

Vilniaus universiteto
Fizikos fakulteto
Lazerinių tyrimų centras

Arnas Vyšniauskas
KOMBINUOTAS KVARCINIO STIKLO APDIRBIMAS FEMTOSEKUNDINIU IR CO₂
LAZERIU

Magistrantūros studijų baigiamasis darbas

Lazerinės technologijos
studijų programa

Studentas

Arnas Vyšniauskas

Leista ginti

2023-05-26

Darbo vadovas

Dr. Paulius Gečys

Centro direktorė

Dr. Dalia Kaškelytė

Vilnius, 2023

Turinys

Įvadas.....	3
1. Kvarcinis stiklas	5
2. Skaidrių medžiagų ir lazerinės spinduliuotės sąveika	5
2.1 Sugertis	6
2.2 Sugertis dielektrikuose	7
2.3 Tiesinė ir daugiafotonė jonizacija.....	8
2.4 Griūtinė ir smūginė jonizacija	9
3. Lazerinis mikroapdirbimas	10
3.1 Lazerinė abliacija.....	10
3.2 Lazerinis poliravimas	11
3.3 Poliravimas įvairios veikos lazeriais	13
3.5 Lazerinių parametrų įtaka apdirbimo procesui	14
4. Optinių elementų formavimas lazeriu	15
5. Optinio paviršiaus vertinimas	17
5.1 Paviršiaus šiurkštumas.....	17
5.2 Optinis paviršius	19
6. Eksperimento įranga ir metodika.....	19
7. Rezultatai ir jų aptarimas	22
7.1 Nepažeisto paviršiaus abliacija.....	22
7.2 Pažeisto paviršiaus abliacija	26
7.3 Mikrolęšių matricos formavimas.....	28
7.4 Pažeisto paviršiaus poliravimas.....	29
7.5 Poliravimas su išfokusuotu pluoštu	31
7.6 Mikrolęšių matricos poliravimas	33
8. Pagrindiniai rezultatai ir išvados	35
9. Literatūra	36
10. Santrauka anglų kalba/Summary	38

Ivadas

Kvarcinis stiklas turi didelį pritaikymo potencialą aukštųjų technologijų srityse. Jis svarbus fotonikoje (kompaktiniai lazeriai, motorizuoti teleskopai, komunikacija šviesolaidiniais lazeriais), mikrofluidinėms ar mikroelektromechaninėms sistemoms. Tokiems elementams suformuoti reikia sparčių, užtikrinančių aukštą apdirbimo kokybę ir tikslių technologijų.

Populiarejant žaliajam kursui ir vystantis gamybos technologijoms auga mažų matmenų prietaisų paklausa. Matmenų mažėjimas optiniuose prietaisuose, tokiuose kaip lazeriai, mikroskopai ar teleskopai, lemia ir mažų optinių elementų poreikį. Kartu su mažų elementų rinka auga ir sudėtingos formos elementų paklausa. Geras pavyzdys yra mikrolęšių matricos ar nesimetrinių paviršių elementai pritaikomi lazerinio pluošto intensyvumo pasiskirstymo keitimui [1, 2]. Su pritaikymu nuolatos auga ir reikalavimai tokių elementų paviršiaus kokybei ir geometrijai, o juos tampa sudėtinga ir neekonomiška gaminti tradiciniais metodais, pavyzdžiui, mechaniniu paviršių apdirbimu.

Tradiciniai metodai nebeatitinka šiuolaikinių poreikių. Dėl mechaninio kontakto tarp prietaiso ir medžiagos paviršiaus, suformuojami pažeidimai, kurie neatitinka reikalavimų keliamų optiniams elementams [1]. Taigi, didėja šlifavimo ir poliravimo žingsnių skaičius, kuris ilgina ir brangina tokio elemento gamybą. Taip pat jei šie procesai yra atliekami rankiniu būdu, tai galutinis rezultatas tiesiogiai priklauso nuo procesą atliekančio darbuotojo patirties [2].

Mažiams sudėtingos formos elementams formuoti yra perspektyvu naudoti lazerines technologijas [3]. Pasitelkiant lazerinę abliaciją, galima formuoti mikroskopinių matmenų darinius stiklo paviršiuje [4]. Galutinė paviršiaus kokybė priklauso nuo naudojamos lazerinio impulso trukmės – femtosekundiniai impulsai yra pranašesni, lyginant su ilgesniais impulsais [5]. Jų sąveikos su medžiaga metu, energija gali būti sugerama per trumpesnę laikotarpį nei būdingas medžiagos terminės difuzijos laikas. Taip galima sumažinti šilumos paveiktą zoną, sumažinti defektų skaičių bei išlaikyti aukštą apdirbimo skyrą [2, 4].

Lazeriu suformavus optinį elementą, jis dar yra pakankamai šiurkštus ir netinkamas optiniams taikymams, tačiau lazerinė spinduliuotė gali būti panaudota ir elemento poliravimui. Dėka mažesnių piniginių sąnaudų, trumpesnės proceso trukmės, ypač jei procesas yra automatizuojamas, lazerinio poliravimo metu galima gauti efektyvų paviršiaus išlyginimą [6]. Kita vertus, paviršiaus perlydimo metu gali padidėti šiurkštumas bei banguotumas [5, 6], atsirasti kiti defektai kaip pūslelės, skilimai, paviršiaus spalvos pakitimai, dėl lydalo nubėgimo

gali pakisti elemento forma [4]. Taigi, norint komercializuoti lazerinį poliravimą, reikia detalesnių šios technologijos tyrimų.

Šio darbo tikslas – ištirti kvarcinio stiklo abliacijos ir lazerinio poliravimo procesus lęšių mikromatricos formavimui. Tikslui pasiekti buvo naudojami 1030 nm bangos ilgio femtosekundinis ir 10,6 μm bangos ilgio CO₂ lazeriai. Išsikelti uždaviniai: optimizuoti sistemos parametrus geros kokybės (mažiausio šiurkštumo) tolygaus paviršiaus frezavimui, taip pat tiksliam paviršiaus formavimui pašalinant kuo mažesnę medžiagos sluoksnį bei stiklo lazeriniam poliravimui. Galiausiai, pritaikant optimizuotus parametrus suformuoti sudėtingos paviršiaus formos optinį elementą.

1. Kvarcinis stiklas

Mikromechanikos, biologijos, chemijos ir ypač tarpdisciplininiais šių sričių taikymams reikalingos puikios mechaninės, cheminės ir optinės medžiagų savybės. Šiuolaikinė mikrooptika taip pat reikalauja didelio pralaidumo, mažo atspindžio ir mažų sklaidos nuostolių. Reikalingas didelis mechaninis stabilumas, ilgaamžiškumas, mažas šilumos laidumas, puikios elektros izoliacinės savybės, platus optinis pralaidumas. Lydytas kvarcas pasižymi visomis šiomis savybėmis.

Bendrai žvelgiant, lydytas kvarcas turi nemažai privalumų: 1) cheminis ir mechaninis stabilumas; 2) iki 96% grynumas su mažai priemaišų; 3) minimali sugertis perduodant didelės energijos lazerio impulsus; 4) puikus pralaidumas plačiame spektro diapazone. Visa tai lemia, kad šis stiklas yra plačiai naudojamas pramonėje [7].

Yra keturi pagrindiniai komercinio lydyto kvarco stiklo tipai [8]: I tipas yra gaminamas lydant natūralius kvarcinius kristalus vakuume arba inertinėse žemo slėgio dujose. II tipas gaminamas iš kvarco kristalų miltelių arba dar vadinamu kvarciniu smėliu jį lydant liepsna. III tipas yra sintetinis, jis gaunamas hidrolizuojant silicio tetrachloridą (SiCl_4), kuomet jis yra purškiamas į hidroksido liepsną. Na ir IV tipas, kuris taip pat vadinamas sintetiniu, gaminamas purškiant silicio tetrachloridą į vandens plazmos liepsną be garų.

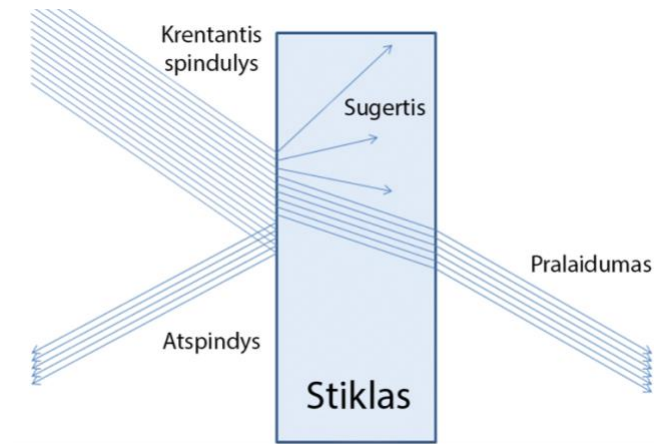
Kiekvienas lydyto kvarco stiklo tipas turi skirtingą priemaišų lygį ir optines savybes [8]. Pavyzdžiui, I tipo kvarciniame stikle dažniausiai būna metalinių priemaišų. Kita vertus III ir IV tipai yra daug grynesni nei I tipo ir pasižymi didesniu ultravioletinio spektro dalies pralaidumu. III tipo kvarcinis stiklas turi didesnę vandens kiekį, kuris riboja infraraudonųjų spindulių pralaidumą dėl stiprios vandens sugerties ties $2,2 \mu\text{m}$ ir $2,7 \mu\text{m}$ bangos ilgiais. IV tipas yra panašus į III, tačiau jame yra mažiau vandens ir todėl turi geresnę infraraudonųjų spindulių pralaidumą. Terminas „kvarcinis stiklas“ dažniausiai yra vartojamas I tipo stiklui.

2. Skaidrių medžiagų ir lazerinės spinduliuotės sąveika

Prieš pradėdant plačiau kalbėti apie lazerinį stiklų apdirbimą, svarbu aptarti lazerinės spinduliuotės ir medžiagos sąveiką. Kuomet elektromagnetinė spinduliuotė sąveikauja su medžiaga, pirmiausia vyksta spinduliuotės atspindys nuo medžiagos paviršiaus (žr. 1.1 pav.) [8]. Tokiu būdu dalis spinduliuotės yra prarandama, o dalis patenka į medžiagą. Atspindžio koeficientą galima aprašyti pasinaudojus medžiagos parametrais:

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

Čia R – atspindžio koeficientas, n_1 ir n_2 terpių, iš kurios ir į kurią sklinda elektromagnetinė banga lūžio rodikliai, κ_1 ir κ_2 atitinkamai tų terpių ekstinkcijos koeficientai. Atspindžio koeficiento formulėje esantys nariai veikia lazerinę spinduliuotę – lūžio rodiklis veikia bangos fazę ir kartu fazinį greitį, o ekstinkcijos koeficientas – bangos amplitudę [8].



1.1 pav. Lazerinės spinduliuotės sąveikos su medžiaga mechanizmai [5].

Ta lazerinės spinduliuotės dalis, kuri lieka neatspindėta, patenka į medžiagą, joje gali būti atspindėta, sugerta arba praeiti medžiagą (žr. 1.1 pav.) [6]. Siekiant, kad vyktų optimalus medžiagos apdirbimas, kuo daugiau spinduliuotės turi būti sugerta.

2.1 Sugertis

Elektromagnetinė spinduliuotė pereidama medžiagą su ja sąveikauja. Medžiagos laisvieji elektronai sąveikauja su išoriniu elektromagnetiniu lauku. Kvantiniu požiūriu, laisvasis elektronas gali sugerti fotoną po sąveikos su trečiąja dalele. Tai gali būti atomas arba kitas elektronas. Susidūrimo metu fotono energija pasiskirsto priklausomai nuo sąveikoje dalyvaujančių dalelių masių. Šis efektas yra vadinamas stabdomąja sugertimi [4]. Elektronui taip sąveikaujant su elektromagnetine spinduliuote, jo energija auga iki tam tikros vertės, kuri yra nulemiama kito efekto – stabdomojo spinduliavimo [4], tai yra energijos nuostolių dėl elektrono smūgiu su jį supančiomis kitomis dalelėmis (elektronais ir atomais). Šių smūgių metu elektronas perduoda savo energiją medžiagai, kuri dėl to pradeda šilti, lydytis ir garuoti.

Elektromagnetinės spinduliuotės sugertis yra apibūdinama koeficientu α , kuris matuoja, kiek spinduliuotės buvo sugerta tam tikrame medžiagos atstume ir yra glaudžiai susietas su ekstinkcijos koeficientu:

$$\alpha = \frac{4\pi\kappa}{\lambda}, \quad (2)$$

kur λ – bangos ilgis. Bangai perėjus pro medžiagą, ši yra dalinai sugeriamas remiantis Bero – Lamberto dėsnium:

$$I(z) = I_0(1 - R)e^{-\alpha z}, \quad (3)$$

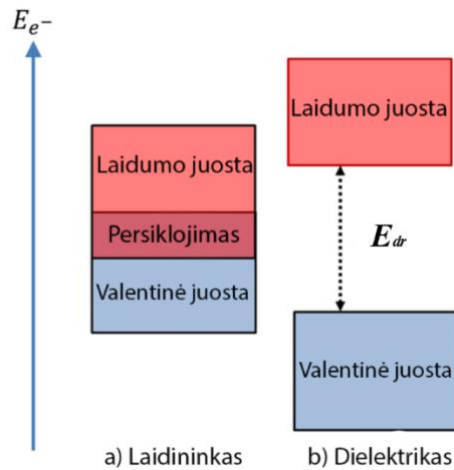
kur I – elektromagnetinės spinduliuotės intensyvumas, $I(z)$ – tos pačios spinduliuotės intensyvumas po tam tikro ilgio sklidimo z terpėje. Todėl medžiagos paviršiuje spinduliuotės intensyvumas yra didžiausias, o skverbiantis gilyn į medžiagą, intensyvumas dėl sugerties eksponentiškai mažėja. Gylis, per kurį lazerio spinduliuotė susilpnėja $1/e$ kartų (apie 2,7) vadinamas sugerties gyliu ir išreiškiamas atvirkščiai proporcingu sugerties koeficientui [4]:

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

Jeigu šviesa į medžiagą krinta ne statmenai, sugerties sąlygos pasikeičia. Medžiagos ir lazerio spinduliuotės sąveikos kampas bei paviršiaus būklė daro įtaką krintančios šviesos sugerčiai [9]. Kalbant apie lazerio sąveiką su medžiaga, nuo pluošto sklidimo kampo priklauso kokia dalis šviesos bus sugerta medžiagoje, ir kokia atspindėta. Lazerinio apdirbimo metu medžiagai sušilus jos atspindžio koeficientas mažėja [10]. Tuo tarpu medžiaga, kuri stipriai atspindi esant žemoje temperatūroje, gali stipriai sugerti spinduliuotę aukštoje temperatūroje [4].

2.2 Sugertis dielektrikuose

Stiklas yra dielektrinė medžiaga laidumo juostoje neturinti laisvųjų elektronų. Juos reikia sugeneruoti išlaisvinant elektronus iš valentinės juostos. Palyginimui, laidumo ir valentinės juostos persikloja laidinikuose, tačiau dielektrikuose šios juostos yra atskirtos draustinės juostos tarpu E_{dr} , kur negali egzistuoti jokios dalelės (žr. 2.1 pav.).



2.1 pav. Laidininkų ir dielektrinių medžiagų energijos juostos, kur E_{e^-} yra elektrono energija, o E_{dr} – draustinių juostų energija [11].

