dielektrinėms medžiagoms. Femtosekundinių impulsų trukmė yra mažesnė nei šilumos laidumo laikas, elektronų energijos perdavimo jonams trukmė, plazmos išsiplėtimo laikas. Dėl šios priežasties femtosekundinės lazerio spinduliuotės ir medžiagos sąveikos metu stebimi jonizacijos procesai [20].

1.4.2 Abliacija skystoje aplinkoje

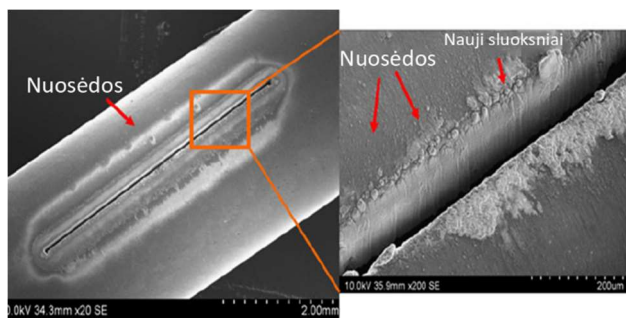
Svarbu pabrėžti, kad abliacijos procesui turi įtakos ne tik lazerio impulso parametrai, bet ir bandinio savybės bei aplinka. Nustatyta, kad abliacijos efektyvumą charakterizuojantys parametrai yra blogesni, medžiagą apdirbant ore [28]. Šiuo atveju suformuoti grioveliai yra mažiau gilūs bei pasižymi prastesne kokybe [29]. Bandinį panardinus į skystį, pašalinamas didesnis medžiagos kiekis, sumažinama šilumos poveikio zona (*HAZ*) [28, 30].

Dėl lazerio spinduliuotės poveikio skystyje ir jame esančiame bandinyje susidaro šiluminiai gradientai. Skystyje susiformavę burbulai lemia jo judėjimą. Dėl šios priežasties abliacijos metu pašalintos medžiagos dalelės nusėda lėčiau. Tokiu būdu nuosėdos gali būti veiksmingai pašalinamos iš lazeriu suformuoto griovelio (7 pav.) [9, 31]. Nemažiau svarbu paminėti, kad papildomas skysčio sluoksnis atlieka bandinio aušinimo funkciją. Pastaroji padeda sumažinti apdirbamos medžiagos įskilimų, įtrūkimų susiformavimo tikimybę [32].

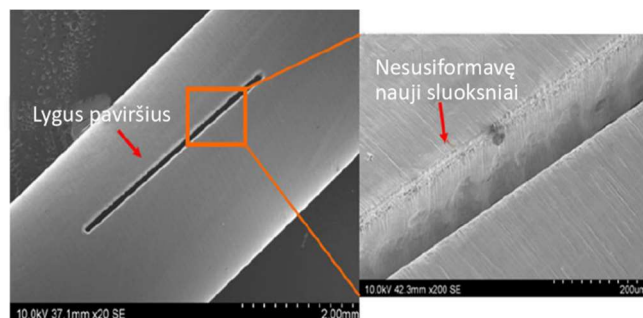


7 pav. Medžiagos abliacija, bandinį panardinus į skystį [9]

8 ir 9 paveiksluose pateiktas sauso ir panardinto į vandenį bandinio lazerinio mikroapdirbimo kokybės palyginimas. Apdirbimo metu nenaudojant papildomo vandens sluoksnio, ant medžiagos paviršiaus susiformuoja nauji nepageidaujami sluoksniai, aptinkamos nuolaužos, stebimi netolygumai (8 pav.). Norint pašalinti nuosėdas, dulkes, po apdirbimo bandinys dažniausiai yra plaunamas ultragarsinėje vonelėje. Tačiau tai nėra efektyvus metodas. Nauji aplink apdirbamą sritį susiformavę sluoksniai, negali būti pašalinami dėl stipraus sukibimo su bandiniu [10]. Todėl medžiagai, kurios mikroapdirbimas atliekamas ore, reikalingas papildomas apdorojimas. Dažniausiai naudojamas cheminis išdėinimas. Nepageidaujamų nuolaužų susidarymo ir naujų sluoksnių susiformavimo išvengiama, kai bandinys apdirbamas vandenyje (9 pav.) [10].



8 pav. Lazerinis mikroapdirbimas ant sauso bandinio paviršiaus [10]

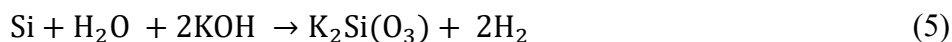


9 pav. Lazerinis mikroapdirbimas, atliktas esant vandens sluoksniui virš bandinio [10]

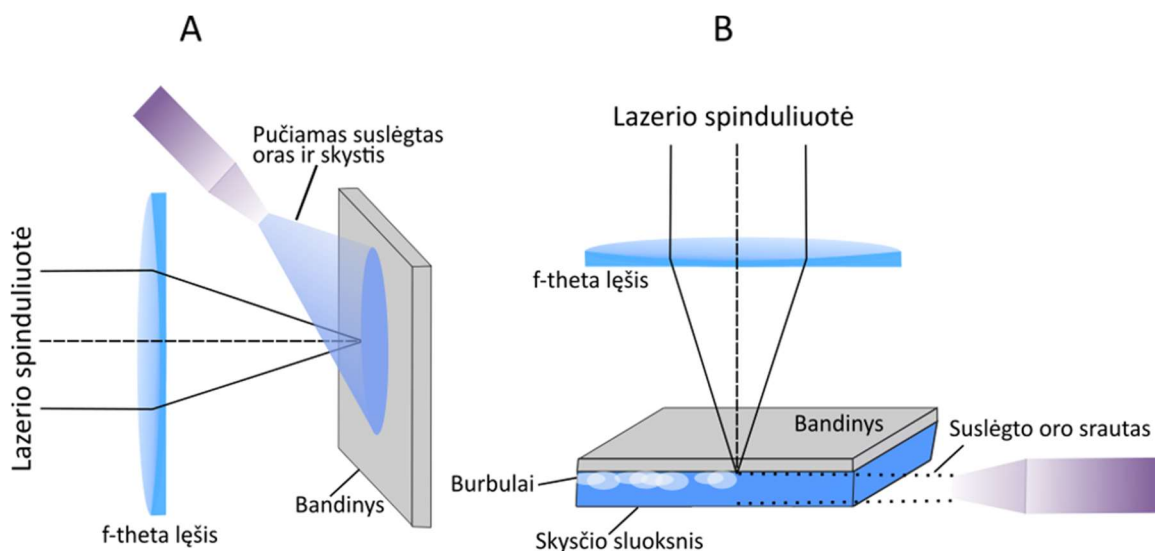
Mikroapdirbime naudojant femtosekundinės trukmės impulsus, pašalinamas šilumos plitimas medžiaga. Dėl šios priežasties tiek bandinį apdirbant skystyje, tiek ore yra pasiekama gana aukšta kokybė. Tačiau, kaip jau minėta anksčiau, kai apdirbimas atliekamas ant sauso bandinio paviršiaus, pastebimas nuolaužų, naujų sluoksnių susidarymas. Aptartų defektų susiformavimo priežastis yra perkaitintų garų kondensacija ant medžiagos paviršiaus. Šį efektą lemia susidūrimai su aplinkos dujų molekulėmis. Iš pradžių išstumti garai ilgainiui grįžta į apdirbamą sritį. Nuolaužų, nuosėdų susidarymas ne tik blogina medžiagos abliacijos efektyvumą, bet ir gali blokuoti lazerio pluošto kelią, sekančio skenavimo metu. Kokybės pagerėjimas, atliekant apdirbimą, kai virš bandinio palaikomas skysčio sluoksnis, yra aiškinamas plazmos generacija skystoje terpėje dėl daugiafotoninės jonizacijos proceso. Lazerio spinduliuotės sužadinti elektronai ir plazma perduoda savo energiją apdirbamos medžiagos gardelei ir skysčio molekulėms. Padidėjusi temperatūra skystyje lemia įtempimus bei stiprios didelio slėgio bangos sklaidimą. Energijos perdavimas yra pakankamai stiprus tam, kad skystyje būtų sukeltas fazės pasikeitimas, kuris sukelia burbulų formavimąsi. Temperatūra gali pakilti iki 10000 K, o slėgis – 2 – 7 GPa [10]. Skystyje izoliuota plazma sukelia didesnę slėgį. Formuojant griovelius palaikant pastovų skysčio sluoksnį virš bandinio, smūginės bangos trukmė yra nuo dviejų iki trijų kartų didesnė nei sauso apdirbimo metu. Padidėjęs slėgis turi didesnę poveikį medžiagos paviršiui. Taip pat izoliuotos plazmos temperatūra yra didesnė skystyje nei apdirbant sausą bandinio paviršių. Skysčio naudojimas neleidžia išsiplėsti plazmai, todėl stebimas mikroapdirbimo efektyvumo padidėjimas [33]. Taigi, plazmos susiformavimas ir sklaidimas – galima priežastis, kuri lemia mechaninių įtempių, didelio slėgio bangų bei burbulų atsiradimą [10].

Vykdamas mikroapdirbimą su femtosekundiniu lazeriu, dažniausiai naudojama skysta terpė, į kurią panardinamas bandinys, – vanduo. Tai yra ekologiškas ir pigus pasirinkimas. Taip pat nemažai eksperimentų atliekama įvairių koncentracijų druskų tirpaluose ir stipriose bazėse, pavyzdžiui, kalio hidrokside (KOH). Druskų tirpalai pasižymi didesne šilumos talpa. Taip pat juose yra daugiau deguonies. Šios savybės palengvina medžiagos pašalinimą iš bandinio [9]. Kalio hidroksidui

sąveikaujant su kitomis medžiagomis, pasireiškia ėsdinimo procesai. Ši reakcija dar labiau suaktyvėja, kai lazerio spinduliuotė lokaliai padidina temperatūrą. Dėl šios priežasties KOH tirpalas taip pat gali būti naudojamas mikroapdirbimo efektyvumo bei kokybės didinimui. Įvykus cheminei reakcijai (žr. 5 formulę) tarp KOH tirpalo ir silicio bandinio, susidaro vandenilio burbulai (H₂) ir K₂Si(O₃). Pastarasis produktas yra tirpus. Šis pavyzdys parodo, koku būdu kalio hidroksidas ėsdina silicio bandinius [11].



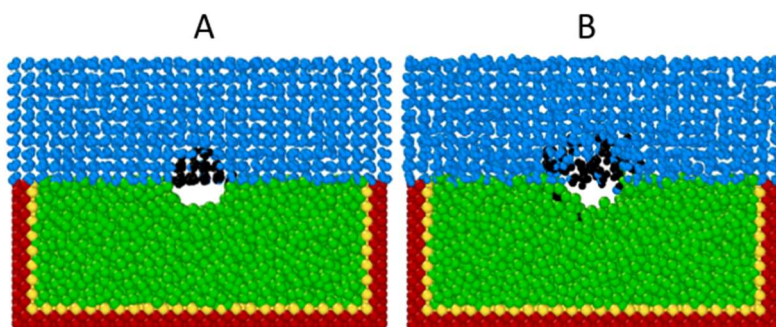
Yra įvairių būdų, kaip galima atlikti skysčiu asistuoją lazerinę abliaciją. Į apdirbamą zoną purškiamas skystis su suslėgtu oru (10 pav. A) padidina medžiagos pašalinimo greitį bei pagerina paviršiaus lygumą. Tekančio skysčio srautas neleidžia nuosėdoms grįžti į apdirbamą sritį. Tai sumažina lazerio spinduliuotės išsklaidymą ir sugertį [9]. Taip pat skysčio cirkuliacija padeda sumažinti paviršiaus šiurkštumą, nes dėl skysčio dinamikos lydalo negali nusėsti ant apdirbamos medžiagos paviršiaus. Sufokusavus lazerio pluoštą į antrą bandinio paviršių (10 pav. B), jis būtų nuolat drėkinamas. Šiuo atveju apdirbimo zonoje gali susiformuoti burbulai, kurie sudarytų atskirtį tarp bandinio ir skysčio. Tai gali sumažinti pašalinamos medžiagos kiekį. Problemai išspręsti gali padėti skysčio cirkuliacija.



10 pav. A - lazerinis mikroapdirbimas, pučiant suslėgtą orą ir skystį į apdirbimo zoną, B – lazerinis mikroapdirbimas, fokusuojant spinduliuotę į antrąjį bandinio paviršių

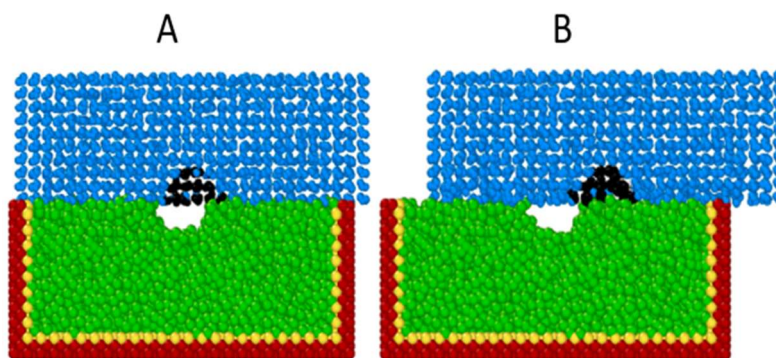
Abliacijos metu palaikant skysčio sluoksnį virš bandinio, kavitacija padeda efektyviau atlikti lazerinį mikroapdirbimą. Vykstančius pagrindinius procesus paaikškina molekulinė dinamika (11 pav.). Netekančio skysčio atveju (11 pav. A) lazerio pluoštas skystį paverčia garais. Įkaitintų garų, lydalo ir išgarintos medžiagos molekulės virš apdirbamos zonos suformuoja terminį sluoksnį (žr. 11 pav. juodi

atomai). Pastarasis neleidžia atvėsti apdirbimai sričiai, o tai padeda efektyviai pašalinti norimą medžiagos kiekį. Praėjus tam tikram laikui, skysčio molekulės pamažu išsklaido įkaitintus garus. Atliekant lazerinį apdirbimą ant sauso bandinio paviršiaus, nėra suformuojamas terminis sluoksnis. Tai gali būti viena iš priežasčių, kodėl esant pastoviam skysčio sluoksniui virš medžiagos pasiekiami geresni apdirbimo rezultatai.



11 pav. Lazerinis mikroapdirbimas netekančio skysčio atveju [34]

Lazerinio mikroapdirbimo procesas, kai yra palaikomas skysčio judėjimas (12 pav.), terminį sluoksnį pastumia nuo apdirbamos srities (12 pav. B). Tai neleidžia išlaikyti aukštą temperatūrą apdirbimo zonoje. Šiuo atveju yra pašalinamas mažesnis medžiagos kiekis, tačiau bandinio paviršius pasižymi geresne kokybe [34].



