

Vilniaus universiteto
Fizikos fakulteto
Lazerinių tyrimų centras

Miglė Mackevičiūtė
STIKLO FREZAVIMO NUO APATINĖS BANDINIO PUSĖS LAZERINE SPINDULIUOTE
TYRIMAI

Magistrantūros studijų baigiamasis darbas

Lazerinių technologijų
studijų programa

Studentė

Miglė Mackevičiūtė

Leista ginti

2021-05-21

Darbo vadovas

dr. Paulius Gečys

Konsultantas

Juozas Dudutis

Centro direktorius

prof. Aidas Matijošius

Vilnius 2021

Turinys

Įvadas	3
1 Netiesinė skaidrių medžiagų sugertis	4
1.1 Daugiafotonė ir tunelinė jonizacija	4
1.2 Griūtinė jonizacija	5
2 Lazerinės stiklo apdirbimo technologijos	6
2.1 Tiesioginė abliacija	6
2.2 Apdirbimas nuo apačios	7
3 Apdirbimo parametrai	10
3.1 Lazerio ir jo pluošto parametrai	10
3.2 Skenavimo ir pozicionavimo parametrai	15
3.3 Apdirbamo bandinio paviršius	17
4 Eksperimento įranga ir metodika	18
5 Rezultatai ir jų aptarimas	23
Pagrindiniai rezultatai ir išvados	39
Literatūros sąrašas	40

Įvadas

Stiklas yra dažnai naudojama medžiaga, pritaikoma įvairiausiuose architektūros [1], medicinos [2], elektronikos [3], saulės elementų [4] bei kituose sektoriuose. Nenuostabu, jog prieš naudojant stiklą pirmiausia reikia jį apdirbti. Dažniausiai naudojamos vandens srauto [5, 6], apdirbimo abrazyvių dalelių srautu [7, 8], apdirbimo ultragarsu [9, 10] bei mechaninio gręžimo [11, 12] ir pjovimo [13] technologijos. Kadangi stiklas yra trapus, šios apdirbimo technologijos yra ribotos kokybės bei apdirbimo greičio, todėl nėra optimalios stiklo mikroapdirbimui. Stipriai augant mikroelektromechaninių [14], mikrofluidinių [15, 16] sistemų bei jutiklių [17–19] taikymams, padidėjo stiklo mikroapdirbimo rinka. Tai lemia didesnę paklausą lazeriniam stiklo apdirbimui, kuris pasižymi tikslumu bei greičiu.

Stiklo apdirbimas lazerio pluoštu gali būti atliktas skirtingais metodais. Norint perpjauti stiklą, gali būti naudojamas stiklo raižymas Beselio-Gauso pluoštu. Tokiu būdu suformuojamas itin mažas pjūvio plotis, o pjovimo greitis gali siekti net 100 mm/s [20]. Tačiau toks apdirbimo būdas nėra pritaikytas sudėtingų formų pjovimui ar stiklo frezavimui.

Tikslumo reikalaujančių sudėtingų figūrų apdirbimui gali būti naudojama tiesioginė abliacija su trumpais ar ultratrumpais impulsais. Šis būdas yra tinkamas plonų medžiagų apdirbimui. Tačiau dėl kampo tarp pjūvio sienelių ir bandinio paviršiaus normalės negalima suformuoti gilių ir siaurų kanalų [21].

Norint apdirbti didesnio storio medžiagą bei gauti statmenas bandinio paviršiui pjūvio sienelės, bandinys apdirbamas nuo apatinės paviršiaus pusės. Parodyta, jog apdirbant lydytą kvarcą nuo apatinės pusės su 5 ns trukmės, 532 nm bangos ilgio impulsais pasiekiamas 0,13 mm³/J efektyvumas [22]. Tačiau trūksta informacijos apie lydyto kvarco apdirbimą nuo apatinės pusės naudojant pirmąją lazerio harmoniką. Pirmoji harmonika yra fundamentinis lazerio dažnis, tad nereikia naudoti papildomo netiesinio kristalo dažnio keitimui. Kadangi lazeriniame apdirbime naudojamos didelės galios pluoštai, su pirmąja harmonika išvengiama kristalo pramušimo galimybė.

Tyrimas buvo atliktas su skirtingos trukmės impulsais, kadangi nuo to stipriai priklauso apdirbimo kokybė bei efektyvumas [23]. Žinoma, jog harmonikų generavimo efektyvumas yra mažesnis trumpesnės trukmės impulsams dėl mažesnio koherentinio sąveikos ilgio [24]. Tai antroji priežastis, kodėl darbe pasirinkta tirti pirmąją harmoniką.

Taip pat darbe ištirtas apdirbimas impulsų papliūpomis (angl. *bursts*). Tokį sprendimą lėmė šiais metais publikuotas tyrimas, kuriame parodyta, jog apdirbant lydytą kvarcą papliūpomis tiesioginės abliacijos būdu, pasiekiamas 7,4 karto didesnis efektyvumas lyginant su įprastu vienašūviu apdirbimo režimu [25]. Tikimasi tokį efektyvumo pagerėjimą pamatyti ir apdirbant bandinį nuo apatinės pusės.

Šio darbo tikslas – ištirti stiklo frezavimo procesą nuo priešingos bandinio pusės su pirmąją harmoniką naudojant nanosekundinius ir pikosekundinius impulsus bei papliūpas.

Darbas parengtas Valstybinio mokslinių tyrimų instituto Fizinių ir technologijos mokslų centre, Lazerinių technologijų skyriuje, Lazerinio mikroapdirbimo technologijų laboratorijoje.

1 Netiesinė skaidrių medžiagų sugertis

Skaidrios medžiagos pasižymi dideliu draustinės juostos pločiu, pvz.: lydyto kvarco draustinės juostos tarpas lygus 7,5 eV, o safyro – 9,9 eV [24]. Norint, kad medžiaga sugertų fotoną, reikia, kad fotono energija viršytų arba būtų lygi medžiagos draustinės energijos tarpui. Kadangi regimosios šviesos fotonų energija siekia 3,1 eV, šios energijos nepakanka perkelti elektroną iš valentinės juostos į laidumo [26]. Norint atlikti skaidrių medžiagų apdirbimą, reikalingas kitas sugerties mechanizmas. Aštriai sufokusavus trumpus lazerio impulsus, pluošto sąsmaukos vietoje galima pasiekti pakankamai didelį intensyvumą, dėl kurio įvyksta netiesinė jonizacija. Literatūroje išskiriami trys netiesinės sugerties mechanizmai [24].

1.1 Daugiafotonė ir tunelinė jonizacija

Daugiafotonė jonizacija įvyksta valentinėje juostoje esančiam elektronui sugeriant kelis fotonus vienu metu (1 pav.). Tuomet jų energija sumuojasi ir elektronas gali pakilti iš valentinės juostos į laidumo:

$$Mh\nu \geq E_g, \quad (1)$$

čia E_g – draustinis tarpas tarp valentinės ir laidumo juostų, h – Planko konstanta, ν – spinduliuotės dažnis, M – fotonų skaičius.

Iš pateiktos formulės matoma, jog norint sukelti daugiafotonę sugertį reikia, jog suminė M fotonų energija viršytų medžiagos draustinį tarpą tarp valentinės ir laidumo juostų.

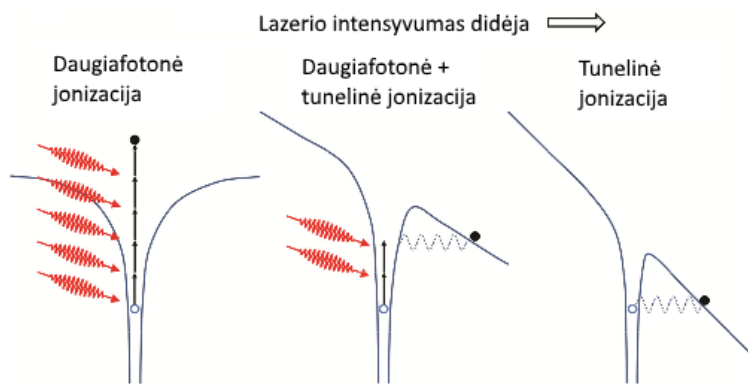
Daugiafotonė jonizacija dominuoja esant mažiems lazerinio pluošto intensyvumams ir dideliems spinduliuotės dažniams. Esant pakankamai dideliame lazerio intensyvumui, gali pasireikšti tunelinė jonizacija (1 pav.). Jos metu laidumo bei valentinės juostų struktūros yra iškreipiamos taip, kad atsiranda nemaža tikimybė elektronui tuneliuoti iš valentinės juostos į laidumo. Šis procesas taip pat priklauso nuo dažnio, kadangi esant mažam dažniui deformuota energetinių lygmenų sistema išsilaiko ilgesnį laiko tarpą [24].

Dominuojančią fotojonizaciją galima nustatyti, apskaičiavus Keldyšo parametą:

$$\gamma = \frac{\omega}{e} \sqrt{\frac{m_e c n \epsilon_0 E_g}{I}}, \quad (2)$$

čia ω – spinduliuotės dažnis, m_e – elektrono redukuota masė, e – elektrono krūvis, c – šviesos greitis, n – medžiagos lūžio rodiklis, ϵ_0 – dielektrinė skvarba vakuume, I – pluošto intensyvumas.

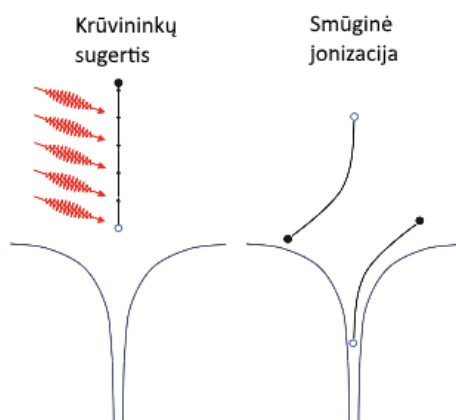
Kai Keldyšo parametras $\gamma < 1,5$ dominuoja tunelinė jonizacija, kai $\gamma > 1,5$ – daugiafotonė, o kai $\gamma \sim 1,5$ vyrauja tarpinis režimas, kurio metu abiejų jonizacijų indėlis panašus. Šias netiesines jonizacijas galima pasiekti tik su itin dideliu smailiniu intensyvumu, kuris pasiekiamas su ultratrumpaisiais impulsais [28].



1 pav. Principinė daugiafotonės, tunelinės bei abiejų jonizacijų kombinacijos schema, adaptuota pagal [27]

1.2 Griūtinė jonizacija

Laidumo juostoje esantis elektronas taip pat gali sugerti fotonus, taip įgydamas papildomos energijos (2 pav.). Sugėręs kelis fotonus, elektronas gali įgyti energiją, didesnę nei medžiagos draustinis juostos tarpas. Tuomet elektronas gali perduoti energiją valentinėje juostoje esančiam elektronui, taip perkeliant jį į laidumo juostą. Tokiu būdu sukuriamas naujas laisvas elektronas, o toks proceso pasikartojimas vadinamas griūtine jonizacija [26].



2 pav. Principinė griūtinės jonizacijos schema, adaptuota pagal [27]

Griūtinę jonizaciją galima pasiekti ir su sąlyginai ilgais nanosekundiniais impulsais. Šiai jonizacijai reikalingas pradinis elektronų tankis laidumo juostoje gali atsirasti dėl medžiagoje esančių priemaišų ir defektų [29]. Todėl nėra būtina inicijuoti daugiafotonę ar tunelinę jonizaciją.

Prasidėjus netiesinėms jonizacijoms, laisvųjų elektronų kiekis medžiagoje didėja tol, kol pasiekiamas kritinis elektronų tankis. Tuomet plazmos virpėjimo dažnis sutampa su lazerio dažniu ir plazma tampa itin sugeriančia. Esant kritiniam elektronų tankiui plazmos atspindys tėra keli procentai, o visa likusi energija yra sugeriamą. Įprastai laikoma, kad medžiagos pažeidimas įvyksta, kai elektronų tankis pasiekia kritinę vertę. Įprastai laikoma, jog kieto kūno medžiagų kritinis elektronų tankis yra 10^{21} cm^{-3} eilės ($\lambda = 1 \text{ }\mu\text{m}$) [24].

2 Lazerinės stiklo apdirbimo technologijos

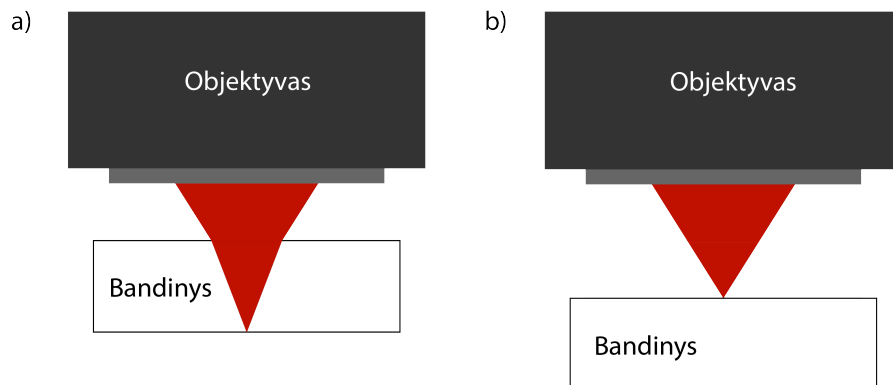
Dėl gerų dielektrinių, cheminių, mechaninių ir optinių savybių stiklas yra plačiai naudojamas įvairiose srityse (optoelektronikoje [30], telekomunikacijoje [31], biofotonikoje [32] ir kt. [33]). Stiklo apdirbimui naudojami lazeriai, norint užtikrinti gerą kokybės ir spartos santykį. Išskiriami trys pagrindiniai lazeriniai šaltiniai, naudojami apdirbimui:

- Impulsinis CO₂ lazeris. Šie lazeriai spinduliuoja mikrometrų eilės bangos ilgį, kurį stiklas sugeria tiesiškai. Sugėrus pakankamą kiekį fotonų, temperatūra pakyla tiek, kad medžiaga pradeda lydėtis ar garuoti. Medžiagai atšalant, dėl temperatūrų skirtumų susidaro mechaniniai įtempiai, kurie lemia nuolaužų susiformavimą. Dėl šios priežasties su CO₂ lazeriais negalima pasiekti aukštos apdirbimo kokybės. Tačiau dėl didelės spartos ir pigumo, tai vieni iš populiariausių pramonėje naudojamų lazerių [34].

- Ultratrumpųjų impulsų lazeriai. Apdirbant pikosekundiniais bei femtosekundiniais impulsais gaunama aukšta apdirbimo kokybė, tačiau žema sparta. Dėl mažos spartos šie lazeriai nėra tinkami naudoti masinės produkcijos gamybai [35]. Tačiau šio tipo lazeriai yra nepralenkiami, norint užtikrinti gerą apdirbimo kokybę.

- Nanosekundiniai lazeriai. Diodais kaupinamų moduluotos kokybės kieto kūno lazerių apdirbimas pasižymi didele sparta. Dėl šios priežasties tokio tipo lazeriai jau dabar plačiai naudojami pramonėje [35]. Tačiau apdirbant nanosekundiniais lazeriais ant paviršių suformuojami 100 μm [35] siekiantys įskilimai. Todėl šie lazeriai nėra tinkami, kai reikalaujama itin aukšta apdirbimo kokybė.

Norint su lazeriu iš stiklo suformuoti erdvinę figūrą, naudojama tiesioginė abliacija arba apdirbimas nuo apatinės pusės (3 pav.).



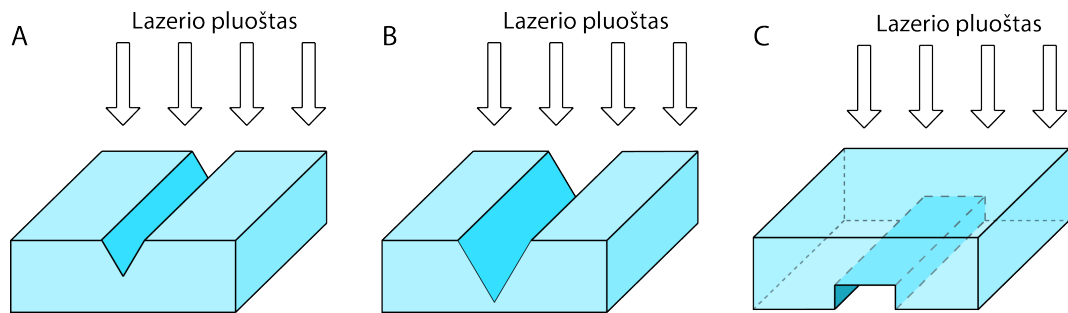
3 pav. a) Apdirbimo nuo apačios ir b) tiesioginės abliacijos schema

2.1 Tiesioginė abliacija

Tiesioginės abliacijos metu pluoštas sufokusuojamas į viršutinį bandinio paviršių (3b pav.). Tuomet dalis lazerio spinduliuotės yra sugeriama bandinyje. Didinant energiją, sukuriama struktūriniai

defektai, nutraukiami ryšiai bei stebimi faziniai virsmai. Bandinys gali išsilydyti, o padidėjus temperatūrai, išgaruoti. Staigiai padidėjus temperatūrai galimas tiesioginis virsmas iš kietosios fazės į garų. Išlydyta medžiaga, nanodalelės bei kietakūniai fragmentai yra išmetami iš bandinio, o toks reiškinys vadinamas abliacija [36].

Tiesioginė abliacija yra patogi norint apdirbti ploną medžiagą. Tačiau didėjant abliacijos gyliui, atsiranda sunkumų dėl lazerio pluošto išsklaidymo nuo pjūvio sienelių [37]. Būtent dėl to kampas tarp sienelių ir bandinio paviršiaus normalės įprastai siekia 8 – 10 laipsnius [21], o didinant kanalo gylį, reikalingas ir pjūvio pločio padidinimas (4A pav. ir 4B pav.).



4 pav. A ir B tiesioginės abliacijos, C abliacijos nuo apatinės pusės suformuoti kanalai

Verta paminėti, jog kontroliuojant pluošto kritimo kampą, tiesioginės abliacijos būdu įmanoma suformuoti ne tik stačias bet ir neigiamo kampo sienelės. Vienos iš dažniausiai krintančio pluošto kampą kontroliuojančių sistemų yra pleiščių [38] ir Dove prizmių [39] trepanavimo sistemos. Tačiau tokios sistemos yra pritaikytos skylių gręžimui ir nėra patogios įvairių formų apdirbimui. Todėl įvairių formų frezavimui įprastai naudojamos sistemos su kuriomis negalima kontroliuoti pluošto kritimo kampo, taigi suformuojamos teigiamo kampo sienelės.

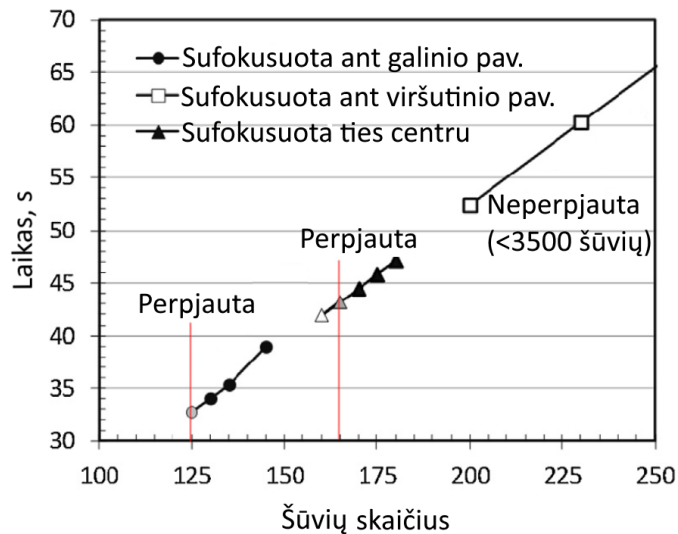
Kita tiesioginės abliacijos problema yra ta, kad apdirbant iš viršaus lazerio impulsai gali būti blokuojami dėl sąveikos su išabliuota medžiaga ir susidarancia plazma [37]. Dėl šios priežasties sumažėja apdirbimo efektyvumas. Šių problemų pašalinimui kartais naudojami papildomas oro [40] ar vandens [41] srautas, nukreiptas į apdirbamą vietą. Eksperimentiškai parodyta, jog vandens srauto panaudojimas gali pagerinti abliacijos efektyvumą iki 12 kartų [41]. Apdirbant silikatinę stiklą su papildomu vandens srautu, naudojant 532 nm bangos ilgiu, 10 ps trukmės, 100 kHz pasikartojimo dažnio impulsus su 23 J/cm^2 energijos tankiu, pasiektas $0,005 \text{ mm}^3/\text{J}$ apdirbimo efektyvumas [41].