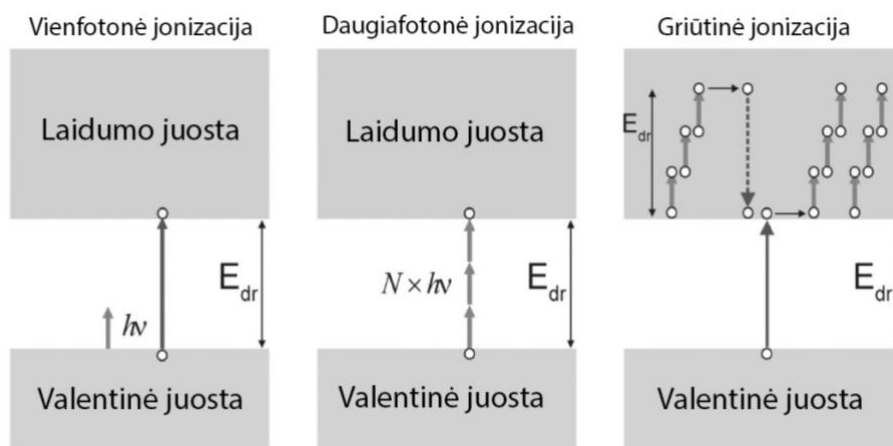
Dielektrikuose sugertis paremta laisvųjų krūvininkų generavimu ir elektromagnetinės spinduliuotės sugertimi juose [4]. Siekiant elektronus perkelti iš valentinės į laidumo juostą elektronams reikia suteikti energijos kiekį lygų arba didesnę draustiniams energijų tarpui, o elektronas gali sugerti energiją dviem būdais – tiesiškai ir netiesiškai (žr. 2.2 pav.). Netiesiniu atveju sugertis gali vykti tik esant didelėms fotonų energijoms, kurios atitiktų draustinių energijų tarpą. Tai galima įvertinti pagal šią formulę:

$$\frac{h\omega}{2\pi} \geq E_{dr}, \quad (5)$$

kur $h\omega/2\pi$ – fono energija, h – Planko konstanta, ω – bangos dažnis. Dielektrikuose fotonų sugerties metu pasiekiamas kritinis krūvininkų tankis ir įvyksta medžiagos optinis pramušimas, o dielektrikas optinėmis savybėmis tampa panašus į laidininką. Dėl tolimesnės medžiagos ir spinduliuotės sąveikos, medžiaga šyla ir galiausiai įvyksta faziniai medžiagos virsmai [4].

2.3 Tiesinė ir daugiafotonė jonizacija

Dielektrinėse medžiagose fotonų sugertis gali pasireikšti tiesiškai, kai sugeriamas tik vienas fotonas, arba daugiafotonine forma, kai sugeriami keli fotonai. Kokios sugerties formos bus dominuojančios, priklausys nuo fono energijos lygio ir spinduliuotės intensyvumo. Jeigu fono energija yra didesnė nei draustinių juostų tarpas, tai perteklinė energija virsta išlaisvinto elektrono kinetine energija. Kita vertus, esant didesniems bangos ilgiams (mažesnė fono energija nei draustinių energijų tarpas) tiesinė sugertis nebegali vykti [5, 9].



2.2 pav. Fotonų sugerties ir elektronų išsilaisvinimo iš valentinės juostos mechanizmai, kur E_{dr} - draustinių juostų energija [4].

Daugiafotonė sugertis vyksta kuomet yra didelis lazerinės spinduliuotės dažnis ir didelis pluošto intensyvumas, tuomet vienu metu valentinėje juostoje yra sugeriami keli fotonai, o tam gali būti panaudoti keli elektronai. Norint, kad šis procesas įvyktų, suminė fotonų energija turi viršyti draustinį energijų tarpą (E_{dr}) tarp valentinės ir laidumo juostų [12]. Nors energija, susijusi su kiekvienu fotonu, yra mažesnė už jungties disociacijos energiją, ryšio nutraukimas yra pasiekiamas sugeriant du arba daugiau fotonų [6].

2.4 Griūtinė ir smūginė jonizacija

Laisvas elektronas, gali sąveikauti su išoriniu elektromagnetiniu lauku. Taigi, jo energija didės. Elektrono energijai viršijus atomo jonizacijos energiją, jis gali smūgiškai jonizuoti atomą ir taip išlaisvinti elektroną iš valentinės juostos (žr. 2.2 pav.). Šio proceso rezultatas yra du arti laidumo juostos minimumo esantys elektronai. Kiekvienas išlaisvintas elektronas gali irgi sugerti lazerinės spinduliuotės energiją vykstant stabdomosios sugerties efektui ir galiausiai išlaisvinti kitus elektronus. Toks laisvų elektronų skaičiaus augimas dėl smūginės jonizacijos yra vadinamas griūtine jonizacija.

Griūtinei jonizacijai vykti reikia elektronų, kurie būtų laidumo juostoje. Tokie elektronai gali atsirasti iš lengvai jonizuojamų priemaišų, termiškai sužadintų krūvininkų [13]. Tam, kad vyktų griūtinė jonizacija, smūginės jonizacijos metu elektronų skaičius turi eksponentiškai išaugti.

3. Lazerinis mikroapdirbimas

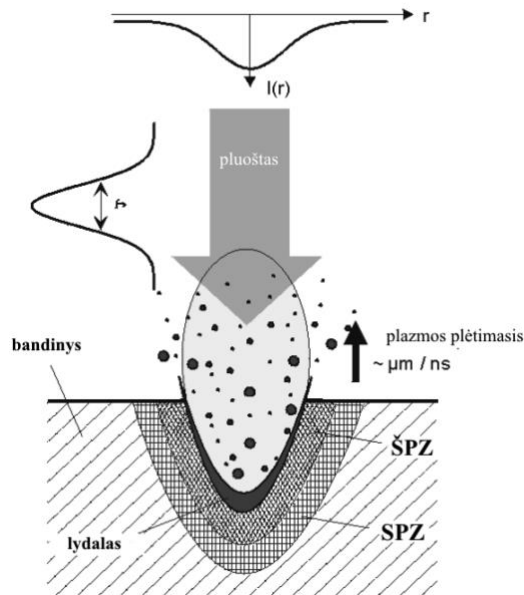
3.1 Lazerinė abliacija

Mikrostruktūrų poreikis atsirado ne tik dėl gausaus mikroelektronikos poreikio, bet ir dėl telekomunikacijų, šiuolaikinių matavimo sistemų, eismo ir medicinos sričių tobulėjimo. Kalbant apie mikrolęšių matricas, jos yra plačiai naudojamos optinio ryšio srityje ir optoelektronikoje. Vienas iš labiausiai paplitusių gamybos būdų apima įprastą fotolitografijos procesą [14]. Egzistuoja ir kiti gamybos būdai, pavyzdžiui, elektronų spindulio litografija ar formavimas lazeriu [15].

Daugelis minėtų technologijų pasižymi sudėtingais procesais ar reikalauja specialių medžiagų. Lazerinis medžiagų struktūrizavimas (žr. 3.1 pav.) turi tam tikrų pranašumų, lyginant su minėtais metodais: bekontaktis submikroninis apdirbimas, lazerio impulsai gali būti perduoti per tankią medžiagą, bandinio geometrija nėra apribota, didelis gylio ir pločio santykis [16]. Nors ši technologija ir nėra pati greičiausia, tačiau pasižymi tuo, kad yra nekontaktinė ir mechaniškai nesidėvinti, lyginant su tradiciniais mechaniniais metodais. Taip pat yra didelis apdirbimo tikslumas (pluošto matmenų eilės), nepriklausomai nuo medžiagos kietumo, mažas paviršiaus šiurkštumas (submikrometrinis) bei proceso universalumas [17].

Norint lazerio spinduliuote apdirbti medžiagą, reikia viršyti abliacijos slenkstinę energijos tankį F_{th} . Bet kurio bandinio abliacijos procesui didžiausią įtaką daro jo atspindžio ir sugerties koeficientai, termodinaminės savybės [16]. Šios medžiagos savybės lemia, kokia dalis į medžiagą kritusių lazerio impulsų energijos yra sugerama medžiagos paviršiuje. Regimojoje srityje neskaidrių ir skaidrių medžiagų sugerties mechanizmai gali skirtis, o jis priklausys nuo pačios medžiagos savybių [16].

Femtosekundiniai lazerio impulsai, kurie yra trumpesni, palyginus su elektrono ir fonono relaksacijos trukme, geba kokybiškiau apdirbti medžiagą su mažesniu terminiu pažeidimu [16]. Femtosekundinių impulsų atveju elektronai yra sužadinami akimirksniu ir pasiekia šiluminę pusiausvyrą. Dėl mažos šiluminės talpos jie gali pasiekti labai aukštą pereinamojo laikotarpio temperatūrą ($>10^3$ K). Galima pasinaudoti dviejų temperatūrų modeliu aprašant fotonų ir medžiagos sąveiką. Jis aiškina, kad elektronų temperatūra greitai pakyla per kelias femtosekundes, o gardelės temperatūra kyla lėčiau dėl šiluminės difuzijos proceso, kuris, priklausomai nuo medžiagos savybių, gali užtrukti nuo dešimčių iki šimtų pikosekundžių [16].

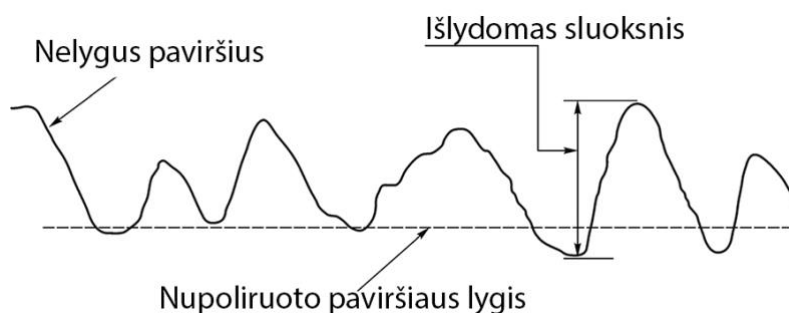


3.1 pav. Impulsinės lazerinės abliacijos schema. $I(r)$ – erdvinis intensyvumo pasiskirstymas, r – erdvinė koordinatė, τ – impulso trukmė, ŠPZ – šilumos paveikta zona, SPS – smūginės bangos paveikta zona [16].

3.2 Lazerinis poliravimas

Kuomet lazerinė spinduliuotė yra sugerama stiklo, jis pradeda šilti, lydytis ir garuoti. Medžiagos garavimas yra naudingas jei norime koreguoti paviršiaus formą, tačiau poliravimo metu medžiaga turi tik persilydyti, o ne garuoti [11, 12]. Trys pagrindiniai rodikliai, padedantys įvertinti paviršiaus apdirbimo procesą, yra topografinė kokybė, funkcionalumas ir atsparumas pažeidimams [2]. Topografinę kokybę galima vertinti stebint optiškai pasinaudojus mikroskopu ar profilometru. Stebint paviršiaus kokybę ir įvertinus jo šiurkštumą galima nuspręsti ar jis bus tinkamas planuotam pritaikymui. Na ir jei paviršiaus kokybė yra atitinkanti lūkesčius, jis turi praeiti atsparumo pažeidimams testą. Atitikus visiems trimis kriterijams apdirbimo procesas laikomas tinkamu.

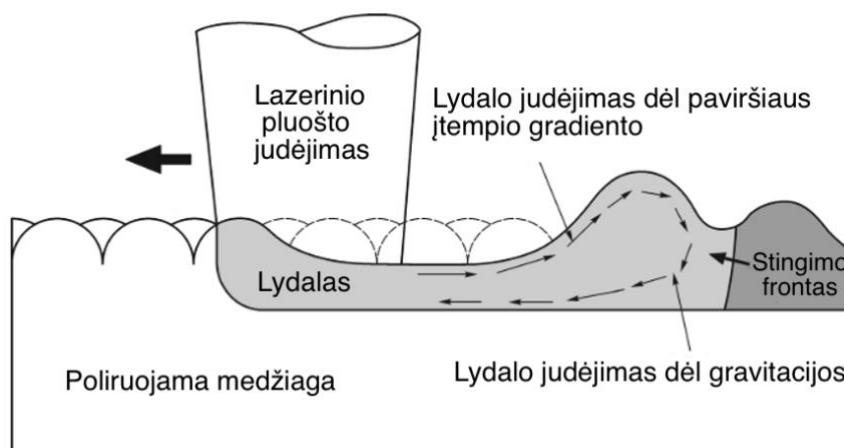
Poliravimo mechanizmus galima suskirstyti į dvi kategorijas: negilus perlydimas (angl. shallow surface melting (SSM)) ir gilus perlydimas (angl. surface over melt (SOM)) [19]. Pirmasis negilaus perlydymo mechanizmas išlydo paviršiaus iškilimus, kurie veikiami gravitacijos ir kapiliarumo reiškinių subėga į daubas ir jas užpildo [2]. Tokiu būdu paviršius pasidaro lygesnis, tačiau pagrindinė jo forma nėra pakeičiama (žr. 3.2 pav.). Jeigu vyksta gilus



3.2 pav. Negilaus paviršiaus perlydymo poliravimo mechanizmas [2].

perlydymo procesas, poliravimo metu susidaro lydalo srautas, kurio stingimo frontas juda priešinga kryptimi nei lazerio pluoštas. Šiuo atveju gali susidaryti daugiau paviršiaus nelygumų negu buvo prieš poliravimą.

Naudoti negilaus perlydymo mechanizmą yra optimalus pasirinkimas proceso efektyvumo atžvilgiu [2]. Prieš naudojant šį mechanizmą reikėtų žinoti paviršiaus formą ir tikslią pluošto fokuso vietą, nes keičiantis pastarajam kinta ir energijos tankis paviršiuje. Kintant energijos tankiui gali kisti perlydymo mechanizmas, dėl ko gali formuotis paviršiaus nelygumai (žr. 3.3 pav.) [14, 15].



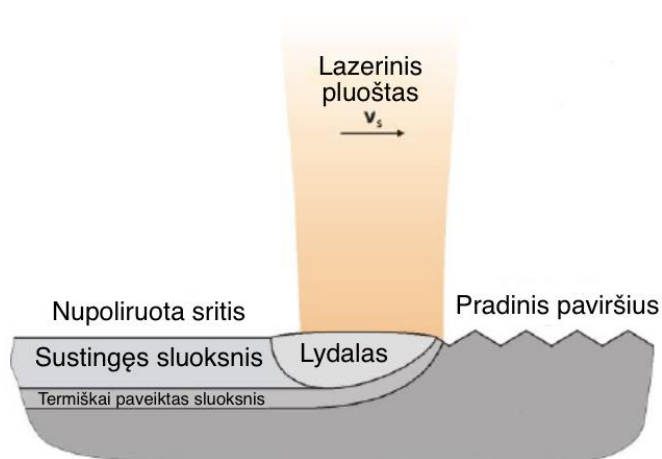
3.3 pav. Periodinių struktūrų formavimasis vykstant gilaus perlydymo mechanizmui [20].