12 pav. Lazerinis mikroapdirbimas, palaikant skysčio dinamiką [34]

Nors virš bandinio palaikomas plonas skysčio sluoksnis sumažina nepageidaujamų defektų atsiradimo tikimybę, tačiau vis tiek yra pastebimi įvairūs trūkumai, kurie sumažina apdirbimo efektyvumą [35]. Tai galima paaiškinti remiantis tuo, kad tokie parametrai, kaip: lazerio energijos tankis, impulsų skaičius, pasikartojimo dažnis, sufokusuoto pluošto diametras, skysčio tipas, storis, dinamika, taip pat turi nemažai įtakos mikroapdirbimo spartai ir kokybei. Pavyzdžiui, parinkus per didelį skysčio storį virš apdirbamos medžiagos, gali prasidėti lazerio spinduliuotės sugerties procesas. Dėl to labai svarbu parinkti optimalius parametrus, kurie leistų pasiekti didžiausią apdirbimo efektyvumą.

1.5 Netiesinis pluošto sklaidimas

Šviesos gijos gali turėti įtakos apdirbimo procesui. Supaprastintas femtosekundinės šviesos gijų formavimasis aprašomas trimis nariais. Vykstant šiam reiškiniai yra pasiekama dinaminė pusiausvyra tarp savifokusavimo, laisvųjų elektronų plazmos defokusavimo ir difrakcijos. Tokią trijų veiksnių sąveiką galima išreikšti formule (6). Pastaroji galioja bet kuriame erdvės taške.

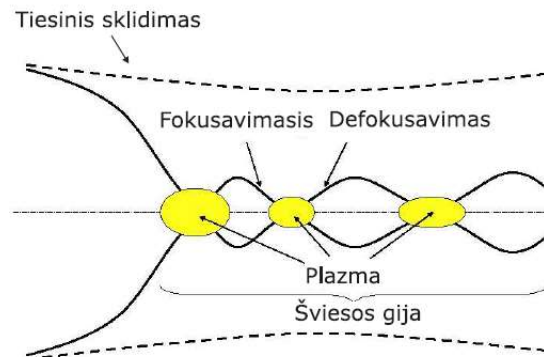
$$n_2 I - \frac{N(I)}{2N_k} - \frac{(0,61\lambda)^2}{4\pi n_0 w_0^2} = 0, \quad (6)$$

čia n_2, n_0 – atitinkamai netiesinis ir tiesinis lūžio rodikliai, λ – bangos ilgis, $N(I)$ – laisvųjų elektronų tankis, w_0 – šviesos gijos diametras, N_k – kritinis plazmos tankis, kuris nusako, kada plazma tampa nebeskaidri. Šį narį galima aprašyti formule:

$$N_k = \frac{\varepsilon_0 m_e w_0^2}{e^2}, \quad (7)$$

čia ε_0 – vakuumo dielektrinė skvarba, m_e, e – atitinkamai elektrono masė ir krūvis.

Dėl pluošto intensyvumo kitimo tiek laike, tiek erdvėje, taip pat keičiasi ir elektronų tankis. Tai lemia ir terpės lūžio rodiklio modifikaciją. Šviesos gijos formavimasis galima pavaizduoti, kaip fokusavimo ir defokusavimo procesų ciklą (13 pav.).



13 pav. Šviesos gijos formavimosi schema [36]

Filamentacijos procesui labai svarbus parametras yra kritinė galia:

$$P_k = \frac{(0,61\lambda)^2 \pi}{8n_0 n_2}. \quad (8)$$

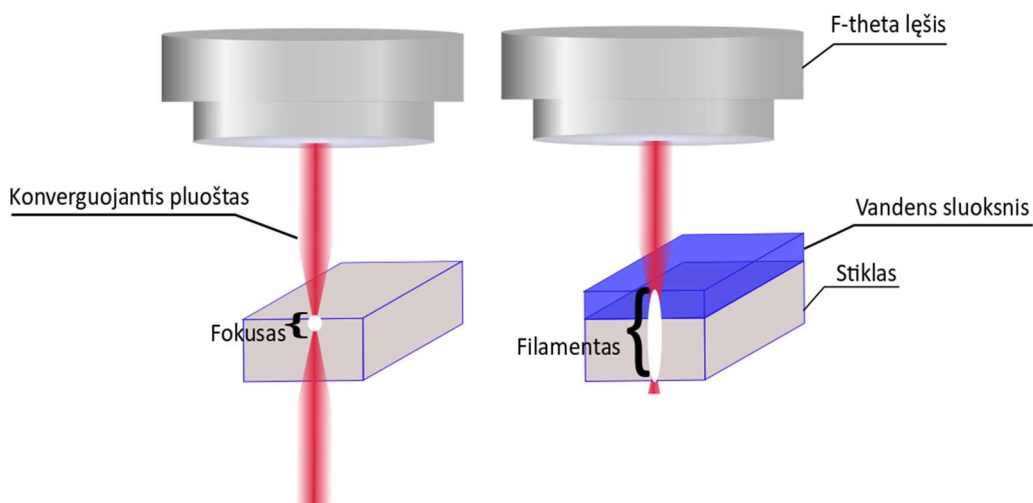
Pasiekus šią vertę, fokusavimasis kompensuoja pluošto skėstį ir prasideda šviesos gijų formavimasis [36].

1.5.1 Šviesos gijų formavimasis lazerinio mikroapdirbimo metu, palaikant skysčio sluoksnį virš bandinio

Skaidrių medžiagų femtosekundinis lazerinis mikroapdirbimas gali būti atliekamas įvairiais būdais, pavyzdžiui, erdvinio ir laikiniu fokusavimu sustiprinta abliacija, lazerio spinduliuote paveiktų sričių papildomu cheminiu ėsdinimu [37]. Taikant pastaruosius metodus ir norint bandinyje suformuoti aukštos kokybės griovelius, skyles, yra reikalingas didelės skaitinės apertūros fokusuojantis objektyvas, greitai judantys pozicionavimo stalai, papildomi komponentai pluošto nukreipimui [38]. Tokios sistemos pasižymi jautrumu. Norint pasiekti geresnę kokybę, padidėja apdirbimo laiko sąnaudos.

Šilumos kaupimasis aplink apdirbamą sritį bandinyje sukelia įskilimus. Kita defektų atsiradimo priežastis – besikeičianti formuojamų griovelių, skylių forma. Po kiekvieno impulso struktūros gylis padidėja. Šiuo atveju stebimi difrakcijos, refrakcijos, sklaidos reiškiniai nuo suformuotų darinių sienelių. Pastarieji procesai iškreipia impulsų intensyvumo pasiskirstymą, o tai savo ruožtu lemia įtrūkimus bei kūginę griovelių formą [37].

Atlikti skaidrių medžiagų mikroapdirbimo tyrimai [37, 38], kurių metu buvo naudojamas mažos skaitinės apertūros objektyvas bei palaikomas papildomas vandens sluoksnis virš bandinio, parodė, kad skystyje galimai susiformuoja šviesos gijos (14 pav.).



14 pav. Kairėje – pluošto fokusavimas ant sauso bandinio paviršiaus, dešinėje – pluošto fokusavimas ant bandinio, virš kurio palaikomas papildomas skysčio sluoksnis (stebimas filamentacijos reiškinys)

Dėl filamentacijos reiškinio padidėjusio sąsmaukos ilgio, galima atsisakyti sudėtingos z ašies pozicionavimo sistemos, aštrios fokusuojančios optikos. Ši technologija leidžia naudoti galvanometrinius skenerius bei f-Theta objektyvus. Tai suteikia galimybę pasiekti didelį skenavimo greitį (> m/s), plotą, sumažina apdirbimo laiką bei pagerina apdirbimo kokybę [38].

2. MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ TYRIMO TEMATIKA APŽVALGA

E. Markauskas ir kt. atliko stiklo lazerinį mikroapdirbimą, kai virš bandinio palaikomas vandens sluoksnis. Eksperimentų metu dirbama su Nd:YVO₄ lazeriu, kuris generuoja 10 ps trukmės impulsus. Pasirinktas bangos ilgis – 532 nm. Lazerio pasikartojimo dažnis lygus 100 kHz. Oras pučiamas į apdirbimo zoną tam, kad būtų galima sukurti tekančio vandens efektą.

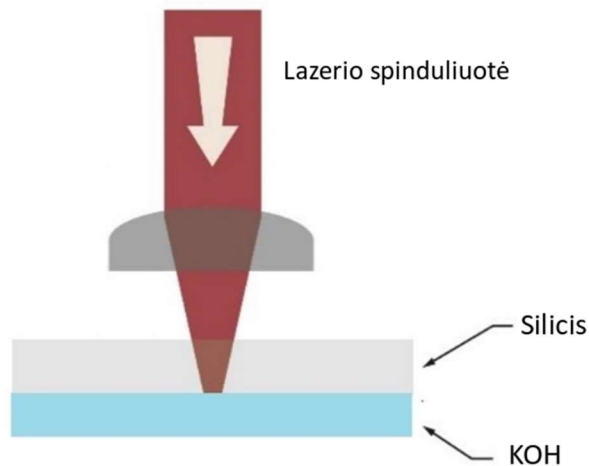
Tyrimai parodė, kad vandens sluoksnis virš bandinio pagerina apdirbimo efektyvumą. Tai grindžiama tuo, kad skystis pašalina nuosėdas iš formuojamų griovelių, skylių. Atliekant apdirbimą ant sauso bandinio paviršiaus, medžiagos pašalinimo efektyvumas yra mažesnis net 12 kartų. Taip pat pastebėta, kad vanduo pagerina mikroapdirbimo kokybę [39].

I. Saxena ir kt. analizavo medžiagų mikroapdirbimą, naudojant lazeriu indukuotos plazmos metodiką. *LIPMM* (angl. *Laser Induced Plasma Micro-machining*) – tai technologija, kurią naudojant apdirbimo metu pašalinami didesni medžiagos kiekiai. Taip pat šis metodas pasižymi tikslumu, stabilumu. Taikant *LIPMM* technologiją, lazereo pluoštas yra fokusuojamas į bandinį per skaidrią terpę. Dažniausiai naudojamas distiliuotas vanduo.

Šiame eksperimente kiekvieno matavimo metu tiriamas aliuminio bandinys buvo panardintas į skirtingos koncentracijos NaCl ir distiliuoto vandens tirpalą. Šio druskos tirpalo koncentracija buvo keičiama nuo 1 g/100ml iki 35 g/100ml. Eksperimentų atlikimui buvo naudojamas 532 nm bangos ilgio Nd:YVO₄ lazeris (*Lumera Lasers Inc.*), generuojantis 8 ps trukmės impulsus, kurių pasikartojimo dažnis svyravo nuo 10 kHz iki 50 kHz. Griovelių formavimo greitis – 0,4 mm/s.

Eksperimentų metu nustatyta, kad tirpalo druskingumo lygis lemia medžiagoje formuojamų griovelių gylį. Pastebėtas dėsningumas, kad griovelių gylis didėja, kai tirpalo koncentracija neviršija 4 g/100 ml. Gauta, kad tirpalo druskingumo lygis neturi žymios įtakos griovelių pločiui [13].

Mokslininkai K. P. Luong ir kt. atliko silicio mikroapdirbimą ore ir KOH tirpale. Lazereo spinduliuotės pluoštas buvo fokusuojamas ties antru paviršiumi (15 pav.). Suformuotų griovelių gylis ore siekė 170 nm. Norint padidinti griovelių gylį, buvo naudojamas KOH tirpalas, kuris pasižymi ėsdinimo savybėmis. Šis tirpalas yra mažiau toksiškas negu kitos cheminės medžiagos, naudojamos silicio litografijoje. Eksperimento metu lazereo pluoštas sufokusuojamas į antrą silicio plokštelės paviršių, kuris buvo nuolat drėkinamas KOH tirpalu. Lokalus temperatūros padidėjimas sukelia dar didesnę ėsdinimą. Griovelių gylio matavimams buvo naudojamas lazerinis mikroskopas. Skenuojančiu elektronų mikroskopu buvo stebimos paviršiaus struktūros.



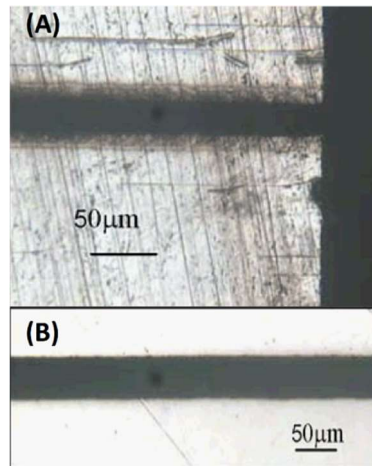
15 pav. Silicio apdirbimas KOH tirpale

Šis tyrimas buvo atliekamas, naudojant 1552,5 nm bangos ilgio femtosekundinį lazerį, kuris generuoja 900 fs trukmės impulsus su pasikartojimo dažniu – nuo 1 Hz iki 500 kHz. Impulsų energijos diapazonas – nuo 1 μJ iki 5 μJ . Eksperimento metu buvo naudojamas p tipo Si bandinys, kurio matmenys – 20 x 20 mm, storis – 320 μm . Bandinio paviršiai buvo nušlifuoti. KOH tirpalo koncentracija – 40 %.

Naudojant šią technologiją, kai lazerio pluoštas yra fokusuojamas į antrą silicio paviršių, kuri nuolat drėkina KOH tirpalas, griovelių gylis gautas daugiau nei 3 μm . Taip pat buvo tiriamos griovelių gylių priklausomybės nuo lazerio impulso energijos, pasikartojimo dažnio bei skenavimo greičio. Gautos gana išsibarsčiusios priklausomybės. Tai galėjo lemti proceso metu susiformavę vandenilio burbulai, kurie trukdo bandinio ir ėsdinimo tirpalo sąveikai [11].

Mokslininkai L. Li ir C. Achara atliko nerūdijančio plieno mikroapdirbimą, panardinus bandinį į natrio chlorido tirpalą, kurio koncentracija buvo keičiama nuo 5 % iki 75 %. Gauti rezultatai lyginami su apdirbimu, atliktu ant sauso bandinio paviršiaus. Eksperimentams buvo naudojamas diodinio kaupinimo Nd:YVO₄ lazeris, generuojantis 532 nm bangos ilgio ir 30 ns trukmės impulsus. Spinduliuotei praėjus pro fokusuojantį lęšį, galia lygi 2,6 W, pasikartojimo dažnis – 25 kHz.

Naudojant šį metodą, suformuotų griovelių plotis svyravo nuo 25 μm iki 45 μm , gylis – nuo 60 μm iki 150 μm . 16 paveiksle stebimi akivaizdūs kokybės skirtumai, atliekant apdirbimą ant sauso bandinio paviršiaus (A) ir panardinus tiriamą medžiagą į druskos tirpalą (B).