2.2 Apdirbimas nuo apačios

Apdirbant medžiagą nuo apatinės pusės, pluoštas yra fokusuojamas per medžiagos tūrį į apatinę medžiagos paviršių (3a pav.). Palaipsniui slenkant pluošto sąsmauką link viršutinės medžiagos pusės suformuojama erdvinė figūra. Galima atskirti du praktikoje naudojamus frezavimo būdus – tolygią abliaciją ir skaldymą. Tolygi abliacija vyksta, kai medžiaga yra pašalinama ją išlydant arba išgarinant. Stiklo skaldymo metu stikle suformuojami mikrotrūkiniai, dėl kurių medžiagos dalelės yra išmetamos

nuolaužų forma [25]. Tolygi abliacija pasižymi geresne apdirbimo kokybe, o skaldymas didele sparta.

Atliekant apdirbimą nuo apatinės pusės, apdirbimo produktai iš sąveikos zonos pašalinami lazerio sukeltos plazmos smūginės bangos bei gravitacijos pagalba [42]. Dėl tokio nuolaužų pašalinimo sumažėja tikimybė lazerio pluoštui sąveikauti su išabliuota medžiaga. Todėl lazerio energija yra efektyviau išnaudojama medžiagos pašalinimui. Skylės išgręžimo laikas nuo pluošto sąsmaukos vietos pateiktas 5 paveiksle. Skylė greičiausiai išgręžiama, kai pluošto sąsmauka pozicionuojama bandinio apatinėje pusėje. Sufokusuotą pluoštą bandinio viduryje, apdirbimas užtrunka 1,36 ilgiau, o sufokusuotą ant priekinio paviršiaus 24,5 kartus ilgiau [42].



5 pav. Skylių išgręžimo trukmės priklausomybė nuo šūvių skaičiaus, fokusuojant pluoštą skirtingose bandinio dalyse. Pilnaviduriai simboliai atitinka kiaurai išgręžtas skylės, o tuščiaviduriai – nepilnai išgręžtas skylės. Eksperimentas atliktas su Gorilla 0,7 mm storio stiklu, naudojant 1064 nm pikosekundinį lazerį su 50 kHz impulsų pasikartojimo dažniu, 9 J/cm² energijos tankiu ir 240 mm/s skenavimo greičiu [42]

Su 1064 nm bangos ilgio, nanosekundiniais, 15 kHz pasikartojimo dažnio impulsais su 150 J/cm² energijos tankiu, pademonstruotas 0,25 mm³/J apdirbimo efektyvumas [35].

Kitas privalumas yra tas, kad, fokusuojant pluoštą per medžiagos tūrį, išvengiama pluošto sklaida nuo pjūvio sienelių. Todėl šiuo būdu galima suformuoti kanalus su statmenomis sienelėmis (4C pav.). Sunkumai atsiranda, norint greitai išfrezuoti siaurą kanalą, kadangi nuolaužos ima kauptis prie sienelių. Šios nuolaužos sugertą energiją perduoda aplink esančiai medžiagai kaip šilumą. Tai lemia didesnes lokalizuotas temperatūras, terminius įtempius ir didesnę įtrūkių susiformavimo tikimybę. Tokie efektai tampa kritiniais, esant dideliame impulsų pasikartojimo dažniui, kadangi tuomet padidėja šilumos akumuliacija. Norint sumažinti nuolaužų kaupimąsi prie sienelių, papildomai gali būti naudojamas oro arba skysčio srautas [21].

Verta paminėti, jog energijos tankio pažeidimo slenkstis apatiniame paviršiui yra mažesnis [43]. Kai pluoštas sklinda iš optiškai retesnės terpės į optiškai tankesnę, atsispindėjęs pluoštas patiria π rad

fazės pokytį. Todėl fazių pokytis tarp kritusios į viršutinį paviršių ir nuo jos atsispindėjusios bangos yra π rad. Toks fazių pokytis lemia destruktynią interferenciją [43]. Dėl šios priežasties ant viršutinio paviršiaus krintantis elektrinio lauko stipris yra mažesnis už pradinį. Pluoštui atsispindėjus nuo apatinio paviršiaus, nėra fazės pokyčio, kadangi pluoštas sklinda iš optiškai tankesnės terpės į optiškai retesnę. Todėl ties apatiniu paviršiumi įvyksta konstruktyvi interferencija tarp kritusios ir atsispindėjusios bangų. Energijos tankių ant apatinio F_{rear} ir ant viršutinio F_{front} paviršių santykį galima apskaičiuoti žinant bandinio lūžio rodiklį n [43]:

$$\frac{F_{\text{rear}}}{F_{\text{front}}} = \frac{4n^2}{(n+1)^2}. \quad (3)$$

Lydyto kvarco atveju ($n = 1,45$, kai $\lambda = 1064$ nm) ant apatinio paviršiaus krintantis energijos tankis yra 1,4 karto didesnis už energijos tankį ant viršutinio paviršiaus.

Nors apdirbant nuo priešingos pusės nėra galimybės apdirbti tiesiškai pluoštą sugeriančių medžiagų, tačiau dėl geresnio efektyvumo bei galimybės suformuoti stačias sienes, didesnio storio (> 1 mm) skaidrios medžiagos frezuojamos nuo apatinės pusės.

3 Apdirbimo parametrai

Apdirbimo nuo apatinės pusės efektyvumas bei kokybė priklauso nuo daugelio parametų. Pagal apdirbamą medžiagą bei frezuojamas formas, pasirenkamas atitinkamas optimalus parametų rinkinys. Šiame skyrelyje bus aptarti į tris grupes išskirti parametrai: lazerio ir jo pluošto, pluošto skenavimo ir pozicionavimo bei apdirbamos medžiagos parametrus.

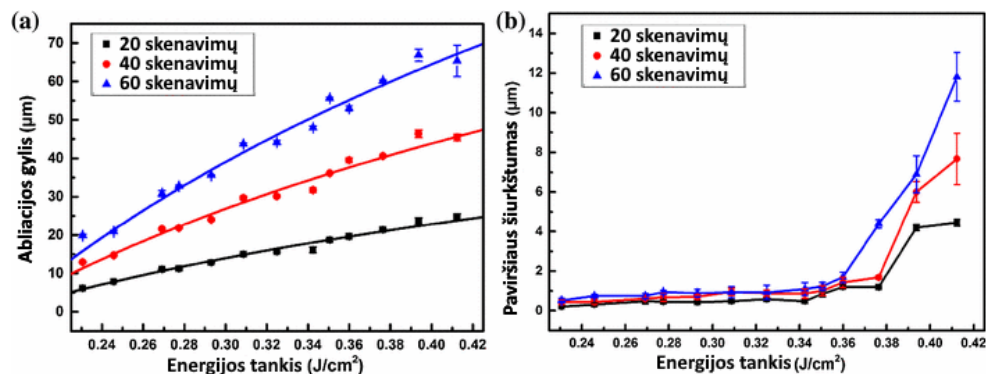
3.1 Lazerio ir jo pluošto parametrai

Energijos tankis

Nuo energijos tankio tiesiogiai priklauso vienu impulsu pašalinamas medžiagos kiekis (6a pav.). Su lazerio pluoštu suformuoto kraterio tūrį V galima apskaičiuoti pagal žemiau pateiktą formulę:

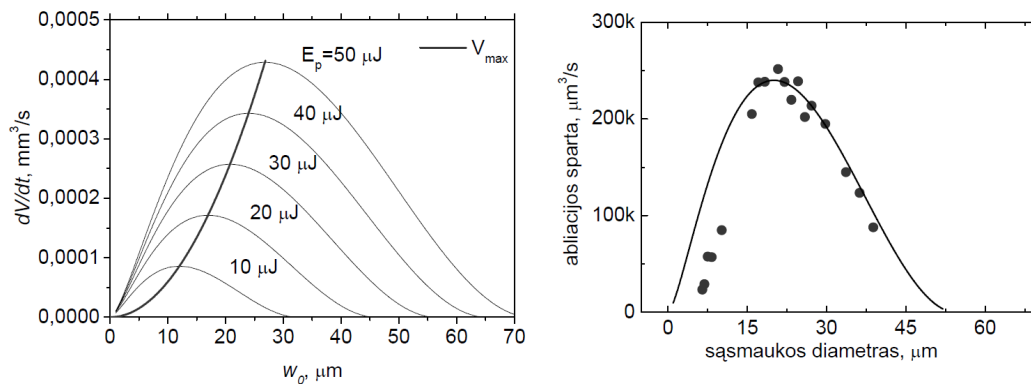
$$V = \frac{\pi\omega_0^2\delta}{4} \left(\ln \frac{F_0}{F_{th}} \right),$$

čia ω_0 – pluošto sąsmaukos spindulys, δ – efektyvus sugerties gylis, F_0 – energijos tankis pluošto centre, F_{th} – slenkstinis abliacijos energijos tankis. Taigi apdirbant su didesniu energijos tankiu išabliuojama daugiau medžiagos ir dėl to padidėja apdirbimo sparta. Tačiau padidėjus energijos tankiui suprastėja frezuojamo paviršiaus kokybė (6b pav.). Todėl energijos tankis turi būti parenkamas pagal norimus apdirbimo rezultatus.



6 pav. Kairėje kraterio gylio, dešinėje paviršiaus šiurkštumo priklausomybė nuo naudojamo energijos tankio. Apdirbimas atliekamas frezuojant 2 mm x 2 mm pločio kvadratus pliene pasinaudojus pikosekundiniais impulsais [44]

Žinoma, jog energijos tankį galima kontroliuoti keičiant impulso energiją arba pluošto sąsmaukos diametrą. Teoriškai apskaičiuota ir eksperimentiškai patvirtinta, jog optimalus (kuris lemia didžiausią efektyvumą) pluošto diametras priklauso nuo impulso energijos, medžiagos pažeidimo slenkščio bei atstumo tarp impulsų [45]. Dėl paprastumo tariame, jog apdirbama ta pati medžiaga, o atstumas tarp šūvių nekinta. Tuomet galima pastebėti, jog didinant impulsų energiją, didėja ir optimalus pluošto sąsmaukos diametras (7 pav.).



7 pav. Abliacijos spartos priklausomybė nuo pluošto diametro, pjaunant įpjovą impulsų seka medžiagoje su $0,6 \text{ J/cm}^2$ pažeidimo slenksčiu su 50 kHz pasikartojimo dažnio pastovios energijos impulsais. Kairėje pateiktas teorinis modelis, o dešinėje eksperimentiškai išmatuotos vertės apdirbant nerūdijantį plieną su $28 \mu\text{J}$ energijos impulsais [45]

Impulso trukmė

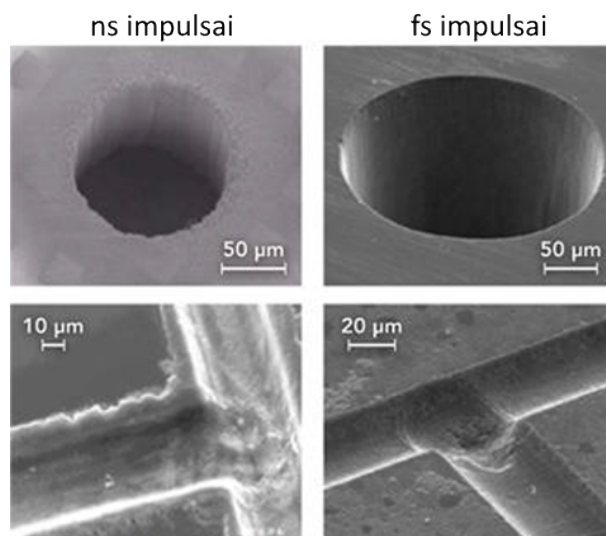
Lazerio pluoštą sugėrę elektronai perduoda savo energiją gardelei tol, kol susivienodina jų temperatūra. Laiko tarpas per kurį pasiekama termodinaminė pusiausvyra vadinamas termalizacijos trukme, o jo vertė įprastai yra pikosekundžių eilės [46]. Femtosekundinių impulsų metu elektronai yra nuolatos sužadinami, o jų energija yra perduodama kitiems elektronams per susidūrimus. Dėl mažos elektronų šiluminės talpos, per mažą ($\sim 100 \text{ fs}$) laiko tarpą pasiekama itin aukšta temperatūra [46]. Vėliau įvyksta energijos perdavimas tarp elektronų ir fononų. Gardelės energija tuomet yra panaudojama medžiagos išlydimui ar išgarinimui.

Kitaip tariant, veikiant ultratrumpaisiais impulsais, fotonų sugerties bei energijos perdavimo gardelei procesai yra atskirti [23]. Dėl šios priežasties kelių mikrometrų gylyje pasiekama itin didelė temperatūra bei slėgis [23]. Dėl trumpos sąveikos trukmės pastovus medžiagos garinimas nėra galimas, todėl suformuojama perkaitinto skysčio būsena [47]. Tuomet didelio slėgio pagalba medžiaga yra pašalinama lašelių bei garų forma [47]. Toks mechanizmas dar vadinamas faziniu sproginimu (angl. *phase explosion*) [47].

Dėl šio medžiagos pašalinimo mechanizmo su trumpesne impulso trukme aplink kraterį suformuojama mažesnė šilumos paveikta zona, o tai lemia geresnę mikroapdirbimo kokybę [38]. Todėl norint atlikti tikslų apdirbimą, naudojami kuo trumpesni impulsai (8 pav.).

Naudojant nanosekundinius ir ilgesnius impulsus pluošto sugertis ir energijos perdavimas gardelei vyksta impulso metu. Medžiaga yra kaitinama iki garavimo temperatūros, o ją pasiekus medžiaga yra išgarinama. Šis medžiagos pašalinimo mechanizmas leidžia pasiekti didesnę spartą, tačiau dėl didesnės šilumos paveiktos zonos suprastėja apdirbimo kokybė.

Su 800 nm 50 fs (FWHM) trukmės impulsais gręžiant skylės stikle nuo apatinės pusės, pasiekiamas $1,4 \mu\text{m}^3/\mu\text{J}$ efektyvumas bei $2,8 \cdot 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{s}$ sparta [48]. Apdirbant stiklą nuo apatinės pusės su ilgesniais, 10 ns (FWHM) trukmės, 532 nm bangos ilgio impulsais efektyvumas ir sparta atitinkamai



8 pav. Kairėje su nanosekundiniais, dešinėje su femtosekundiniais impulsais apdirbtų bandinių optinio mikroskopo nuotraukos [23]

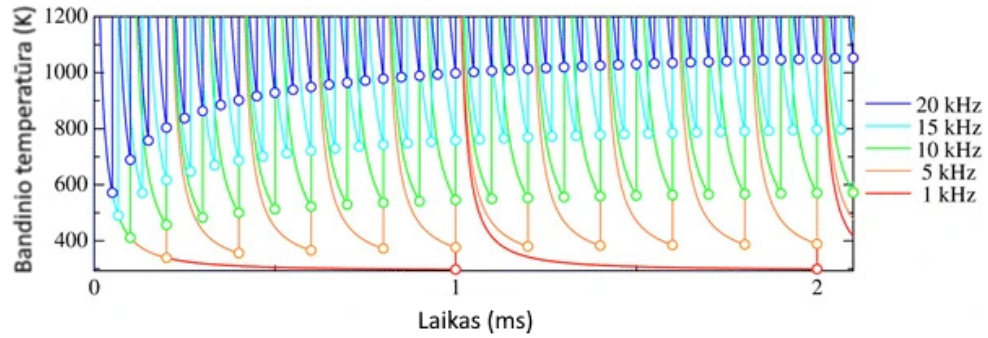
0,25 mm³/J ir 2,5 mm³/s [35].

Impulso trukmė taip pat lemia slenkstinę abliacijos energijos tankį. Nustatyta, jog impulsų trukmių intervale nuo 10 ps iki 10 ns, slenkstinis energijos tankis didėja nuo impulso trukmės per $\sqrt{\tau}$ [24]. Todėl norint atlikti apdirbimą su trumpesniais lazeriniais impulsais, užtenka mažesnių impulso energijų. Trumpesniems nei 10 ps impulsams, aptarta priklausomybė nuo impulso trukmės nebegalioja, todėl dažnai teigiama, kad medžiagos yra atsparesnės itin trumpiems impulsams. Šis nukrypimas atsiranda dėl pakitusio optinio pažeidimo mechanizmo, kuriam vis didesnę įtaką daro daugiafotonė jonizacija [24].

Impulsų pasikartojimo dažnis

Nuo impulsų pasikartojimo dažnio priklauso abliacijos slenkstis. Įprastai šaltiniuose nurodomas vieno impulso abliacijos slenkstis. Tačiau apdirbant medžiagą su keleta mažesnio energijos tankio nei energijos slenkstis impulsais, taip pat galima inicijuoti abliaciją. Nors vieno impulso energijos tankis yra per mažas medžiagos išgarinimui, tačiau jo pakanka sukelti struktūrinius ir cheminius pokitimus. Vieni iš tokių padarinių yra dislokacijos kristalinėse medžiagose, fotocheminės reakcijos, nanogardelės [49]. Dėl šių defektų slenkstinis energijos tankis gali sumažėti keliasdešimt kartų [49]. Kitas reiškinys, atsirandantis naudojant didelio pasikartojimo dažnio impulsus – šilumos akumuliacija. Sumodeliuoti medžiagos temperatūros pokyčiai, naudojant skirtingo pasikartojimo dažnio impulsus pateikti 9 paveiksle. Pastebima, jog apdirbant bandinį su 5 kHz ir didesniu impulsų pasikartojimo dažniu, šiluma nespėja difunduoti iš sąveikos vietos. Todėl su kiekvienu impulsu apdirbamas vis didesnės temperatūros bandinys. Mažo šiluminio laidumo medžiagoms, taigi ir stiklui, šiluminė akumuliacija pasireiškia stipriau.

Norint apskaičiuoti slenkstinę abliacijos energijos tankį atsižvelgiant į akumuliacinį efektą, nau-

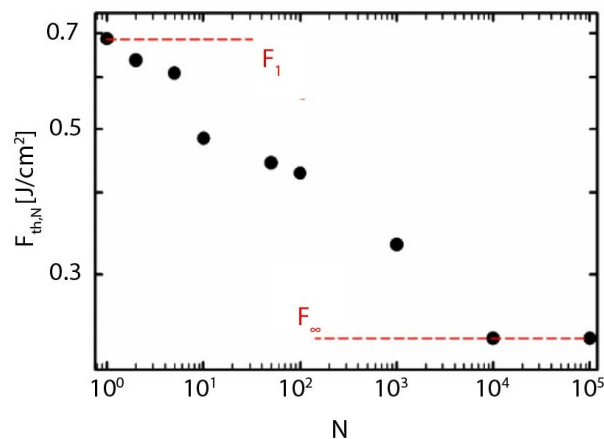


9 pav. Pluošto sąveikos su borosilikatinio bandinio paviršiumi centre sumodeliuota paviršiaus temperatūra. Modeliavimas atliktas su skirtingais impulsų pasikartojimo dažniais, naudojant $1 \mu\text{J}$ impulsų energiją [50]

dojama formulė:

$$F_{\text{th}}(N) = F_{\text{th}}(1) \cdot N^{\zeta-1}, \quad (4)$$

čia N – impulsų skaičius, $F_{\text{th}}(N)$ – N impulsų slenkstinis abliacijos energijos tankis, $F_{\text{th}}(1)$ – vieno impulso slenkstinis abliacijos energijos tankis, ζ – akumuliacijos koeficientas. Akumuliacijos koeficientas parodo abliacijos slenkščio priklausomybę nuo poveikio trukmės. Kai akumuliacijos koeficientas lygus 1, abliacijos slenkstis vienam ir keliems impulsams nekinta. Tačiau įprastai šis koeficientas yra mažesnis. Verta paminėti, jog (4) formulė negalioja, kai kalbama apie itin didelį impulsų kiekį [51]. Eksperimentiškai nustatyta, jog pasiekus tam tikrą impulsų skaičių, slenkstinis energijos tankis įsisotina ir nebemažėja (10 pav.).