Gilaus perlydymo mechanizmas matomas 3.3 paveiksle. Šiuo metu perlydomas sluoksnis yra gilesnis negu žemiausios paviršiaus įdubos. Tai reiškia, kad susidaro lydalo baseinas, kuris gali judėti sukeliant paviršiaus formos pakitimus. Dėl egzistuojančių temperatūrų skirtumo ir pluošto judėjimo, lydalo srautas juda priešinga kryptimi nei pluoštas dėl paviršiaus įtempio gradiento [21]. Artėjant prie stingimo zonos, išnyksta gradientas ir lydalo srautas yra stabdomas paviršiaus įtempio ir gravitacijos jėgų, dėl kurių lydalo turėtų relaksuoti iki lygaus paviršiaus [20]. Tačiau lydalo relaksacija į lygų paviršių yra stabdoma skysčio klampumo. Jei relaksacijos trukmė yra didesnė nei lydalo stingimo trukmė, paviršiuje

susiformuoja periodinės struktūros, kurios bendrai gali didinti šiurkštumą [20]. Atliekant poliravimo eksperimentus reikia išvengti gilaus paviršiaus perlydymo ir dirbti tik dalinai išlydyto paviršiaus režime.

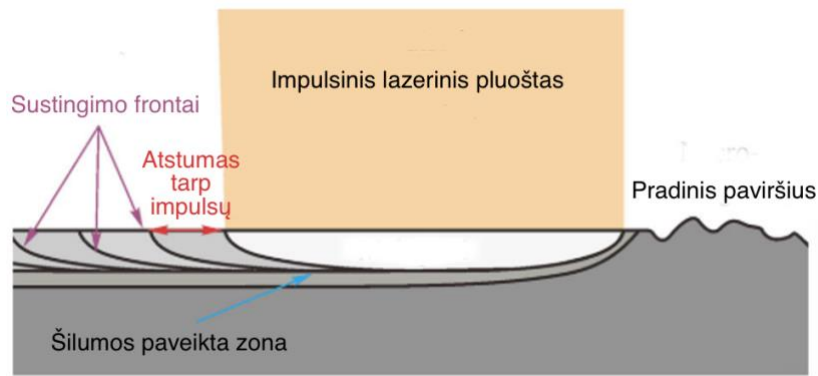
3.3 Poliravimas įvairios veikos lazeriais

Lazerinis poliravimas gali būti atliekamas tiek su impulsiniais, tiek su nuolatinės veikos lazeriais [2]. Didesnių paviršių poliravimui dažniausiai yra naudojami nuolatinės veikos lazeriai, toks procesas vadinamas makropoliravimu (žr. 3.4 pav.) [22]. Naudojant šį poliravimo procesą stiklas gali būti perlydomas 10 – 80 μm gylio ribose, tačiau paviršius gali įgauti papildomą banguotumą [22]. Poliravimo procesui yra svarbus pradinis paviršiaus šiurkštumas, skenavimo greitis, pluošto dydis bei vidutinė lazerio galia. Paviršiaus šiurkštumas priklauso nuo medžiagos termofizikinių savybių, tokių kaip šilumos laidumas, paviršiaus įtempis, klampumas, lydymosi ir garavimo temperatūra, homogeniškumas. Siekiant pagerinti kokybę proceso metu pluoštas gali būti išfokusuojamas [23].



3.4 pav. Makropoliravimo schema su nuolatinės veikos lazeriu [22].

Siekiant tikslesnio paviršiaus perlydymo ir mažesnio šiurkštumo, galima pasitelkti mikropoliravimo procesą su impulsinės veikos lazeriu (žr. 3.5 pav.) [22]. Svarbiausi šio metodo parametrai yra impulso trukmė ir spinduliuotės intensyvumas. Mikropoliravimas yra tikslus procesas, kurio metu lydymosi gylis yra 0,5 – 5 μm [24]. Proceso metu išsilydžiusi medžiaga sukietėja prieš kitam lazerio impulsui pasiekiant paviršius ir sukuria naują lydalo baseinėlį. Kol medžiaga yra išsilydžiusi, paviršius išsilygina ir sukietėjus tampa lygesnis [22]. Šis procesas yra svarbus ir naudingas dėl jo gebėjimo išlyginti mažus plotelius nenaudojant jokių abrazyvinių medžiagų, nesukuriant šiukšlių ir nereikalingo šilumos patekimo giliau į medžiagą.



3.5 pav. Mikropoliravimo schema naudojant impulsinės veikos lazerį [22].

3.5 Lazerinių parametų įtaka apdirbimo procesui

Vienas iš pagrindinių apdirbimo rezultatą nusakančių parametų yra lazerio impulso trukmė τ [16]. Galima svarstyti du kraštutinius atvejus. Ilgiems impulsams (nanosekundiniai ir ilgesni lazerio impulsai), t. y. impulsams, kurie yra gerokai ilgesni už elektronų ir fononų relaksacijos laiką, atsiranda lokali šiluminė pusiausvyra tarp elektronų ir gardelės. Atlėkę į medžiagos paviršių impulsai pašalina dalį medžiagos, kuri išlekia $\mu\text{m}/\text{ns}$ greičiu (žr. 3.1 pav.) [16]. Tai reiškia, kad sekantys lazerio impulsai yra dalinai ekranuojami abliacijos pliūpsnio, o viso abliacijos proceso efektyvumas sumažėja. Dar vienas trūkumas apdirbant ilgais lazerio pluošto impulsais yra aplink kraterį atsirandančios užvartos.

Apdirbimo metu lazerio energijos intensyvumas yra vienas iš svarbiausių parametų, nes nuo to priklauso kiek šilumos gaus medžiaga. Be kita ko, lazerio galia, impulsų pasikartojimo dažnis ir jų trukmė, pluošto dydis, sąveikos su medžiaga trukmė taip pat daro įtaką rezultatams [2]. Lazerio impulso energija ir pluošto diametras nusako bendrą dydį – energijos tankį. Tinkamai pasirenkant šį dydį poliravimo metu galima sumažinti pradinį paviršiaus šiurkštumą iki 85 procentų [25]. Energijos tankio F vertę galima paskaičiuoti šia formule:

$$F = \frac{2E_p}{\pi r_0^2}, \quad (7)$$

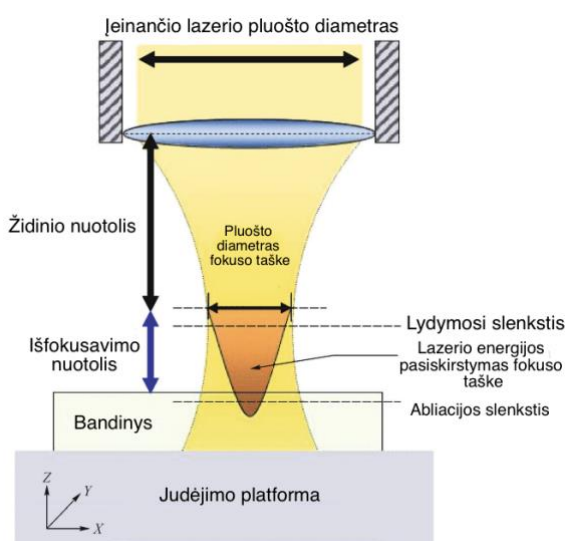
kur E_p yra lazerinio impulso energija, r_0 yra pluošto radiusas. Per mažas energijos tankis neišlydytų medžiagos arba išlydytų per mažai. Tuo tarpu per didelis energijos tankis gali nulemti nereikalingą paviršiaus perlydymą arba net abliaciją – medžiagos pašalinimą [25].

Dažniausiai poliravimo metu naudojamos impulso trukmės yra mikrosekundžių [26] ir nanosekundžių [27] eilės, bet populiarėja ir poliravimas su femtosekundžių trukmės impulsais

[5]. Tyrimai rodo, kad naudojant ilgesnius impulsus galima pasiekti geresnius paviršiaus šiurkštumo rezultatus [28]. Pavyzdžiui, poliruojant titano paviršių susidaro didesni lydalo baseinai, o tai leidžia pasiekti geresnį rezultatą. Vėlgi, naudojant ilgesnius impulsus susidaro ir didesnė terminio poveikio zona. Galų gale, paviršiaus poliravimo rezultatai priklauso nuo impulso trukmės ir kiekvienam paviršiui gali būti skirtinga optimali impulso trukmė.

Optimizuojant medžiagos abliacijos ir poliravimo procesą taip pat yra keičiamas ir impulsų persiklojimas. Tiek per didelis, tiek per mažas impulsų persiklojimas netenkina galutiniame rezultate, nes paviršiaus šiurkštumas būna per didelis. Ne optimalus impulsų persiklojimas lemia prastos kokybės medžiagos abliaciją. Poliravimo atveju per mažas atstumas tarp impulsų inicijuoja abliaciją, o per didelis – didina paviršiaus banguotumą [2].

Pluošto fokusavimo sąlygos taip pat daro didelę įtaką poliravimo procesui ir jo rezultatui. Jeigu pluošto dydis bandinio atžvilgiu kinta proceso metu, kinta ir energijos tankis, o kartu ir galutinis rezultatas. Vėlgi, didesnis energijos tankis gali lemti abliacijos pradžia, o dėl per mažo energijos tankio gali būti išlydytas per mažas medžiagos sluoksnis arba išlydytas netolygiai. Keičiant atstumą tarp lazerio pluošto sąsmaukos ir bandinio (išfokusavimo atstumą), galima kontroliuoti poliravimo procesą (žr. 3.6 pav.) [29].



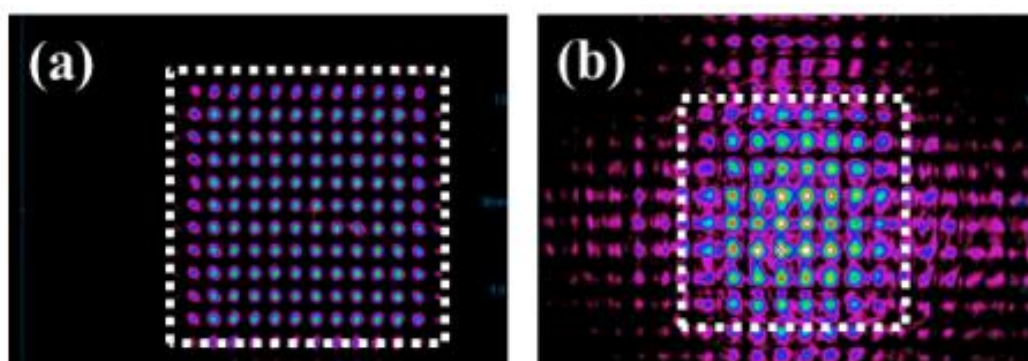
3.6 pav. Lydimosi ir abliacijos slenkščiai skirtingiems židinio nuotolio poslinkiams bandinio atžvilgiu [29].

4. Optinių elementų formavimas lazeriu

Standartiniais mikrolęšių gamybos būdais yra sunku užtikrinti didelį tikslumą ir paprastą gamybos procesą [30]. Vis dar išlieka sunkumų pagaminti didelio tikslumo mikrostruktūras iš stiklo, ypač su lenkais paviršiais. Panaudojus lazerinį apdirbimą galima pasiekti iki ~ 10 μm mikrolęšio diametrą, procesas yra lankstus ir aukštos rezoliucijos, tačiau

reikalaujantis didelių finansinių investicijų [31]. Tuo tarpu litografijos būdu galima pasiekti iki ~ 445 nm diametro mikrolęšius, procesas leidžia kontroliuoti jo formą, tačiau yra pakankamai sudėtingas. Femtosekundinis lazerinės abliacijos procesas yra veiksmingas trimačių mikrostruktūrų gamybos metodas, taikomas įvairioms, sunkiai apdirbamoms medžiagoms, pavyzdžiui stiklui, metalui, keramikai [30].

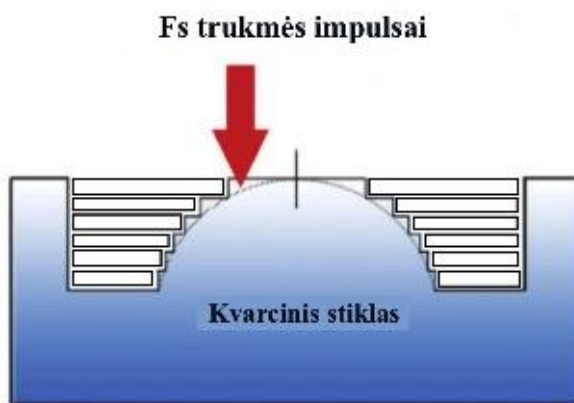
H. K. Choi atliko mikrolęšių matricos formavimą su femtosekundiniu lazeriu ir tolimesnį jos poliravimą su CO₂ lazeriu [32]. Buvo naudojamas 20x didinimo mikroskopinis objektyvas ir formuojami 20 μm bei 40 μm dydžio lęšiuokai. Su 10 mm/s skenavimo greičiu ir 4.2 μJ impulso energija buvo suformuota mikrolęšių matrica, kurios paviršiaus šiurkštumas $S_a = 4,27 \mu\text{m}$. Pasitelkus 12,5 W galios CO₂ lazerio spinduliuotę ir sufokusavus 170 mm židinio nuotolio objektyvu buvo nupoliruotos mikrolęšių matricos paviršius, kurio šiurkštumas sumažėjo iki $S_a = 0,783 \mu\text{m}$. Charakterizuojant pagamintą matricą naudotas He-Ne lazeris. Jo Gauso formos pluoštas praėjęs pro pagamintą matricą tapo panašus į kvadratinės formos pluošto profilį. Charakterizuojant komerciškai parduodamą kvadratinę mikrolęšių matricą yra gaunamas ryškus kvadratinis pluošto profilis (žr. 4.1 pav.), tuo tarpu pagaminta matrica iškreipia vaizdą ir profilis nesigauna taisyklingai kvadratinis, kaip buvo planuota. Nors difrakcijos efektai buvo pagamintoje lęšių matricoje, buvo patvirtinta, kad mikrolęšių matricos charakteristika yra kvadratinis profilis. Autoriaus nuomone, artefaktas atsiranda dėl nepilno masių poliravimo, kai šiurkštumas lemia šviesos difrakciją. Siekdamas sumažinti difrakciją, autorius teigia, kad reikėtų tobulinti poliravimo procesą ir ateityje tuomet pavyktų pasiekti komerciškai parduodamą produkto kokybę. Tai būtų greitas, nesudėtingas ir lankstus būdas dideliais kiekiais gaminti įvairias mikrolęšių matricas.



4.1 pav. Komerciškai parduodamos (a) ir pagamintos mikrolęšių matricos (b) charakterizavimo vaizdas [32].

Pradedant sferinio paviršiaus formavimo procesą, jau reikia žinoti lazerinės sistemos parametrus, su kuriais vieno sluoksnio metu būtų pašalinama norimo storio medžiaga. Kuo

vienas sluoksnis bus plonesnis, tuo pagamintas mikroležis bus tikslesnis, tačiau per plonas sluoksnis lems ilgą apdirbimo procesą [33]. Sluoksnius galima šalinti įvairiais būdais [33], pavyzdžiui pluoštą judinant spirale, taip nesukuriant perėjimo tarp dviejų sluoksnių. Taip pat galima abliuoti sluoksniais (žr. 4.2 pav.). Pradinis paviršiaus šiurkštumas turi gana didelę įtaką galutinei kokybei. Jeigu pradžioje buvo tam tikri stiklo pažeidimai, jau nepavyks išgauti geriausios kokybės [30].