16 pav. *Suformuotų griovelių kokybės palyginimas, atlikus mikroapdirbimą ant sauso bandinio paviršiaus (A) ir druskos tirpale (B) [12]*

Taip pat eksperimento metu buvo analizuojamos įvairios priklausomybės. Gauta, kad atliekant apdirbimą tiek ant sauso paviršiaus, tiek panardinus bandinį į NaCl tirpalą, griovelių gylis yra atvirkščiai proporcingas skenavimo greičiui. Didžiausias gylis yra pasiekiamas, esant 50 $\mu\text{m/s}$ greičiui. Dideli suformuotų griovelių gylio skirtumai nėra pastebimi, keičiant skenavimo greitį nuo 75 $\mu\text{m/s}$ iki 150 $\mu\text{m/s}$. Šiame greičio intervale yra pašalinamas nedidelis medžiagos kiekis. Taip pat nustatyta, kad medžiagos pašalinimo kiekis didėja, kai druskos tirpalo koncentracija neviršija 80 %. Kai koncentracija yra didesnė nei 80 %, apdirbimo efektyvumas ima mažėti. Atlikus griovelių formavimą ant sauso paviršiaus ir druskos tirpale, pastaruoju atveju pašalinama 3 kartus daugiau medžiagos. Nemažiau svarbus šio tyrimo rezultatas yra tai, kad abliacijos metu didėja griovelio gylis, o plotis išlieka pastovus [12].

Siekiant pagerinti medicinoje naudojamų koronarinių stentų gaminimą, mokslininkai N. Muhammad ir L. Li atliko nitalio (nikelio ir titano lydinys) femtosekundinį mikroapdirbimą vandenyje. Eksperimentų metu buvo naudojamas Ti:Safyro lazeris (*Coherent Libra*), kuris generuoja 800 nm bangos ilgio ir 100 fs trukmės impulsus. Energija lygi 1 mJ, maksimali vidutinė galia – 1 W, pasikartojimo dažnis – 1 kHz. Taip pat į eksperimento schemą buvo įtrauktas filtras, kuriuo reguliuojamas lazerio spinduliuotės intensyvumas. Matavimai atliekami, keičiant energijos tankį ir skenavimo greitį. Tyrime naudojamos energijos tankio vertės – 4 J/cm², 6 J/cm², 8 J/cm², 13 J/cm². Su kiekviena energijos tankio verte matavimai pakartoti, esant skirtingiems skenavimo greičiams: 0,1 mm/s, 0,5 mm/s, 1 mm/s, 1,5 mm/s. Norint pagrįsti lazerinio mikroapdirbimo vandenyje pranašumus, apdirbimas taip pat buvo atliekamas ant sauso bandinio. Eksperimentų metu stengiamasi palaikyti 1 mm vandens sluoksnį virš medžiagos paviršiaus.

Atlikus apdirbimą abiejose terpėse, duomenys buvo analizuojami kiekybiškai ir kokybiškai. Rezultatai parodė, kad po apdirbimo be papildomo vandens sluoksnio bandinio minimalus paviršiaus šiurkštumas pasiekiamas, nustatius mažiausią energijos tankio vertę (4 J/cm^2) bei didžiausią skenavimo greitį ($1,5 \text{ mm/s}$). Šiuo atveju nuosėdos ir dulkės buvo išplaunamos, naudojant ultragarsinį plovimą. Tačiau norint pašalinti susiformavusius naujus sluoksnius, reikalingas papildomas apdirbimas. Taip pat esant didžiausiam energijos tankiui (13 J/cm^2), buvo pastebėta $2 \text{ }\mu\text{m}$ šilumos poveikio zona. Efektas nepasireiškė, atliekant apdirbimą vandenyje. Šiuo atveju priešingai nei bandinį apdirbant ore, geresnė bandinio kokybė gauta, kai energijos tankis lygus 13 J/cm^2 , o skenavimo greitis parenkamas mažiausias – $0,1 \text{ mm/s}$. Nemažiau svarbu pabrėžti, kad nuolaužų, nuosėdų ir dulkių kiekis buvo žymiai mažesnis, atliekant apdirbimą, esant vandens sluoksniui virš bandinio [10].

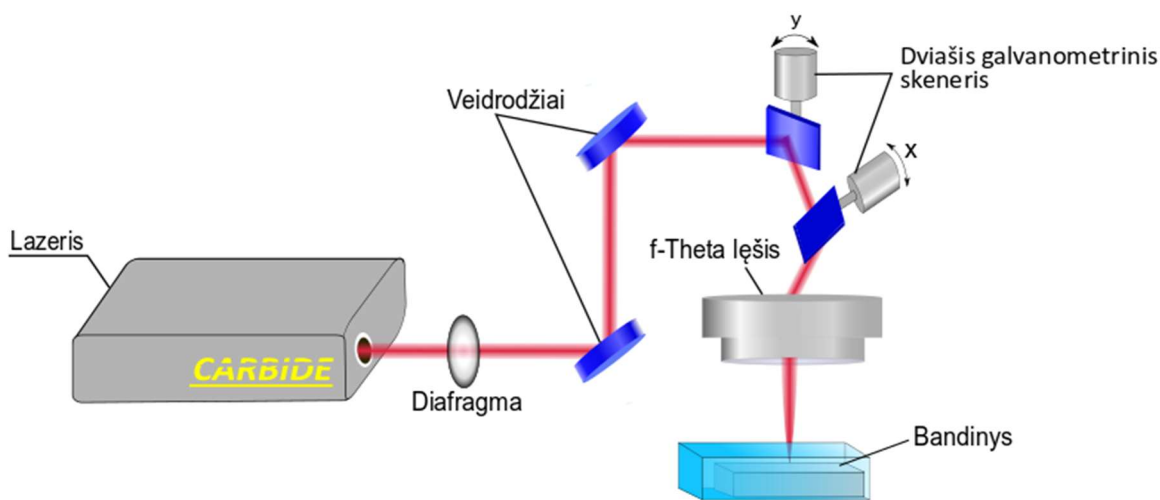
Mokslininkų grupė, kurią sudarė: G. Daminelli ir kt. tyrė lazerinį silicio mikroapdirbimą, kuris buvo atliekamas ant sauso bandinio paviršiaus ir medžiagą panardinus į vandenį. Eksperimentams atlikti buvo naudojamas Ti:Safyro lazeris ir regeneracinio stiprintuvo sistema (*Spitfire, Spectra Physics*). Generuojamų impulsų trukmė – 130 fs , bangos ilgis – 800 nm . Impulsų pasikartojimų dažnis keičiamas nuo 1 Hz iki 1000 Hz . Tyrime naudojamos impulsų skaičiaus vertės – $10000, 1000, 100, 10, 1$. Silicio plokštelės storis – $400 \text{ }\mu\text{m}$. Dalis eksperimentų atliekama, bandinį įdėjus į kiuvetę taip, kad apdirbamos medžiagos padėtis būtų vertikali ir lazerio pluoštas kristų statmenai į paviršių. Atstumas tarp bandinio ir kvarcinio lango buvo apie 5 mm . Šis tarpas buvo užpildytas vandeniu. Kiti matavimai atliekami, bandiniui esant horizontalioje padėtyje.

Palyginus eksperimentų rezultatus, nustatyta, kad atliekant silicio plokštelės apdirbimą vandenyje, pasiekiami nedideli gyliai – pašalinama mažiau medžiagos. Taip pat šiuo atveju gaunamos didesnės pažeidimo slenksčio vertės. Mokslininkai pastebėjo, kad atliekant apdirbimą vandenyje, dėl pašalintos medžiagos kiekio pasikeičia skystos terpės spalva. Tai įrodo, kad vanduo gali padėti pašalinti nepageidaujamas nuosėdas ir dulkes. Dar vienas tyrimo rezultatas, kai bandinys apdirbamas vandenyje, – užfiksuoti nedidelio gylio morfologiniai pokyčiai (bangelės, raibuliai) aplink apdirbimo zoną [32].

3. TYRIMO METODIKA

3.1 Eksperimentų schemos ir aparatūrinės įrangos

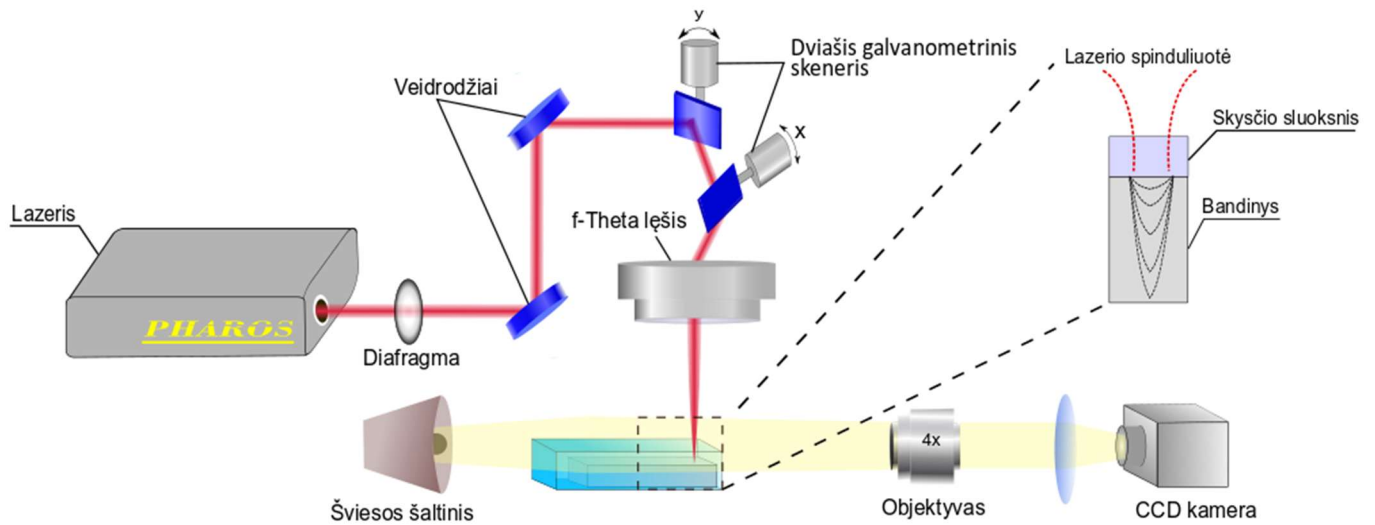
Pirmieji matavimai atlikti, naudojant *CARBIDE* (*Light Conversion Ltd.*) lazerį, kuris generuoja 1030 nm bangos ilgio femtosekundinės trukmės impulsus (290 fs). Jų pasikartojimo dažnis – 60 kHz, maksimali išvadinė galia – 5 W. Eksperimento principinė schema pateikta 17 paveiksle. Pirmiausia lazerio spinduliuotė, praėjusi pro diafragmą, veidrodžių sistema nukreipiama į dviašį galvanometrinių skenerių (*ScanLab Inc.*). Jame esantys du veidrodžiai gali pakeisti pluošto sklaidimo kryptį dviem statmenomis kryptimis. Šiuo atveju veidrodžių judėjimas reguliuojamas, naudojant *SCA* programinę įrangą (*Altechna Ltd.*). Didelis skenavimo greitis (3 m/s), tikslumas, mažas inertiškumas, kompaktiškumas, stabilumas – tai savybės, kuriomis pasižymi ši lazerio spinduliuotės valdymo sistema. Pro galvanoskenerį praėjęs pluoštas fokusuojamas f-Theta lęšiu ($f = 100$ mm). Šio lęšio židinio padėtis yra proporcinga pluošto lūžio kampui. Vienašio motorizuoto poslinkio stalelio (*Standa Ltd.*), valdomo *SMCVieW* (*Standa Ltd.*) programine įranga, pagalba buvo reguliuojamas atstumas nuo bandinio iki f-Theta lęšio. Tokiu būdu surandama fokuso padėtis.



17 pav. Principinė eksperimento schema Nr. 1

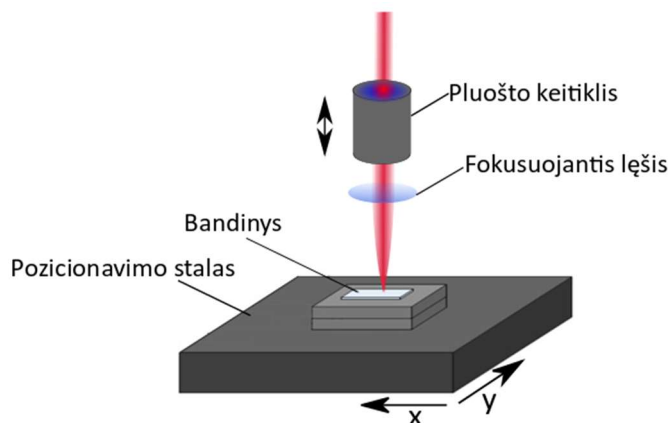
Kitų tyrimų eksperimentinė schema pateikta 18 paveiksle. Šiuo atveju naudojamas Yb:KGW *Pharos* (*Light Conversion*) lazeris, generuojantis 1026 nm bangos ilgio femtosekundinės trukmės impulsus (260 fs). Kiti parametrai: impulsų pasikartojimo dažnis – 1 Hz - 610 kHz, maksimali išvadinė galia – 20 W, impulso energija – < 400 μ J.

Matavimų metu taip pat buvo naudojama prie kompiuterio prijungta *mvBlueFOX* CCD kamera (*Sony*). Tokiu būdu mikroapdirbimo procesas tiek ant sauso bandinio paviršiaus, tiek bandinį panardinus į skystį, buvo stebimas tiesiogiai. Kameros naudojimas leido tiksliau kontroliuoti skysčio storį virš apdirbamos medžiagos bei stebėti formuojamo griovelio gylio bei profilio kitimą.



18 pav. Principinė eksperimento schema Nr. 2

Taip pat šiam stebėjimui buvo naudojamas 4X *Olympus* objektyvas, kurio darbinis židinio nuotolis yra 18,4 mm bei skaitinė apertūra (NA) lygi 0,2, ir fokusuojantis lęšis ($f = 5$ cm). Nemažiau svarbu paminėti, kad schemoje naudojamas papildomas apšvietimas, kuris pagerino stebėjimo proceso kokybę. Pastarąjį tinkamai nukreipus, šviesa, sklindanti per skystį ir vandenį, buvo surenkama ir atvaizduojama, o sklindanti per orą – išsklaidyta.



19 pav. Mikroapdirbimo schema, naudojant pluošto keitiklį

Pluošto keitiklis bei fokusuojantis lęšis ($f = 5$ cm) būtini komponentai, norint atlikti eksperimentą. Pozicionavimo stalai (*Aerotech*) bei SP620U (*Ophir*) kamera padėjo tiksliai nusakyti, kada Gauso pluoštas pakeičia formą. Svarbu paminėti, kad pluoštas įgauna kitą formą, tik prieš fokuso padėtį.