10 pav. Daugiaimpulsinio abliacijos slenkstinio energijos tankio priklausomybė nuo impulsų kiekio (ši ašis pavaizduota logaritmineje skalėje). Eksperimentas atliktas su 55 fs, 800 nm, 1 kHz impulsų vora, skirtingomis impulsų energijomis formuojant kraterius TiO_2 sluoksniu dengtame lydyto kvarco bandinyje [51]

Taigi, didinant dažnį, dėl akumuliacinių reiškinių, sumažėja abliacijos slenkstis. Nepaisant to, norint išlaikyti tą patį šūvių persiklojimo faktorių, didinant dažnį, didinamas ir skenavimo greitis, ir

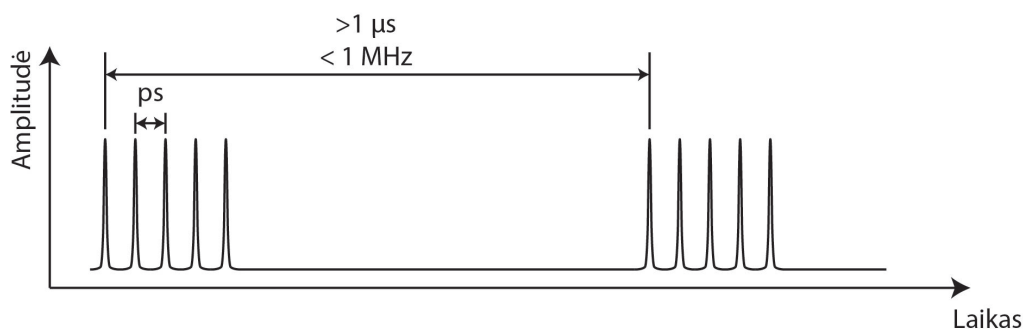
pasiekama didesnė apdirbimo sparta. Verta paminėti, jog maksimalų naudojamą impulsų pasikartojimo dažnį gali apriboti ne tik paties lazerio parametrai, bet ir galvanoskenerio ar pozicionavimo staliuko greitis. Pasiekus maksimalią pluošto skenavimo ar bandinio pozicionavimo greičio vertę, impulsų pasikartojimo dažnio didinimas pradeda riboti maksimalų atstumą tarp gretimų šūvių. Todėl esant pakankamai dideliame impulsų pasikartojimo dažniui, nebegalima pasiekti mažo impulsų persiklojimo faktoriaus. Pvz.: jei pluošto skenavimo sistemos maksimalus greitis 14 m/s, su 400 kHz impulsų pasikartojimo dažniu galima pasiekti ne didesnę nei 35 μm atstumą tarp šūvių.

Verta pastebėti, jog impulsų pasikartojimo dažnio didinimas nevisada lemia didesnę apdirbimo efektyvumą, kadangi apdirbimo efektyvumas gali būti apribotas plazmos ekranavimo [45] ar dėl didelių terminių įtempių susiformuojančiais skilimais [46].

Apdirbimas papliūpomis

Mažos ultratrumpųjų impulsų apdirbimo spartos problemą galima spręsti didinant lazerio galią bei pasikartojimo dažnį. Tačiau tokiu būdu nevisada pavyksta gauti aukštą efektyvumą ir apdirbimo kokybę. To priežastys – plazmos ekranavimas bei padidėjusi šilumos akumuliacija, dėl kurios bandinys gali įkaisti tiek, kad įvyksta bandinio lydymasis ar net skilimas [46].

Pademonstruota, jog medžiagos pašalinimo efektyvumą galima pagerinti, apdirbant papliūpų (angl. *bursts*) režimu [52–54]. Papliūpa vadinamas impulsas, išskaidytas į kelis mažesniu nei 1 μs laiko tarpu atskirtus impulsus (11 pav.) [46].

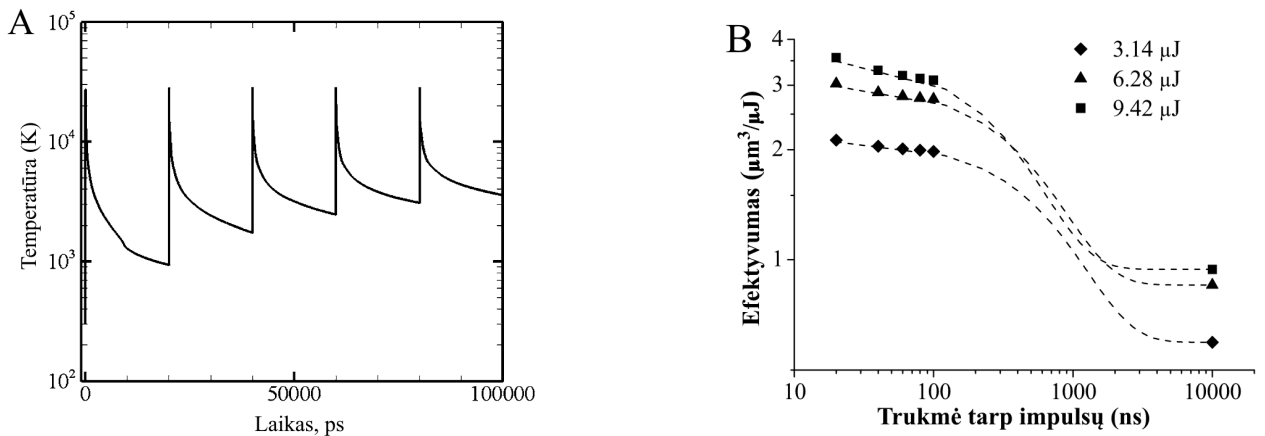


11 pav. Papliūpų laikinės charakteristikos schema. Paveiksle pavaizduotos mažesnio nei 1 MHz pasikartojimo dažnio papliūpos, sudarytos iš penkių, pikosekundžių trukme atskirtų impulsų

Apdirbimo metu impulso energija yra išnaudojama medžiagos temperatūrai pakelti. Temperatūrai pasiekus garavimo tašką, įvyksta medžiagos abliacija, o energijos perteklius pašalinamas kartu su išabliuota medžiaga. Apdirbimo vienašūviais impulsais metu trukmė tarp impulsų yra pakankamai ilga, jog šiluma difunduotų iš sąveikos vietos ir temperatūra grįžtų į pradinę vertę [55].

Apdirbant su papliūpomis, šiluma nespėja difunduoti iš sąveikos zonos ir pakelia jos temperatūrą (12A pav.) [56]. Todėl sumažėja slenkstinis energijos tankis ir su tuo pačiu energijos kiekiu pašalinamas didesnis kiekis medžiagos. Pademonstruota, jog su trumpesne trukme tarp papliūpos impulsų

pasiekiamas didesnis efektyvumas (12B pav.). To priežastis – mažesnį atstumą spėjusi difunduoti šiluma.



12 pav. Kairėje: teorinė vario paviršiaus temperatūros priklausomybė nuo laiko, kai į bandomą netaikomi penki 10 ps trukmės impulsai, atskirti 20 ns. Dešinėje: abliacijos efektyvumo priklausomybė nuo laiko tarpo tarp impulsų papliūpoje. Taškais pažymėti eksperimento metu gauti rezultatai, o kreivės atitinka teorinį modelį. Papliūpą sudarė 5 impulsai su skirtingomis 3,14 μJ , 6,28 μJ ir 9,42 μJ energijomis [56]

Iki šiol yra atlikta nemažai tyrimų naudojant papliūpas įvairių metalų apdirbimui [46, 52–54, 57]. Parodyta, jog naudojant papliūpas, vario frezavimas yra 20 % efektyvesnis nei naudojant pavienius impulsus (su papliūpomis, sudarytomis iš trijų 64,5 MHz 10 ps trukmės impulsų, pasiekiamas 4,8 $\mu\text{m}^3/\mu\text{J}$ efektyvumas) [53]. Pastebimai mažiau mokslinių straipsnių, aprašančių stiklo apdirbimą papliūpomis. 2021 m. išleistame S. Schwarz'o straipsnyje parodyta, jog naudojant papliūpas, sudarytas iš dešimties 230 fs trukmės 0,46 ns trukme atskirtų impulsų, pasiekiamas 7,4 kartų didesnis efektyvumas, lyginant su pavieniais impulsais [25]. Toks efektyvumo padidėjimas aiškinamas pasikeitusiu medžiagos pašalinimo mechanizmu. Teigiama, jog apdirbant su papliūpomis, sudarytomis iš daugiau nei 5 impulsų, medžiaga yra pašalinama nuolaužų forma. Kadangi nereikia išgarinti medžiagos, energija efektyviau panaudojama medžiagos pašalinimui. Medžiagos pašalinimo mechanizmo priklausomybė nuo papliūpą sudarančių impulsų skaičiaus taip pat pastebėta ir S. M. Remund'o publikuotame straipsnyje [58]. Tačiau kol kas nėra publikuotų tyrimų, parodančių papliūpų privalumą atliekant stiklo apdirbimą nuo apatinės pusės.

3.2 Skenavimo ir pozicionavimo parametrai

Šūvių persiklojimas

Didelis lazerio šūvių persiklojimas sukelia galingas termines smūgines bangas, dėl kurių medžiagoje susidaro nepageidaujami įtrūkių. Tačiau esant mažam šūvių persiklojimui, gali neužtekti energijos tolygiam medžiagos pašalinimui. Todėl egzistuoja optimalus šūvių persiklojimas (13 pav.), su kuriuo susiformuoja mažiausiai įtrūkių [42].

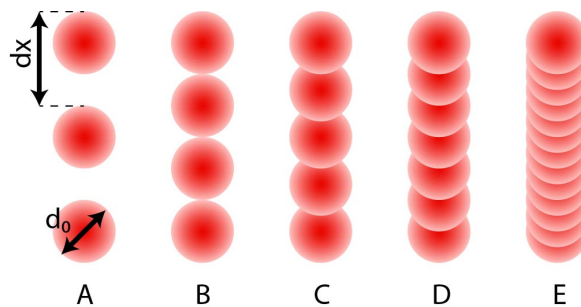
Šūvių persiklojimą galima apskaičiuoti pagal formulę:

$$O = \left(1 - \frac{dx}{d_0}\right), \quad (5)$$

čia O – persiklojimo faktorius, dx – atstumas tarp šūvių, d_0 – pluošto diametras $1/e^2$ intensyvumo lygyje. Persiklojimo faktorių galima nesunkiai valdyti keičiant pasikartojimo dažnį arba skenavimo greitį, kadangi nuo šių parametrų priklauso atstumas tarp šūvių:

$$dx = \frac{v}{f}, \quad (6)$$

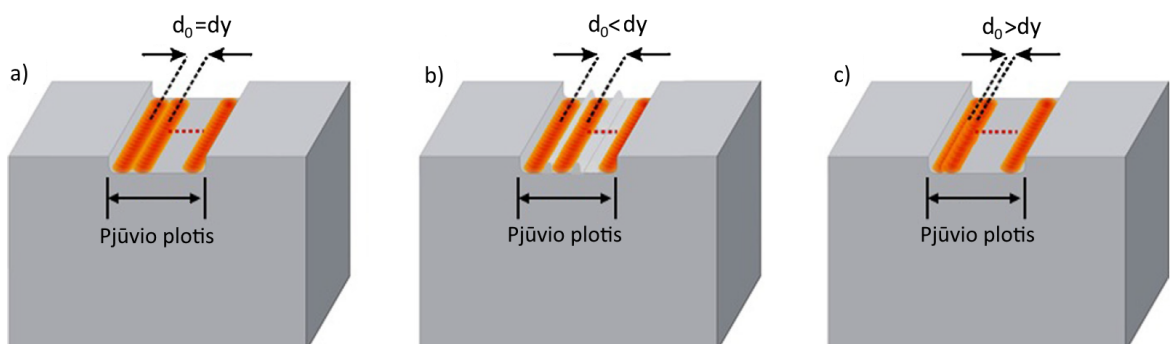
čia f – impulsų pasikartojimo dažnis.



13 pav. Skirtingas šūvių persiklojimas, kur d_0 pluošto diametras, o dx atstumas tarp šūvių. A – $dx/d_0 = 1,5$, B – $dx/d_0 = 1$, C – persiklojimas tarp šūvių 25 %, D – 50 %, E – 75 %

Atstumas tarp šūvio linijų

Kaip ir prieš tai, egzistuoja optimalus atstumas tarp skenavimo linijų [42]. Kai išfrezuotos šūvio linijos plotis yra mažesnis už atstumą tarp linijų, medžiaga išabliuojama neefektyviai (14b pav.). Tokiu atveju tarp šūvio linijų lieka dalis neišabliuotos medžiagos. Tačiau kai atstumas tarp linijų yra per mažas, šūvio linijos gali persikloti taip, kad kiekvienos naujos linijos metu tik nedidelė pluošto dalis būtų panaudota frezavimui (14c pav.).



14 pav. Skirtingos kraterio diametro d_0 ir atstumo tarp linijų dy konfigūracijos [42]

Poslinkis Z ašyje

Kaip ir prieš tai aptartuose parametruose, egzistuoja optimalus bandinio ar pluošto sąsmaukos poslinkis Z ašyje, su kuriuo pasiekiamas didžiausias frezavimo efektyvumas. Teoriškai optimalus poslinkis Z ašyje turi būti lygus išfrezuojamo sluoksnio gyliui. Jei poslinkis yra didesnis nei vienu sluoksniu išfrezuojamas gylis, pluošto sąsmauka kyla greičiau nei bandinys. Todėl tam tikru metu pluošto sąsmauka atsiranda bandinio tūryje. Tuomet galimos dvi baigtys: jei pluošto intensyvumas yra pakankamai didelis, jog tūryje sukeltų pažeidimus, suformuojami įtrūkiai, tačiau jei pluošto intensyvumas yra nepakankamas tūriniam pažeidimams sukelti, frezavimas sustoja intensyvumui sumažėjus žemiau pažeidimo slenkščio. Esant mažesniai poslinkiui Z ašyje nei vienu sluoksniu išfrezuojamas gylis, su kiekvienu sluoksniu pluošto sąsmauka tols nuo frezuojamo paviršiaus. Frezavimas bus neefektyvus, kadangi apdirbimas bus atliekamas su vis didesniu pluošto diametru ir mažesniu energijos tankiu.

3.3 Apdirbamo bandinio paviršius

Apdirbamo paviršiaus šiurkštumas

Šiurkštesnis paviršius pasižymi didesne pluošto sugertimi bei mažesniu slenkstiniu abliacijos energijos tankiu. Jau 1977 m. gautas empirinis sąryšis tarp paviršiaus šiurkštumo ir slenkstinės pažeidimo ribos [59]:

$$E_{th} \cdot \sigma^m = C, \quad (7)$$

čia E_{th} – slenkstinis elektrinio lauko stipris (MV/cm), σ – paviršiaus šiurkštumas (RMS), m ir C yra medžiagą bei jos paviršių apibūdinantys rodikliai. Įprastai m vertė svyruoja apie 0,5 [59]. Visgi iki dabar nėra tikslaus m ir C verčių teorinio apskaičiavimo būdų – jos įvertinamos eksperimentiškai. Tačiau žinoma, jog šiurkštaus paviršiaus sugeriamą galia yra proporcinga σ^2 . Todėl slenkstinis pažeidimo energijos tankis šiurkščiam paviršiui yra proporcingas σ^{-2} [60].

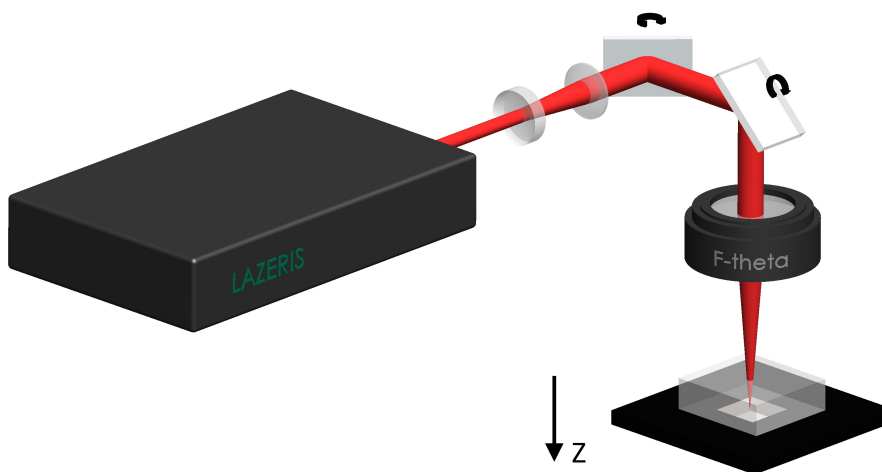
Mažesnis pažeidimo slenkstis šiurkštiems paviršiams aiškinamas šlifavimo metu atsirandančiais defektais bei mikroįtrūkiams. Fokusuojant pluoštą į paviršių, neišvengiama mikroabliacija tarp šių mikroertmių. Mikroabliacijos metu suformuojama plazma, kurios sukeliama slėgis lemia mikroįtrūkių plėtimąsi, kurie gali sukelti mikroskilimus. Verta paminėti, kad apdirbant šiurkštesnį paviršių pašalinama daugiau dalelių, o tai lemia didesnę spartą [61].

4 Eksperimento įranga ir metodika

Eksperimentas atliktas su 5 ns, 13 ps bei 5 ps trukmės impulsais. Šių eksperimentų metodikos turi skirtumų, tad šiame skyriuje bus atskirai aptartos visos metodikos ir naudoti parametrai. Dėl mažesnio informacijos pertekliaus bendra informacija, kuri kartojasi visose metodikose, pateikta žemiau pateiktame poskyryje.

Bendra informacija

Pagrindinės eksperimento schemas dalys pateiktos 15 paveiksle. Tyrimuose su 5 ns ir 13 ps trukmės impulsais naudotas Atlantic 60 (1064 nm, maksimali galia – 60 W, 200 – 1105 kHz impulsų pasikartojimo dažnis) lazeris, o tyrime su papliūpomis naudotas Carbide CB3-80W (1030 nm, maksimali galia – 80 W, 1 Hz – 2 MHz impulsų pasikartojimo dažnis) lazeris. Pluošto padėtis XY plokštumoje buvo keičiama su galvanometriniiais skeneriais intelliSCAN 14 (ScanLab). Bandinio padėtis Z ašyje keičiama su žingsniniu varikliu (8MT167-100, Standa) eksperimentuose su 5 ns ir 13 ps trukmės impulsais, o eksperimente su papliūpomis bandinio pozicija X, Y ir Z kryptimis buvo keičiama su linijine poslinkio sistema (Aerotech). Pluošto fokusavimui naudotas telecentrinis f-theta lęšis.



15 pav. Eksperimento schema

Visuose eksperimentuose apdirbamas 6,3 mm storio 150 mm x 150 mm lydytas kvarcas. Bandinys pozicionuojamas taip, jog sufokusuoto pluošto sąsmaukos padėtis būtų žemiau arba ties apatiniu bandinio paviršiumi. Ši pozicija nustatyta su lazerio pluoštu suformuojant kraterius skirtingose Z pozicijose, kadangi paviršiui esant pluošto sąsmaukos padėtyje suformuojami mažiausio diametro krateriai.

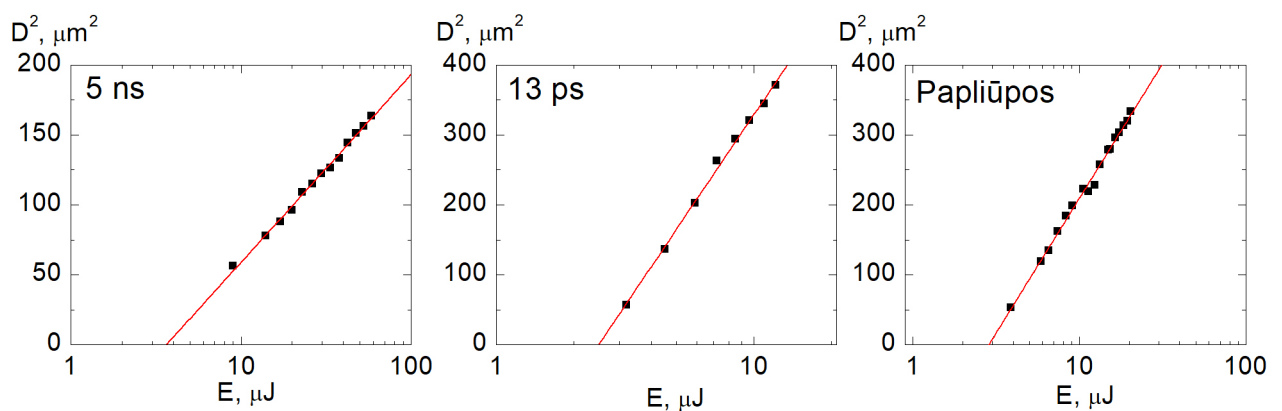
Nustačius pluošto sąsmaukos Z poziciją, apskaičiuotas sufokusuoto pluošto sąsmaukos diametras. Sąsmaukos diametro matavimas atliktas bandinio paviršiuje suformuojant kraterius skirtingomis impulsų energijomis. Tyrimuose su 5 ns ir 13 ps pluošto sąsmauka išmatuota ant apatinio bandinio, padengto sidabro sluoksniu, paviršiaus, o tyrime su papliūpomis sąsmaukos diametras išmatuotas ant

bandinio, dengto chromu, viršutinio paviršiaus. Diametrų ant apatinio ir viršutinio paviršiaus skirtumas yra minimalus, kadangi pluoštas fokusuojamas su žema skaitine apertūra (pluošto diametras prieš lęšį ~ 10 mm, naudotų f-theta lęšių židinio nuotoliai 80 mm ir 100 mm, todėl NA atitinkamai lygi 0,06 ir 0,05).