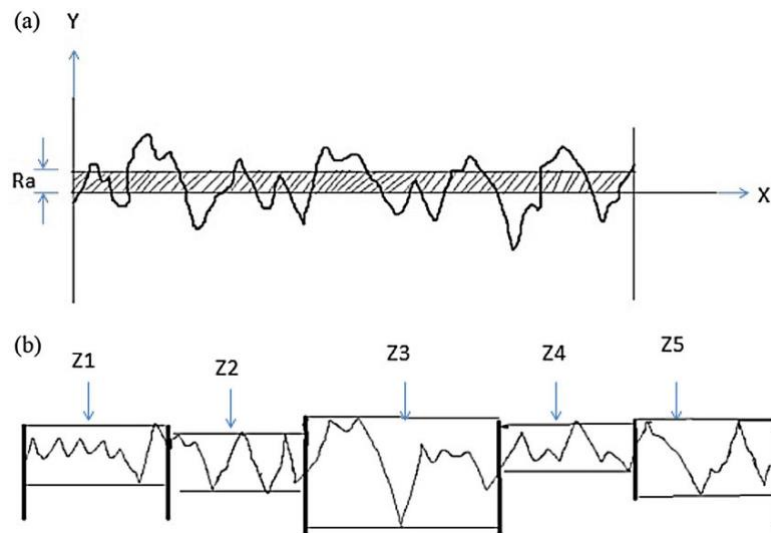
4.2 pav. Sferinio elemento gamybos schema, kuomet medžiaga pašalinama sluoksnis po sluoksniu, adaptuota pagal [34].

5. Optinio paviršiaus vertinimas

5.1 Paviršiaus šiurkštumas

Norint atlikti kokybišką paviršiaus poliravimą, reikia žinoti apie paviršiaus kokybės įvertinimo metodus. Vienas iš pagrindinių apdirbto paviršiaus kokybės įvertinimo būdų yra paviršiaus šiurkštumas [35]. Kiekvienas paviršius turi tam tikrą tekstūrą, kuri pasireiškia smailėmis ir įdubomis. Šios smailės ir įdubos skiriasi aukščiu ir atstumais [35].

Amplitudės parametrai yra svarbiausi parametrai, apibūdinantys paviršiaus topografiją [36]. Jie naudojami pamatuoti vertikalioms paviršiaus nuokrypių charakteristikoms. Aritmetinis vidutinio aukščio parametras yra labiausiai visuotinai naudojamas šiurkštumo parametras bendrai kokybės kontrolei [36]. Jis apibrėžiamas kaip vidutinis absoliutus paviršiaus nelygumų nuokrypis nuo vidutinės linijos per tam tikrą ilgį (žr. 5.1 pav.).



5.1 pav. Vaizdinis aritmetinio aukščio vidurkio vaizdavimas skaičiuojant R_a (a) ir R_z (b) [37].

Šį parametą lengva apibrėžti, nesunku išmatuoti ir jis suteikia gerą bendrą vaizdą apie aukščio svyravimus. Jis nesuteikia jokios informacijos apie bangos ilgi ir nėra jautrus mažiems šiurkštumo profilio pokyčiams. Aritmetinio aukščio vidurkio parametro matematinis apibrėžimas statistiškai [36]:

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i|, \quad (8)$$

kur y_i yra smailės aukštis arba įdubos gylis. Kitas gana paplitęs paviršiaus topografijos amplitudės parametras yra R_z [36]. Šis parametras yra apibrėžiamas kaip vertikalus atstumas tarp aukščiausių smailių ir žemiausių įdubų vidurkis per visą vertinamo profilio ilgį. Jis padeda įsivertinti didžiausius paviršiaus kokybės defektus. Parametras R_q yra vidutinis kvadratinis šiurkštumas [36], kuris parodo aukščio nuokrypių kvadratinį verčių vidurkį, ištrauktą iš šaknies ir apskaičiuotą per visą matavimo ilgį. Šis parametras yra svarbus, nes parodo standartinį paviršiaus šiurkštumo nuokrypį, kas leidžia statistiškai nagrinėti paviršiaus kokybę. R_q yra jautrenis nei R_a parametras dideliems nuokrypiams nuo vidurkio linijos. Matematiškai apibrėžiamas pagal šią formulę [36]:

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2}. \quad (9)$$

Vidutinė kvadratinė vidurkio linija dalina profilį taip, kad kvadratinų nuokrypių suma nuo profilio ilgio būtų lygi nuliui [36].

Situacijose, kai R_a negali būti panaudotas, galima naudoti ploto paviršiaus šiurkštumo vidurkio parametą S_a . Šis parametras S_a yra R_a (linijos aritmetinio vidurkio) išplėtimas iki

ploto. Jis yra išreiškiamas, kaip absoliuti vertė nusakanti kiekvieno taško aukščio skirtumą nuo ploto aritmetinio vidurkio [36].

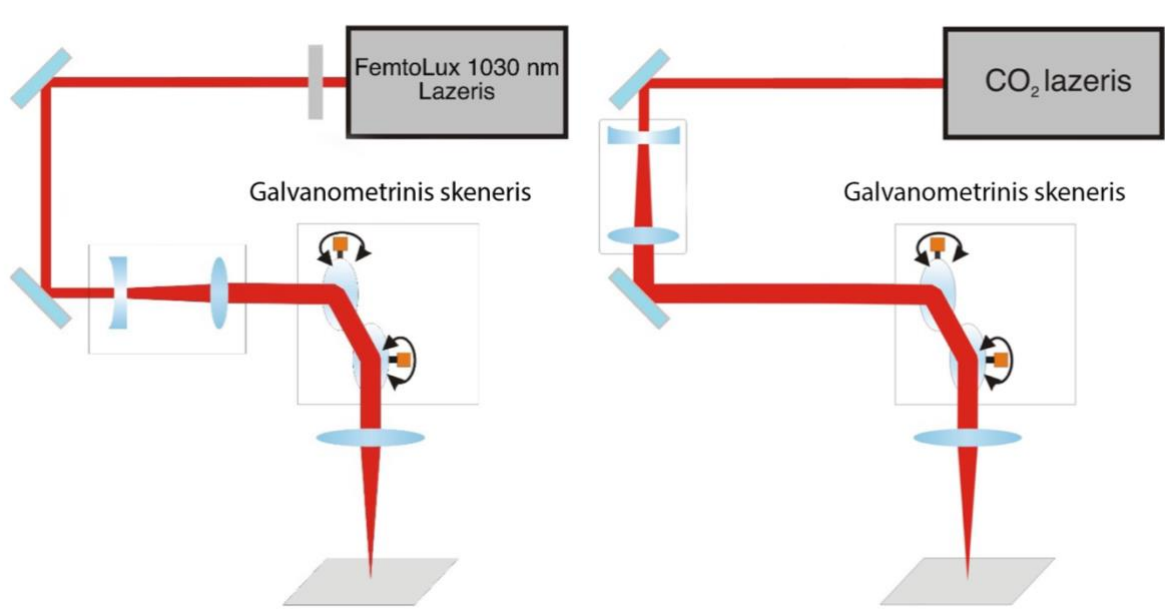
5.2 Optinis paviršius

Norint įvertinti optinę paviršiaus kokybę, galima pasiremti paviršiaus šiurkštumo matavimu šviesos sklaidos metodu. Tai yra greitai besivystantis ir sėkmingai taikomas metodas, ties kuriuo buvo atlikta daugybė tyrimų ir leido jį padaryti vienu iš pagrindinių būdų matuojant optinių komponentų paviršiaus kokybę. Optinių paviršių šviesos sklaidos matavimo metodas apima kampu apibrėžtą ir pilnutinės integruotos sklaidos matavimą [38]. Kampu apibrėžto sklaidos matavimo (angl. Angle Resolved Scattering, ARS) metu matuojamas šviesos intensyvumas ir jos sklaidos pasiskirstymas. Lazerio spindulys nukreipiamas į bandinio paviršių, kur jis atsispindi ir išsisklaido. Kai paviršius yra labai glotnus, šviesos intensyvumas daugiausia pasiskirstęs optinio elemento pralaidumo arba atspindžio kryptimi, o kai optinis paviršius yra šiurkštus, atspindžiai yra labiau išsklaidyti[38].

Paviršiaus lygumas yra paviršiaus tikslumo specifikacijos tipas, kuriuo matuojamas plokščio paviršiaus nuokrypis. Šis nuokrypis gali būti išmatuotas naudojant optinį plokščią etaloną, kuris yra aukštos kokybės, labai tikslus plokščias paviršius, naudojamas bandinio plokštumui palyginti. Kai lygus bandomosios optikos paviršius priglundęs prie plokščio optinio etalono, atsiranda juostos, kurių forma lemia tikrinamos optikos paviršiaus lygumą. Jei juostos yra tolygiai išdėstytos, tiesios ir lygiagrečios, tada bandomas optinis paviršius yra toks pat plokščias kaip etaloninis optinis paviršius. Plokštumo nuokrypiai dažnai matuojami bangų vertėmis (λ), kurios yra bandomojo šaltinio bangos ilgio kartotiniai. Viena juosta atitinka $\frac{1}{2}$ bangos. λ lygumas laikomas tipišku, $\lambda/4$ plokštumas laikomas tikslu, o $\lambda/20$ – didelio tikslumo paviršius [39]. Norint paviršių panaudoti optiniams pritaikymams, turi būti bent $\lambda/10$ paviršiaus tikslumas.

6. Eksperimento įranga ir metodika

Atliekant abliacijos eksperimentus (žr. 6.1 pav.) buvo naudojamas femtosekundinis lazeris FemtoLux 30 (Ekspla), kurio bangos ilgis yra 1030 nm, maksimali vidutinė galia 30 W. Galimas pasikartojimo dažnis iki 4 MHz. Buvo naudojama 320 fs lazerio impulsų trukmė. Pluoštas buvo pozicionuojamas bandinio plokštumoje naudojant galvanometrinių skenerių IntelliScan 14 (ScanLab). Fokusuoti pluoštui buvo naudojamas F-theta telecentrinis lęšis su $f = 100$ mm židinio nuotoliu.



6.1 pav. Abliacijos eksperimentų įrangos schema (kairėje) ir poliravimo eksperimentų įrangos schema (dešinėje).

Poliravimo eksperimentuose (žr. 6.1 pav.) buvo naudojamas CO₂ lazeris Diamond E150 150 W (Coherent). Bangos ilgis 10,6 μm, impulsų pasikartojimų dažnis 0,001 – 100 kHz, 3 – 1000 μs trukmės impulsai. Naudojant SCANcube III 14 (ScanLab) galvanometrinių skenerių, lazerio pluoštas buvo pozicionuojamas XY bandinio plokštumoje. Pluoštas fokusuotas Rodenstock objektyvu, kurio židinio nuotolis $f = 250$ mm. Pluošto išfokusavimas atliktas judinant bandinio pozicionavimo stalą Z ašimi (Standa).

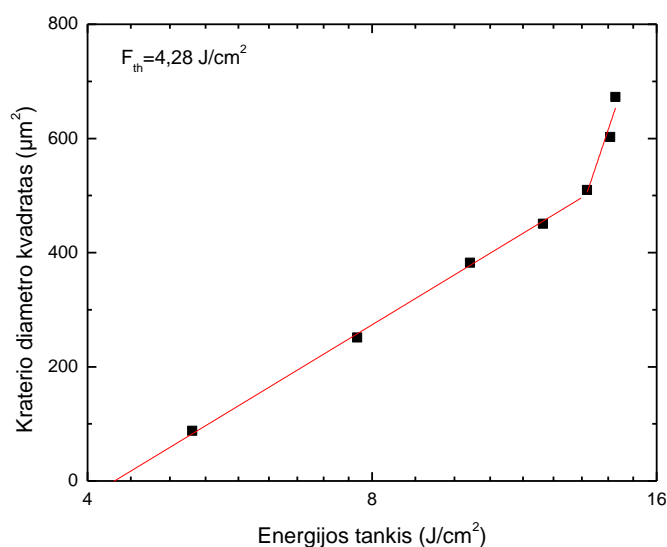
Eksperimentų metu buvo naudojami 6,2 mm storio bei 150 mm kraštinės ilgio kvadrato formos kvarcinio stiklo bandiniai, kurių nepažeisto paviršiaus šiurkštumas buvo $R_a = 9 \text{ nm} \pm 3 \text{ nm}$. Naudotas kvarcinis stiklas pagamintas II metodu, aprašytu literatūros apžvalgoje (žr. 1 skyrių). Pirmoje eksperimentų dalyje (paviršiaus formavimo tyrimuose) atliekant eksperimentus ant kvarcinio stiklo paviršiaus sufokusuotu lazerio pluoštu, buvo abliuojami 3 x 3 mm dydžio kvadratai. Abliacija vyko ant nepažeisto ir ant pažeisto paviršiaus. Pašalinus medžiagą toliau ploteliai buvo matuojami su optiniu profilometru PL μ 2300 (Sensofar). Siekiant optimizuoti eksperimentus, ant paviršiaus buvo abliuojamos skirtingų parametrų rinkinių matricos. Stulpeliuose buvo keičiama galia, o eilutėse skenavimo greitis. Be šių dviejų parametrų buvo keičiamas lazerio pasikartojimo dažnis, atstumas tarp impulsų, vidutinė galia, o parametrų optimizavimo tikslas surasti mažiausią paviršiaus šiurkštumą.

Suradus z padėtį, kuomet pluošto išfrezuotas vieno šūvio krateris yra mažiausias, buvo užfiksuota pozicija kaip pluošto fokusas. Tuomet buvo suformuota kvarcinio stiklo paviršiuje

10 x 9 taškų matrica. Išmatavus matricos kraterių diametrą ir pasinaudojus (10) priklausomybe, buvo rastas abliacijos slenkstis ir pluošto radiusas:

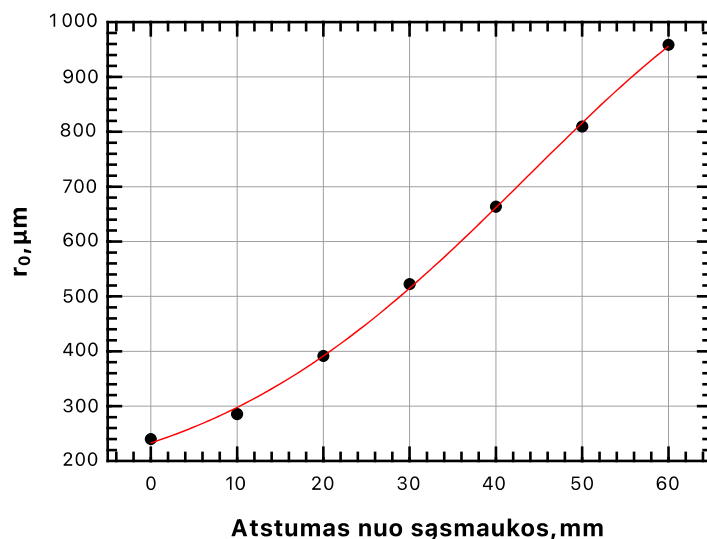
$$2r_0^2 = \frac{D^2}{\ln(E_p/E_{th})}, \quad (10)$$

kur D yra kraterio diametras, r_0 pluošto radiusas $1/e^2$ lygyje, E_p impulso energija, E_{th} slenkstinė abliacijos energija. Apskaičiavus pluošto radiusą $r_0 = 13,5 \mu\text{m}$, o impulso energiją pavertus energijos tankiu buvo atidėta D^2 priklausomybė nuo $\ln(F_{th})$ (žr. 6.2 pav.). Pratęsus aproksimavimo tiesę iki nulio vertės, toje vietoje, kur yra kertama energijos tankio ašis, yra randamas abliacijos slenkstis $F_{th} = 4,28 \text{ J/cm}^2$.



6.2 pav. Suformuotų kraterių diametro kvadrato priklausomybė nuo energijos tankio.