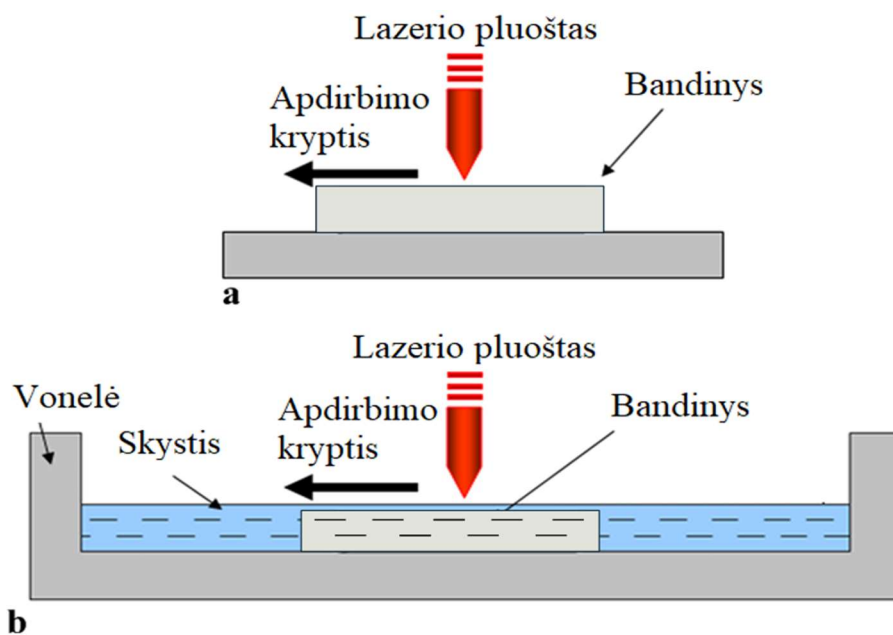
Lazerinio apdirbimo metu visais atvejais susiformavusios nuosėdos, dulkės nupučiamos oro kompresoriumi ir siurbliu susiurbiamos. Tokiu būdu buvo siekiama neužteršti optinės sistemos elementų bei palaikyti patalpos švarą.

Suformuotų griovelių vizualinė bei topografinė analizės atliktos, naudojantis BX51 (*Olympus Corporation*) optiniu mikroskopu, Plμ 2300 (*Sensofar*) profilometru, TM-1000 elektroniniu mikroskopu (*Hitachi*). Duomenų apdorojimui naudojamos programos: *Origin*, *MATLAB*, *SensoMap*.

3.2 Bandinių paruošimas

Mikroapdirbimui naudojami silikatinio stiklo bandiniai, kurių parametrai: ilgis – 75 mm, plotis – 25 mm, storis – 1 mm. Bandiniai buvo talpinami į specialią vonelę skaidriomis sienomis, kurioje atliekamas medžiagos apdirbimas tiek skystoje terpėje, tiek ore (20 pav.). Prieš pradėdant eksperimentus, stiklo bandiniai buvo nuplaunami.

Lazerinis apdirbimas atliekamas ant sauso stiklo paviršiaus bei bandinį panardinus į vandenį, KOH ir NaCl tirpalus. Druska buvo tirpinama distiliuotame vandenyje kambario temperatūroje. Paruošta dešimt skirtingos koncentracijos tirpalų (nuo 1 g/100 ml iki 10 g/100 ml). Taip pat buvo analizuojama KOH tirpalų (1 %, 5 %, 10 %) įtaka mikroapdirbimui. Kiekvieno eksperimento metu vandens ir tirpalų sluoksnio storį virš bandinio stengiamasi palaikyti stabilų – apie 0,6 mm [37].



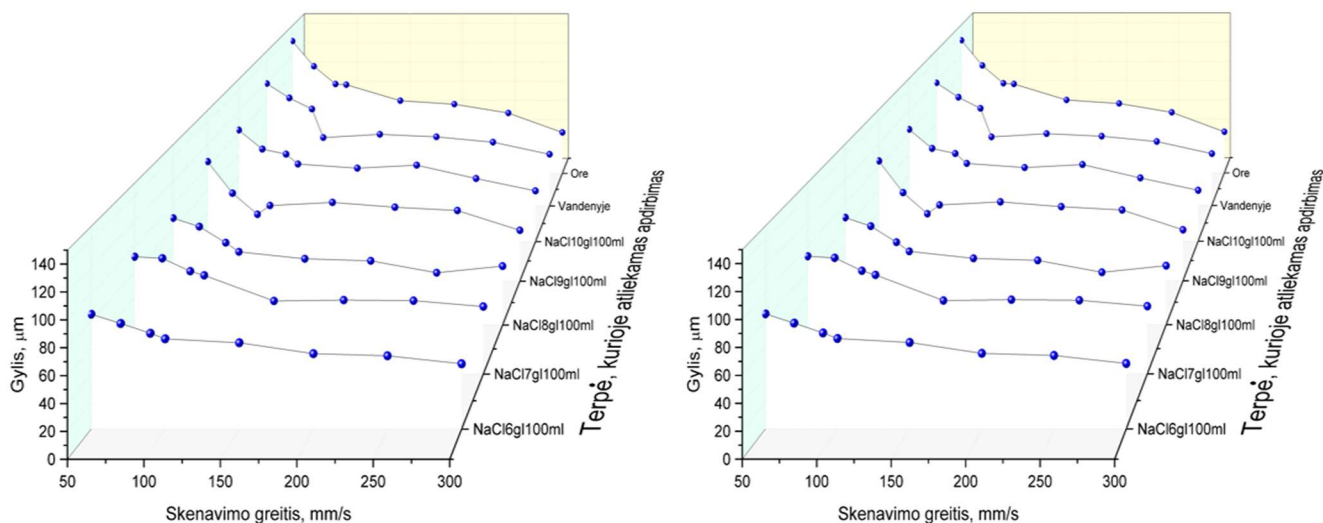
20 pav. Principinė bandinio apdirbimo schema (a – lazerinis mikroapdirbimas ant sauso bandinio paviršiaus; b – lazerinis mikroapdirbimas, kai bandinys panardinamas į skystį)

4. REZULTATAI IR JŲ APTARIMAS

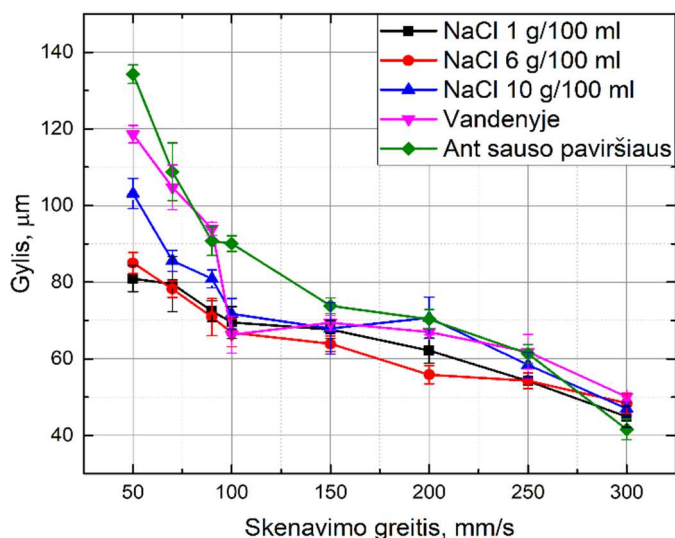
4.1 Vandens ir tirpalų įtaka lazeriniam mikroapdirbimui. Suformuotų griovelių analizė

Dirbant su pirmąja optine sistema (17 pav.), buvo analizuojama druskos ir KOH tirpalų įtaka lazeriniam mikroapdirbimui. Tyrimui pasirinktas standartinis algoritmas – „gyvatėlė“. Šiuo atveju bandinyje formuojamos 7 mm ilgio vertikalios ir 0,3 mm horizontalios linijos.

21 ir 22 paveiksluose pateikta suformuotų griovelių gylių priklausomybė nuo skenavimo greičio, kai bandinio apdirbimas atliekamas skirtingose terpėse – druskos tirpale, vandenyje ir ant sauso stiklo paviršiaus. Visi matavimai atlikti, esant pastoviam praėjimų skaičiui (15), spinduliuotės galiai (5 W) bei impulsų pasikartojimo dažniui (60 kHz).



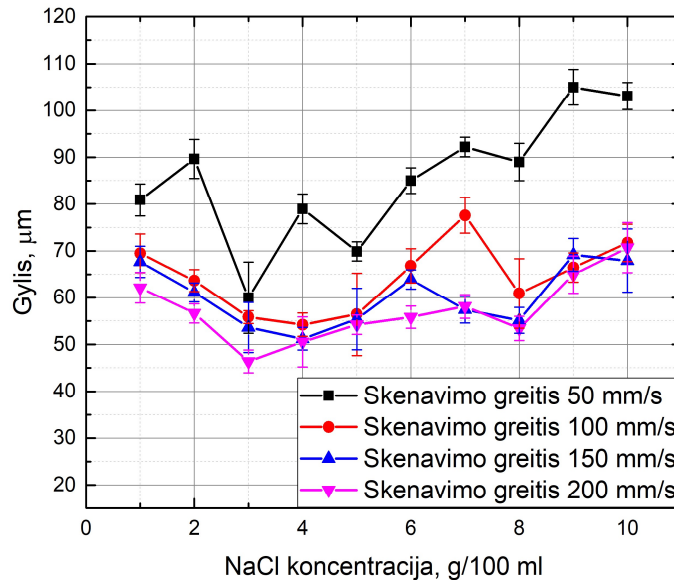
21 pav. Suformuotų griovelių gylių priklausomybė nuo skenavimo greičio, kai apdirbamas atliekamas skirtingose terpėse – įvairios koncentracijos (nuo 1 g/100 ml iki 10 g/100 ml) druskų tirpaluose, vandenyje ir ant sauso paviršiaus



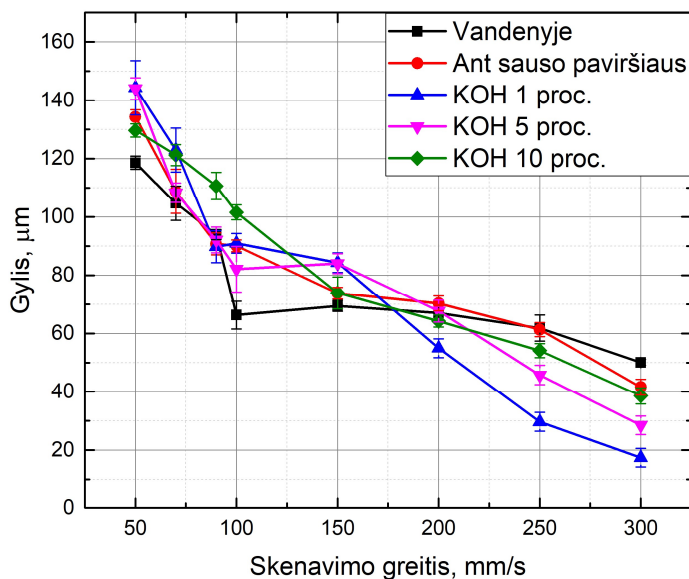
22 pav. Stiklo bandinyje suformuotų griovelių gylių priklausomybė nuo skenavimo greičio

Matyti, kad visais atvejais, didėjant skenavimo greičiui, griovelių gylis mažėja. Tai galima paaikškinti žinant, kad esant mažam skenavimo greičiui, didesnis impulsų skaičius tenka ploto vienetui. Dėl šios priežasties abliacijos procesas vyksta ilgiau, todėl gaunami didesni pažeidimo gyliai. Taip pat pastebėta, kad gilesni grioveliai suformuojami, kai virš bandinio nėra papildomo vandens ar druskos tirpalo sluoksnio.

Nemažiau svarbu paminėti, kad didinant druskos koncentraciją, pastebima griovelių gylių didėjimo tendencija, kuri ypač akivaizdi, esant nedideliam skenavimo greičiui (50 mm/s) (23 pav.). Ši priklausomybė galimai išryškėja dėl to, kad naudojant NaCl tirpalus lazeriniame mikroapdirbime, chloras veikia kaip cheminės reakcijos katalizatorius [12].



23 pav. Stiklo bandinyje suformuotų griovelių gylių priklausomybė nuo NaCl tirpalo koncentracijos. Matavimai pakartoti, esant pastoviam skenavimo greičiui: 50 mm/s, 100 mm/s, 150 mm/s, 200 mm/s

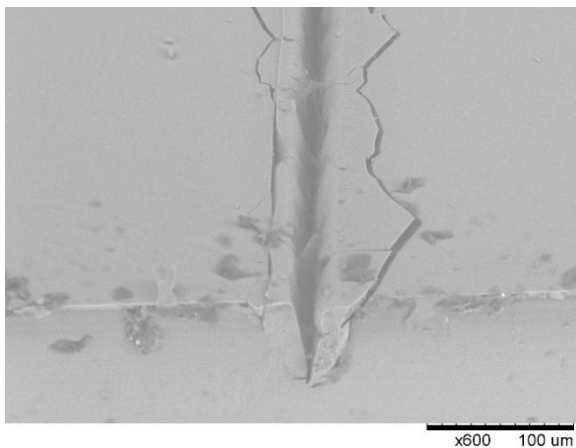


24 pav. Suformuotų griovelių gylių priklausomybė nuo skenavimo greičio, kai apdirbimas atliekamas skirtingose terpėse – įvairios koncentracijos (1 %, 5 %, 10 %) KOH tirpaluose, vandenyje ir ant sauso bandinio paviršiaus

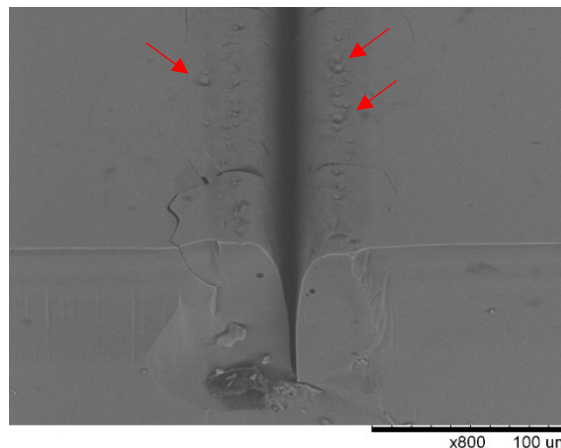
Naudojant skirtingų koncentracijų KOH tirpalus, griovelių gylis gautas didesnis nei griovelių, kurie buvo formuojami, esant vandens sluoksniui virš bandinio bei nustačius nedidelį skenavimo greitį (24 pav.). Kai KOH koncentracija lygi 1 % ir 5 %, grioveliai (~ 144 μm) yra apie 10 μm gilesni už griovelius, kurie gauti atliekant apdirbimą ant sauso bandinio paviršiaus (134,3 μm), esant 50 mm/s skenavimo greičiui. Taip pat gilesni grioveliai suformuojami, bandinį panardinus į 10 % KOH tirpalą, kai skenavimo greitis keičiamas nuo 70 mm/s iki 150 mm/s. Griovelių gylių padidėjimas stebimas, nes lazerio spinduliuotė sukelia lokalų temperatūros padidėjimą, kuris padidina KOH tirpalo išsivardymo savybes. Dėl šios priežasties abliacijos metu yra pašalinama daugiau medžiagos [11]. Nemažiau

svarbu atkreipti dėmesį, kad esant dideliame skenavimo greičiui (200 – 300 mm/s), suformuotų griovelių gylis tampa mažesnis už griovelių gylius, gautus, atlikus lazerinį mikroapdirbimą ant sauso bandinio paviršiaus ir panardinus jį į vandenį. Šį pasikeitimą lemia mažesnis impulsų skaičius, tenkantis ploto vienetui.