Išmatavus kraterių diametrus D ir žinant impulsų energiją E_p , apskaičiuotas $2\omega_0$ – pluošto sąsmaukos diametras $1/e^2$ intensyvumo lygyje [62]:

$$2\omega_0^2 = \frac{D^2}{\ln(E_p/E_{th})}. \quad (8)$$

Kadangi slenkstinė energija E_{th} nekinta, todėl atidedama D^2 priklausomybę nuo $\ln(E_p)$. Aproximavus šiuos duomenis tiese, gaunamas polinkis, kuris lygus $2\omega_0^2$. Skirtingų eksperimentų metu išmatuota kraterių diametrų kvadratų priklausomybė nuo impulso energijos pateikta 16 pav.



16 pav. Bandinio paviršiuje suformuotų kraterių diametrų kvadrato priklausomybė nuo impulsų energijos. Nors tiesinė aproksimacija atlikta natūrinio logaritmo skalėje, tačiau dėl aiškumo abscisų ašis pateikta \log_{10} skalėje. Paveiksle pateikti visų trijų eksperimentinių dalių metu matuoti kraterių diametrai

Svarbu paminėti, jog eksperimentuose pateikti energijos tankiai yra apskaičiuoti pasinaudojus šiuo būdu apskaičiuotais sąsmaukos diametrais.

Kiekviename tyrime buvo atliekamas kvadratų frezavimas, skenuojant pluoštą dvikrypčiu būdu. Atliekant eksperimentus pastebėta, kad išfrezuotų kvadratų kokybė skiriasi skirtingose X ir Y pozicijose. Dėl to nuspręsta kiekvieno kvadrato frezavimui išlaikyti vienodas galvanoskenerio X ir Y pozicijas. Todėl išfrezavus vieną kvadratą su galvanoskenerio pagalba, kitas kvadratas buvo apdirbamas prieš tai mechaniškai pakeitus bandinio poziciją X ar Y ašyse.

Frezavimo efektyvumo apskaičiavimas

Kiekviename tyrime kvadratai frezuojami su skirtingu sluoksnių skaičiumi. Tyrime su 5 ns trukmės impulsais sluoksnis atitinka kvadrato skenavimą horizontalia ir vertikalia kryptimi, o su 13 ps trukmės

impulsais ir papliūpomis sluoksnis atitinka kvadrato ploto skenavimą vienoje Z pozicijoje viena kryptimi. Iš išfrezuotų gylių skirtumų tarp sluoksnių apskaičiuojamas frezavimo efektyvumas:

$$\eta = \frac{\Delta h \cdot S}{t \cdot P}, \quad (9)$$

čia η [mm³/J] – frezavimo efektyvumas, Δh [mm] – gylio skirtumas tarp sluoksnių, S [mm²] – frezuojamo kvadrato plotas, t [s] – frezavimo laikas, P [W] – vidutinė galia.

Frezavimo laikas vienam sluoksniui buvo apskaičiuotas iš kvadrato matmenų ir naudotų parametų:

$$t = \frac{N \cdot S}{v \cdot dy}, \quad (10)$$

čia v [mm/s] – skenavimo greitis, dy [mm] – atstumas tarp skenavimo linijų, N – skaičius, nusakantis kiek kartų per sluoksnį praskenuojamas kvadrato plotas.

Tuomet efektyvumas lygus:

$$\eta = \frac{\Delta h \cdot S \cdot v \cdot dy}{N \cdot S \cdot P} = \frac{\Delta h \cdot v \cdot dy}{N \cdot P}. \quad (11)$$

Kadangi:

$$v = dx \cdot f; P = E \cdot f, \quad (12)$$

čia dx [mm] – atstumas tarp šūvių, f [Hz] – šūvių pasikartojimo dažnis, E [J] – impulso energija.

Įsistačius šias išraiškas į efektyvumo formulę, gauname:

$$\eta = \frac{\Delta h \cdot v \cdot dy}{N \cdot P} = \frac{\Delta h \cdot dx \cdot dy \cdot f}{N \cdot E \cdot f} = \frac{\Delta h \cdot dx \cdot dy}{N \cdot E}. \quad (13)$$

Kadangi atstumą tarp šūvių, linijų bei impulso energiją pasirenkame patys, tad vienintelis parametras, kurį reikia išmatuoti, norint apskaičiuoti efektyvumą, yra išfrezuotas gylis.

Toliau bus aprašytos skirtingų tyrimų metodikos. Dėl geresnio informacijos perteikimo pasirinkta tikslų apdirbimo parametų neminėti metodikose, o juos pateikti skyriaus pabaigoje pateiktoje 1 lentelėje.

Apdirbimas 5 ns trukmės impulsais

Eksperimente pasirinkta naudoti minimalų energijos tankį, su kuriuo pasiekiamas stabilus stiklo frezavimas. Kadangi naudojant didesnę energiją pablogėja frezavimo paviršiaus kokybė, nuspręsta energijos tankio nedidinti.

Bandinys pozicionuojamas taip, jog pluošto sąsmauka būtų ties apatiniu bandinio paviršiumi. Eksperimentas atliktas nekeičiant šios Z pozicijos. Pasirinkus skirtingus atstumus tarp šūvių bei linijų, frezuojami 3 mm x 3 mm kvadratai. Su kiekvienu parametų rinkiniu frezuojami 1, 2 ir 3 sluoksnių kvadratai.

Kiekvieno kvadrato gylis buvo matuotas su Veeco Dektak 150 adatiniu profilometru. Įvertinus 1 sluoksnio gylį bei kvadratų gylio skirtumą tarp 2 ir 1 bei 3 ir 2 sluoksnių, apskaičiuoti atitinkamai 1, 2 ir 3 sluoksnių frezavimo efektyvumai.

Apdirbimas 13 ps trukmės impulsais

Eksperimentas atliekamas frezuojant 2 mm x 2 mm kvadratus. Šįkart bandinio pozicija Z ašyje yra keičiama. Optimalūs parametrai įvertinti su kiekvienu atstumo tarp šūvių bei linijų rinkiniu pasirinkus didžiausią poslinkį Z ašyje su kuriuo pasiekiamas stabilus frezavimas. Stabilus frezavimas laikomas, kai su tam tikru parametru rinkiniu atliekant 30 sluoksnių frezavimą, neatsiranda skilimai. Kiekvienam parametru rinkiniui radus maksimalų Z poslinkį, frezuojami 20-ies bei 40-ies sluoksnių kvadratai. Išfrezuoti kvadratai matuojami su Veeco Dektak 150 adatiniu profilometru. Apskaičiavus išfrezuoto gylio skirtumą, įvertinamas frezavimo efektyvumas.

Dėl geresnio apdirbimo dalelių pašalinimo iš apatinės pusės, purkštuku (17 pav.) pučiamas 0,3 MPa slėgio oro srautas.



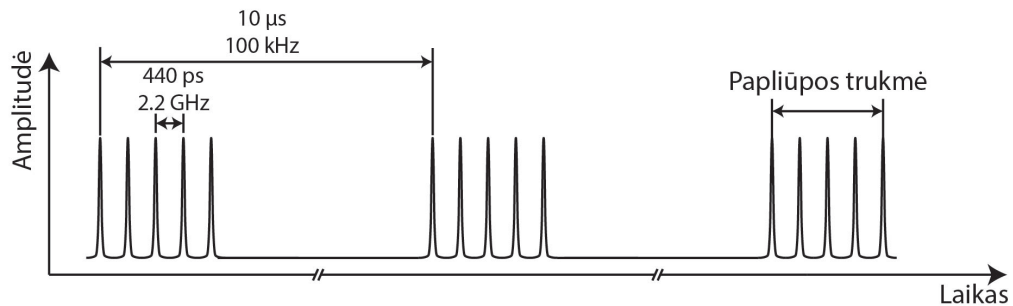
17 pav. Purkštukas naudojamas oro srauto nuo apatinės pusės nukreipimui. Purkštuko išėjimo diameteras – 3 mm, o atstumas nuo purkštuko iki stiklo plokštelės – 3 mm

Apdirbimas papliūpomis

Eksperimente naudojamas lazeris, su kuriuo galima impulsus padalinti į kelis impulsus, atskirtus 440 ps (2,2 GHz) trukme (18 pav.). Dėl patogumo toliau režimas, kai impulsas nėra išskaidytas į dalis bus vadinamas vienašūviu arba papliūpa iš vieno impulso. Papliūpos trukme bus laikomas laiko tarpas tarp pirmojo ir paskutiniojo papliūpos impulsų.

Šio eksperimento schema šiek tiek skiriasi nuo pateiktos 15 paveiksle. Vietoj dviejų lęšių sistemos buvo pastatytas teleskopas (Sill Optics), išplečiantis pluoštą 2 kartus. Taip pat pluošto kelyje pastatyta $\lambda/4$ fazinė plokštelė, kurios pagalba tiesinė poliarizacija pakeičiama į apskritimą.

Eksperimentas atliktas bandinyje frezuojant 3 mm x 3 mm kvadratus. Su kiekvienu sluoksniu skenuojamų linijų kampas buvo pasukamas per 33 laipsnius, o f-theta lęšio Z pozicija pakeliama per tam tikrą vertę dz . Radus optimalias atstumo tarp šūvių ir atstumo tarp linijų vertes, toliau atliekamas kvadratų frezavimas su skirtingomis impulsų energijomis ir papliūpą sudarančių impulsų skaičiumi.



18 pav. Trijų papliūpų, sudarytų iš 5 impulsų, atskirtų 440 ps trukme, laikinės charakteristikos schema. Papliūpų pasikartojimo dažnis – 100 kHz

mi. Su kiekvienu parametų rinkiniu buvo frezuojami daugiau nei 10 kvadratų, kurie vienas nuo kito skyrėsi sluoksnių skaičiumi. Buvo siekiama pasirinkti tokią dz vertę, kuri viršytų per vieną sluoksnį išfrezuojamą gylį. Tuomet su optiniu profilometru (Sensofar) išmatuoti kvadratų gyliai ir atidedama gylių priklausomybė nuo skenavimų skaičiaus. Aproximavus tiesinę dalį atitinkančius duomenis, gaunamas krypties koeficientas, kuris atitinka per vieną sluoksnį išfrezuotą gylį Δh . Gavus šią vertę efektyvumas apskaičiuojamas pagal (13) formulę, kur E vienašūviu režimu yra impulso, o papliūpos režimu yra visos papliūpos energija.

Paviršiaus šiurkštumas įvertintas optiniu profilometru išmatavus 2,1 mm x 1,8 mm kvadratų paviršiaus topografijas. Režimams su skirtingais parametų rinkiniais buvo atlikti trijų skirtingų sluoksnių kvadratų paviršių matavimai. Po matavimo iš paviršiaus profilio zigzago kreive buvo gautas ~ 20 mm ilgio linijinis profilis. Pagal ISO 4287 standartą pasirinkus tinkamą filtrą (angl. *cut-off wavelength*), išmatuotos R_a ir R_z vertės. Kiekvienam parametų rinkiniui galutinės R_a ir R_z vertės atitinka 3 verčių vidurkį.

Dėl aiškumo, apačioje pateikta informacija apie pagrindinius parametrus dirbant su skirtingos trukmės impulsais (1 lentelė).

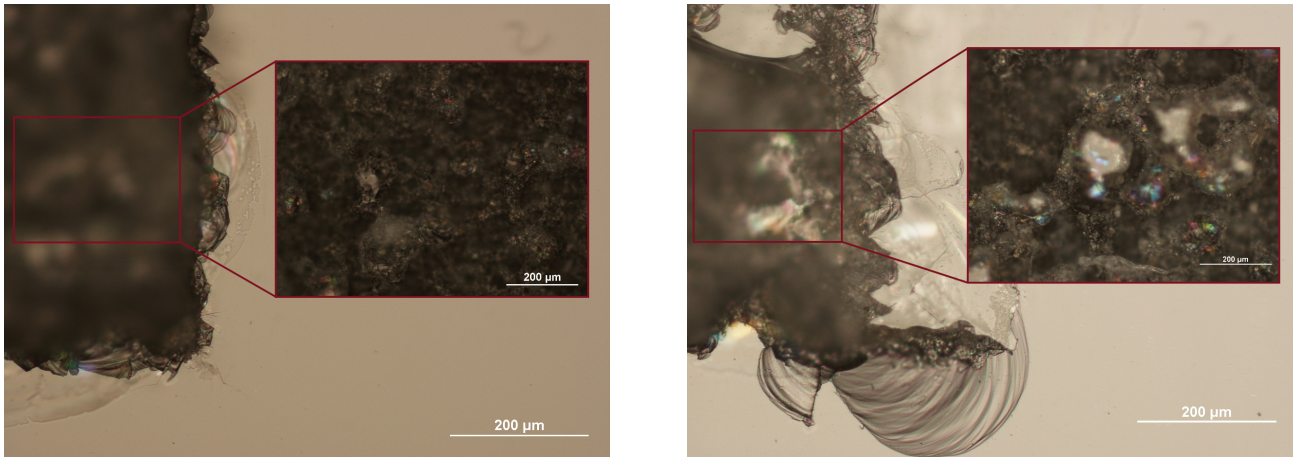
1 lentelė. Apdirbimo parametrai dirbant su skirtingos trukmės impulsais

Impulso trukmė	Lazeris	Apdirbimo parametrai	Keičiami parametrai	Ieškomi parametrai
5 ns	Atlantic 60	1064 nm, 3 W, 60 μ J, 50 kHz, 43 J/cm ² , $\omega = 9,4 \mu$ m.	Atstumas tarp šūvių, atstumas tarp linijų	Efektyvumas, apdirbimo kokybė
13 ps	Atlantic 60	1064 nm, 8 W, 20 μ J, 400 kHz, 10,7 J/cm ² , $\omega = 10,7 \mu$ m.	Atstumas tarp šūvių, atstumas tarp linijų, poslinkis Z ašyje	Efektyvumas, apdirbimo kokybė
5 ps	Carbide CB3-80W	1030 nm, 100 kHz, $\omega = 9,2 \mu$ m.	Papliūpos energija, papliūpą sudarančių impulsų skaičius	Efektyvumas, apdirbimo kokybė

5 Rezultatai ir jų aptarimas

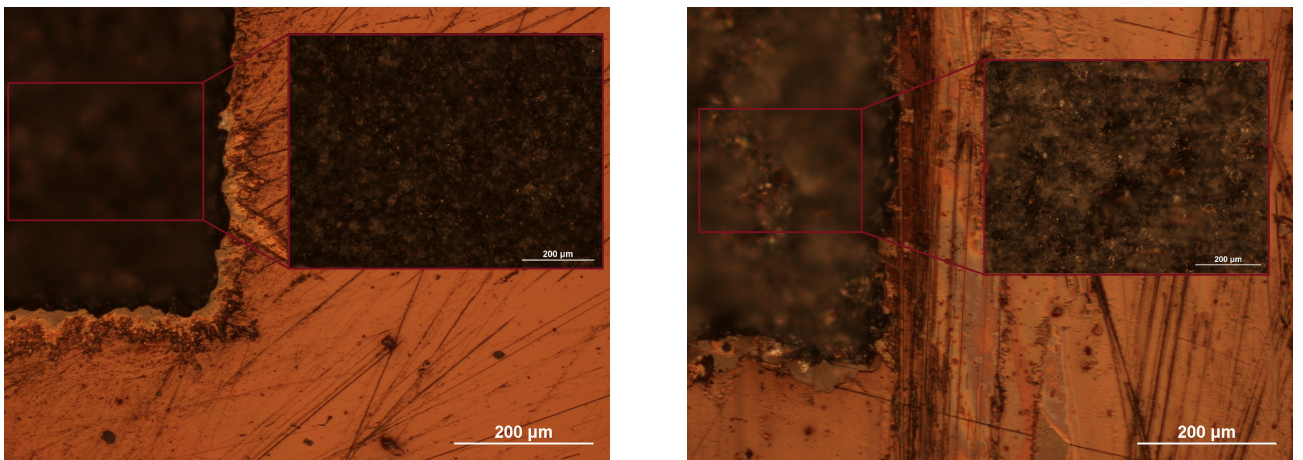
Apdirbimas 5 ns trukmės impulsais

Pradėjus eksperimentą pastebėta, jog su skirtingais parametrais nepavyksta inicijuoti kokybiško frezavimo. Išfrezuoto kvadrato paviršius pasižymi itin dideliu šiurkštumu, o šonuose susiformuoja 150 μm – 230 μm siekiantys įskilimai (19 pav.).



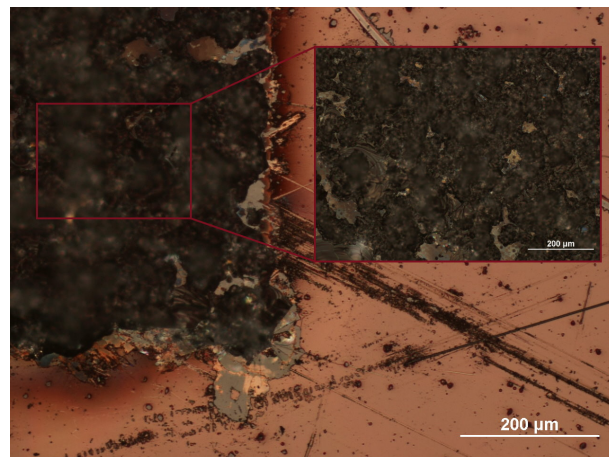
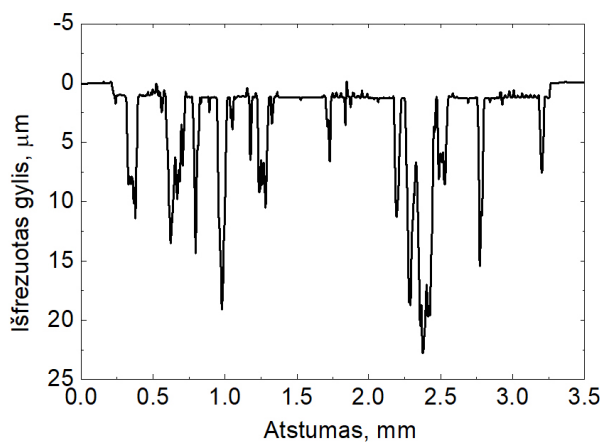
19 pav. Būdingas išfrezuoto kvadrato paviršius pro optinį mikroskopą atlikus 1 sluoksnio frezavimą

Viena iš priežasčių – per maža sugertis naudojamam bangos ilgiui. Taigi geresnę frezavimo pradžią galima gauti padidinus sugertį. Todėl tolimesni bandymai atlikti su juodu žymekliu padengus apatinę bandinio pusę dažais. Tokiu būdu išfrezuotų kvadratų paviršių šiurkštumas sumažėja, o kraštai mažiau apskeldėję (20 pav.).



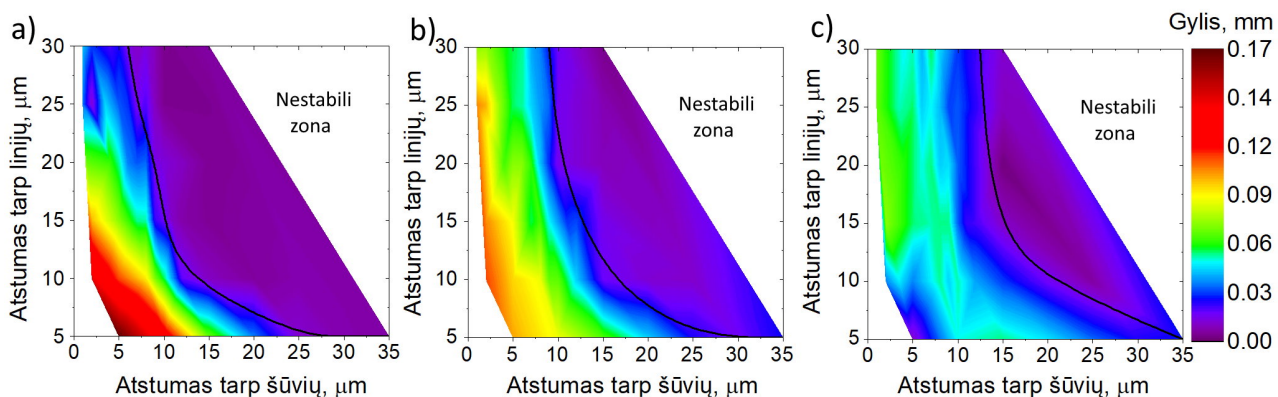
20 pav. Dažais dengtame bandinyje išfrezuoto kvadrato paviršius pro optinį mikroskopą atlikus 1 sluoksnio frezavimą. Atstumas tarp šūvių 10 μm , o atstumas tarp linijų kairėje 10 μm , dešinėje 30 μm

Pasirinkus netinkamus atstumus tarp šūvių ar linijų, stebimas nestabilus frezavimo režimas. Tuomet bandinio paviršiaus profilis yra netolygus, o šonuose gali susiformuoti įskilimai (21 pav.).