Kadangi eksperimente buvo suplanuota atlikti tyrimus išfokusavus CO_2 lazerio pluoštą, buvo atliktas jo matmenų tyrimas ties skirtingais išfokusavimo atstumais. Suradus z ašies padėtį, kuomet lazerio impulso išabliuotas krateris yra mažiausio diametro, nustatome šią vietą kaip pluošto fokuso padėtį. Tuomet 8,6 – 135,9 W lazerio galios intervale buvo suformuota kvarcinio stiklo paviršiuje 10 x 9 taškų matrica. Išmatavus matricos kraterių diametrą, galima pasinaudoti (10) priklausomybe ir rasti CO_2 pluošto radiusą $r_0 = 240 \mu\text{m}$. Tai yra atliekama ties kiekvienu išfokusavimo atstumu 10 – 60 mm. Pluošto radiuso priklausomybė nuo atstumo iki sąsmaukos pavaizduota 6.3 paveiksle, aproksimuota Gauso pluošto sklidimo laisvoje erdvėje lygtimi.



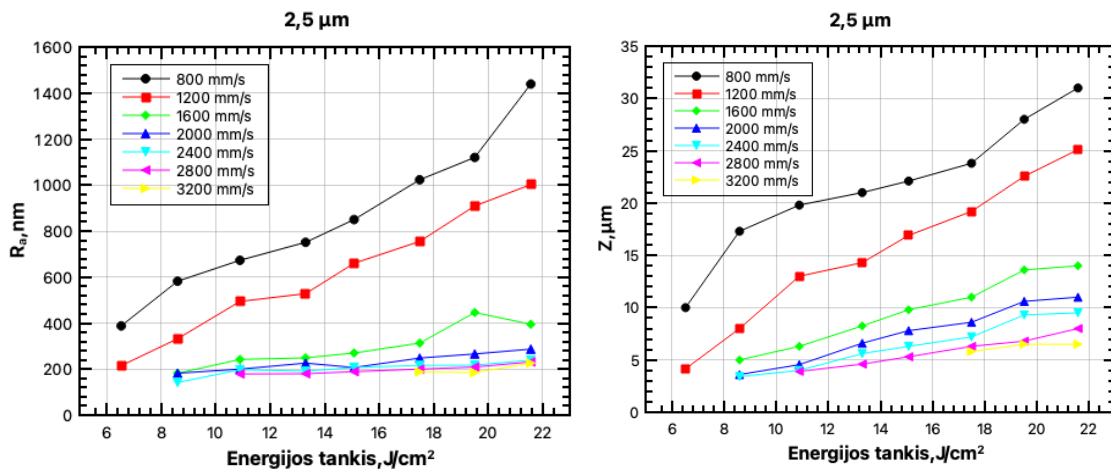
6.3 pav. CO_2 lazerio pluošto radiuso priklausomybė nuo atstumo iki sąsmaukos, aproksimuota Gauso skirstiniu.

7. Rezultatai ir jų aptarimas

7.1 Nepažeisto paviršiaus abliacija

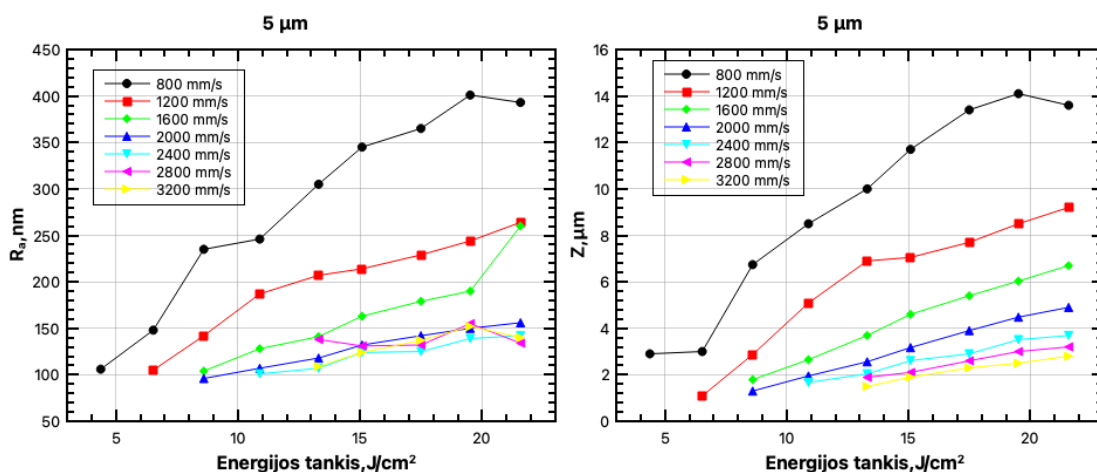
Abliacijos eksperimentai buvo pradėti pasitelkus 209,3 kHz fiksuotą lazerio pasikartojimo dažnį. Pasirinkti naudoti 2,5, 5, 7,5 ir 10 μm atstumai tarp skenavimo linijų. Naudotas skenavimo greitis 800 – 3200 mm/s ir 3,32 – 16,36 W vidutinė lazerio galia. Šie parametrai buvo pasirinkti neatsitiktinai. Buvo atliktas trumpas pirminis tyrimas, kurio metu buvo abliuojami ploteliai stiklo paviršiuje ir įvertinus paviršiaus šiurkštumą buvo suformuoti eksperimento parametrai.

Pirmiausia buvo tiriama, kaip atstumas tarp skenavimo linijų daro įtaką paviršiaus kokybei. Pasirinktas mažiausias atstumas tarp skenavimo linijų, t.y. 2,5 μm ir buvo išabliuota matrica, kurioje kito energijos tankis ir skenavimo greitis. Paviršiaus šiurkštumo ir pašalinto gylio priklausomybės nuo energijos tankio pavaizduotos 7.1 paveiksle. Iš rezultatų yra matoma, kad mažiausias paviršiaus šiurkštumas $R_a = 142 \text{ nm}$ ir pašalintas gylis $Z = 3,4 \mu\text{m}$ yra gaunamas su mažesniais energijos tankiais ir didesniais skenavimo greičiais. Tai parodo, kad siekiant dar labiau pagerinti rezultatus, reikia mažinti energijos tankį ir didinti skenavimo greitį, tačiau taip darant medžiaga nėra tolygiai pažeidžiama. Dėl to yra atliekamas kitas eksperimentas, kur yra padvigubinamas atstumas tarp skenavimo linijų.



7.1 pav. Paviršiaus šiurkštumo R_a (kairėje) ir išabliuoto gylio Z (dešinėje) priklausomybės nuo energijos tankio esant 209,3 kHz pasikartojimo dažniui ir 2,5 μm atstumui tarp skenavimo linijų.

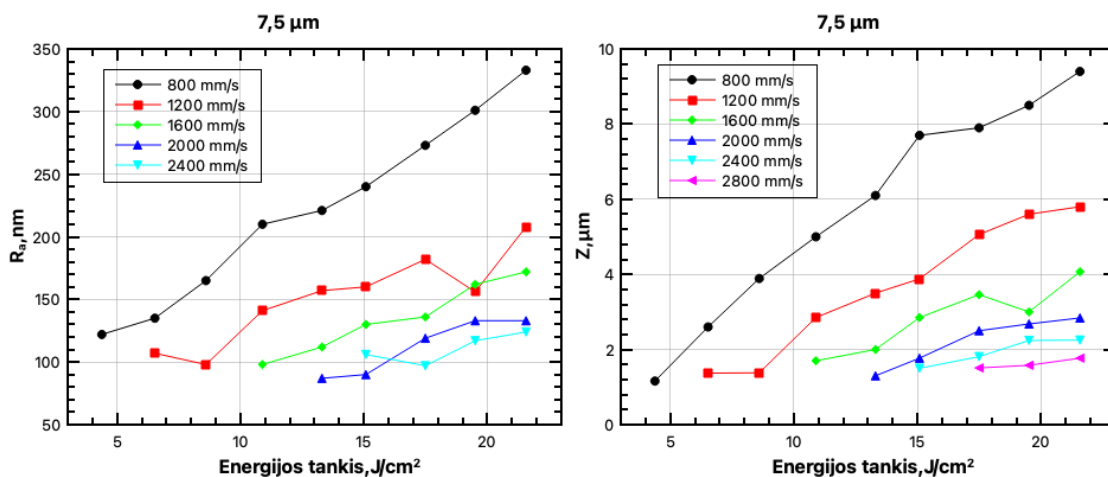
Padidinus atstumą tarp linijų iki 5 μm yra kartojami abliacijos eksperimentai, o jų rezultatai yra pateikti 7.2 paveiksle. Iš paviršiaus šiurkštumo ir pašalinto gylio priklausomybių nuo energijos tankio matosi, kad yra gaunamas mažesnis paviršiaus šiurkštumas $R_a = 96 \text{ nm}$ ties 2000 mm/s skenavimo greičiu ir 8,6 J/cm² energijos tankiu. Pašalintas gylis taip pat gaunamas mažesnis $Z = 1,09 \mu\text{m}$ ties 1200 mm/s skenavimo greičiu ir 6,53 J/cm² nei matricoje su 2,5 μm atstumu tarp skenavimo linijų. Šiuo atveju yra pasiekiamas mažesnis energijos tankis vieniniam plotui kas leidžia gauti geresnę paviršiaus kokybę. Sekant tą pačią tendenciją, jog didinant atstumą tarp skenavimo linijų yra gaunamas minimalus mažesnis paviršiaus šiurkštumas, toliau jis yra didinamas iki 7,5 μm .



7.2 pav. Paviršiaus šiurkštumo R_a (kairėje) ir išabliuoto gylio Z (dešinėje) priklausomybės nuo energijos tankio esant 209,3 kHz pasikartojimo dažniui ir 5 μm atstumui tarp skenavimo linijų.

Vėl padidinus atstumą tarp skenavimo linijų iki 7,5 μm atliekamas identiškas abliacijos eksperimentas ir rezultatai pateikiami 7.3 paveiksle. Šioje parametrų matricoje yra pasiekiamas

dar mažesnis paviršiaus šiurkštumas $R_a = 87$ nm ties tuo pačiu 2000 mm/s skenavimo greičiu tik didesniu $13,3 \text{ J/cm}^2$ energijos tankiu (1 lentelė). Pašalintas gylis nėra pasiekiamas mažesnis nei $Z = 1,09 \text{ } \mu\text{m}$ iš eksperimento su $5 \text{ } \mu\text{m}$ atstumu tarp skenavimo linijų. Galima sakyti, kad tendencija išlieka ta pati – ties kiekvienu skenavimo greičiu didinant energijos tankį didėja ir paviršiaus šiurkštumas. Tai vyksta dėl to, kad didėjant energijos tankiui abliacijos metu yra pašalinamas didesnis medžiagos kiekis, kas lemia didesnius paviršiaus pažeidimus. Kadangi didėja atstumas tarp gretimų skenavimo linijų, 3200 mm/s skenavimo greitis jau yra per didelis pašalinti medžiagą ir ji yra tik netolygiai pažeidžiama.

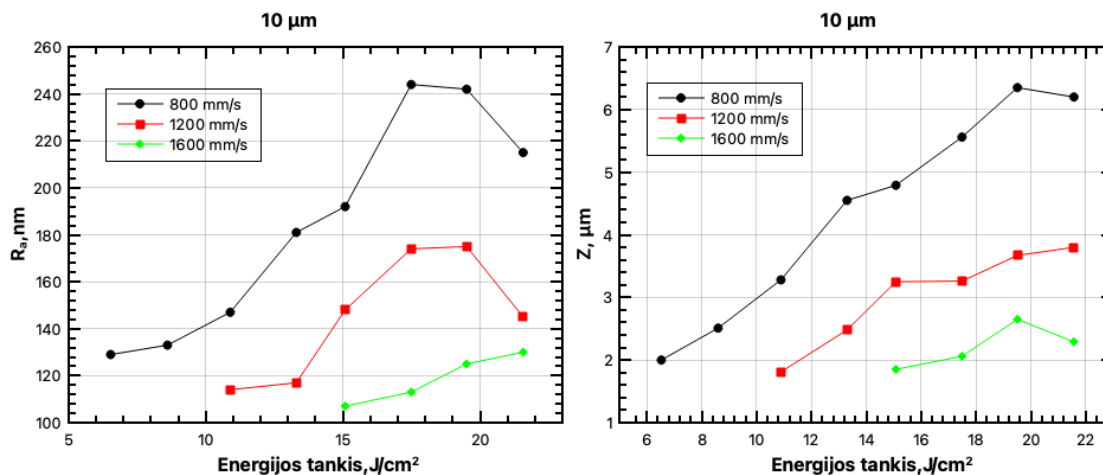


7.3 pav. Paviršiaus šiurkštumo R_a (kairėje) ir išabliuoto gylio Z (dešinėje) priklausomybės nuo energijos tankio esant 209,3 kHz pasikartojimo dažniui ir $7,5 \text{ } \mu\text{m}$ atstumui tarp skenavimo linijų.

Analizuojant paskutinį eksperimentą su didžiausiu $10 \text{ } \mu\text{m}$ atstumu tarp gretimų linijų, rezultatai gali būti matomi 7.4 paveiksle. Šiame eksperimente atkrito net trys skenavimo greičiai (2800 mm/s, 2400 mm/s ir 2000 mm/s), su kuriais jau negalima pasiekti lygaus paviršiaus be defektų, nes neužtenka energijos tankio tolygiai išgarinti medžiagą. Gautas mažiausias paviršiaus šiurkštumas $R_a = 107$ nm ties 1600 mm/s skenavimo greičiu, o mažiausias pašalintas sluoksnio storis $Z = 1,5 \text{ } \mu\text{m}$. Padidėjęs minimalus eksperimento paviršiaus šiurkštumas bei mažėjantis galimų skenavimo greičių skaičius rodo, kad toliau didinti atstumo tarp gretimų linijų, nei yra gautas ties $7,5 \text{ } \mu\text{m}$ atstumu tarp skenavimo linijų, nėra tikslo, nes jau nebus pasiektas geresnis rezultatas dėl susiformavusių atsiskyrusių periodinių griovelinių.

Pastebėta, kad vieno sluoksnio pašalinamas storis nesumažėja žemiau negu $1 \text{ } \mu\text{m}$. Kai naudojamas didesnis greitis, lazerio pluoštas paveikia paviršių trumpesnę laiko tarpą. Tai reiškia, kad stiklo paviršius turi mažiau laiko energijai sugerti, todėl galimi paviršiaus deformacijų atsiradimai kurie gali sukelti šiurkštumą, yra mažesni. Tai derinant su energijos tankiu, galima pasiekti mažą paviršiaus šiurkštumą.

Apibendrinant visus keturis skirtingus atstumus tarp skenavimo linijų galima sakyti, kad 7,5 μm atstumas tarp linijų yra šiame tyrime geriausias pasirinkimas, nes gaunamas mažiausias paviršiaus šiurkštumas $R_a = 87 \text{ nm}$. Yra svarbu pasiekti kuo mažesnę pirmo pašalinto sluoksnio paviršiaus šiurkštumą, nes skenuojant antrąjį ir tolimesnius sluoksnius, šiurkštumas pradės akumuliuotis.