Stiklo bandinyje suformuotų griovelių kokybės analizė atlikta, naudojant elektroninį ir optinį mikroskopus. Iš 25, 26 paveikslų matyti, kad geresnė griovelių kokybė stebima, atliekant lazerinį mikroapdirbimą ant sauso stiklo paviršiaus, nei bandinį panardinus į 7 g/100 ml koncentracijos druskos tirpalą. Šiame skystyje suformuotuose grioveliuose stebimi žymūs aplinkinio paviršiaus pažeidimai, didesnis griovelio užterštumas. Panašūs defektai aptinkami visuose bandiniuose, kurie eksperimento metu buvo panardinti į įvairius skysčius.



25 pav. Stiklo bandinyje suformuotas griovelis, atliekant mikroapdirbimą 7 g/100 ml koncentracijos NaCl tirpale. Praėjimų skaičius – 15, skenavimo greitis – 100 mm/s, vidutinė galia – 5 W, impulsų pasikartojimo dažnis – 60 kHz



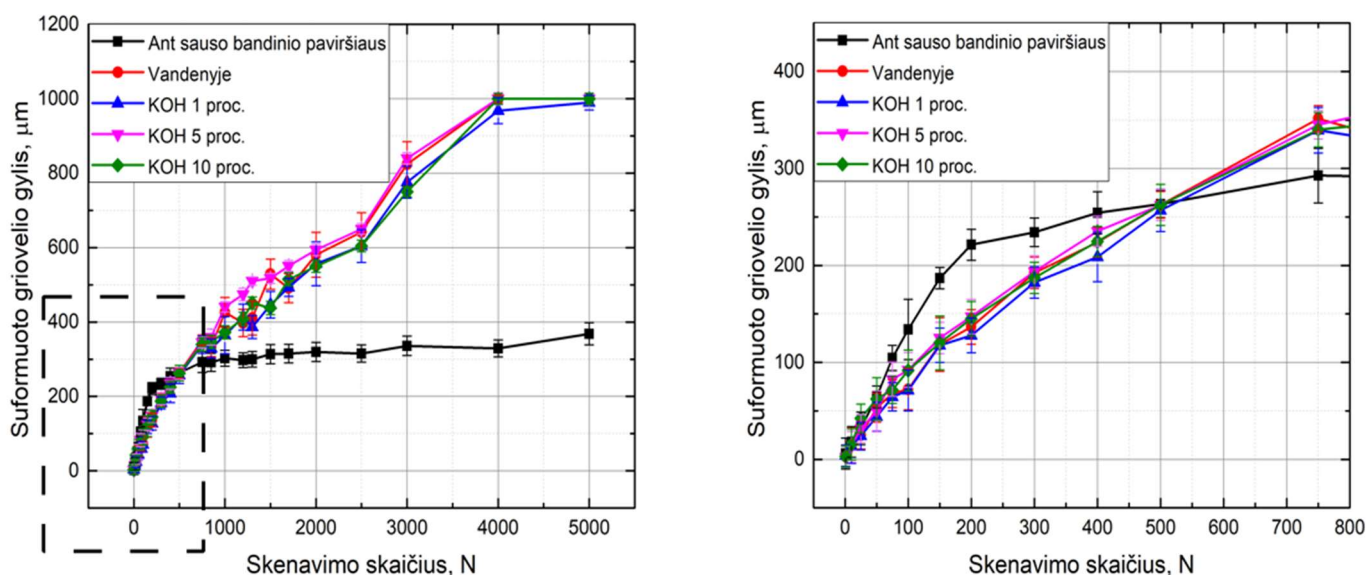
26 pav. Stiklo bandinyje suformuotas griovelis, atliekant mikroapdirbimą ant sauso paviršiaus. Praėjimų skaičius – 15, skenavimo greitis – 100 mm/s, vidutinė galia – 5 W, impulsų pasikartojimo dažnis – 60 kHz. Raudonos rodyklės žymi susiformavusias nuosėdų sankaupas

Pablogėjusiai kokybei galėjo turėti įtakos kintantis skysčio storis virš apdirbamo paviršiaus. Palaikyti pastovų skysčio kiekį trukdė dėl lazerio spinduliuotės poveikio prasidėjęs garavimas. Šią problemą padėtų išspręsti pluošto fokusavimas į antrą bandinio paviršių, kuris būtų nuolat drėkinamas. Tačiau svarbu pabrėžti, kad, atliekant apdirbimą skysčiuose, nėra stebimos nuosėdų sankaupos griovelių kraštuose (25 pav.).

Antroji optinė sistema (18 pav.) buvo pasirinkta, norint praplėsti eksperimento galimybes, naudojant didesnės galios šaltinį. Taip pat aptarta sistema apdirbimo metu leido išvengti virš bandinio esančio skysčio sluoksnio kitimo. Sistemos privalumas – galimybė kameros pagalba tiesiogiai stebėti abliacijos procesą bei kontroliuoti naudojamo skysčio sluoksnio storį.

Šių eksperimentų metu nustatyti pastovūs lazerio parametrai: vidutinė galia – 7 W, impulsų pasikartojimo dažnis – 10 kHz. Tyrimui naudojamas algoritmas – „linija“. Šiuo atveju ant bandinio formuojamas 3 mm brūkšnys. Matavimai atlikti, esant pastoviam skenavimo greičiui, kuris lygus 1653,6 mm/s. Parametrų vertės parinktos tokios, kurios užtikrina abliacijos procesą, tačiau nesukelia didelių stiklo įskilimų, įtrūkimų.

27 paveiksle pateiktos suformuotų griovelių gylių priklausomybės nuo skenavimo skaičiaus, atliekant mikroapdirbimą skirtingose terpėse – ant sauso bandinio paviršiaus, vandenyje bei KOH tirpaluose (1 %, 5 %, 10 %). Matyti, kad didėjant skenavimų skaičiui, didėja griovelių gylis. Tokią priklausomybę stebime dėl didelio impulsų skaičiaus, kuris tenka ploto vienetui, esant dideliame praėjimų skaičiui. Su kiekvienu praėjimu didėja pašalintos medžiagos kiekis.



27 pav. Stiklo bandinyje suformuotų griovelių gylio priklausomybė nuo skenavimo skaičiaus, kai apdirbimas atliekamas skirtingose terpėse – 1 %, 5 %, 10 % KOH tirpaluose, vandenyje ir ant sauso bandinio paviršiaus. Dešinėje pusėje pateiktas punktyru pažymėtos srities išdidintas vaizdas

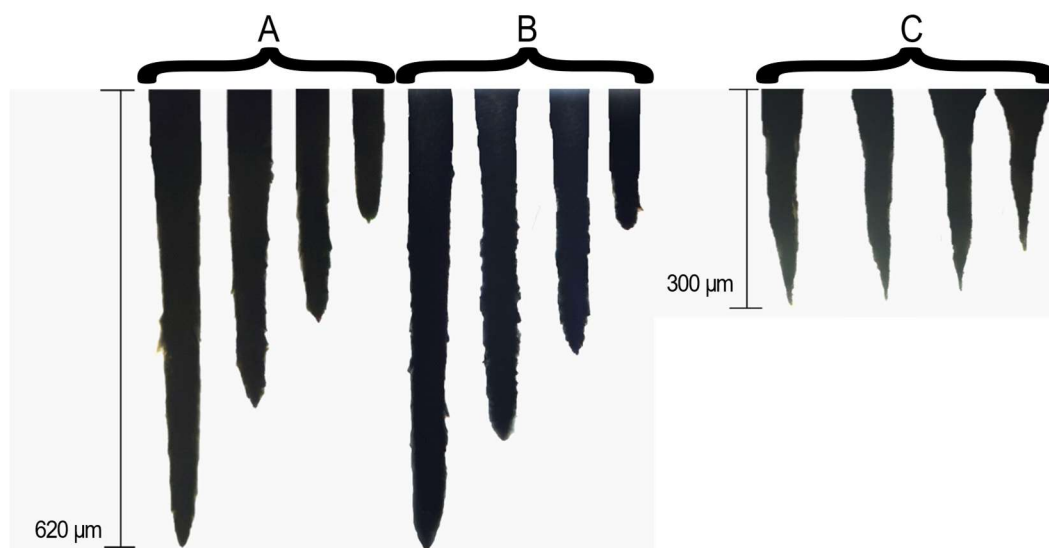
Taip pat pastebėta, kad kai praėjimų skaičiaus intervalas lygus: 1 – 500, ant sauso bandinio suformuojami gilesni grioveliai nei atliekant mikroapdirbimą skystoje terpėje (27 pav. punktyru pažymėta sritis). Tačiau dar labiau didinant skenavimų skaičių (500 – 5000), gilesni grioveliai gauti, kai virš bandinio yra palaikomas papildomas vandens ar KOH (1 %, 5 %, 10 %) tirpalų sluoksnis. Kai praėjimų skaičius lygus 5000, griovelių gyliai skiriasi net 2,7 karto. Remiantis šiais rezultatais galima teigti, kad didesni gyliai yra greičiau pasiekiami, kai virš bandinio yra palaikomas tam tikras skysčio sluoksnis. Tačiau norint suformuoti negilius pažeidimus, efektyviau rinktis apdirbimą, kuris atliekamas ant sauso medžiagos paviršiaus. Pastaruoju atveju taip pat stebimas gylio išsotrinimo efektas. Šis reiškinys nėra matomas, atliekant apdirbimą skystoje terpėje. 27 paveiksle stebima

priklausomybė parodo, kad intervale nuo 400 μm iki 1 mm, gylis nuo praėjimų skaičiaus kinta tiesiškai, kol galiausiai bandinys yra perpjaunamas. Skysčio sluoksnis padeda išlaikyti ant medžiagos krentantį energijos tankį. Pastarojo dydžio nesumažėjimas leidžia daryti išvadą, kad Gausinis intensyvumo pasiskirstymas yra transformuojamas ir, remiantis eksperimentu, išlieka nepakitęs mažiausiai apie 600 μm .

Nors žinant, kad lazerio spinduliuotė sukelia lokalų temperatūros padidėjimą, kuris padidina KOH tirpalo išsivymą savybes, atliekant mikroapdirbimą, bandinį panardinus į KOH tirpalus (1 %, 5 %, 10 %), gauti griovelių gyliai palyginami su tais, kurie buvo suformuoti, palaikant vandens sluoksnį virš bandinio. Tai galima paaiškinti remiantis rezultatais, gautais dirbant su pirmąja optine schema (17 pav.). Kaip jau minėta anksčiau, pastaruoju atveju pastebėta, kad abliacijos procesas tampa efektyvesnis, parinkus nedidelį skenavimo greitį (50 mm/s) (23 pav.). Tačiau apdirbimo metu medžiagą panardinus į skirtingos koncentracijos KOH tirpalus, nustatytas didesnis skenavimo greitis (1653,6 mm/s). Šis parametras galėjo turėti įtakos išsivymo procesui, kuris neprasisidėjo arba buvo nežymus. Taip pat suformuoti gilesnius griovelius galimai trukdė reakcijos metu besiformuojantys vandenilio burbulai (5 formulė).

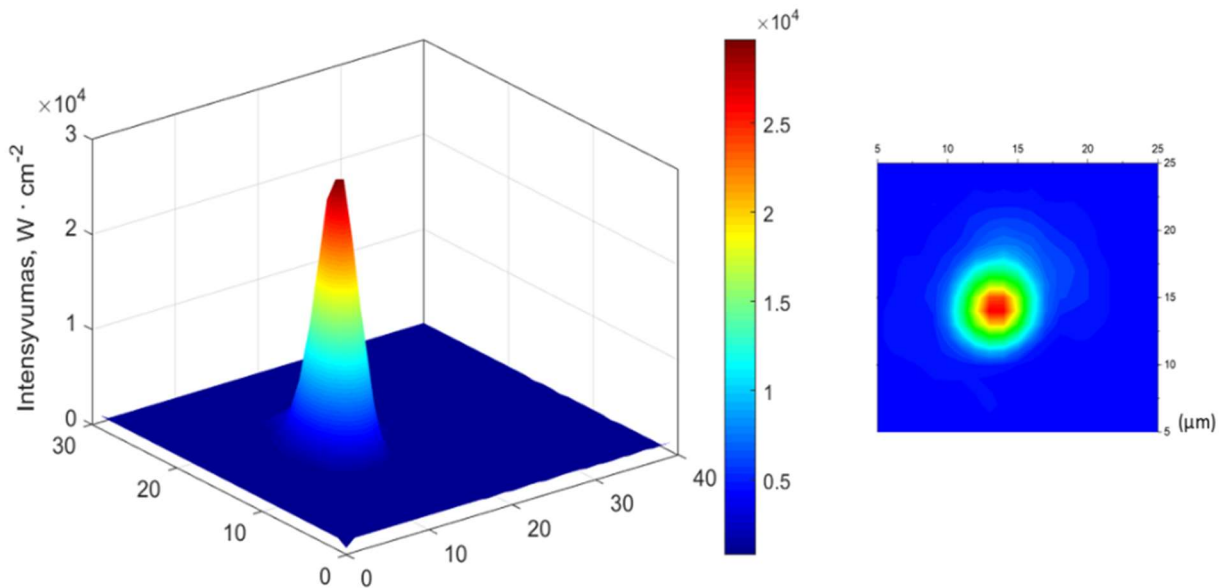
4.3 Suformuotų griovelių gylio profilių įvertinimas

Eksperimentų metu taip pat įvertinti suformuotų griovelių gylio profiliai. Iš 28 paveikslo matyti, kad atliekant mikroapdirbimą ant sauso stiklo paviršiaus, grioveliai pasižymi smailumu. Jiems būdinga siaurėjanti forma. Šie rezultatai skiriasi nuo tų, kurie gauti, kai apdirbimo metu virš bandinio palaikomas pastovus vandens ar 5 % KOH tirpalo sluoksnis. Šiuo atveju griovelių profiliai tapo platesni ir bukesni.