21 pav. Dažais dengtame bandinyje išfrezuoto kvadrato paviršius atlikus 1 sluoksnio frezavimą, kai atstumas tarp šūvių $15\ \mu\text{m}$, o atstumas tarp linijų $10\ \mu\text{m}$. Kairėje pavaizduotas adatiniu profilometru išmatuotas profilis, o dešinėje kvadrato paviršiaus nuotrauka, padaryta su optiniu mikroskopu

Nestabilius režimus galima nustatyti iš išfrezuoto gylio duomenų atrinkus parametrų rinkinius, su kuriais išfrezuojamas mažas gylis (mažiau nei $20\ \mu\text{m}$). Režimą laikysime nestabiliu, jei su šiais parametrų rinkiniais išfrezuoto paviršiaus profilis yra netolygus.



22 pav. Išfrezuoto gylio priklausomybė nuo atstumo tarp linijų ir atstumo tarp šūvių su a) 1, b) 2, c) 3 sluoksniais. Juoda linija atskiria kokybiško ir nekokybiško frezavimo režimus

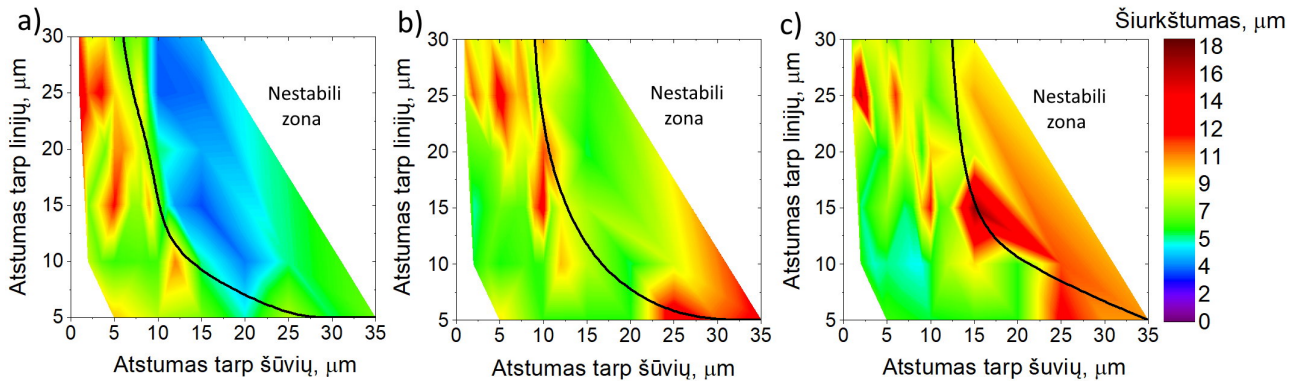
Stabilus režimas nuo nestabilaus atskirtas juoda kreive (22 pav.). Su dešinėje juodos kreivės esančiais parametrų rinkiniais nepavyksta inicijuoti kokybiško frezavimo. Todėl domina tik kairėje juodos kreivės esantys parametrų rinkiniai.

Frezavimo kokybė

Išfrezuoto paviršiaus kokybės įvertinimas atliekamas su adatiniu profilometru išmatuojant vidutinį paviršiaus šiurkštumą. Didelis šiurkštumas atitinka netolygų frezavimą, taigi mažas šiurkštumas turėtų atitikti kokybišką frezavimą. Tačiau taip yra nevisada. Frezuojant su mažo efektyvumo parametrais, gaunami netolygūs, tačiau mažo gylio profiliai. Todėl šių profilių vidutinis šiurkštumas yra itin mažas.

Pavyzdžiui, 21 pav. pavaizduoto kvadrato vidutinis šiurkštumas – $3,3 \mu\text{m}$, o vidutinis gylis – $3,5 \mu\text{m}$.

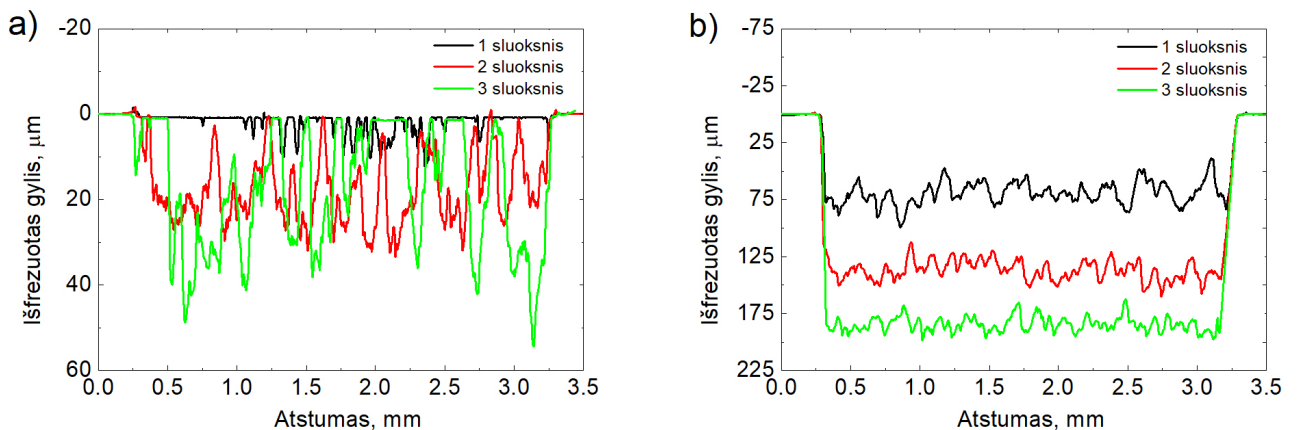
Taigi vertinant vidutinį šiurkštumą svarbu atskirti stabilų ir nestabilų frezavimo režimą. Todėl 23 pav. atvaizduoti vidutinio šiurkštumo grafikai pažymėti su juoda kreive, skiriančia stabilų ir nestabilų režimą.



23 pav. Vidutinio šiurkštumo priklausomybė nuo atstumo tarp linijų ir atstumo tarp šūvių su a) 1, b) 2, c) 3 sluoksniais. Juoda linija atskiria kokybiško ir nekokybiško frezavimo režimus

Iš 23 pav. galima pamatyti, kad nestabilių režimų šiurkštumas didėja, didėjant sluoksnių skaičiui. Pirmajam sluoksniui mažą šiurkštumo vertę lemia mažas išfrezavimo gylis. Didėjant sluoksnių skaičiui, frezavimo gylis didėja, o vidutinio šiurkštumo vertė artėja link nuostovios. Kadangi tai nestabilūs režimai – šiurkštumas didėja (24a pav.).

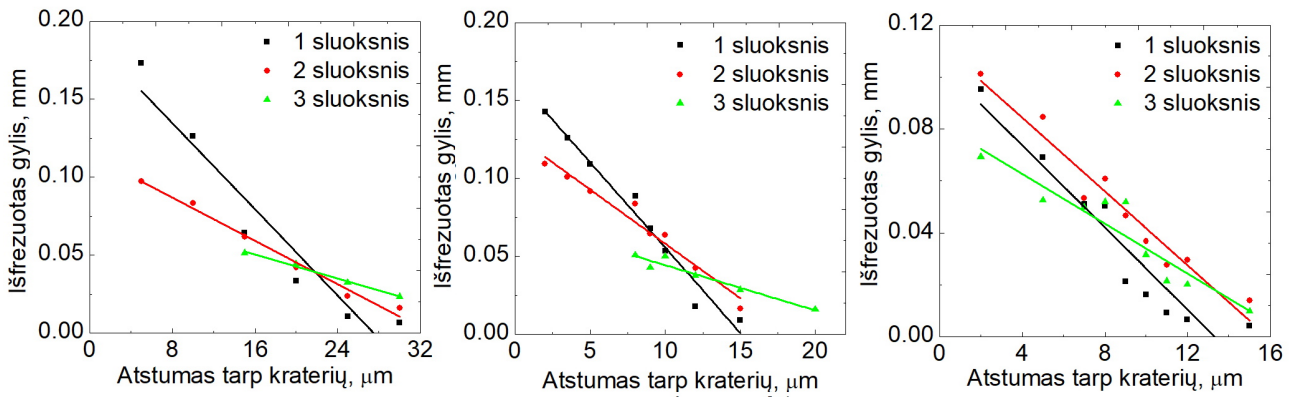
Stabilaus režimo zonoje didėjant sluoksnių skaičiui šiurkštumas nežymiai mažėja. Kadangi pirmuoju sluoksniu išfrezuojamas didelis gylis, kitais sluoksniais pluoštas yra išfokusuotas ir frezavimo gylis nebėra toks žymus. Tuomet pluoštas aplygina nelygumus, taip sumažinant šiurkštumą (24b pav.). Pasirinkus optimalius parametrus, išmatuotos vidutinio paviršiaus šiurkštumo vertės svyruoja apie $5 \mu\text{m} - 7 \mu\text{m}$.



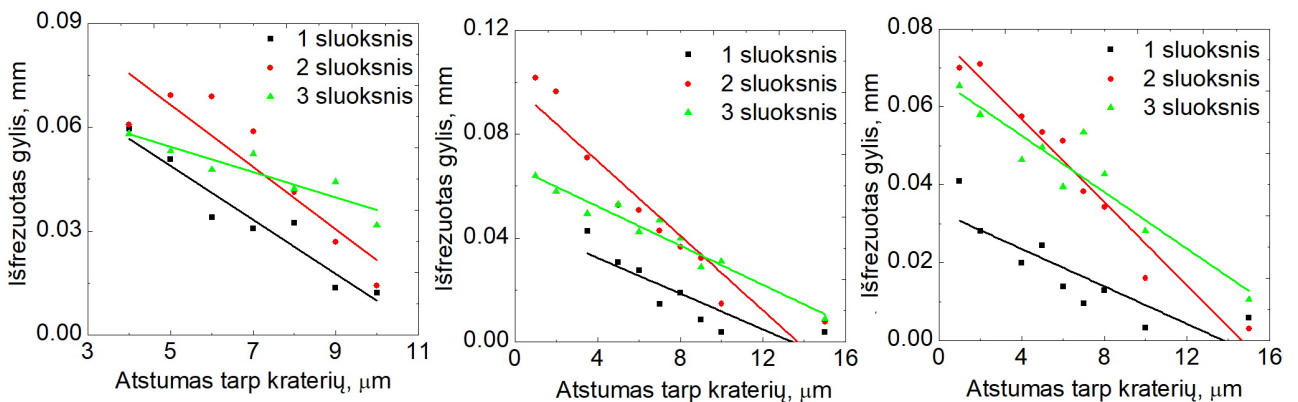
24 pav. a) nestabilaus, b) stabilaus režimų kvadratų profiliai. Atstumas tarp šūvių ir linijų atitinkamai lygus a) $15 \mu\text{m}$ ir $15 \mu\text{m}$, b) $9 \mu\text{m}$ ir $10 \mu\text{m}$

Frezavimo efektyvumas

Kiekvieno sluoksnio pašalinimo efektyvumą galima apskaičiuoti žinant, koks papildomas gylis buvo išfrezuotas per sluoksnį. Žemiau pavaizduotos išmatuoto išfrezuoto gylio priklausomybės nuo skirtingų atstumų tarp šuvių.



25 pav. Išfrezuoto gylio priklausomybė nuo atstumo tarp kraterių. Kairėje atstumas tarp linijų 5 μm , viduryje 10 μm , dešinėje 15 μm



26 pav. Išfrezuoto gylio priklausomybė nuo atstumo tarp kraterių. Kairėje atstumas tarp linijų 20 μm , viduryje 25 μm , dešinėje 30 μm

25 – 26 pav. pateiktus duomenis aproksimavus tiesine funkcija $\Delta h = a \cdot dx + b$, įvertinamos koeficientų a ir b vertės. Įsistačius šias vertes į (13) formulę, gauname:

$$\eta = \frac{(a \cdot dx + b) \cdot dy \cdot dx}{2 \cdot E_{\text{imp}}} = \frac{a \cdot dy \cdot dx^2 + b \cdot dy \cdot dx}{2 \cdot E_{\text{imp}}}. \quad (14)$$

Norint apskaičiuoti optimalią dx vertę su kuria efektyvumas bus didžiausias, skaičiuojame efektyvumo išvestinę ir sulyginame ją su 0:

$$\eta' = \frac{2 \cdot a \cdot dy \cdot dx + b \cdot dy}{2 \cdot E_{\text{imp}}} = 0. \quad (15)$$

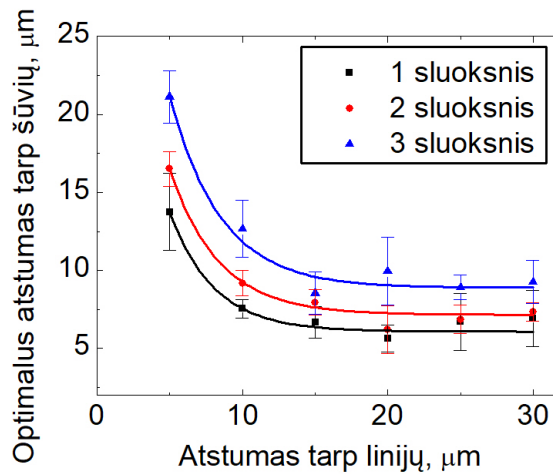
Tuomet optimalus atstumas tarp šūvių lygus:

$$dx_{\text{opt}} = \frac{-b}{2a}. \quad (16)$$

Su šia formule iš 25 – 26 pav. duomenų apskaičiuojamas optimalus atstumas tarp šūvių esant skirtingiems atstumams tarp linijų. Tokiu būdu gaunamas didesnis optimalaus atstumo tarp šūvių tikslumas, kadangi interpretuojami kelių taškų duomenys. Apskaičiuoto optimalaus atstumo tarp šūvių priklausomybė nuo atstumo tarp linijų pateikta 27 paveiksle. Duomenys pateikti su paklaidomis, kurios apskaičiuotos su žemiau pateikta formule, pasinaudojus iš tiesinių aproksimacijų gautomis standartinių nuokrypių vertėmis:

$$\delta dx_{\text{opt}} = dx_{\text{opt}} \sqrt{\left(\frac{\delta b}{b}\right)^2 + \left(\frac{\delta a}{a}\right)^2}, \quad (17)$$

čia δdx_{opt} [μm] – optimalaus atstumo tarp šūvių standartinis nuokrypis, δb [μm] – b parametro standartinis nuokrypis, δa – a parametro standartinis nuokrypis.



27 pav. Optimalaus atstumo tarp šūvių priklausomybė nuo atstumo tarp linijų. Optimalus atstumas tarp šūvių apskaičiuotas pasinaudojus išfrezuoto gylio priklausomybės nuo atstumo tarp šūvių tiesinės aproksimacijos gautais koeficientais. Taškai aproksimuoti eksponente dėl aiškesnio tendencijos pademonstravimo

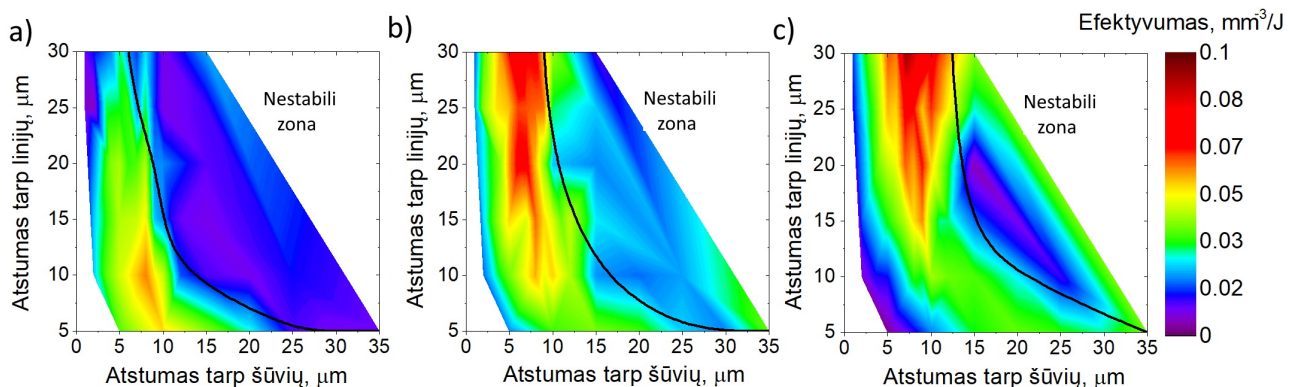
Pastebima, jog didėjant atstumui tarp linijų, optimalus atstumas tarp šūvių mažėja. Tai gali būti paaiškinta tuo, kad padidėjus atstumui tarp linijų, didėja neišfrezuotos medžiagos kiekis tarp linijų. Todėl norint išlaikyti optimalaus frezavimo sąlygas reikia padidinti skenuojamų linijų plotį. Tai pasiekama sumažinant atstumą tarp šūvių, kadangi taip padidinamas šūvių kiekis į vieną liniją.

Taip pat pastebima, jog didėjant sluoksnių skaičiui, didėja ir optimalus atstumas tarp šūvių. Viena iš priežasčių – skirtingas pluošto diametras ties skirtingais sluoksniais. Pirmo sluoksnio frezavimas atliekamas, kai pluošto sąsmauka yra ties apatiniu bandinio paviršiumi. Išfrezavus dalį medžiagos, atstumas tarp pluošto sąsmaukos ir apatinio bandinio paviršiaus padidėja. Taigi ir pluošto diametras

ties apatiniu paviršiumi padidėja, o pluošto energijos tankis sumažėja. Taigi norint išlaikyti tą patį persiklojimą tarp impulsų, reikalingas didesnis atstumas tarp šūvių.

Efektyvumo priklausomybė nuo atstumo tarp šūvių ir linijų pateikta 28 pav. Pastebima, jog pirmo sluoksnio apdirbimas yra mažiau efektyvus. Tai paaiškinama tuo, kad antruoju ir trečiuoju sluoksniu apdirbamas pašiurkštintas paviršius, kurio slenkstinis abliacijos energijos tankis yra mažesnis.

Efektyviausi režimai skirtinguose sluoksniuose pasiekiami, kai atstumas tarp šūvių $5\ \mu\text{m} - 10\ \mu\text{m}$, o atstumas tarp linijų $5\ \mu\text{m} - 30\ \mu\text{m}$. Kaip ir su atstumu tarp šūvių, pastebima, jog optimalus atstumas tarp linijų didėja, didėjant kvadrato sluoksnių skaičiui. To priežastis galėtų būti jau minėtas pluošto diametro padidėjimas. Todėl jei pirmo sluoksnio frezavimas atliekamas efektyviai, t.y. išfrezuojamas didelis gylis, tai antro sluoksnio frezavimas atliekamas neefektyviai dėl didesnio išsifokusavimo. Tuomet optimalus antro sluoksnio frezavimas atliekamas, kai atstumas tarp šūvių yra toks, kad pirmasis sluoksnis būtų frezuojamas ne optimaliai. Kita priežastis galėtų būti ta, jog antruoju ir trečiuoju sluoksniu apdirbamas pašiurkštintas paviršius. Pašiurkštinto paviršiaus slenkstinis abliacijos energijos tankis yra mažesnis, todėl su ta pačia impulso energija suformuojami didesni krateriai. Todėl norint išlaikyti optimalų skenavimo linijų persiklojimą, reikia didinti atstumą tarp jų.