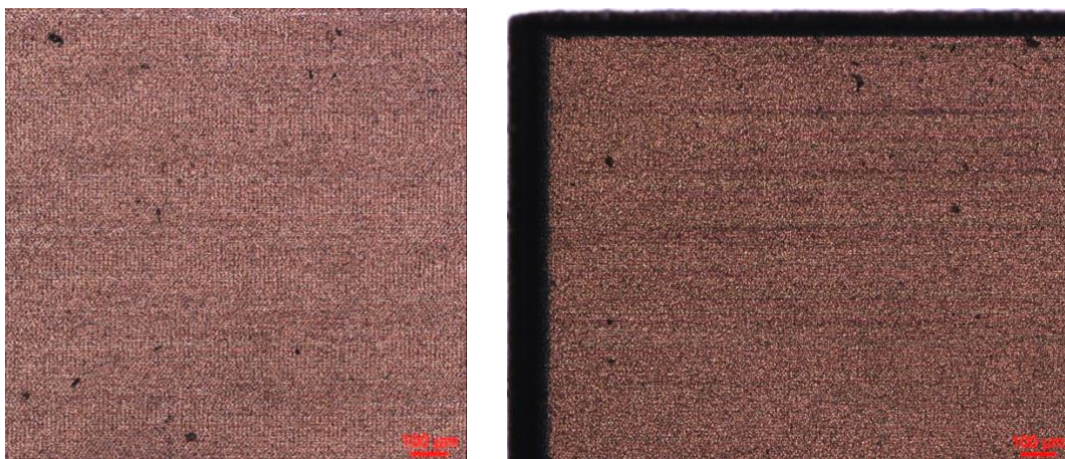
7.4 pav. Paviršiaus šiurkštumo R_a (kairėje) ir išabliuoto gylio Z (dešinėje) priklausomybės nuo energijos tankio esant 209,3 kHz pasikartojimo dažniui ir 10 μm atstumui tarp skenavimo linijų.

Norint lazeriu suformuoti optinį elementą, abliacija turi vykti dešimtimis ir šimtais sluoksnių. Pašalinus pirmąjį medžiagos sluoksnį, pakinta jos paviršiaus struktūra, sugertis ir abliuojant antrąjį sluoksnį jau reikia mažiau energijos medžiagai išgarinti. Siekiant sumažinti anksčiau minėtą vieno pašalinamo sluoksnio storį, reikia atlikti abliacijos eksperimentus ant jau vienu sluoksniu pažeisto paviršiaus. Prieš atliekant šiuos eksperimentus buvo atliktas kitas eksperimentas, kuris tikrina defektų akumuliaciją didinant skenuojamų sluoksnių skaičių.

Abliacija buvo atliekama 1, 2, 4, 8, 16, 32 bei 64 sluoksniais pasinaudojus jau atrinktais parametrais esančiais 1 lentelėje. Optiniu mikroskopu atliktos nuotraukos ties 1 ir 64 sluoksniais pateikiamos 7.5 pav. Minėtas 64 sluoksniais nuabliuotas plotelis didesnių defektų neturi, matomos tik dulkės. Viršutinėje plotelio dalyje galima išvelgti atsikartojančias skenavimo linijas, tačiau to galima išvengti kiekvieno sluoksnio metu skenavimą pradedant vis kitoje vietoje. Tokiu būdu linijos persiklos vis kitu kampu ir nevyks defektų akumuliacija.

1 lentelė. Mažiausio paviršiaus šiurkštumo eksperimento parametrai ir rezultatai.

f, kHz	Atstumas tarp skenavimo linijų, μm	Atstumas tarp impulsų, μm	Skenavimo greitis, mm/s	Energijos tankis, J/cm^2	R _a , nm
209,3	7,5	9,5	2000	13.3	87

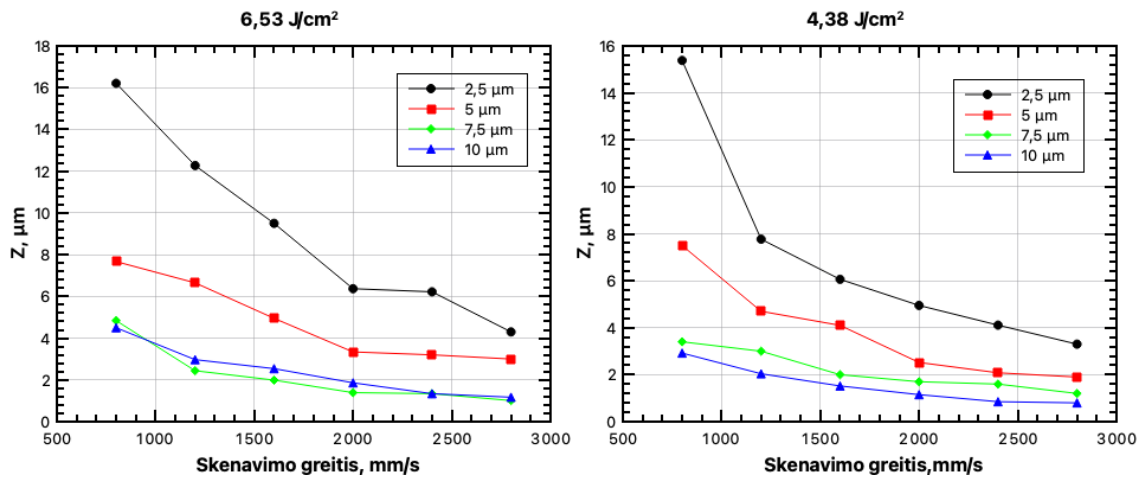


7.5 pav. Lazerio spinduliuote suformuoto paviršiaus vienu (kairėje) ir 64 sluoksniais (dešinėje) optinės nuotraukos. Naudoti parametrai 1 lentelėje.

7.2 Pažeisto paviršiaus abliacija

Iš stiklo abliacijos eksperimentų galima matyti, kad vieno skenavimo metu pašalinamas kvarcinio stiklo sluoksnis negali būti mažesnis nei $1 \mu\text{m}$. Siekiant sumažinti gylį vieno skenavimo metu, reikia naudoti mažesnę energijos tankį, o tai galima pasiekti padidinant lazerinės spinduliuotės sugertį medžiagoje. Tai galima padaryti pašalinus pirmąjį sluoksnį pasinaudojant optimaliais turimais abliacijos parametrais (1 lentelė). Svarbu pradinį paviršiaus šiurkštumą pasiekti kuo mažesnę, nes vėliau likę defektai kaupiasi ir didėja [40].

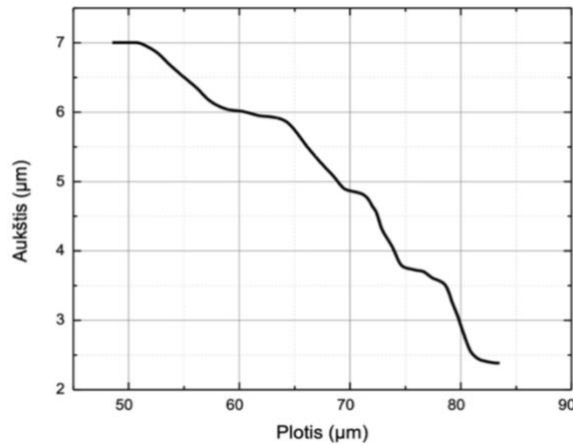
Ant apdirbto paviršiaus buvo vėlgi atliekami vieno sluoksnio abliavimo eksperimentai. Šį kartą buvo galima naudoti tuos energijos tankius, kurie anksčiau ties tais pačiais skenavimo greičiais buvo nebepanaudojami. Todėl buvo vėl naudojamas 209,3 kHz pasikartojimo dažnis ir 2,5 – 10 μm atstumas tarp gretimų skenavimo linijų. Abliacijos pašalinto gylio priklausomybė nuo skenavimo greičio ties skirtingais atstumais tarp gretimų skenavimo linijų yra pateikta 7.7 paveiksle. Pavaizduotos priklausomybės esant $6,53 \text{ J}/\text{cm}^2$ ir $4,38 \text{ J}/\text{cm}^2$ lazerio pluošto energijos tankiui.



7.7 pav. Vienu sluoksniu pašalinto medžiagos gylio priklausomybė nuo skenavimo greičio ties skirtingais atstumais tarp gretimų skenavimo linijų.

Naudojant $6,53 \text{ J/cm}^2$ energijos tankį, grafike esančios kreivės ties $7,5 \text{ }\mu\text{m}$ ir $10 \text{ }\mu\text{m}$ persikloja ir sunku išsirinkti mažiausią pašalintą sluoksnio gylį, kuris šioje priklausomybėje siekia virš $1 \text{ }\mu\text{m}$ kaip ir abliacijos eksperimente ant nepažeisto paviršiaus. Sumažinus energijos tankį iki $4,38 \text{ J/cm}^2$, gautas pašalintas gylis su $10 \text{ }\mu\text{m}$ atstumu tarp gretimų skenavimo linijų yra mažiausias ir siekia $Z = 800 \text{ nm}$ ties 2800 mm/s skenavimo greičiu. Su šiais parametrais apdirbta medžiaga turi $R_a = 183 \text{ nm}$ paviršiaus šiurkštumą, tačiau yra svarbu turėti tinkamą vieno sluoksnio storį, nei truputį didesnę šiurkštumą.

Kyla klausimas, kiek gi reikia mažinti vieno pašalinamo sluoksnio storį, kad būtų galima suformuoti tolygaus ir nelaiptuoto paviršiaus mikrolęšių matricą. Siekiant tai išsiaiškinti buvo atliktas eksperimentas ir suformuota viena bandomoji matrica su pasirinktu sluoksnio storiu $1,1 \text{ }\mu\text{m}$. Naudotas $209,3 \text{ kHz}$ pasikartojimo dažnis, $6,53 \text{ J/cm}^2$ energijos tankis, $10 \text{ }\mu\text{m}$ atstumas tarp skenavimo linijų ir 2800 mm/s skenavimo greitis. Suformuotoje matricoje centrinis mikrolęšis buvo 1 mm diametro. Dalis suformuoto mikrolęšio profilio yra pavaizduota 7.8 paveiksle. Iš profilio matosi, jog yra tam tikri laipteliai, su $1 - 1,1 \text{ }\mu\text{m}$ žingsniu, bet jie iš dalies jau yra panašūs į paviršiaus banguotumą. Siekiant gauti tolygesnį paviršių yra pasirenkamas optimalių parametų rinkinys norint pasiekti $Z = 800 \text{ nm}$ pašalinamam sluoksnio storiui panaudojus $209,3 \text{ kHz}$ pasikartojimo dažnį, $4,38 \text{ J/cm}^2$ energijos tankį, $10 \text{ }\mu\text{m}$ atstumą tarp skenavimo linijų ir 2800 mm/s skenavimo greitį (2 lentelė).



7.8 pav. Bandomojo mikrolęšio sienelės dalies profilis.

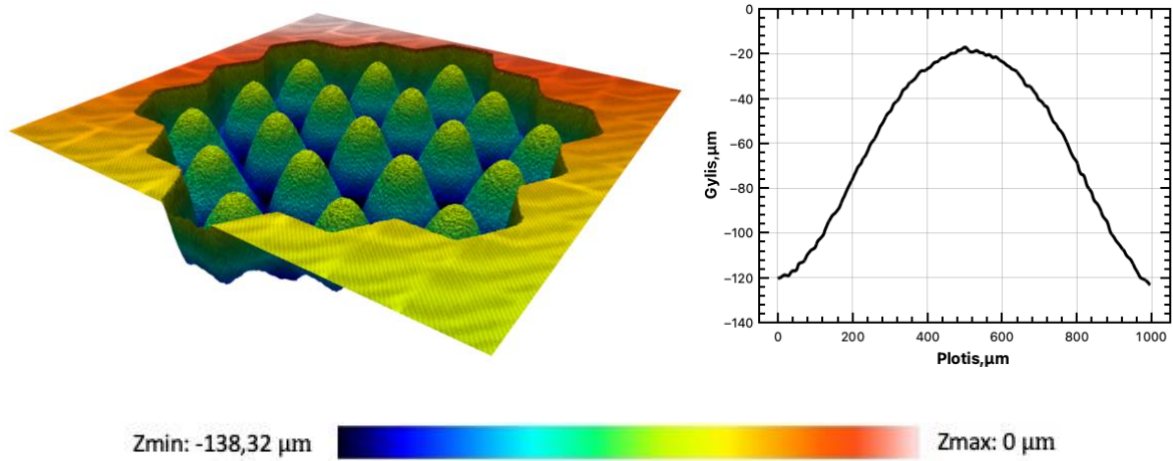
7.3 Mikrolęšių matricos formavimas

Formuojant sferinį paviršių reikia pašalinti nuo dešimčių iki šimtų sluoksnių, tad jeigu optimaliais frezavimo parametrais atliekamas procesas bus sąlyginai lėtas ir finansiškai ilgai neatsiperkantis, neapsimokės gaminti tokių produktų. Tikslas yra išabliuoti tolydžią mažo paviršiaus šiurkštumo mikrolęšių matricą, formuojant glaudžiamuosius lęšius. Prieš atliekant abliacijos procesą reikėjo sukurti programinį kodą lazerinės sistemos valdymo programoje, skirtą glaudžiamojo lęšio formavimui. Išgaubtas paviršius yra suformuojamas centre turint mažiausiai sluoksnių, o po truputį didinant apskirtą plotą nuo elemento centro yra suformuojama norima forma.

Prieš atliekant matricos formavimą buvo nuabliuotas pirmasis sluoksnis pasinaudojus 1 lentelėje esančiais mažiausią paviršiaus šiurkštumą užtikrinančiais parametrais. Toliau buvo pasirinkti 2 lentelėje esantys optimalūs abliavimo parametrai, su kuriais yra pašalinama 800 nm vieno sluoksnio metu. Buvo suformuota matrica, sudaryta iš 19 mikrolęšių, kur vieno lęšio diametras 1 mm, o kreivumo radiusas $\sim 865 \mu\text{m}$. Tam prireikė 136 skenavimo sluoksnių, o gautas vieno mikrolęšio paviršiaus ploto šiurkštumas $S_a = 398 \text{ nm}$ (žr. 7.9 pav.). Visas abliacijos laikas buvo $\sim 47 \text{ min}$.

2 lentelė. Optimalūs mikrolęšių matricos formavimo parametrai.

f, kHz	Atstumas tarp skenavimo linijų, μm	Atstumas tarp impulsų, μm	Skenavimo greitis, mm/s	Energijos tankis, J/cm^2
209,3	10	13,4	2800	4,38

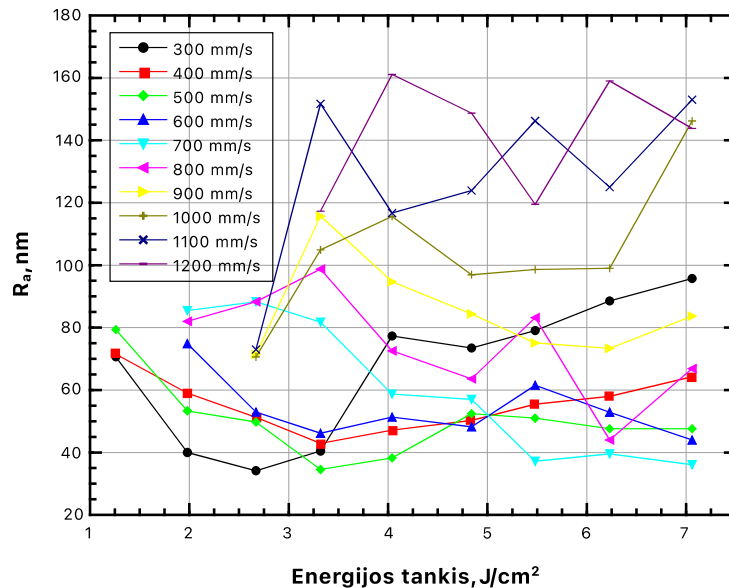


7.9 pav. Suformuotos mikrolęšių matricos topografija, išmatuota optiniu profilometru (kairėje) ir centrinio lęšiuko profilis (dešinėje).