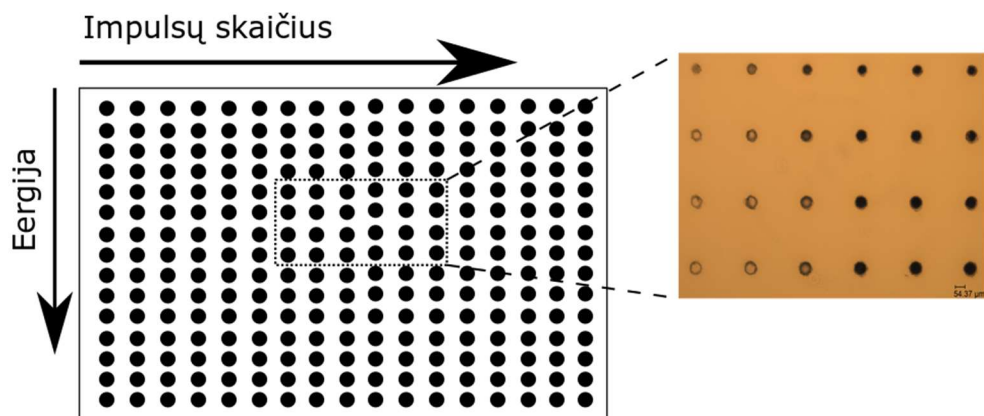
28 pav. Griovelių gylių profiliai, apdirbimą atliekant (A) vandenyje, 5 % KOH tirpale (B) bei ant (C) sauso bandinio paviršiaus. Profiliai gauti, kai skenavimų skaičius lygus 2000, 1300, 850, 300 (iš kairės į dešinę)

Remiantis gautais rezultatais, tolimesni matavimai buvo atliekami, siekiant išsiaiškinti, kaip pasikeičia intensyvumo pasiskirstymas, pluoštui sklindant skysta terpe. Pirmiausia buvo įvertintas Gauso pluoštas (29 pav.), kuris užregistruotas, naudojant SP620U (*Ophir*) kamerą ir jai pritaikytą *BeamStar* programinę įrangą. Matavimų metu į sistemą įmontuojamas didelio atspindžio koeficiento 1026 nm bangos ilgio spinduliuotei veidrodis, atspindintis nulinio laipsnių kampu. Šis komponentas padėjo išvengti kameros matricos pažeidimų.



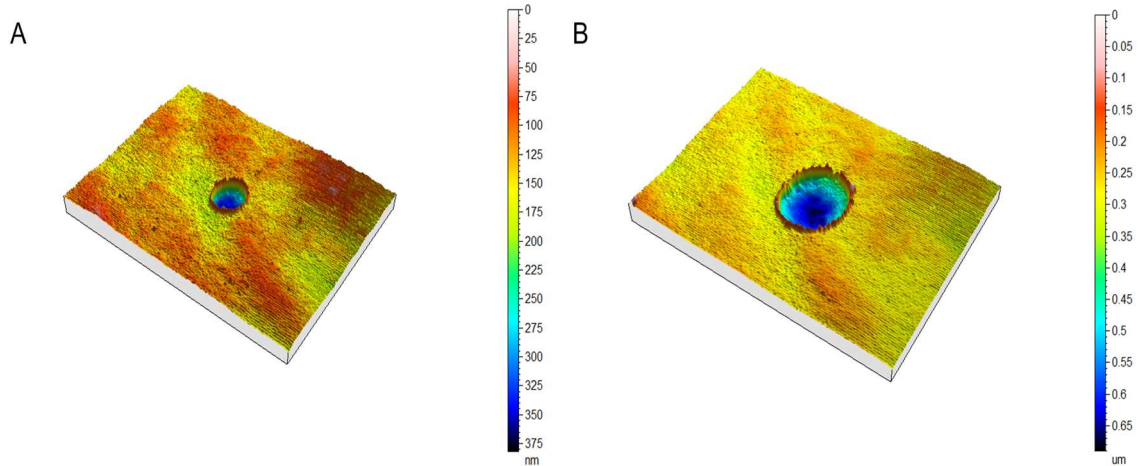
29 pav. Gauso pluošto trimatis ir dvimatis skirstiniai

Norint įvertinti griovelių gylio formos kitimą, ant sauso bandinio paviršiaus suformuota pažeidimų matrica, kurioje viena kryptimi keičiamas impulsų skaičius į vieną vietą, kita – impulso energija. Eksperimento principinė schema pateikta 30 paveiksle. Šis tyrimas reikalingas tam, kad būtų galima nusakyti suformuotų pažeidimų gylio priklausomybę nuo energijos tankio ir impulsų skaičiaus. Gyliai įvertinti, naudojantis profilometru, tačiau dėl šio prietaiso ribojimų pavyko pamatuoti ne visų pažeidimų gylius.



30 pav. Pažeidimų matricos formavimo principinė schema

31 paveiksle pateiktos pažeidimų topografinės nuotraukos. Matyti, kad didėjant energijai, keičiasi pažeidimų gylis ir plotis. Abiem atvejais impulsų skaičius lygus vienam. Kai energija lygi 126 μJ (30 pav. A), pažeidimo diametras – 18 μm, gylis – 0,22 μm. Padidinus energiją iki 148 μJ (30 pav. B), pažeidimo diametras ir gylis atitinkamai lygūs: 28 μm, 0,39 μm.

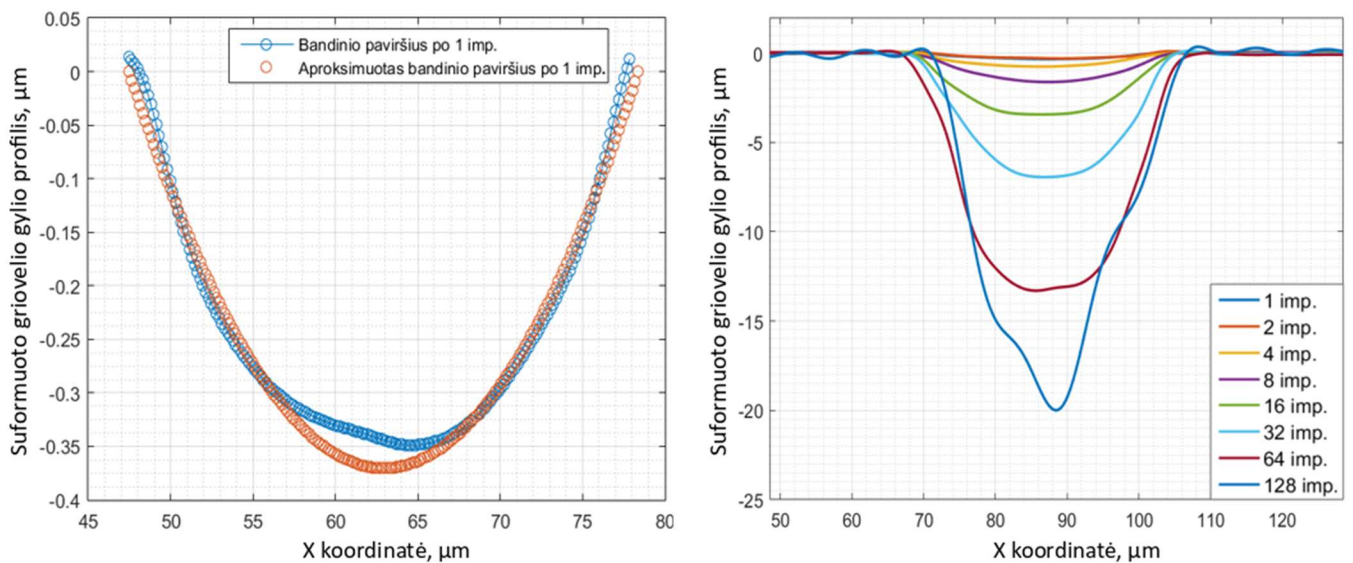


31 pav. Pažeidimų topografinės nuotraukos. Energija: A – 126 μJ, B – 148 μJ, impulsų skaičius abiem atvejais lygus vienam

32 paveikslo kairėje pateiktas bandinio paviršiaus profilis po vieno impulso. Energija lygi 162 μJ. Tokiu būdu įvertinama, kaip kinta gylis nuo energijos tankio po vieno impulso. Kreivė aproksimuota, naudojant funkciją:

$$f(x) = a_0 + a_1 * \cos(x * w) + b_1 * \sin(x * w) \quad (9)$$

Aproksimacijos funkcija parinkta tokia, kad kuo labiau atkartotų eksperimentiškai gautą profilį ir būtų simetriška.

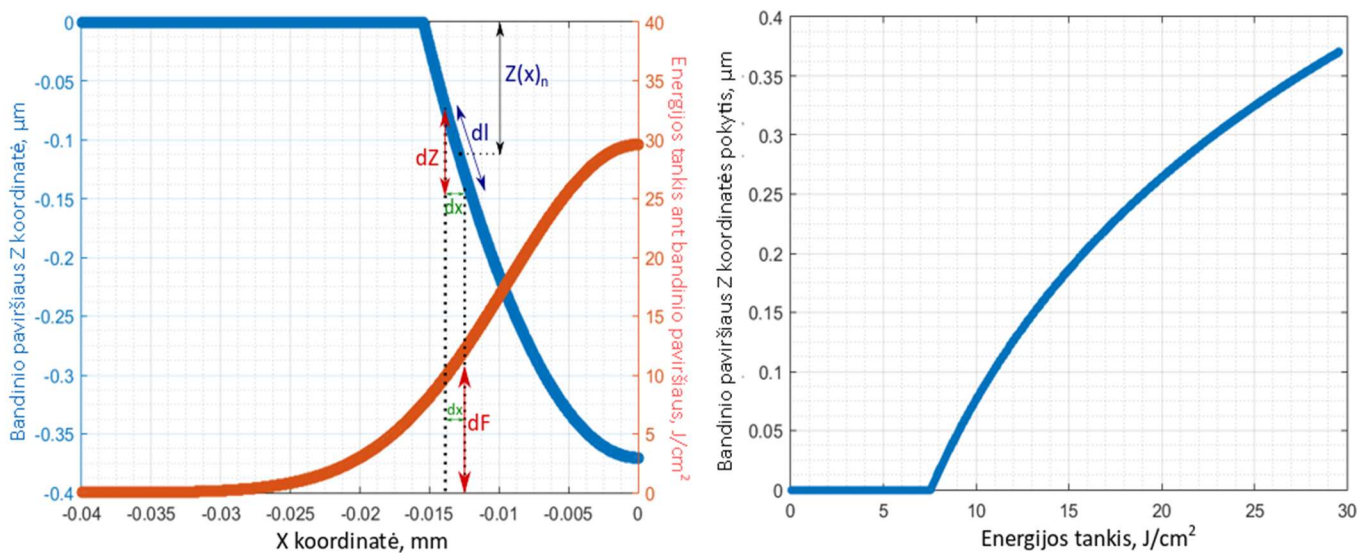


32 pav. Kairėje – bandinio paviršius po vieno impulso. Dešinėje – suformuoto griovelio gylio profilio kitimas, keičiant impulsų skaičių. Energija – 162 μJ

Atlikus matricos analizę, įvertintas pažeidimų profilio kitimas. Iš 32 paveikslo (dešinė) matyti, kaip keičiasi suformuoto griovelio profilis, kai energija nekinta ir yra lygi $162 \mu\text{J}$. Pastebėta, kad didinant impulsų skaičių, vis daugiau medžiagos yra pašalinama. Dėl netolygaus impulso intensyvumo pasiskirstymo kritęs energijos tankis nėra vienodas skirtingose bandinio paviršiaus taškuose. Dėl šios priežasties yra pašalinamas skirtingas medžiagos kiekis.

33 paveiksle (kairėje) vaizduojamas Gauso impulso formuojamas pažeidimas. Faktinis intensyvumo pasiskirstymas užregistruotas CCD kamera (29 pav.). Dėl priklausomybės simetriškumo pateiktas ne visas pasiskirstymas. Pastarojo antroji pusė nesuteikia papildomos informacijos, todėl jos nagrinėjimas nėra būtinas. Raudona kreivė iliustruoja ant bandinio krintantį energijos tankį. Mėlyna atitinka kritusio energijos tankio formuojamą gylį – pašalintos medžiagos kiekį. Svarbu paminėti, kad medžiagos šalinimas prasideda, kai energijos tankis lygus apie 8 J/cm^2 . Ši vertė – tai abliacijos slenkstis.

Žinant šią priklausomybę, nesunku įvertinti, kiek medžiagos įmanoma pašalinti ir kokią gylį galima suformuoti, esant tam tikram energijos tankiui. Iš 33 paveikslo (dešinė) matyti, kaip kinta bandinio paviršiaus Z koordinatė nuo energijos tankio. Kuo pastarojo dydžio vertė didesnė, tuo griovelis gilesnis.



33 pav. Kairėje – Gauso pluošto (raudona kreivė) formuojamas pažeidimas (mėlyna kreivė). Dešinėje – bandinio paviršiaus Z koordinatės pokyčio priklausomybė nuo energijos tankio

Prieš pirmąjį impulsą bandinio paviršius yra lygus. dx regione esanti energija sukelia bandinio paviršiaus Z koordinatės pasikeitimą (dZ). Antrojo ir sekančių impulsų energija, sukaupia dx zonoje, yra projektuojama į dl zoną. Po kiekvieno impulso apskaičiuojama dl sritis, į kurią krinta tam tikras energijos kiekis $E(x)$. Tokiu būdu gali būti sudarytas pusiau empirinis modelis, kuris nusako

pažeidimo gylio evoliuciją, impulsams pasiekus bandinį. Z koordinatės pasikeitimas gali būti užrašytas formule:

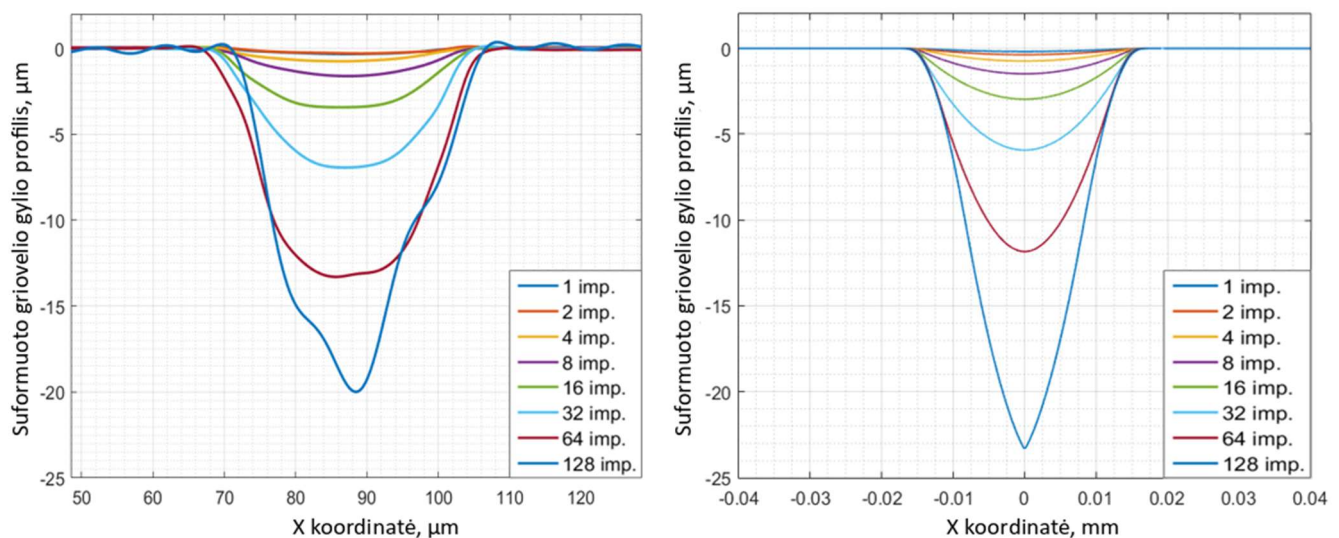
$$dZ(x) = a_1 \log \left(a_2 \frac{dx \cdot E(x)}{S(x)} \right). \quad (10)$$

Pastarųjų pokyčių suma suformuoja naują funkciją, kuri nusako bandinio paviršiaus formos kitimą po kiekvieno n -ojo impulso:

$$Z(x)_n = \sum_{i=1}^n a_1 \log \left(a_2 \frac{dx \cdot E(x)}{\sqrt{\Delta Z(x)_{i-1}^2 + dx^2}} \right). \quad (11)$$

kur $a_1 = 0,1356$, $a_2 = 0,1324$ – eksperimentiškai gauti koeficientai. Kiti dydžiai, naudojami formulėse, pateikti 33 paveiksle kairėje.