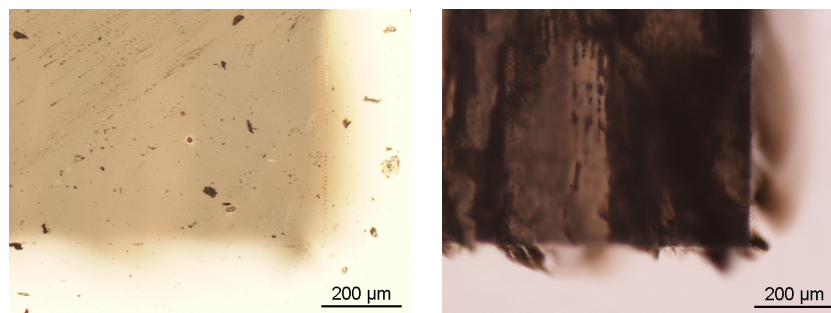


28 pav. Efektyvumo priklausomybė nuo atstumo tarp linijų ir atstumo tarp šūvių su a) 1, b) 2, c) 3 sluoksniais. Juoda linija atskiria kokybiško ir nekokybiško frezavimo režimus

Apdirbimas 13 ps trukmės impulsais

Pastebėta, jog pradėdant apdirbti nuo pluošto sąsmaukos pozicijos, pažeidimai suformuojami bandinio tūryje (29 pav).

Viena iš priežasčių galėtų būti dėl netiesinių reiškinų atsirandantis terminis lęšis. Jis susiformuoja, kai medžiaga sugeria spinduliuotę ir taip padidėja jos temperatūra. Kadangi lūžio rodiklis priklauso nuo temperatūros, medžiaga įgauna laužiamąją gebą. Apdirbime naudojamas f-theta lęšis yra pagamintas iš lydyto kvarco, kurio lūžio rodiklis padidėja, pakilus temperatūrai [63]. Eksperimente naudojamas pluoštas su Gausiniu intensyvumo pasiskirstymu skersinėse koordinatėse. Pluoštui sklindant per medžiagą, didžiausia sugertis įvyks pluošto centre, kadangi tai intensyviausias taškas. Tolstant

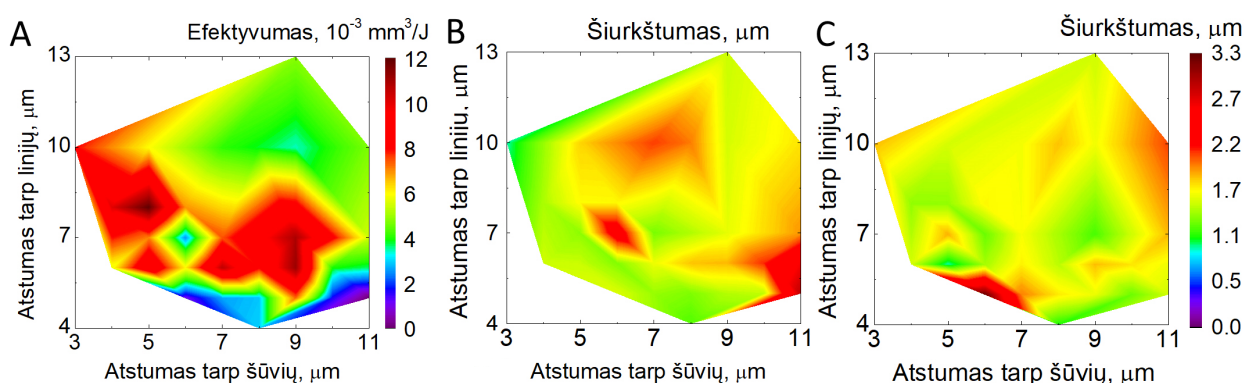


29 pav. Tipinio frezuoto bandinio paviršius, kai pluošto sąsmaukos pozicija nėra pakeičiama su papildomu poslinkiu Z ašyje. Kairėje objektyvas sufokusuotas į bandinio paviršius, dešinėje – į pažeidimus

nuo pluošto centro, sugertis bus mažesnė, dėl mažėjančio pluošto intensyvumo. Todėl pluošto centro vietoje lūžio rodiklio pokytis bus didesnis. Tai lemia didesnę bangos fronto iškreipimą ir didesnę laužiamąją gebą. Dėl šios priežasties pluošto sąsmaukos Z pozicija pakyla. Kita priežastis galėtų būti dėl didelio energijos tankio susiformuojančios tūrinės modifikacijos.

Norint tinkamai pradėti medžiagos frezavimą nuo apatinės paviršiaus pusės, pasirinkta pakelti bandinį aukščiau nustatytos pluošto sąsmaukos pozicijos. Šio papildomo poslinkio Z ašyje vertės svyravo apie 250 µm – 300 µm. Pasirinkus minimalią 8 W galią, ties kuria atliekamas stabilus frezavimas, ieškomi optimalūs atstumai tarp šūvių bei tarp linijų.

Atlikus eksperimento metodikoje aprašytą algoritmą rasta efektyvumo priklausomybė nuo atstumo tarp šūvių ir atstumo tarp linijų (30A pav.). Su 5 µm atstumu tarp šūvių, 8 µm atstumu tarp linijų ir 8 µm poslinkiu Z ašyje pasiektas didžiausias 0,011 mm³/J vieno sluoksnio frezavimo efektyvumas. Taip pat išmatuota vidutinio šiurkštumo priklausomybė nuo atstumo tarp šūvių ir atstumo tarp linijų (30A pav. ir 30B pav.). Galima pastebėti, kad didžiausias paviršiaus šiurkštumas gaunamas, kai pasirenkami mažiausią efektyvumą turintys parametrai rinkiniai. Pasirinkus efektyviausius parametrai rinkinius vidutinis šiurkštumas svyruoja apie 1 – 2 µm.

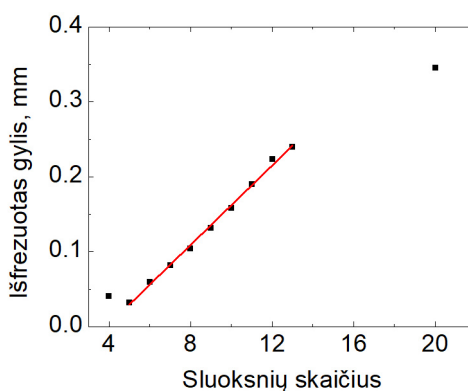


30 pav. A dalyje pateikta frezavimo efektyvumo priklausomybė nuo atstumo tarp linijų ir atstumo tarp šūvių. B ir C dalyse pateikta vidutinio paviršiaus šiurkštumo priklausomybė nuo atstumo tarp linijų ir atstumo tarp šūvių. Abiejų dalių šiurkštumo skalės sutampa, todėl dešinėje pateikta viena bendra skalė. B dalyje pateikti rezultatai su 20 sluoksniais, C dalyje – su 40

Apdirbimas papliūpomis

Eksperimento pradžioje ieškomos tokios atstumo tarp šūvių ir atstumo tarp linijų vertės, su kurio-
mis būtų pasiektas stabilus ir efektyvus frezavimas. Atlikus tyrimą su keliomis papliūpų energijomis,
pastebėta, jog esant $3 \mu\text{m}$ atstumui tarp šūvių ir $18 \mu\text{m}$ atstumui tarp linijų, pasiekiamas didžiausias
efektyvumas. Todėl toliau su šiomis vertėmis frezuojami skirtingų sluoksnių kvadratai, keičiant pa-
pliūpų energiją bei ją sudarančių impulsų skaičių. Verta paminėti, jog frezavimas buvo pradedamas
pluošto sąsmauką pozicionuojant žemiau išmatuotos pluošto sąsmaukos pozicijos Z ašyje. Pradedant
frezavimą nuo išmatuotos Z pozicijos, pažeidimai susiformuodavo bandinio tūryje. Kaip jau minėta
tyrime su 13 ps trukmės impulsais, tokie pažeidimai gali atsirasti dėl terminio lęšio susiformavimo
ir pakitusios sąsmaukos pozicijos ar tiesiog per didelio energijos tankio, viršijančio tūrinio pažeidi-
mo slenkstį. Frezuojant kvadratus su skirtingais parametrais atitinkamai buvo keičiama ir papildomo
poslinkio vertė.

Iš kvadratų gylis priklausomybės nuo sluoksnių skaičiaus, įvertintas išfrezuotas gylis per vieną
sluoksnį (31 pav.). Reikia atkreipti dėmesį, jog ne visi taškai atitinka tiesinę priklausomybę. Viena
iš priežasčių galėtų būti ta, jog ties pirmais ir ties paskutiniais sluoksniais pluoštas yra išfokusuotas,
todėl frezavimas nėra efektyvus.



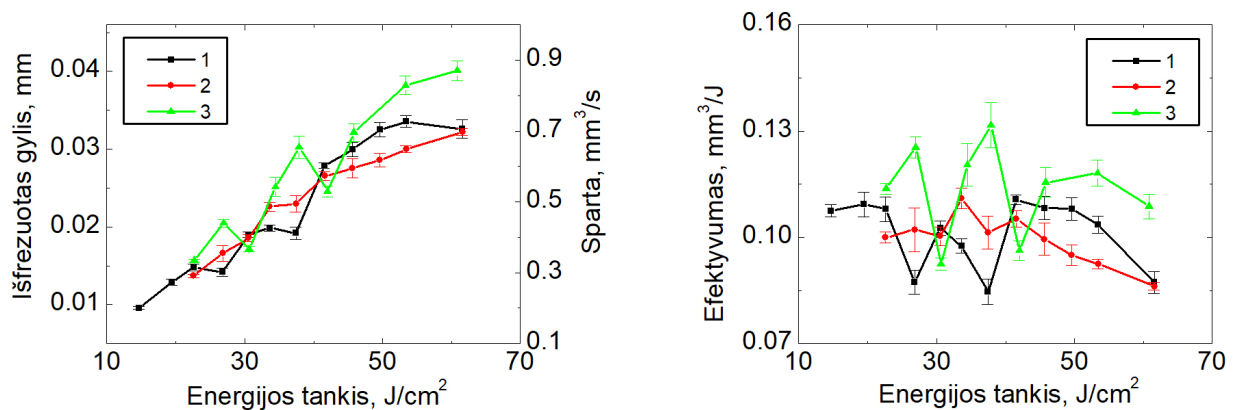
31 pav. Išfrezuoto gylis priklausomybė nuo sluoksnių skaičiaus

Iš 31 pav. galima matyti, jog pirmojo taško išfrezuoto gylis vertė yra didesnė nei antrojo. Tai
galėtų atrodyti kaip matavimo klaida, tačiau toks rezultatas pasikartojo visų bandymų metu. Viena
iš priežasčių galėtų būti ta, kad frezuojant pirmą kvadratą, bandinys yra įkaitinamas. Kaip jau buvo
minėta, lydyto kvarco temperatūros padidėjimas lemia didesnę lūžio rodiklį. Iš Snelio dėsnio žinoma,
jog spindulio lūžimo kampas yra mažesnis, pereinant į didesnio lūžio rodiklio terpę. Todėl padidėjusi
bandinio temperatūra, taigi ir lūžio rodiklis lemia žemesnę pluošto sąsmaukos poziciją Z ašyje. Są-
smaukos pozicijos nutolinimą taip pat galėtų lemti ir naudojamame teleskope suformuotas terminis lęšis.
Dėl šio sąsmaukos pozicijos pokyčio, pirmas kvadratas pradedamas frezuoti, kai pluošto sąsmauka yra
arčiau apatinio paviršiaus. Kiti kvadratai frezuojami didesnės temperatūros bandinyje, įkaitusiame nuo
prieš tai frezuojamų kvadratų. Todėl kitų kvadratų apdirbimas pradedamas su išfokusuotu pluoštu ant
apatinio paviršiaus. Tokią idėją patvirtina ir eksperimento metu pastebėtas reiškinys, kai frezuojant

pirmą kvadratą jau nuo pirmųjų sluoksnių susiformuoja plazma, o frezuojant kitus kvadratus plazma susiformuodavo tik po keleto sluoksnių.

Atliekant eksperimentą pastebėta, kad naudojant papliūpas, sudarytas iš daugiau nei 3 impulsų, nepavyksta pasiekti stabilaus frezavimo – susiformuoja įskilimai. Todėl čia ir toliau pateikti duomenys naudojant papliūpas, sudarytas iš 3 ir mažiau impulsų.

Kadangi atstumas tarp šūvių ir linijų nebuvo keičiamas, spartos ir gylio priklausomybės nuo energijos tankio yra tapačios. Todėl didžiausia sparta bus pasiekta su tais pačiais parametrais, su kuriais išfrezuojamas didžiausias gylis per sluoksnį. Apskaičiuoto gylio bei frezavimo spartos per sluoksnį priklausomybės nuo energijos tankio yra pavaizduotos viename grafike (32 pav. kairė). Čia ir toliau pateikiami grafikai su paklaidomis, įvertintomis pasinaudojus išfrezuoto gylio nuo sluoksnių skaičiaus tiesinės funkcijos standartiniais nuokrypiais. Taip pat verta priminti, jog energijos tankis skaičiuojamas, pasinaudojus eksperimento pradžioje išmatuotu sąsmaukos diametru. Kadangi, bandinys yra pozicionuojamas aukščiau išmatuotos sąsmaukos pozicijos, apskaičiuotas energijos tankis nebūtinai atitiks energijos tankį su kuriuo atliekamas apdirbimas. Energijos tankis skaičiuojamas su sąsmaukos diametru, kadangi nėra žinoma, kaip išmatuoti pluošto diametrą ant apatinio paviršiaus apdirbimo metu.

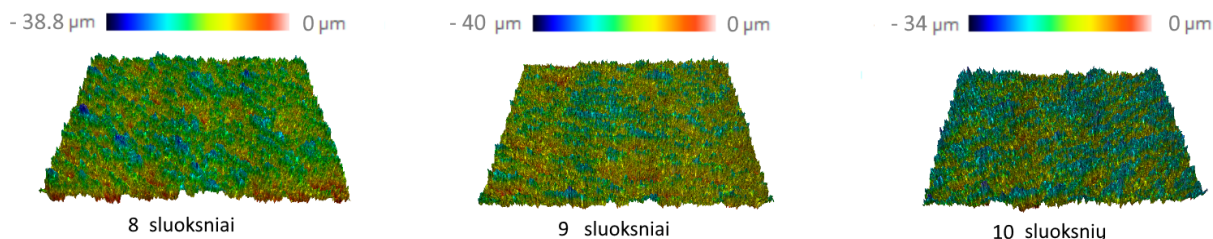


32 pav. Kairėje išfrezuoto gylio ir frezavimo spartos, o dešinėje frezavimo efektyvumo priklausomybė nuo naudojamos papliūpos energijos tankio. Grafikuose pateikti duomenys apdirbant papliūpomis iš 1, 2 ir 3 impulsų

Didžiausias gylis per sluoksnį siekė 40 μm , o tai atitinka 0,87 mm^3/s frezavimo spartą. Tokia vertė pasiekta su papliūpomis iš 3 impulsų su 60 J/cm^2 energijos tankiu. Frezuojant vienašūviu režimu didžiausias išfrezuotas gylis per sluoksnį siekė 33,6 μm , o sparta 0,72 mm^3/s .

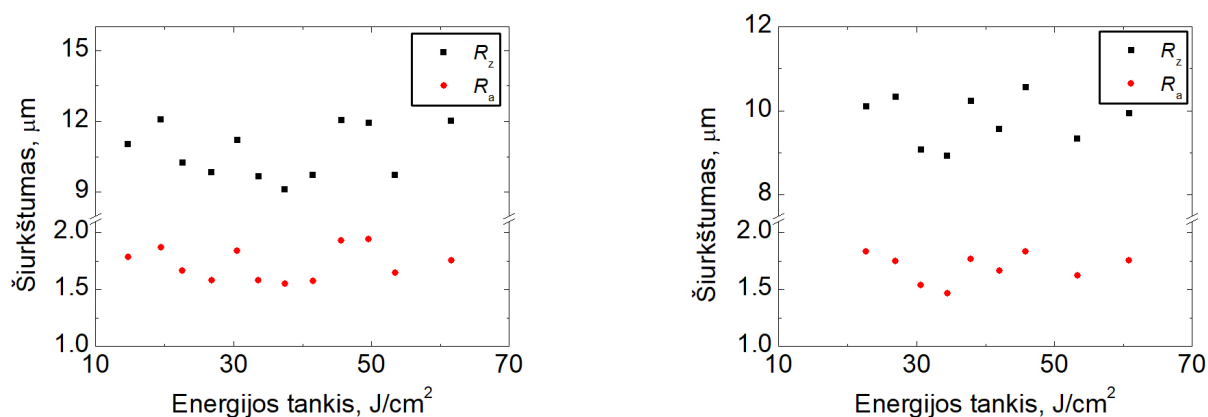
Efektyvumo priklausomybė nuo energijos tankio pateikta 32 pav. dešinėje. Didžiausias frezavimo efektyvumas (0,13 mm^3/J) pasiektas su papliūpomis iš 3 impulsų. Frezuojant įprastu, vienašūviu, režimu didžiausias pademonstruotas efektyvumas – 0,11 mm^3/J .

Toliau pagal metodikoje pateiktą algoritmą buvo matuoti paviršiaus šiurkštumai. Išfrezuotų kvadratų paviršių topografijos pateiktos 33 paveiksle.



33 pav. Skirtingu sluoksnių skaičiumi frezuotų kvadratų paviršių topografijos apdirbant vienašūviu režimu. Kiekvienos topografijos dydis 2,1 mm x 1,8 mm. Viršuje topografijų pateiktos Z pozicijos skalės

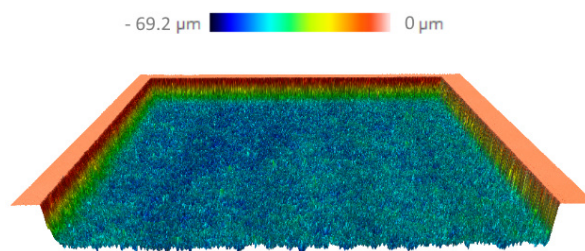
Paviršių šiurkštumai išmatuoti vieno impulso režimui (34 pav. kairėje esantis grafikas) bei režimui su papliūpa, sudaryta iš 3 impulsų (34 pav. dešinėje esantis grafikas), kadangi tai efektyviausias režimas. Apdirbant su papliūpomis, sudarytomis iš 3 impulsų, išmatuoto paviršiaus šiurkštumo parametro R_a vertė varijuoja tarp 1,5 μm – 1,8 μm , o R_z vertė tarp 9 μm – 10,6 μm . Šiurkštumo vertės apdirbant vieno impulso režimu yra panašaus dydžio – R_a vertė varijuoja tarp 1,6 μm – 2 μm , o R_z vertė tarp 9,1 μm – 12,1 μm . Šiurkštumo parametų priklausomybė nuo energijos tankio nenustatyta.



34 pav. Šiurkštumo parametų R_a ir R_z priklausomybės nuo impulso (kairėje) arba papliūpos (dešinėje) energijos tankio. Kairėje pateiktos paviršiaus šiurkštumo vertės apdirbant vieno impulso režimu, o dešinėje apdirbant su papliūpa sudaryta iš 3 impulsų

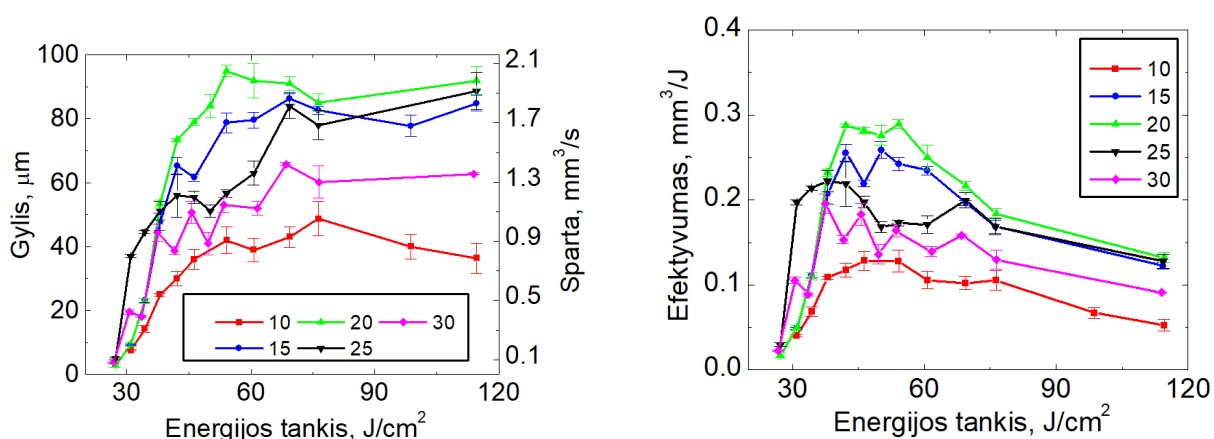
Norint pasiekti aukštesnes efektyvumo vertes, buvo nuspręsta pradėti apdirbimą su prieš tai pašiurkštintu paviršiumi. Tokio paviršiaus slenkstinis pažeidimo tankis yra mažesnis, todėl frezavimo efektyvumas turėtų padidėti. Pašiurkštinimas atliktas frezuojant 5 sluoksnių kvadratus su vienašūviu režimu, naudojant prieš tai išbandytus parametrus – 3 μm atstumu tarp šūviu, 18 μm atstumu tarp linijų ir 20 μm dz verte. Pasirinkus tokį režimą ir 37 J/cm^2 energijos tankį, išfrezuojamas apie 50 μm gylio kvadratas su $R_a = 1,3 \mu\text{m}$ bei $R_z = 8,8 \mu\text{m}$ paviršiaus šiurkštumo vertėmis.