Suformuota mikrolęšių matrica kol kas negali būti panaudota optiniams taikymams, nes paviršius yra per šiurkštus ir dar ne visai skaidrus. Norint sumažinti mikrolęšių matricos paviršiaus šiurkštumą, reikia imtis lazerinio poliravimo eksperimentų ir atrasti optimalius parametrus siekiant mažiausio paviršiaus šiurkštumo.

7.4 Pažeisto paviršiaus poliravimas

Toliau darbai buvo tęsiami poliravimo eksperimentais. Tirta kaip nupoliruoto paviršiaus šiurkštumas priklauso nuo CO₂ lazerio energijos tankio (žr. 7.10 pav.). Šiame etape visi poliravimo eksperimentai buvo atliekami ant vienu sluoksniu pažeisto kvarcinio stiklo, o tam pasitelkti parametrai yra 1 lentelėje. Šio etapo metu pluošto sąsmauka buvo ties kvarcinio stiklo bandinio paviršiumi. Pasirinktas 10 kHz lazerio pasikartojimo dažnis, energijos tankis 1,26 – 7,06 J/cm², pluošto skenavimo greitis 300 – 1200 mm/s, atstumas tarp impulsų XY kryptimis išlaikytas vienodas.

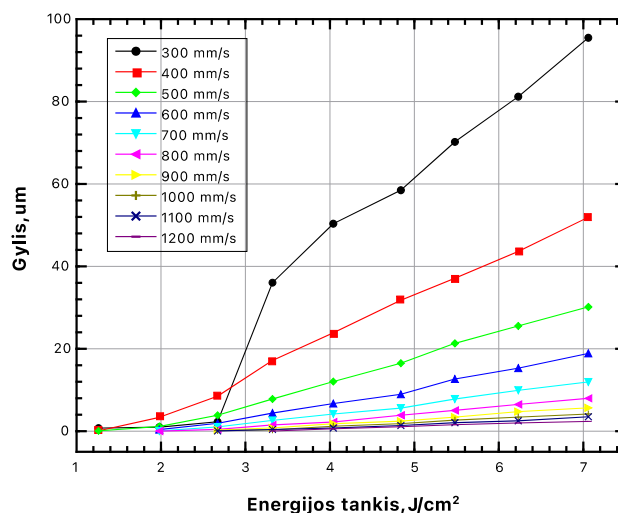


7.10 pav. Paviršiaus šiurkštumo priklausomybė nuo lazerio spinduliuotės energijos tankio esant skirtingiems skenavimo greičiams.

Buvo pastebėta, kad esant 300 – 500 mm/s skenavimo greičiams matome, kad didėjant energijos tankiui nuo ~1 iki ~2,75 (300 mm/s); 3,25 (400 ir 500 mm/s) J/cm² šiurkštumas mažėja ir tai atitiktų, kad energijos tankio užtenka tik negiliam paviršiaus perlydymui vykti. Toliau didėjant energijos tankiui, šiurkštumas didėja, kas atitiktų gilų perlydymą ir galimą su juo susijusį šiurkštumo didėjimą (dėl inicijuojamos abliacijos).

Didėjant skenavimo greičiui yra perlydomas vis mažesnis medžiagos sluoksnis (mažėja terminis medžiagos kaitimas dėl mažesnio impulsų persiklojimo), tai šiurkštumas didėja. Ties didesniais skenavimo greičiais reikėtų didesnių energijos tankių, kad padidinti išlydomą sluoksnį ir sumažinti šiurkštumą. Tai yra matoma iš rezultatų ties mažesniais skenavimo greičiais: didėjant skenavimo greičiui nuo 300 mm/s iki 700 mm/s pasiekiamas minimalus šiurkštumas pasistumia nuo ~2,75 iki 5,5 J/cm².

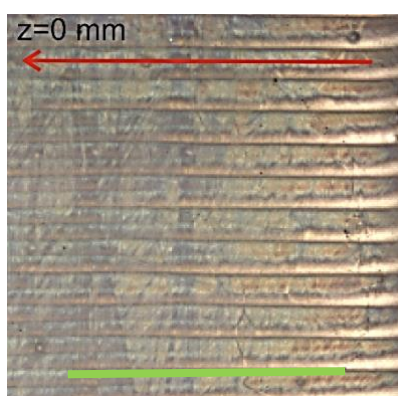
Didinant skenavimo greitį mažėja pašalintas medžiagos kiekis poliravimo metu. Tai įrodo nupoliruoto ploto gylio priklausomybė nuo energijos tankio ties skirtingais pluošto skenavimo greičiais (žr. 7.11 pav.). Keičiant energijos tankį ir/ar skenavimo greitį galima sumažinti/padidinti pašalinamos medžiagos kiekį. Nors idealiu atveju poliravimo proceso metu medžiaga ir neturi būti pašalinta, o tik perlydyta, tačiau eksperimentiniai rezultatai parodo, kad dalis medžiagos nuo paviršiaus yra išgarinama. Norint pasiekti minimalų medžiagos pašalinimą, reikia naudoti didelį skenavimo greitį ir mažą energijos tankį. Taigi, buvo priimtas sprendimas sumažinti energijos tankį pluoštą išfokusuojant. Bandinio kaitinimas buvo užtikrinamas padidinant impulso energiją.



7.11 pav. Nupoliruoto ploto gylis priklausomybė nuo lazerio spinduliuotės energijos tankio esant skirtingam skenavimo greičiui.

7.5 Poliravimas su išfokusuotu pluoštu

Poliruojant medžiagą, kuomet jos paviršius yra pluošto sąsmaukoje, sunku pasiekti mažą paviršiaus šiurkštumą ir banguotumą, nes perlydytame sluoksnyje išlieka atskiros pluošto skenavimo linijos ir yra pašalinama pakankamai daug medžiagos – vyksta ne poliravimas o abliacija (žr. 7.12 pav.). Paveiksle matome susidariusias periodines skenavimo linijas – gilesnės ir seklesnės vietos. Tai galima aiškinti dviem aspektais. Pirma, dėl Gausinio pluošto intensyvumo pasiskirstymo ir palyginti didelio energijos tankio stiklas yra daugiau išabliuojamas pluošto centre nei kraštuose [41]. Antra, dėl didesnio intensyvumo pluošto centre yra didesnė lydalo temperatūra nei pluošto kraštuose. Dėl temperatūrų skirtumo susidaro lydalo paviršiaus įtempio gradientas, kuris verčia lydala judėti iš karštesnės zonos į vėsesnę [22].

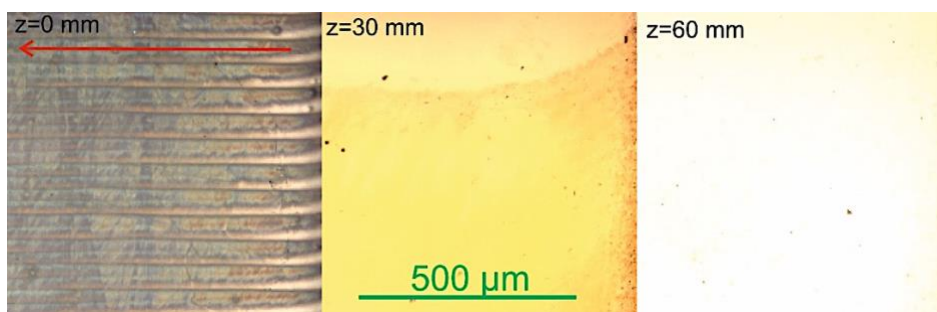


7.12 pav. Poliruoto stiklo paviršiaus nuotrauka, kai išfokusuotumo atstumas buvo 0 mm. Raudona rodyklė rodo paviršiaus šiurkštumo R_a matavimo kryptį. Žalia linija nurodo 500 µm ilgio atstumą.

Paviršiaus kokybę galima pagerinti stiklą kaitinant su mažesniu energijos tankiu. Tai gali būti atliekama išfokusuojant pluoštą. Paviršiaus šiurkštumo priklausomybė nuo impulso energijos esant skirtingam išfokusavimo atstumui ir skenavimo greičiui pateikta 7.14 paveiksle.

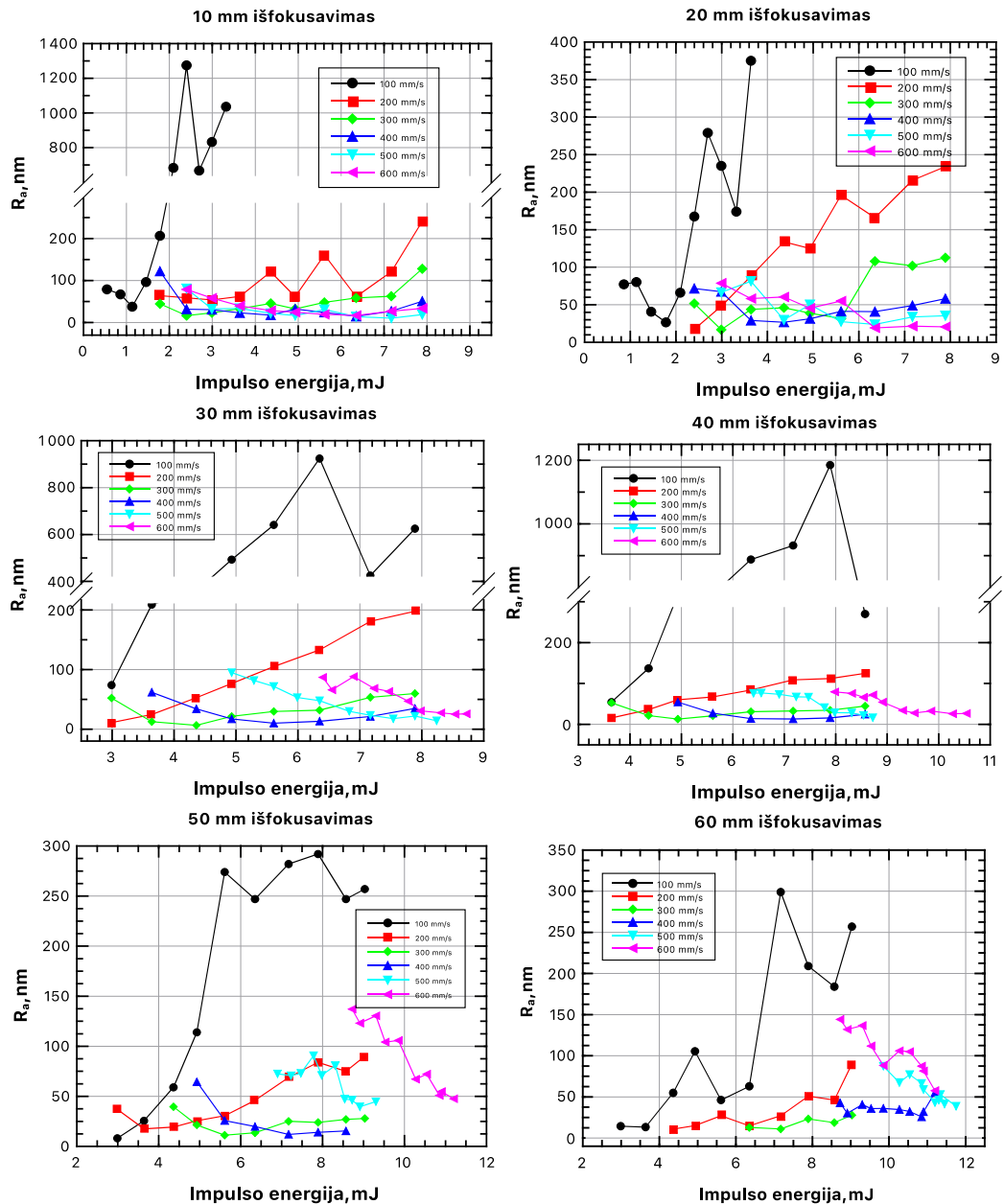
Didinant pluošto diametrą didėja ir impulsų persiklojimas, tačiau vienetinis paviršiaus plotas gauna mažesnę energijos kiekį. Norint pasiekti panašų paviršiaus šiurkštumą didesniame plote, reikia didinti ir impulso energiją. Taip yra kompensuojamas energijos kiekis tenkantis plotui, tačiau poliravimas vyksta su tolygiau pasiskirsčiusia energija to ploto atžvilgiu. Ties 10 – 60 mm pluošto išfokusavimu buvo atlikti poliravimo eksperimentai, ieškant parametrų pasiekti mažiausią paviršiaus šiurkštumą (žr. 7.14 pav.). Ties kiekviena išfokusavimo pozicija, 100 mm/s ir 200 mm/s pluošto skenavimo greičiai sukelia didžiausią šiurkštumą. Taip yra dėl per didelio medžiagos išlydymo, kurio metu yra pereinama į gilaus perlydymo poliravimo mechanizmą ar net intensyvią abliaciją. Reikėtų vengti šios darbinės zonos ir laikytis ties negilaus perlydymo zona. Esant išfokusavimui 50 mm ir 60 mm, 500 mm/s ir 600 mm/s skenavimo greičių rezultatas suprastėja (šiurkštumai padidėja) dėl mažesnio stiklo šilimo, bet didėjant impulso energijai, šiurkštumas sparčiai mažėja. Ties 600 mm/s skenavimo greičiu ir 60 mm išfokusavimu, šiurkštumas sumažėja nuo 150 iki 50 nm, kai impulso energija yra padidinama nuo 8,3 mJ iki 10,6 mJ.

Žiūrint į skirtingais išfokusavimais nupoliruoto paviršiaus nuotraukas (žr. 7.13 pav.), lygiausias paviršius gaunasi su didžiausiu 60 mm išfokusavimu. Taip yra dėl didžiausio impulsų persiklojimo ir didesnio pluošto matmenų, kas lemia tolygesnį paviršiaus perlydymą.



7.13 pav. Poliruoto stiklo paviršių nuotraukos, kai išfokusavimo atstumas buvo 0, 30 ir 60 mm. Raudona rodyklė rodo paviršiaus šiurkštumo R_a matavimo kryptį.

Iš mikroskopu atliktų nuotraukų, lygiausias paviršius gaunasi esant 60 mm išfokusavimui (žr. 7.13 pav. kai $z = 60$ mm), gautas šio paviršiaus šiurkštumas yra $R_a = 11$ nm. Tam pasiekti buvo naudotas 300 mm/s skenavimo greitis, 7,17 mJ impulso energija, 30 μ m atstumas tarp impulsų ir 10 kHz pasikartojimo dažnis.