Modelio pagrįstumas buvo tikrinamas, lyginant eksperimentiškai gautus rezultatus (34 pav. kairė) su apskaičiuotais (34 pav. dešinė). Pastaruoju atveju matyti, kad gilėjant pažeidimui, jo plotis nekinta. Priešinga situacija stebima eksperimentiniu atveju – suformuoto pažeidimo plotis nėra pastovus. Taip pat gylio profilis pasižymi asimetriškumu. Tai ypač akivaizdu, kai pažeidimo gylis yra didesnis. Tai galimai lėmė stikle susiformavę defektai. Svarbu paminėti, kad modelyje nėra atsižvelgta į griovelių dugno paviršiaus šiurkštumą, dėl spinduliuotės poveikio atsiradusius įskilimus, įtrūkimus, jų sukeltus nuostolius. Šie reiškiniai apskurdintų modelio skaičiavimus ir pritaikymą. Vis dėlto sumodeliuoto pažeidimo gylio profilio kitimas yra artimas eksperimentiniams rezultatams.



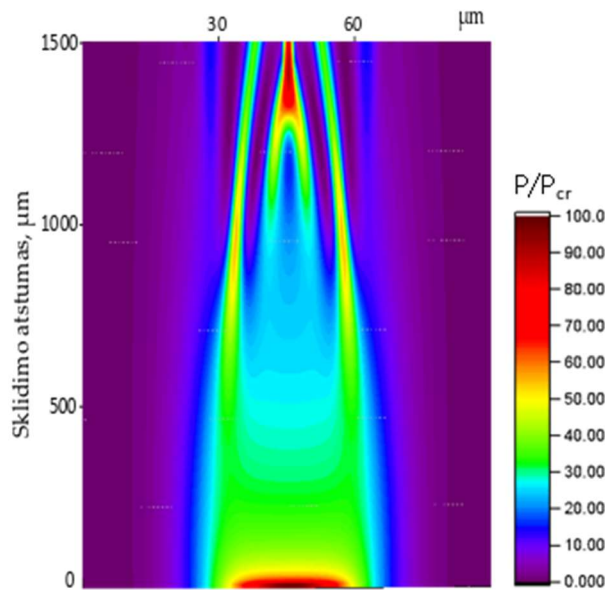
34 pav. Eksperimentiškai gautų (kairė) ir sumodeliuotų (dešinė) griovelių gylio profilio kitimo įvertinimas, esant pastoviai energijai 162 μJ bei kintančiam impulsų skaičiui

Atlikus ant sauso bandinio paviršiaus suformuotų griovelių analizę, pastebėta, kad didinant impulsų skaičių, jų gylis beveik nekinta (27 pav.). Tokį gylio stabilumą lėmė griovelių smailėjanti forma. Norint įvertinti skystoje terpėje suformuotų griovelių gylio profilio kitimą, reikalingi papildomi eksperimentai, kurių rezultatai galėtų parodyti, kokią įtaką pluoštui turi skysčio sluoksnis. Kadangi atlikus apdirbimą, kai virš bandinio palaikomas papildomas skysčio sluoksnis, suformuotų griovelių profilis yra kitos formos. Tai leidžia daryti išvadą, kad tokio tipo griovelius formuoja ne Gauso pluoštas.

Remiantis aptartais rezultatais bei naudojantis modeliavimo programa [41], pademonstruotas didelio intensyvumo pluošto sklidimas netiesiškai sugeriančioje terpėje – vandenyje (35 pav.). Skaitmeninio modeliavimo rezultatai gauti, sprendžiant netiesinę modifikuotą Šredingerio lygtį:

$$\frac{\partial}{\partial z} E = \frac{i}{2k_0} \left(\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E}{\partial y^2} \right) + \frac{i\omega_0 n_2}{c} |E|^2 E - \frac{\beta^{(K)}}{2} |E|^{2K-2} E, \quad (12)$$

čia E – elektrinio lauko amplitudė, k_0 – bangos skaičius, ω_0 – nešantysis dažnis, n_2 – netiesinis lūžio rodiklis, c – šviesos greitis, $\beta^{(K)}$ – daugiafotonės sugerties koeficientas, K – daugiafotonės sugerties eilė.



35 pav. Pluošto transformacija, sklindant vandeniui

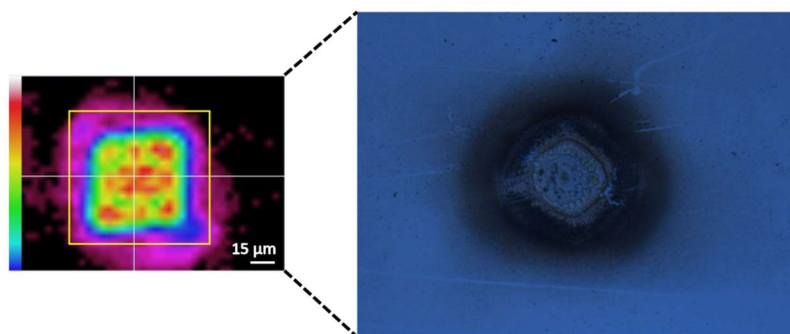
Šiuo atveju impulsų energija ir trukmė atitinkamai lygi 140 μJ , 260 fs. Pluošto galia viršija kritinę galią apytiksliai 100 kartų ($P_{\text{in}} = 100 P_{\text{cr}}$). Iš 35 paveikslo matyti, kaip kinta pluoštas, sklisdamas per vandens sluoksnį. Svarbu pabrėžti, kad netiesiškai sugeriančioje terpėje Gauso intensyvumo pasiskirstymas labai greitai keičiasi. Po 25 μm intensyvumas sumažėja apie 20 %. Nusklidus 100 μm , pluoštas dar labiau suplokštėja. Toks intensyvumo pasiskirstymas išlieka iki 550

μm . Šioje srityje intensyvumo nuostoliai yra 50 %. Vandens sluoksnio storis turėtų būti apie 100 μm tam, kad prasidėtų Gauso transformavimas. Atliekant eksperimentus, dėl vandens paviršiaus įtempių sunku pasiekti tokias vertes, kurios būtų mažesnės nei 300 μm . Tačiau mažiausias vandens sluoksnio storis turėtų užtikrinti geriausias rezultatus.

4.4 Pažeidimų formavimas, naudojant pluošto keitiklį

Atsižvelgiant į gautus rezultatus, tolimesni tyrimai atilikti, naudojant pluošto keitiklį (19 pav.), kuris tradicinį Gauso pluoštą gali transformuoti į plokščios viršūnės pluoštą. Spėjama, kad atliekant mikroapdirbimą, kai virš bandinio palaikomas papildomas skysčio sluoksnis, pluoštas pakeičia formą į *top-hat* [40].

Matavimų metu visų pirma kameros pagalba buvo užfiksuota Z ašies padėtis, kuriai esant pluoštas pakeičia formą. Tikslus sistemos suderinimas – tai vienas iš veiksnių, kuris buvo labai svarbus eksperimentų rezultatams. Stebimas vaizdas pateiktas 36 paveikslo kairėje.



36 pav. Pluošto keitikliu suformuoto pluošto pažeidimas stikle

Parinkus šiuos lazerio parametrus: impulsų pasikartojimo dažnis – 100 kHz, galia – 20 W, šūvių skaičius – 500, stiklo paviršiuje formuojami pažeidimai. 36 paveikslo dešinėje pateiktas pažeidimas, kurio forma artimiausia stačiakampiui. Keičiant tiek impulsų skaičių, tiek energiją, stengiamasi pasiekti didesnius pažeidimo gylius tam, kad būtų galima patvirtinti spėjimą, kad atliekant mikroapdirbimą, kai virš bandinio palaikomas skysčio sluoksnis, Gauso pluoštas pakeičia formą. Svarbu paminėti, kad naudojamas pluošto keitiklis transformuoja pluoštą prieš fokuso padėtį. Tai gali būti viena iš priežasčių, kodėl formuojant didesnio gylio pažeidimus, pastarieji neišlaikydavo stačiakampio formos. Stiklo savybės taip pat galėjo turėti įtakos eksperimentų rezultatams. Kaip žinoma ši medžiaga pasižymi didesniu pažeidimo slenksčiu, kuriam pasiekti reikia didesnių intensyvumų. Kita priežastis galėtų būti stačiakampio pluošto netolygus intensyvumo pasiskirstymas.

REZULTATAI IR IŠVADOS

1. Įvertinta skirtingos koncentracijos druskos (NaCl) tirpalų įtaka lazeriniam mikroapdirbimui. Pastebima griovelių gilėjimo tendencija, kuri ypač akivaizdi, esant nedideliam skenavimo greičiui (50 mm/s). Ištirpinus druską distiliuotame vandenyje, dėl tirpalo sudėtyje esančių Na^+ ir Cl^- jonų sumažėja efektyvi terpės jonizacijos energija, tuo pačiu sumažėja ir slenkstinis plazmos generacijos intensyvumas, dėl to išauga krūvininkų tankis pažaidos srityje [13]. Taip pat galimas ir kitas šios priklausomybės paaiškinimas. Kai yra pasiekama tam tikra NaCl tirpalo koncentracija, chloro jonai, esant aukštai temperatūrai, gali dalyvauti cheminėse reakcijose, dėl kurių prasideda medžiagos ardymas.
2. Naudojant skirtingų koncentracijų KOH tirpalus, griovelių gylis gautas didesnis nei griovelių, kurie buvo formuojami, esant vandens sluoksniui virš bandinio bei nustačius nedidelį skenavimo greitį (50 mm/s). Gilesni grioveliai suformuojami, kai apdirbimas atliekamas 1 %, 5 %, 10 % KOH tirpaluose. Šiuo atveju skenavimo greičių ribos atitinkamai lygios – 50 mm/s – 70 mm/s, 50 mm/s – 70 mm/s, 70 mm/s – 150 mm/s. Griovelių gylių padidėjimas stebimas, nes lazerio spinduliuotė sukelia lokalų temperatūros padidėjimą, kuris padidina stiklo ėsdinimo greitį KOH tirpale. Taip pat gilesnių griovelių formavimui galimai turėjo įtakos medžiagos porėtumas, kuris padidina sąveikos plotą ir tuo pačiu paspartina ėsdinimą. Suformuoti gilesnius griovelius galimai trukdė reakcijos metu susiformavę vandenilio burbulai.
3. Įvertinta įvairiose terpėse – KOH (1 %, 5 %, 10 %) tirpaluose, vandenyje, ant sauso bandinio paviršiaus suformuotų griovelių gylių priklausomybė nuo skenavimo skaičiaus. Šiuo atveju skenavimo greitis lygus 1653,6 mm/s. Esant mažam skenavimo skaičiui (1 – 500) ant sauso bandinio suformuojami gilesni grioveliai nei atliekant mikroapdirbimą skystoje terpėje. Didinant skenavimų skaičių (500 – 5000), gilesni grioveliai gauti, kai virš bandinio yra palaikomas papildomas vandens ar KOH (1 %, 5 %, 10 %) tirpalų sluoksnis. Tikėtina, kad papildomas skysčio sluoksnis pakeičia Gauso pluoštą, todėl pasiekiami didesni formuojamų griovelių gyliai.
4. Bandinį panardinus į skirtingos koncentracijos (1 %, 5 %, 10 %) KOH tirpalus ir parinkus didelį skenavimo skaičių (1653,6 mm/s), gauti griovelių gyliai palyginami su tais, kurie buvo suformuoti, palaikant vandens sluoksnį virš bandinio. Šiuo atveju dėl parinktų apdirbimo

parametrų sukeliama nykstamai maži cheminiai procesai. Spėjama, kad tai stebima dėl didelio skenavimo greičio bei galimai besiformuojančių vandenilio burbulų.

5. Atlikus suformuotų griovelių gylio profilių analizę, pastebėta, kad apdirbimo aplinka lemia griovelių formą. Ant sauso bandinio paviršiaus suformuoti grioveliai pasižymi smailumu. Kai virš apdirbamos medžiagos buvo palaikomas pastovus skysčio sluoksnis, griovelių profiliai tapo platesni ir bukesni. Tokius griovelių profilius formuoja ne Gauso pluoštas. Pastarąjį transformuoja skysčio sluoksnis virš bandinio.

REZULTATŲ PRISTATYMAS MOKSLINĖSE PUBLIKACIJOSE IR KONFERENCIJOSE

Dalis šiame darbe aptartų rezultatų yra pateikti publikacijoms į šiuos žurnalus: *Micromachines* ir *Applied Sciences*. Taip pat rezultatai pristatyti tarptautinėje konferencijoje *ICPEPA* 2018.

1. L. Mačernytė, O. Balachninaite, J. Skruibis, V. Vaičaitis, R. Sirutkaitis, Femtosecond laser micromachining of glass in ambient air and under various liquids, *Micromachines*, (2019).
2. S. Butkus, E. Gaižauskas, L. Mačernytė, D. Paipulas, V. Sirutkaitis, Femtosecond Beam Transformation Effects In Water Enabling Increased Throughput Micromachining In Transparent Materials, *Appl. Sci.*, (2019).
3. L. Mačernytė, O. Balachninaite, S. Butkus, V. Sirutkaitis, Femtosecond laser micromachining of glass samples in air, water and various solutions (NaCl, KOH), *ICPEPA11*, September 10-14, 2018.