Apdirbant pašiurkštintą paviršių pasirinktas 12 μm atstumas tarp šūvių ir 18 μm atstumas tarp linijų, kadangi su šiais parametrais pasiekiamas stabilus ir efektyvus frezavimas. Pastebėta, jog stabilus frezavimas pasiekiamas su papliūpomis, sudarytomis iš 10 ir daugiau impulsų.



35 pav. Pašiurkštinimo režimu frezuoto kvadrato paviršiaus topografija. Viršuje topografijos pateikta Z pozicijos skalė

Apskaičiuoto išfrezuoto gylio per sluoksnį ir frezavimo spartos priklausomybės nuo papliūpos energijos tankio pateiktos 36 pav. kairėje. Didžiausias $95 \mu\text{m}$ išfrezuotas gylis per sluoksnį ir atitinkamai $2 \text{ mm}^3/\text{s}$ sparta pasiekta su papliūpomis iš 20 impulsų. Pastebima, jog didinant energijos tankį išfrezuotas gylis didėja iki tam tikros vietos. Toliau didinant energijos tankį gylis nebedidėja arba didėja nežymiai.



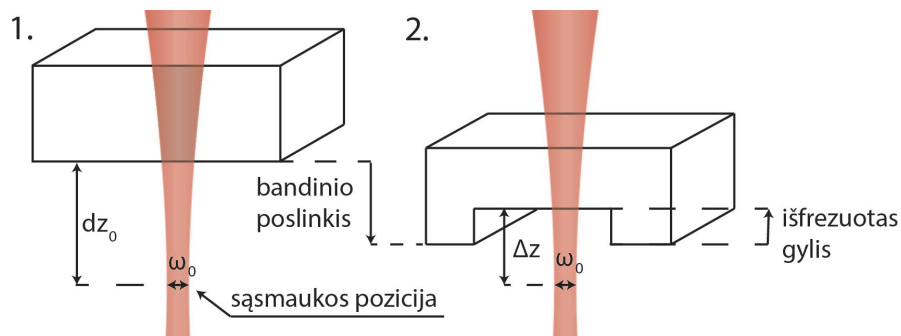
36 pav. Kairėje: išfrezuoto gylio ir frezavimo spartos priklausomybė nuo papliūpos energijos tankio, apdirbant papliūpomis iš skirtingų impulsų skaičiaus. Dešinėje: frezavimo efektyvumo priklausomybė nuo papliūpos energijos tankio, apdirbant papliūpomis iš skirtingų impulsų skaičiaus

Iš išfrezuoto gylio per sluoksnį verčių, apskaičiuotas frezavimo efektyvumas pateiktas 36 pav. dešinėje. Didžiausias pademonstruotas frezavimo efektyvumas – $0,29 \text{ mm}^3/\text{J}$. Tokia vertė pasiekta naudojant papliūpas, sudarytas iš 20 impulsų. Tai 2,2 kartus didesnis efektyvumas lyginant su prieš tai pateiktu efektyviausiu režimu, kai apdirbamas nepašiurkštintas paviršius.

Pastebima, jog efektyvumo vertės didėja iki tam tikro energijos tankio, po kurio vertės pradeda mažėti. To priežastis – išfrezuoto gylio per sluoksnį įsisotinimas ties tam tikra energijos tankio verte.

Sunku tiksliai įvardinti priežastį, dėl kurios įvyksta išfrezuojamo gylio per sluoksnį įsisotinimas. Viena iš priežasčių, kurią pavyko sugalvoti, yra susijusi su pluošto išfokusavimu ant apatinio paviršiaus dėl naudojamo papildomo poslinkio Z ašyje. Kaip jau buvo minėta, papildomo poslinkio Z ašyje vertė buvo keičiama kiekvienam parametrų rinkiniui. Naudojant didesnę papliūpų energiją, didėdavo ir po-

slinkio Z ašyje vertė. Pagrindinis šios vertės pasirinkimo kriterijus, jog tūryje nebūtų suformuojami pažeidimai. Tarus, jog nėra jokių terminio lęšio efektų, arba, jog šie efektai anuluoja vienas kitą, galima įvertinti pluošto, krintančio ant apatinės bandinio pusės, diametrą. Tam reikia žinoti pluošto sąsmaukos diametrą bei atstumą tarp bandinio apatinės pusės ir pluošto sąsmaukos pozicijos. Pluošto sąsmaukos diametras ir jo pozicija Z ašyje yra žinoma, tad belieka apskaičiuoti atstumą nuo sąsmaukos iki bandinio apatinės pusės. Norint apskaičiuoti šį atstumą, reikalinga išsirinkti tokią Z poziciją, ties kuria būtų atliekamas stabilus frezavimas. Laikoma, jog stabilus frezavimas pasiekiamas tuose taškuose, kurie atitinka tiesinę funkciją išfrezuoto gylio nuo sluoksnių skaičiaus priklausomybėje (31 pav.). Pasirinkus antrojo taško, atitinkančio tiesinę funkciją, sluoksnių skaičių (31 pav. tai atitinka 6 sluoksni) ir padauginus jį iš nustatyto poslinkio kas sluoksni Z ašyje, įvertinamas bandinio poslinkis. Taip pat svarbu įvertinti vienu sluoksniu mažiau išfrezuotą gylį (31 pav. tai atitinka 5 sluoksniais išfrezuotą $30\ \mu\text{m}$ gylį). Sudėjus išfrezuoto gylio ir papildomo poslinkio Z ašyje vertes ir iš jų atėmus bandinio poslinkį, apskaičiuojamas atstumas tarp pluošto sąsmaukos ir apatinio bandinio paviršiaus. Dėl geresnio suvokimo, 37 pav. pateikta vaizdinė schema.



37 pav. Atstumo nuo sąsmaukos pozicijos iki apatinio paviršiaus apskaičiavimo schema. Vienetu pažymėta pradinė pozicija, o dvejetu – stabilų frezavimą pasiekusi pozicija. Brėžinyje pateikta dz_0 vertė atitinka papildomą poslinkį Z ašyje, o Δz vertė – atstumą nuo apatinio paviršiaus iki pluošto sąsmaukos pasiekus stabilų frezavimą

Pasinaudojus Gauso pluošto sklaidimo formule, apskaičiuojamas pluošto diametras ant apatinio bandinio paviršiaus:

$$\omega(z) = \omega_0 \sqrt{1 + \left(\frac{\Delta z \lambda}{\pi \omega_0^2} \right)^2}, \quad (18)$$

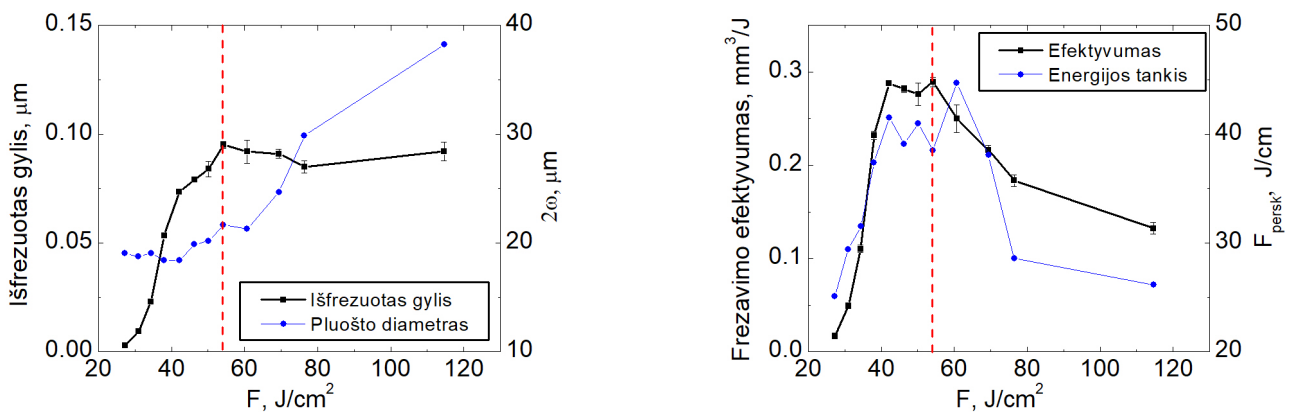
čia $\omega(z)$ – pluošto spindulys ant apatinio paviršiaus, ω_0 – sąsmaukos spindulys, Δz – atstumas nuo sąsmaukos iki apatinio paviršiaus, λ – bangos ilgis.

Pluošto ant apatinio bandinio paviršiaus įvertinimui pasirinktas papliūpos iš 20 impulsų režimas. Apskaičiuoti pluošto diametro ant apatinio paviršiaus ir išfrezuoto gylio priklausomybės nuo energijos tankio pateiktos 38 pav. kairėje. Pastebima, jog pluošto diametras pradeda smarkiai didėti ties panašia energijos tankio verte, ties kuria prasideda išfrezuoto gylio įsisotinimas. Toliau didinant energiją, frezavimas atliekamas su stipriau išfokusuotu pluoštu, todėl naudojamas šūvių ir linijų persiklojimas

nebėra optimalus.

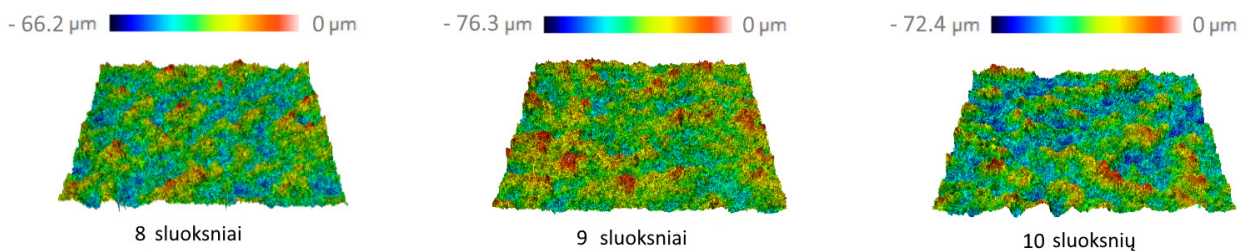
Pasinaudojus apskaičiuoto pluošto diametro ant apatinės bandinio pusės vertėmis, perskaičiuotas energijos tankis krintantis ant apatinio paviršiaus. Perskaičiuoto energijos tankio ir apdirbimo efektyvumo priklausomybės nuo energijos tankio pateiktos 38 pav. dešinėje. Pastebima, jog perskaičiuotas energijos tankis ant apatinio paviršiaus pradeda stipriai mažėti ties panašia energijos tankio verte, ties kuria prasideda efektyvumo mažėjimas. Perskaičiuoto energijos tankio mažėjimas gali būti aiškina- mas tuo, kad padidėjus pluošto diametru padidėja šūvių persiklojimas, dėl kurio padidėja šiluminė akumuliacija ir sumažėja slenkstinis energijos tankis.

Visi šie rezultatai rodo, jog iš pradžių didinant papliūpų energiją, didėja ant apatinio paviršiaus krintantis energijos tankis, tačiau pasiekus tam tikrą vertę, pradeda didėti pluošto ant apatinės bandinio pusės diameteras. Pradedant didėti pluošto diametru, išfrezuojamas gylis per sluoksnį ties tam tikru energijos tankiu nebedidėja, kadangi pasikeičia optimaliųjų atstumų tarp šūvių ir linijų vertės. Taigi frezavimo efektyvumas didėja tol, kol pasiekiamas optimalus energijos tankis ir pluošto diameteras ant bandinio paviršiaus.



38 pav. Kairėje: išfrezuoto gylio ir pluošto diametro ant apatinio paviršiaus priklausomybės nuo papliūpos energijos tankio, apdirbant papliūpomis iš 20 impulsų. Dešinėje: frezavimo efektyvumo ir perskaičiuoto energijos tankio priklausomybės nuo energijos tankio. Raudona brūkšninė linija žymi energijos tankį, ties kuriuo pasiekiamas didžiausias efektyvumas

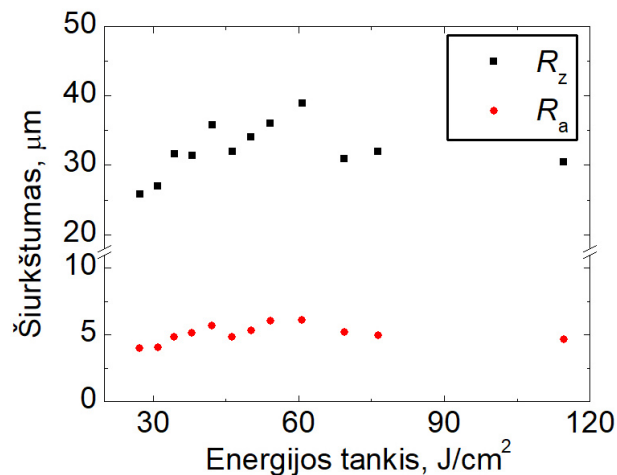
Kvadratų, išfrezuotų su 60 μJ papliūpomis iš 20 impulsų, paviršių topografijos pateiktos 39 pav.



39 pav. Skirtingu sluoksniu skaičiumi frezuotų kvadratų paviršių topografijos. Frezavimas atliktas su papliūpomis sudarytomis iš 20 impulsų. Kiekvienos topografijos dydis 2,1 mm x 1,8 mm. Viršuje topografijų pateiktos Z pozicijos skalės

Lyginant 33 paveiksle pateiktas topografijas su 39 paveiksle pateiktomis, galima pastebėti, kad apdirbant paviršių su papliūpomis, sudarytomis iš 20 impulsų, gaunamas šiurkštesnis paviršius.

Paviršiaus topografijos buvo išmatuotos režimui su papliūpa, sudaryta iš 20 impulsų, kadangi tai efektyviausias režimas. Šiurkštumo parametrų priklausomybė nuo naudojamos papliūpos energijos pateikta 40 paveiksle. R_a vertė varijuoja tarp $4 \mu\text{m} - 6,1 \mu\text{m}$, o R_z vertė tarp $25,8 \mu\text{m} - 39 \mu\text{m}$. Taigi R_a bei R_z vertės yra $\sim 2 - 3$ kartus didesnės lyginant su ankstesniais režimais, kai buvo apdirbamas nepašiurkštintas paviršius. Šiurkštumo parametrų priklausomybė nuo naudojamo energijos tankio nenustatyta.



40 pav. Šiurkštumo parametrų R_a ir R_z priklausomybė nuo naudojamos papliūpos, sudarytos iš 20 impulsų, energijos tankio

Rezultatų palyginimas

Šiame darbe gauti bei mokslinėje literatūroje rasti apdirbimo parametrai pateikti 2 lentelėje.

Atstumas tarp šūvių ir linijų

Eksperimentai su 5 ns ir 13 ps trukmėmis atlikti pasirinkus minimalų energijos tankį, su kuriuo pasiekiamas stabilus frezavimas. Su 13 ps minimali energijos tankio vertė yra kelis kartus mažesnė. Tai paaiškinama mažesniu slenkstiniu energijos tankiu trumpesnės trukmės impulsams. Mokslinėje literatūroje pateiktos vieno impulso slenkstinės energijos tankio vertės 10 ps ir 2 ns trukmės impulsams skiriasi 12 kartų ir atitinkamai yra $9,5 \text{ J/cm}^2$ ir 116 J/cm^2 [64].

Pastebima, jog naudojant 5 ns trukmės impulsus, optimalus atstumas tarp linijų yra didesnis, lyginant su 13 ps trukme. Ta pati tendencija, tačiau šįkart su atstumu tarp šūvių, gali būti pastebima lyginant papliūpų, sudarytų iš 3 ir 20 impulsų, režimus. Papliūpos, sudarytos iš 20 impulsų, trukmė 8,4 ns, o papliūpos iš 3 – 0,9 ns. Optimalus atstumas tarp šūvių yra 4 kartus didesnis, kai naudojamos ilgesnės 8,4 ns trukmės papliūpos.

2 lentelė. Apdirbimo parametrai bei su jais pademonstruotos apdirbimo efektyvumo ir paviršiaus šiurkštumo vertės. Lentelėje pateiktos šiame darbe bei mokslinėje literatūroje pademonstruotos vertės, apdirbant lydytą kvarcą. Atstumas tarp šūvių pažymėtas dx , atstumas tarp linijų dy , o poslinkis Z ašyje – dz

Bangos ilgis, impulsų trukmė, impulso arba papliūpos energijos tankis, pluošto sąsmaukos spindulys, atstumas tarp šūvių, linijų, poslinkis Z ašyje.	Efektyvumas, mm^3/J	Paviršiaus šiurkštumo vertės, μm
Apdirbimas nuo apatinės pusės		
1064 nm, 5 ns, 43 J/cm ² , $\omega = 9,4 \mu\text{m}$, $dx = 7 \mu\text{m}$, $dy = 30 \mu\text{m}$.	0,094	8,2 (R_a)
1064 nm, 13 ps, 11 J/cm ² , $\omega = 10,7 \mu\text{m}$, $dx = 5 \mu\text{m}$, $dy = 8 \mu\text{m}$, $dz = 8 \mu\text{m}$.	0,011	1,5 (R_a)
1030 nm, 5 ps, 41 J/cm ² , $\omega = 9,2 \mu\text{m}$, $dx = 3 \mu\text{m}$, $dy = 18 \mu\text{m}$.	0,11	1,6 (R_a); 9,7 (R_z). Su ISO 4287 filtrais
1030 nm, 5 ps, 37 J/cm ² , $\omega = 9,2 \mu\text{m}$, $dx = 3 \mu\text{m}$, $dy = 18 \mu\text{m}$. Papliūpos iš 3 impulsų atskirtų 440 ps trukme.	0,13	1,8 (R_a); 10,2 (R_z). Su ISO 4287 filtrais
1030 nm, 5 ps, 53 J/cm ² , $\omega = 9,2 \mu\text{m}$, $dx = 12 \mu\text{m}$, $dy = 18 \mu\text{m}$. Papliūpos iš 20 impulsų, atskirtų 440 ps trukme.	0,29	6 (R_a); 36 (R_z). Su ISO 4287 filtrais
532 nm, 5 ns, 210 J/cm ² , $\omega = 5,2 \mu\text{m}$ [22].	0,13	4 – 6 (R_a)
Tiesioginė abliacija		
1030 nm, 230 fs, 1,71 J/cm ² , $\omega = 31,3 \mu\text{m}$ [25].	0,007	0,4 (R_a)
1030 nm, 230 fs, 3 J/cm ² , $\omega = 31,3 \mu\text{m}$. Papliūpos iš 10 impulsų, atskirtų 460 ps trukme [25].	0,05	2,5 (R_a)

Efektyvumas ir paviršiaus kokybė

Frezavimo efektyvumas stipriai priklauso nuo naudojamo energijos tankio. Todėl reikia manyti, jog eksperimentuose su 5 ns ir 13 ps gautos vertės nėra maksimalios. Tačiau kadangi abu eksperimentai atlikti su minimaliu energijos tankiu, galima pastebėti, jog su trumpesnės trukmės impulsais ties stabilaus apdirbimo slenksčiu pasiekiamas 5,5 karto mažesnis šiurkštumas. Tačiau frezuojant su 5 ns impulsais pasiekiamas 8,5 kartų didesnis efektyvumas.