LITERATŪROS SĄRAŠAS

- [1] A.K. Jain, P.M. Pandey, Study of Peck drilling of borosilicate glass with μ RUM process for MEMS, *J. Manuf. Process.* **22**, 134–150 (2016).
- [2] M.C. Gower, Industrial applications of laser micromachining, *Opt. Express* **7**(2), 56–67 (2000).
- [3] G.M. Whitesides, The origins and the future of microfluidics, *Nat.* **442**(7101), 368–373 (2006).
- [4] L. Rihakova, H. Chmelickova, Laser Micromachining of Glass, Silicon and Ceramics, *Adv. Mater. Sci. Eng.* **2015**(2), 1–6 (2015).
- [5] S. Lee, A. Ashmead, L. Migliore, Comparison of ns and ps pulses for Si and glass micromachining applications, *Solid State Lasers XVIII: Technology and Devices*, Vol. 7193 (SPIE, San Jose, 2009) pp. 719322–10.
- [6] A.H. Hamad, High Energy and Short Pulse Lasers, Effects of Different Laser Pulse Regimes (Nanosecond, Picosecond and Femtosecond) on the Ablation of Materials for Production of Nanoparticles in Liquid Solution, in: *High energy and Short Pulse Lasers*, ed. R. Viskup, (InTech, Rijeka, 2016) pp. 305–325.
- [7] M. Richardson, A. Zoubir, L. Shah, C. Rivero, C. Lopez, K. Richardson, N. Ho, R. Valee, Ablation and optical property modification of transparent materials with femtosecond lasers, *Laser-Induced Damage in Optical Materials*, Vol. 5273 (SPIE, Boulder, 2004) pp. 472–481.
- [8] S. Nolte, F. Schrepel, F. Dausinger, *Ultrashort Pulse Laser Technology, Laser Sources and Applications* (Springer International Publishing, Switzerland, 2016).
- [9] A. Kruusing, *Handbook of Liquids – Assisted Laser Processing* (Elsevier Ltd., United Kingdom, 2008).
- [10] N. Muhammad, L. Li, Underwater femtosecond laser micromachining of thin nitinol tubes for medical coronary stent manufacture, *Appl. Phys. A* **107**(4), 849–861 (2012).
- [11] K.P. Luong, R. Tanable, Y. Ito, Machining on Rear Surface of Silicon Substrate by an Infrared Femtosecond Laser via Non-linear Absorption Processes, *Procedia CIRP* **42**, 73–76 (2016).
- [12] L. Li, C. Achara, Chemical Assisted Laser Machining for Minimisation of Recast and Heat Affected Zone, *CIRP Annals* **53**(1), 175–178 (2004).
- [13] I. Saxena, K. Ehmann, I. Cao, Productivity Enhancement in Laser Induced Plasma Micromachining by altering the Salinity of Dielectric Media, *ICOMM*, Vol. 93 (IEEE, Bucharest, 2014) pp. 1–6.

- [14] A. Hof, J.A. Ziki, Micro-Hole Drilling on Glass Substrates – A Review, *Micromach.* **8**(2), 1–23 (2017).
- [15] K. Kolari, V. Saarela, S. Franssila, Deep plasma etching of glass for fluidic devices with different mask materials, *J. Micromech. Microeng.* **18**(2), 1–6 (2008).
- [16] A. Ghobeity, H. Getu, M. Papini, J.K. Spelt, Surface evolution models for abrasive jet micromachining of holes in glass and polymethylmethacrylate (PMMA), *J. Micromech. Microeng.* **17**(11), 2175–85 (2007).
- [17] A. Schorderet, E. Deghilage, K. Agbeviade, Tool type and hole diameter influence in deep ultrasonic drilling of micro-holes in glass, *Procedia CIRP* **6**, 565–570 (2013).
- [18] C. Iliescu, B. Chen, J. Miao, On the wet etching of Pyrex glass, *Sensors and Actuators A* **143**(1), 154–161 (2008).
- [19] F. He, Y. Liao, J. Lin, J. Song, L. Qiao, Y. Cheng, K. Sugioka, Femtosecond Laser Fabrication of Monolithically Integrated Microfluidic Sensor in Glass, *Sensors* **14**(10), 19402–40 (2014).
- [20] S. Musazzi, U. Perini, *Laser – Induced Breakdown Spectroscopy* (Springer-Verlag, Berlin, 2014).
- [21] A. Ozkan, L. R. Migliore, C. M. Dunskey, M. W. Phaneuf, Glass processing using microsecond, nanosecond and femtosecond pulsed lasers, Fourth International Symposium on Laser Precision Microfabrication, Vol. 5063 (SPIE, Munich, 2003) pp. 1–5.
- [22] Escooptics <<https://escooptics.com/pages/materials-fused-silica-quartz>> (2019.04.29).
- [23] E.S. Dresselhaus, *Solid State Physics, Part II, Optical Properties of Solids* (Springer, Berlin, 2018).
- [24] U. Eppelt, S. Russ, C. Hartmann, M. Sun, C. Siebert, W. Schulz, Diagnostic and Simulation of ps-Laser Glass Cutting, International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics, Vol. 835 (Laser Institute of America, America, 2012) pp. 835–844.
- [25] J. Han, Y. Li, *Lasers – Applications in Science and Industry* (InTech, Croatia, 2011).
- [26] A. Ben-Yakar, A. Harkin, J. Ashmore, R.L. Byer, H.A. Stone, Thermal and fluid processes of a thin melt zone during femtosecond laser ablation of glass: the formation of rims by single laser pulses, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **40**(5), 1447–59 (2007).
- [27] D. Bäuerle, *Laser Processing and Chemistry* (Springer-Verlag, Berlin, 2011).

- [28] H. Hu, T. Liu, H. Zhai, Comparison of femtosecond laser ablation of aluminium in water and in air by time-resolved optical diagnosis, *Opt. Express* **23**(2), 628–35 (2015).
- [29] J.J.J Kaakkunen, M. Silvennoinen, K. Paivasaari, P. Vahimaa, Water-assisted Femtosecond Laser Pulse Ablation of High Aspect Ratio Holes, *Phys. Proc.* **12**, 89–93 (2011).
- [30] S. Muhammed, H. Darwish, N. Ahmed, A.M. Al-Ahmari, *Laser Beam Micro-milling of Micro-channels in Aerospace Alloys* (Springer Nature, Singapore, 2017).
- [31] O.J. Ohara, M. Nagakubo, N. Kawahara, T. Hattori, High aspect ratio etching by infrared laser induced micro bubbles, *The Tenth Annual International Workshop on Micro Electro Mechanical Systems. An Investigation of Micro Structures, Sensors, Actuators, Machines and Robots*, (IEEE, Nagoya, 1997) pp. 175–179.
- [32] G. Daminelli, J. Krüger, W. Kautek, Femtosecond laser interaction with silicon under water, confinement, *Thin Solid Films* **467**(1-2), 334–341 (2004).
- [33] S. Zhu, Y.F. Lu, M.H. Hong, X.Y. Chen, Laser ablation of solid substrates in water and ambient air, *J. Appl. Phys.* **89**(4), 2400–03 (2001).
- [34] V.A. Menon, S. James, Molecular Dynamics Simulation Study of Liquid-Assisted Laser Beam Micromachining Process, *J. Manuf. Matter Process* **2**(3), 2–15 (2018).
- [35] K.L. Choo, Y. Ogawa, G. Kanbargi, V. Otra, L.M. Raff, R. Komanduri, Micromachining of silicon by short-pulse laser ablation in air and under water, *Mater. Sci. Eng. A* **372**(1-2), 145–162 (2004).
- [36] A. Dubietis, *Netiesinė optika* (Vilnius, 2009).
- [37] S. Butkus, D. Paipulas, D. Kaškelytė, E. Gaižauskas, V. Sirutkaitis, Improvement of Cut Quality in Rapid-Cutting of Glass Method via Femtosecond Laser Filamentation, *J. Laser Micro./Nanoeng.* **10**(1), 59–63 (2015).
- [38] S. Butkus, D. Paipilas, R. Sirutkaitis, E. Gaižauskas, V. Sirutkaitis, Rapid Cutting of Transparent Materials via Femtosecond Laser Filamentation, *J. Laser Micro./Nanoeng.* **9**(3), 213–220 (2014).
- [39] E. Markauskas, P. Gečys, Thin water film assisted glass ablation with a picosecond laser, *Procedia CIRP* **74**, 328–332 (2018).
- [40] S. Rung, J. Barth, R. Hellmann, Characterization of Laser Beam Shaping Optics Based on Their Ablation Geometry of Thin Films, *Micromach.* **5**(4), 943–953 (2014).

[41] O. Balachnaitė, R. Butkus, E. Gaižauskas, V. Kudriašov, M. Maciulevičius, V. Sirutkaitis, V. Smilgevičius, V. Vaičaitis, *Netiesinės optikos laboratoriniai darbai* (Vilniaus universiteto leidykla, Vilnius, 2008).

SANTRAUKA

Lina Mačernytė

FEMTOSEKUNDINIS LAZERINIS STIKLO BANDINIŲ MIKROAPDIRBIMAS ORE IR SKYSTOJE TERPĖJE

Šio darbo tikslas – įvertinti vandens, KOH, NaCl tirpalų įtaką stiklo bandinių femtosekundiniam lazeriniam mikroapdirbimui

Pagrindiniai darbo uždaviniai:

1. Atlikti stiklo bandinių femtosekundinį lazerinį mikroapdirbimą ore, vandenyje, KOH ir NaCl tirpaluose.
2. Įvertinti suformuotų griovelių gylio profilio kitimą, kai apdirbimas atliekamas ant sauso stiklo paviršiaus ir bandinį panardinus į skystį.

Lazerinis medžiagų mikroapdirbimas femtosekundiniais impulsais pasižymi aukšta kokybe, tikslumu, efektyvumu. Naudojant ultratrumpuosius impulsus, yra sumažinamas šilumos plitimas medžiaga, nes impulsų trukmė yra mažesnė nei laikas, per kurį sužadintų elektronų energija virsta šiluma [6, 7]. Siekiant abliacijos metu dar labiau padidinti pašalinamos medžiagos kiekį, lazerinis mikroapdirbimas gali būti atliekamas, bandinį panardinus į skystą terpę. Dėl lazerio spinduliuotės poveikio susiformavę burbulai lemia skysčio judėjimą, kuris padeda pašalinti nuosėdas iš formuojamų griovelių. Taip pat apdirbimo metu vanduo vėsina bandinį. Tai leidžia išvengti medžiagos įskilimų, įtrūkimų. Vanduo – dažniausiai naudojama skysta terpė femtosekundiniame mikroapdirbime [9–13].

Šiame darbe stiklo bandinių lazerinis mikroapdirbimas buvo atliekamas skirtingos koncentracijos KOH, NaCl tirpaluose, vandenyje ir ant sauso bandinio paviršiaus. Atliekant eksperimentus, kai virš bandinio palaikomas druskos ir KOH tirpalų sluoksnis, ėsdinimo savybės yra ryškesnės, esant mažesniai skenavimo skaičiui. Šiuo atveju didesnis impulsų skaičius tenka ploto vienetui, todėl yra pasiekama aukštesnė temperatūra, kuri pagreitina ėsdinimo procesus. Taip pat keičiant skenavimo skaičių, įvertintas įvairiose terpėse suformuotų griovelių gylis bei jo profilis. Esant mažam skenavimo skaičiui (1 – 500), ant sauso bandinio suformuojami gilesni grioveliai nei atliekant mikroapdirbimą skystoje terpėje. Didinant skenavimų skaičių (500 – 5000), gilesni grioveliai gauti, kai virš bandinio yra palaikomas papildomas vandens ar KOH tirpalų sluoksnis. Kai praėjimų skaičius lygus – 5000, griovelių gyliai skiriasi net 2.7 karto. Nors KOH tirpalas pasižymi stipriomis ėsdinimo savybėmis, stiklą panardinus į šį tirpalą, gauti griovelių gyliai palyginami su tais, kurie buvo suformuoti,

palaidant vandens sluoksnį virš bandinio. Pasiekti didesnius gylius galimai trukdė reakcijos metu susiformavę vandenilio burbulai bei parinktas didelis skenavimo greitis. Įvertinus griovelių gylių profilius, pastebėta, kad skystoje terpėje suformuotiems grioveliams būdingos bukios viršūnės. Smailia forma pasižymi grioveliai, gauti ant sauso bandinio paviršiaus. Spėjama, kad papildomas skysčio sluoksnis pakeičia Gauso pluoštą. Dėl šios priežasties pasiekiami didesni formuojamų griovelių gyliai bei stebimi profilių formos pasikeitimai.

SUMMARY

Lina Mačernytė

FEMTOSECOND LASER GLASS MICROMACHINING IN AIR AND LIQUID ENVIRONMENT

The goal of this study – to evaluate water, KOH, NaCl solutions impact on glass samples femtosecond laser micromachining.

Main tasks:

1. To perform femtosecond laser micromachining of glass samples in air, water, KOH and NaCl solutions.
2. To evaluate profile alteration of formed grooves depth when machining is performed on dry glass surface and on the contrary when sample is immersed in solution.

Lasers with ultrashort pulse durations have demonstrated excellent micromachining quality, because pulse widths are shorter than the time for converting the energy of excited electrons into thermal energy [6, 7]. Micromachining performed in liquids can significantly improve the ablation quality and material removal efficiency. Bubbles that form in the liquid during laser heating determine used liquids movement. Throughout ablation process removed material particles sink slower in liquids. In this way sediment can be removed efficiently from laser formed grooves. Also, additional water layer above material surface performs a cooling function so sample fractures and cracks are avoided. Usually water is the most commonly used liquid medium for femtosecond laser micromachining [9–13].

In this study glass samples laser micromachining was performed in various concentrations of KOH and NaCl solutions, water and on dry sample surface. In the experiments, when the salt and KOH solutions are maintained above the sample, the etching properties are more pronounced at a lower scanning speed. In this case, greater number of pulses is detected per unit area, therefore higher temperature is reached which speeds up the etching processes. Formed grooves depth and its' profile were analysed in various mediums while changing the number of scans. Micromachined formed grooves were deeper on dry samples in comparison to liquid medium when the number of scans was low (1 – 500). By increasing the number of scans (500 – 5000), deeper grooves were obtained when an additional layer of water or KOH solutions were maintained above the sample. When the number of scans is equal to 5000, the groove depths vary even by 2,7 times. Although the KOH solution has strong etching properties, the depth of the grooves obtained by immersing the glass in this solution

is compared with that formed by maintaining the water layer above the sample. Selected high scanning speed and during the reaction formed hydrogen bubbles may have prevented reaching deeper depths. Grooves depth profiles were also evaluated. The grooves formed in the liquid medium are characterized by blunt apexes. The pointed shape is characterized by grooves obtained on the dry surface of the sample. It is hypothesized that the additional layer of liquid replaces Gaussian beam. For this reason, the larger depths of the formed grooves are achieved and changes in the shape of the profiles observed.