Didesnį efektyvumą su nanosekundiniais impulsais galima paaiškinti skirtingu medžiagos pašalinimo mechanizmu. Medžiagos pašalinimo mechanizmą galima atpažinti įvertinant apdirbimo kokybę bei apdirbimo produktų dydį. Kadangi nebuvo galimybės išmatuoti apdirbimo produktų dydį tenka įvertinti paviršiaus kokybę. Moksliniuose straipsniuose teigiama, jog apdirbant skaldymo režimu paviršiaus kokybė siekia $3 \mu\text{m } R_a$ [25]. Kadangi apdirbant nanosekundiniais impulsais išfrezuoto paviršiaus šiurkštumo vertės siekia $8 \mu\text{m } (R_a)$, galima teigti, jog vyksta medžiagos pašalinimas nuolaužų forma. Apdirbant su pikosekundiniais impulsais paviršiaus šiurkštumas siekia $1,5 \mu\text{m } (R_a)$, todėl galima teigti, jog medžiaga yra pašalinama ją išgarinant. Akivaizdu, jog medžiagos išgarinimui reikalingas didesnis energijos kiekis, todėl apdirbant su nanosekundiniais impulsais pasiekiamas didesnis efektyvumas.

Norint įvertinti papliūpų naudą, galima palyginti su 5 ns trukme ir 43 J/cm² energijos tankiu pademonstruotą efektyvumo vertę su efektyvumu, pasiektu su panašaus energijos tankio ir trukmės pa-

pliūpomis. Kadangi papliūpas sudarančių impulsų skaičius buvo keičiamas kas 5 impulsus, artimiausios 5 ns trukmei papliūpos yra sudarytos iš 10 impulsų (4 ns) ir 15 impulsų (6,2 ns). Su 42 J/cm^2 energijos tankiu ir 4 ns trukmės papliūpomis pasiektas $0,12 \text{ mm}^3/\text{J}$ efektyvumas, o su 6,2 ns – $0,26 \text{ mm}^3/\text{J}$. Taigi su 4 ns ir 6,2 ns trukmės papliūpomis pasiekiamas atitinkamai 1,3 kartus bei 2,8 kartus didesnis efektyvumas, lyginant su tyrime su 5 ns trukmės impulsais pasiektu efektyvumu.

Apdirbant lydytą kvarcą su papliūpomis, sudarytomis iš 3 ir mažiau impulsų, paviršiaus šiurkštumas R_a siekia $1,8 \mu\text{m}$. Paviršiaus šiurkštumo vertės žymiai padidėja, apdirbant su papliūpomis iš 10 ir daugiau impulsų ($R_a \sim 6 \mu\text{m}$). Tai galima sieti su pasikeitusiu medžiagos pašalinimo mechanizmu. Apdirbant su ilgesnės trukmės papliūpomis pasiekiamas skaldymo režimas. Tai patvirtinta ir efektyvumo vertės, kadangi su ilgesnės trukmės papliūpomis pasiekiamas 2,2 karto didesnis efektyvumas. Tokia pati tendencija pademonstruota ir mokslinėje literatūroje publikuotuose straipsniuose [25, 58].

Didžiausias efektyvumas pasiektas naudojant papliūpas sudarytas iš 20 impulsų. Pademonstruota vertė yra net 2,6 karto didesnė lyginant su darbe pademonstruotu didžiausiu efektyvumu, apdirbant vienašūviu režimu. Lyginant paviršiaus kokybę, su ilgesnės trukmės papliūpomis gaunama apie 3,7 karto didesnės šiurkštumo vertės.

Didžiausia lydyto kvarco apdirbimo su nanosekundiniais ir trumpesniais impulsais efektyvumo vertė, kurią pavyko rasti mokslinėje literatūroje – $0,13 \text{ mm}^3/\text{J}$. Ši vertė pasiekta su 532 nm bangos ilgio nanosekundiniais impulsais apdirbant bandinį nuo apatinės pusės. Šiame darbe pavyko pasiekti net 2,2 karto didesnę efektyvumą. Palyginus didžiausią literatūroje rastą lydyto kvarco frezavimo efektyvumą su papliūpomis, pasiektas net 5,8 karto didesnis efektyvumas.

Pagrindiniai rezultatai ir išvados

1. Apdirbant lydytą kvarcą lazerine spinduliuote apatinio paviršiaus pažeidimo sąlygos skiriasi nuo tūrinės dalies optimalių frezavimo parametrų dėl didesnio poliruoto paviršiaus abliacijos slenkščio, todėl stabiliam lydyto kvarco frezavimo procesui pasiekti reikalingas papildomas apatinio paviršiaus padengimas lazerinę spinduliuotę sugeriančia danga arba papildomas pašiuirkštinimas lazerine spinduliuote.
2. Pasirinkus efektyvaus frezavimo režimus apdirbant su minimaliu energijos tankiu, reikalingu stabiliam frezavimui, su 13 ps trukmės impulsais pasiekiamas 5,5 karto mažesnis vidutinis paviršiaus šiurkštumas ($1,5 \mu\text{m } R_a$) lyginant su 5 ns trukmės impulsais ($8,2 \mu\text{m } R_a$). Apdirbant papliūpomis, sudarytomis iš dvidešimties 5 ps trukmės impulsų, pasiekiamas 3,7 karto didesnis vidutinis šiurkštumas ($6 \mu\text{m } R_a$) lyginant su 5 ps trukmės vienašūviu režimu ($1,6 \mu\text{m } R_a$).
3. Didžiausias lydyto kvarco frezavimo efektyvumas pademonstruotas apdirbant papliūpomis iš 20-ies 5 ps trukmės impulsų (1030 nm , 100 kHz , 53 J/cm^2) ir siekė $0,29 \text{ mm}^3/\text{J}$. Toks apdirbimo režimas buvo 2,6 karto efektyvesnis lyginant su vienašūviu režimu (1030 nm , 5 ps , 100 kHz , 41 J/cm^2).

Literatūros sąrašas

- [1] M. Arbab, J. J. Finley, Glass in architecture, *Int. J. Appl. Glass Sci.* **1**(1), 118–129 (2010).
- [2] L. L. Hench, D. E. Day, W. Höland, V. M. Rheinberger, Glass and medicine, *Int. J. Appl. Glass Sci.* **1**(1), 104–117 (2010).
- [3] M. J. Han, D.-Y. Khang, Glass and plastics platforms for foldable electronics and displays, *Adv. Mater.* **27**(34), 4969–4974 (2015).
- [4] K. Burrows, V. Fthenakis, Glass needs for a growing photovoltaics industry, *Sol. Energ. Mat. Sol. C.* **132**, 455–459 (2015).
- [5] U. Aich, S. Banerjee, A. Bandyopadhyay, P. K. Das, Abrasive water jet cutting of borosilicate glass, *Proc. Mater. Sci.* **6**, 775–785 (2014).
- [6] K. Kowsari, H. Nouraei, D. James, J. Spelt, M. Papini, Abrasive slurry jet micro-machining of holes in brittle and ductile materials, *J. Mater. Process. Tech.* **214**(9), 1909–1920 (2014).
- [7] D. Solognac, A. Sayah, S. Constantin, R. Freitag, M. Gijs, Powder blasting for the realisation of microchips for bio-analytic applications, *Sensor. Actuat. A-Phys.* **92**(1-3), 388–393 (2001).
- [8] E. Belloy, A. Sayah, M. Gijs, Oblique powder blasting for three-dimensional micromachining of brittle materials, *Sensor. Actuat. A-Phys.* **92**(1-3), 358–363 (2001).
- [9] A. Schorderet, E. Deghilage, K. Agbeviade, Tool type and hole diameter influence in deep ultrasonic drilling of micro-holes in glass, *Proc. CIRP* **6**, 565–570 (2013).
- [10] K. Egashira, K. Mizutani, T. Nagao, Ultrasonic vibration drilling of microholes in glass, *Proc. CIRP* **51**(1), 339–342 (2002).
- [11] A. K. Jain, P. M. Pandey, Study of peck drilling of borosilicate glass with RUM process for MEMS, *J. Manuf. Process.* **22**, 134–150 (2016).
- [12] B. Park, Y. Choi, C. Chu, Prevention of exit crack in micro drilling of soda-lime glass, *CIRP Ann-Manuf. Techn.* **51**(1), 347–350 (2002).
- [13] M. Zhou, B. Ngoi, M. Yusoff, X. Wang, Tool wear and surface finish in diamond cutting of optical glass, *J. Mater. Process. Tech.* **174**(1-3), 29–33 (2006).
- [14] J. Lee, S. Lee, S. Lee, J. Park, Through-glass copper via using the glass reflow and seedless electroplating processes for wafer-level RF MEMS packaging, *J. Micromech. Microeng.* **23**(8), 085012 (2013).

- [15] Y. Cheng, K. Sugioka, K. Midorikawa, Microfluidic laser embedded in glass by three-dimensional femtosecond laser microprocessing, *Opt. Lett.* **29**(17), 2007 (2004).
- [16] I. Goenaga, Femtosecond laser ablation for microfluidics, *Opt. Eng.* **44**(5), 051105 (2005).
- [17] S. Gao, R. Zhuang, J. Zhang, J. Liu, E. Mäder, Glass fibers with carbon nanotube networks as multifunctional sensors, *Adv. Funct. Mater.* **20**(12), 1885–1893 (2010).
- [18] S. F. León-Luis, U. R. Rodriguez-Mendoza, I. R. Martin, E. Lalla, V. Lavin, Effects of er³⁺ concentration on thermal sensitivity in optical temperature fluorotellurite glass sensors, *Sensor. Actuat. B-Chem.* **176**, 1167–1175 (2013).
- [19] F. He, Y. Liao, J. Lin, J. Song, L. Qiao, Y. Cheng, K. Sugioka, Femtosecond laser fabrication of monolithically integrated microfluidic sensors in glass, *Sensors* **14**(10), 19402–19440 (2014).
- [20] J. Dudutis, J. Pipiras, R. Stonys, E. Daknys, A. Kilikevičius, A. Kasparaitis, G. Račiukaitis, P. Gečys, In-depth comparison of conventional glass cutting technologies with laser-based methods by volumetric scribing using bessel beam and rear-side machining, *Opt. Express* **28**(21), 32133 (2020).
- [21] K. Mishchik, K. Gaudfrin, J. Lopez, Drilling of through holes in sapphire using femto-second laser pulses, *J. Laser Micro Nanoen.* **12**(3), 321–324 (2017).
- [22] V. Tomkus, V. Girdauskas, J. Dudutis, P. Gečys, V. Stankevič, G. Račiukaitis, High-density gas capillary nozzles manufactured by hybrid 3d laser machining technique from fused silica, *Opt. Express* **26**(21), 27965–27977 (2018).
- [23] A. H. Hamad, 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* (InTech, 2016).
- [24] A. Dubietis, *Netiesinė optika* (Vilniaus Universitetas, 2011).
- [25] S. Schwarz, S. Rung, C. Esen, R. Hellmann, Enhanced ablation efficiency using GHz bursts in micromachining fused silica, *Opt. Lett.* **46**(2), 282 (2021).
- [26] D. Paipulas, *Lūžio rodiklio modifikavimas stikluose ir kristaluose veikiant ultratrumpaisiais lazerio impulsais*, daktaro disertacija, Vilnius (2011).
- [27] S. J. Mihailov, Femtosecond laser-inscribed fiber bragg gratings for sensing applications, in *Opto-Mechanical Fiber Optic Sensors* (Elsevier, 2018), 137–174.
- [28] A. Sennaroglu, *Solid-State Lasers and Applications*, Optical Science and Engineering (CRC Press, 2017).

- [29] R. Osellame, S. Taccheo, M. Marangoni, R. Ramponi, P. Laporta, D. Polli, S. De Silvestri, G. Cerullo, Femtosecond writing of active optical waveguides with astigmatically shaped beams, *JOSA B* **20**(7), 1559–1567 (2003).
- [30] H. Ohsaki, Y. Kokubu, Global market and technology trends on coated glass for architectural, automotive and display applications, *Thin Solid Films* **351**(1-2), 1–7 (1999).
- [31] S. Gupta, *Textbook on optical fiber communication and its applications* (PHI Learning Pvt. Ltd., 2018).
- [32] R. Osellame, R. M. Vazquez, R. Ramponi, G. Cerullo, C. Dongre, R. Dekker, H. J. Hoekstra, M. Pollnau, Integrated optical sensing in a lab-on-chip by femtosecond laser written waveguides, in *Conf. Laser Electr.* (Optical Society of America, 2008).
- [33] K. L. Wlodarczyk, A. Brunton, P. Rumsby, D. P. Hand, Picosecond laser cutting and drilling of thin flex glass, *Opt. Laser Eng.* **78**, 64–74 (2016).
- [34] L. A. Hof, J. Abou Ziki, Micro-hole drilling on glass substrates – a review, *Micromachines* **8**(2), 53 (2017).
- [35] P. Gečys, J. Dudutis, G. Račiukaitis, Nanosecond laser processing of soda-lime glass, *J. Laser Micro Nanoen.* **10**(3) (2015).
- [36] O. Balachninitė, M. Barkauskas, A. Čiburys, D. Paipulas, I. Pipinytė, V. Sirutkaitis, J. Vengelis, *Lazeriai ir jų taikymai* (Vilnius, 2016).
- [37] M. Kumkar, L. Bauer, S. Russ, M. Wendel, J. Kleiner, D. Grossmann, K. Bergner, S. Nolte, Comparison of different processes for separation of glass and crystals using ultrashort pulsed lasers, in *Proc. Spie.* (SPIE, 2014), volume 8972, 897214.
- [38] O. Balachninitė, A. Bargelis, A. Dementjev, R. Jonušas, G. Račiukaitis, V. Sirutkaitis, *Lazerinė technologija : Vilniaus universiteto vadovėlis.* (Vilniaus universiteto I-kla, Vilnius, 2008).
- [39] C. Fornaroli, J. Holtkamp, A. Gillner, Laser-beam helical drilling of high quality micro holes, *Physcs. Proc.* **41**, 661–669 (2013).
- [40] Y. Reg, K.-H. Leitz, M. Schmidt, Influence of processing gas on the ablation quality at ns-laser beam ablation, *Physcs. Proc.* **12**, 182–187 (2011).
- [41] E. Markauskas, P. Gečys, Thin water film assisted glass ablation with a picosecond laser, *Proc. CIRP* **74**, 328–332 (2018).
- [42] Z. Wang, H. Zheng, W. Seow, X. Wang, Investigation on material removal efficiency in debris-free laser ablation of brittle substrates, *J. Mater. Process. Tech.* **219**, 133–142 (2015).

- [43] M. Crisp, N. Boling, G. Dubé, Importance of fresnel reflections in laser surface damage of transparent dielectrics, *Appl. Phys. Lett.* **21**(8), 364–366 (1972).
- [44] B. Wu, P. Liu, F. Zhang, J. Duan, X. Wang, X. Zeng, Effect of parameters on picosecond laser ablation of cr12mov cold work mold steel, *Appl. Phys. A* **124**(1) (2017).
- [45] G. Raciukaitis, Use of high repetition rate and high power lasers in microfabrication: How to keep the efficiency high?, *J. Laser Micro. Nanoen.* **4**(3), 186–191 (2009).
- [46] G. Giannuzzi, *Laser micromachining with bursts of ultrashort pulses*, daktaro disertacija, University of Bari Aldo Moro (2018).
- [47] K.-H. Leitz, B. Redlingshöfer, Y. Reg, A. Otto, M. Schmidt, Metal ablation with short and ultrashort laser pulses, *Physcs. Proc.* **12**, 230–238 (2011).
- [48] L. Jiang, P. Liu, X. Yan, N. Leng, C. Xu, H. Xiao, Y. Lu, High-throughput rear-surface drilling of microchannels in glass based on electron dynamics control using femtosecond pulse trains, *Opt. Lett.* **37**(14), 2781–2783 (2012).
- [49] M. Brikas, *Silicio ir metalų mikroapdirbimas didelio impulsų pasikartojimo dažnio pikosekundiniais lazeriais*, daktaro disertacija (2011).
- [50] H. Hidai, S. Matsusaka, A. Chiba, N. Morita, Heat accumulation in microdrilled glass from ultraviolet laser ablation, *Appl. Phys. A.* **120**(1), 357–367 (2015).
- [51] Z. Sun, M. Lenzner, W. Rudolph, Generic incubation law for laser damage and ablation thresholds, *J. Appl. Phys.* **117**(7), 073102 (2015).
- [52] C. Kerse, H. Kalaycıoğlu, P. Elahi, B. Çetin, D. K. Kesim, Önder Akçaalan, S. Yavaş, M. D. Aşık, B. Öktem, H. Hoogland, R. Holzwarth, F. Ömer Ilday, Ablation-cooled material removal with ultrafast bursts of pulses, *Nature* **537**(7618), 84–88 (2016).
- [53] A. Žemaitis, P. Gečys, M. Barkauskas, G. Račiukaitis, M. Gedvilas, Highly-efficient laser ablation of copper by bursts of ultrashort tuneable (fs-ps) pulses, *Scis Rep.* **9**(1) (2019).
- [54] A. Žemaitis, M. Gaidys, P. Gečys, M. Barkauskas, M. Gedvilas, Femtosecond laser ablation by bibursts in the MHz and GHz pulse repetition rates, *Opt. Express* **29**(5), 7641 (2021).
- [55] G. Bonamis, K. Mishchick, E. Audouard, C. Hönninger, E. Mottay, J. Lopez, I. Manek-Hönninger, High efficiency femtosecond laser ablation with gigahertz level bursts, *J. Laser Appl.* **31**(2), 022205 (2019).
- [56] W. Hu, Y. C. Shin, G. King, Modeling of multi-burst mode pico-second laser ablation for improved material removal rate, *Appl. Phys. A* **98**(2), 407–415 (2009).

- [57] D. Bruneel, L. Canguero, B. Jäggi, B. Neuenschwander, C. Hairaye, J. A. R. de Campos, Micromachining using pulse bursts: Influence of the pulse duration and the number of pulses in the burst on the specific removal rate, in *Proc. SPIE* (SPIE, 2018).
- [58] S. M. Remund, M. Gafner, M. V. Chaja, A. Urniezius, S. Butkus, B. Neuenschwander, Milling applications with GHz burst: Investigations concerning the removal rate and machining quality, *Proc. CIRP* **94**, 850–855 (2020).
- [59] R. House, J. Bettis, A. Guenther, Surface roughness and laser damage threshold, *IEEE J. Quantum Elect.* **13**(5), 361–363 (1977).
- [60] W. Duan, *The effect of surface processing methods on the laser induced damage threshold of fused silica*, daktaro disertacija, University of Central Lancashire (2014).
- [61] K. Nagayama, Y. Kotsuka, T. Kajiwara, T. Nishiyama, S. Kubota, M. Nakahara, Pulse laser ablation of ground glass, *Shock Waves* **17**(3), 171–183 (2007).
- [62] J. M. Liu, Simple technique for measurements of pulsed gaussian-beam spot sizes, *Opt. Lett.* **7**(5), 196 (1982).
- [63] A. C. P. Rocha, J. R. Silva, S. M. Lima, L. A. O. Nunes, L. H. C. Andrade, Measurements of refractive indices and thermo-optical coefficients using a white-light michelson interferometer, *Appl. Opt.* **55**(24), 6639 (2016).
- [64] D. Nieto, J. Arines, G. M. O’Connor, M. T. Flores-Arias, Single-pulse laser ablation threshold of borosilicate, fused silica, sapphire, and soda-lime glass for pulse widths of 500 fs, 10 ps, 20 ns, *Appl. Opt.* **54**(29), 8596 (2015).

Investigation of glass rear side milling using laser

Summary

Fast growing market of glass microelements leads to higher demand on laser machining because of its high quality and speed. Laser rear side milling is attractive glass machining method because it allows to mill complex shapes with zero taper walls. However, there is still lack of information about this technology when milling with different parameters. The aim of this work is to investigate the glass rear side milling using first harmonic wavelength with nanosecond and picosecond pulses and burst regime.

It was shown that the optimal parameters for milling undamaged and damaged surfaces differ, because of the larger damage threshold of the polished surface. Therefore, for the initiation of stable milling, the surface needs to be processed. For example, it could be roughened or coated with absorptive coating.

When milling is done with the minimal fluence needed to achieve stable milling with 13 ps the average roughness is 5,5 times smaller ($1,5 \mu\text{m } R_a$) than with 5 ns ($8,2 \mu\text{m } R_a$). The average surface roughness is 3,7 times larger when comparing milling with bursts from 20 pulses ($6 \mu\text{m } R_a$) to single pulse regime ($1,6 \mu\text{m } R_a$).

Experiments has shown that rear side milling with bursts proves to be advantageous over the single pulse regime when milling with 5 ps pulses. The efficiency is 2,6 times higher when comparing to the single pulse milling. The highest efficiency value of $0,29 \text{ mm}^3/\text{J}$ was achieved with 1030 nm 100 kHz $53 \text{ J}/\text{cm}^2$ bursts from 20 pulses. The highest milling efficiency value found in scientific literature for fused silica laser milling is 2,2 times smaller than the efficiency demonstrated in this work.