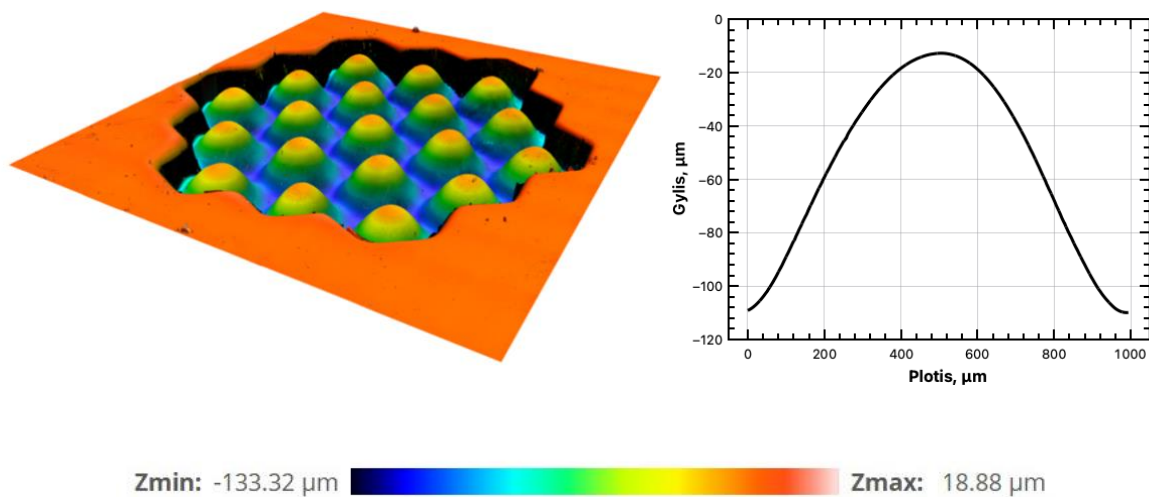
7.14 pav. Paviršiaus šiurkštumo priklausomybė nuo impulso energijos ties 10 – 60 mm išfokusavimu skirtingais skenavimo greičiais.

7.6 Mikrolęšių matricos poliravimas

Suradus optimalius lazerinio poliravimo parametrus (3 lentelė), galima pradėti galutinį tyrimų žingsnį – mikrolęšių matricos poliravimo procesą. Poliravimo procesas yra pakankamai greitas, nes užtenka vieno skenavimo sluoksnio, jog persilydytų paviršius. Pasinaudojus turimais optimaliais poliravimo parametrais, užtruko 3 sekundes nupoliruoti visą matricą, o jos centrinio mikrolęšio paviršiaus ploto šiurkštumas yra $S_a = 29$ nm.

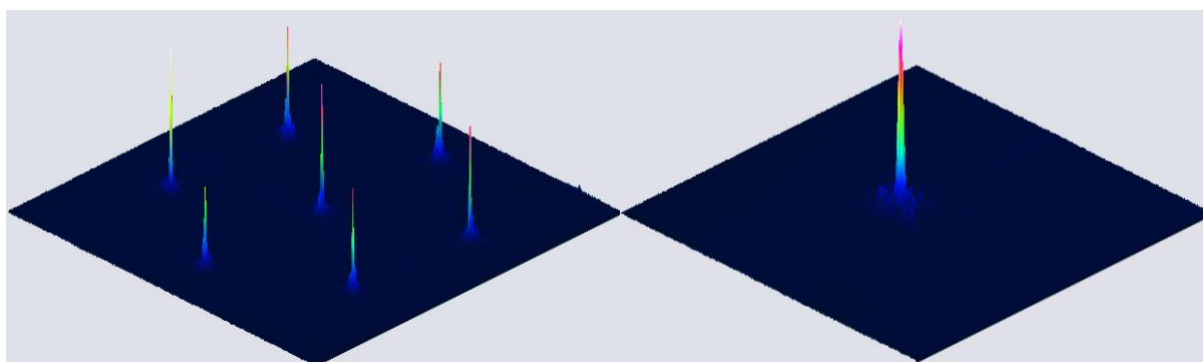
3 lentelė. Optimalūs poliravimo parametrai.

Pluošto išfokusavimas, mm	Skenavimo greitis, mm/s	Pasikartojimo dažnis, kHz	Atstumas tarp impulsų, μm	Impulso energija, mJ
60	300	10	30	7,17



7.15 pav. Nupoliruotos mikrolęšių matricos topografija, išmatuota optiniu profilometru (kairėje) ir centrinio lęšiuko profilis (dešinėje).

Nupoliruota mikrolęšių matrica buvo įstatyta į charakterizavimo stendą, kuriame ji apšviesta 532 nm bangos ilgio lazeriniu diodu, o matricos sufokusuotas vaizdas fiksuojamas su CCD kamera (žr. 7.16 pav.). Suformuotos matricos židinio nuotolis yra $\sim 1,9$ mm.



7.16 pav. Nupoliruotos mikrolęšių matricos centrinės dalies pluošto fokusavimas, kai yra apšviesta centrinė jos dalis (kairėje) ir kai yra apšviestas tik centrinis matricos lęšis (dešinėje).

8. Pagrindiniai rezultatai ir išvados

- Atlikus nepažeisto kvarcinio stiklo paviršiaus vieno sluoksnio abliacijos proceso optimizavimą, buvo gautas mažiausias paviršiaus šiurkštumas $R_a = 87$ nm ir minimalus pašalintas gylis $Z = 1,09$ μm , kai atstumas tarp skenavimo linijų buvo $7,5$ μm – mažesnis tarpas lėmė didesnę šiurkštumą dėl didesnės terminės akumuliacijos lemtų defektų atsiradimo, o esant per dideliu tarpui tarp skenuojamų linijų buvo lemtas atsiskiriančių lazerinių impulsų ir to lemto šiurkštumo didėjimo.
- Siekiant suformuoti tolygaus paviršiaus optinį elementą reikia dar labiau sumažinti minimalų pašalinamą sluoksnio storį, dėl to buvo papildomai pašiurkštintas nepažeistas kvarcinio stiklo paviršius taip sugeneruojant papildomus paviršiaus defektus bei padidinant jo sugertį.
- Panaudojus $209,3$ kHz pasikartojimo dažnio, $4,38$ J/cm² energijos tankio spinduliuotę bei išlaikant 10 μm atstumą tarp gretimų linijų, 2800 mm/s pluošto skenavimo greitį buvo gautas pašiurkštinto paviršiaus minimalus vieno sluoksnio pašalintas storis $Z = 800$ nm, o paviršiaus šiurkštumas $R_a = 183$ nm.
- Atlikus pažeisto kvarcinio stiklo paviršiaus vieno sluoksnio poliravimo proceso optimizavimą, 9 mm² plote buvo gautas mažiausias paviršiaus šiurkštumas $R_a = 11$ nm ties 10 kHz impulsų pasikartojimo dažniu, 300 mm/s skenavimo greičiu, $7,17$ mJ impulso energija, 10 μm atstumu tarp impulsų ir 60 mm pluošto išfokusavimu.
- Siekiant kokybiškai nupoliruoti stiklo paviršių reikia vienu metu šildyti didesnę stiklo plotą todėl buvo pademonstruota, kad išfokusuojant pluoštą 60 mm atstumu (pluošto dydis padidėjo nuo 480 μm iki 1920 μm diametro), po poliravimo buvo gaunamas lygesnis stiklo paviršius – nebesimatė Gauso pluošto lemiamų bangelių.
- Pasinaudojus optimizuotais lydyto kvarco abliavimo ir poliravimo parametrais buvo suformuota $\sim 1,9$ mm židinio nuotolio mikrolęšių matrica, o centrinio lęšiuko paviršiaus ploto šiurkštumas buvo $S_a = 29$ nm.

9. Literatūra

- [1] K. M. Nowak, H. J. Baker, and D. R. Hall, "Efficient laser polishing of silica micro-optic components," *Applied Optics*, p. 162 – 171, 2006.
- [2] A. Krishnan and F. Fang, "Review on mechanism and process of surface polishing using lasers," *Frontiers of Mechanical Engineering*, p. 299 – 319, 2019.
- [3] M. Zimmermann, N. Lindlein, R. Voelkel, and K. J. Weible, "Microlens laser beam homogenizer: from theory to application," in *Laser Beam Shaping VIII*, SPIE, 2007.
- [4] O. Balachnaitė, A. Bargelis, A. Demetjev, R. Jonušas, G. Račiukaitis, and V. Sirutkaitis, *Lazerinė technologija: Vilniaus universiteto vadovėlis*. Vilniaus universiteto leidykla, 2008.
- [5] Q. Zheng *et al.*, "Investigation on the underwater femtosecond laser polishing SiC ceramic", *Proceedings of the Joint Symposium of the Tenth International Conference of The Chinese Society of Micro-Nano Technology and Microsystems and Nanoengineering Summit 2019 (CSMNT2019 & MAN2019): Part III of V*, p. 28 – 36, 2020.
- [6] N. B. Dahotre and S. P. Harimkar, "Laser fabrication and machining of materials," *Laser Fabrication and Machining of Materials*, p. 1 – 558, 2008.
- [7] H.-S. Jang, M.-W. Cho, and D.-S. Park, "Micro Fluidic Channel Machining on Fused Silica Glass Using Powder Blasting," *Sensors*, p. 700 – 710, 2008.
- [8] R. Kitamura, L. Pilon, and M. Jonasz, "Optical constants of silica glass from extreme ultraviolet to far infrared at near room temperature", *Appl. Opt.*, p. 8118 – 8133, 2007.
- [9] J. G. Parker, "Optical Absorption in Glass: Investigation Using an Acoustic Technique," *Appl Opt*, p. 2974, 1973.
- [10] Y. Miyagawa, J. M. Powers, and W. J. O'brient, "Optical Properties of Direct Restorative Materials", *Journal of dental research*, p. 4-890, 1981.
- [11] Maxime Rioult, "Hematite-based epitaxial thin films as photoanodes for solar water splitting", *Doctoral thesis of physics*, 2015.
- [12] A. Dubietis, „Netiesinė optika“, *Vilniaus Universitetas*, 2011.
- [13] C. B. Schaffer, "Interaction of Femtosecond Laser Pulses with Transparent Materials," p. 193, 2001.
- [14] Z. D. Popovic, R. A. Sprague, and G. A. N. Connell, "Technique for monolithic fabrication of microlens arrays", *Appl. Opt.*, p. 1281 – 1284, 1988.
- [15] C. S. Lim, M. H. Hong, A. S. Kumar, M. Rahman, and X. D. Liu, "Fabrication of concave micro lens array using laser patterning and isotropic etching," *Int J Mach Tools Manuf*, p. 552 – 558, 2006.
- [16] J. Krüger and W. Kautek, "Ultrashort Pulse Laser Interaction with Dielectrics and Polymers," *Advances in Polymer Science*, p. 247 – 290, 2004.
- [17] N. Ahmed, S. Darwish, and A. M. Alahmari, "Laser Ablation and Laser-Hybrid Ablation Processes: A Review," *Materials and Manufacturing Processes*, p. 1121 – 1142, 2016.
- [18] A. Temmler, C. B. Weingarten, B. Schober, and E. Uluz, "Investigation on laser beam figuring of fused silica using microsecond pulsed CO2 laser radiation," *Appl Surf Sci*, , p. 149 – 609, 2021.
- [19] E. Ukar, A. Lamikiz, L. N. L. de Lacalle, D. del Pozo, and J. L. Arana, "Laser polishing of tool steel with CO2 laser and high-power diode laser," *Int J Mach Tools Manuf*, p. 115–125, 2010.
- [20] J. A. Ramos, D. L. Bourell, and J. J. Beaman, "Surface over-melt during laser polishing of indirect-SLS metal parts," *Materials Research Society Symposium - Proceedings*, p. 53 – 61, 2003.
- [21] A. Passerone, R. Sangiorgi, and G. Valbusa, "Surface tension and density of molten glasses in the system La2O3 Na2Si2O5," *Ceramurgia International*, p. 18 – 22, 1979.
- [22] A. Temmler, E. Willenborg, and K. Wissenbach, "Laser Polishing," *Laser Applications in Microelectronic and Optoelectronic Manufacturing (LAMOM) XVII*, p. 82 –430,2012.

- [23] K. C. Yung *et al.*, “Laser polishing of additive manufactured CoCr components for controlling their wettability characteristics,” *Surf Coat Technol*, p. 89 – 98, 2018.
- [24] A. Hafiz, “Applicability of a Picosecond Laser for Micro-Polishing of Metallic Surfaces,” *Dissertation for the Doctoral Degree. London: The University of Western Ontario*, 2013.
- [25] E. Ukar, A. Lamikiz, L. N. L. de Lacalle, D. del Pozo, F. Liebana, and A. Sanchez, “Laser polishing parameter optimisation on selective laser sintered parts”, *International Journal of Machining and Machinability of Materials*, p. 417 – 432, 2010.
- [26] S. Schwarz, S. Rung, C. Esen, and R. Hellmann, “ Fabrication of a high-quality axicon by femtosecond laser ablation and CO₂ laser polishing for quasi-Bessel beam generation ”, *Opt Express*, p. 23 – 287, 2018.
- [27] V. N. Tokarev, J. I. B. Wilson, M. G. Jubber, P. John, and D. K. Milne, “Modelling of self-limiting laser ablation of rough surfaces: application to the polishing of diamond films,” *Diam Relat Mater*, p. 169 – 176, 1995.
- [28] M. Vadali, C. Ma, N. A. Duffie, X. Li, and F. E. Pfefferkorn, “Effects of Laser Pulse Duration on Pulse Laser Micro Polishing”, *Proceedings of the 7th International Conference on MicroManufacturing*, 2012.
- [29] M. T. C. Chow, E. v Bordatchev, and G. K. Knopf, “Experimental study on the effect of varying focal offset distance on laser micropolished surfaces”, *Int J Adv Manuf Technol* , p. 2607 – 2617, 2013.
- [30] H. Liu *et al.*, “Photoetching of spherical microlenses on glasses using a femtosecond laser,” *Opt Commun*, p. 4119 – 4123, 2009.
- [31] S. Cai, Y. Sun, H. Chu, W. Yang, H. Yu, and L. Liu, “Microlenses arrays: Fabrication, materials, and applications,” *Microscopy Research and Technique*, p. 2784 – 2806, 2021.
- [32] H. K. Choi, J. Ryu, C. Kim, Y. C. Noh, I. B. Sohn, and J. T. Kim, “Formation of micro-lens array using femtosecond and CO₂ lasers”, *Journal of Laser Micro Nanoengineering*, p. 341 – 345, 2016.
- [33] R. Guo, S. Xiao, X. Zhai, J. Li, A. Xia, and W. Huang, “Micro lens fabrication by means of femtosecond two photon photopolymerization,” *Opt Express*, p. 810, 2006.
- [34] D. Tan, K. N. Sharafudeen, Y. Yue, and J. Qiu, “Femtosecond laser induced phenomena in transparent solid materials: Fundamentals and applications,” *Prog Mater Sci*, p. 154 – 228, 2016.
- [35] G. A. Al-Kindi and B. Shirinzadeh, “An evaluation of surface roughness parameters measurement using vision-based data,” *Int J Mach Tools Manuf*, p. 697 – 708, 2007.
- [36] E. S. Gadelmawla, M. M. Koura, T. M. A. Maksoud, I. M. Elewa, and H. H. Soliman, “Roughness parameters,” *J Mater Process Technol*, p. 133 – 145, 2002.
- [37] B. Das, S. Roy, R. N. Rai, and S. C. Saha, “Development of an in-situ synthesized multi-component reinforced Al–4.5%Cu–TiC metal matrix composite by FAS technique – Optimization of process parameters,” *Engineering Science and Technology, an International Journal*, p. 279 – 291, 2016.
- [38] C. Wang, D. Lu, H. Shi, X. Liu, and R. Xin, “Discussion on method of optical surface roughness measurement,” in *Second International Conference on Photonics and Optical Engineering*, SPIE, 2017.
- [39] “Understanding Optical Specifications.” <https://www.edmundoptics.eu/knowledge-center/application-notes/optics/understanding-optical-specifications/> (accessed May 10, 2023).
- [40] F. Ahrari, M. Akbari, J. Akbari, and G. Dabiri, “Enamel Surface Roughness after Debonding of Orthodontic Brackets and Various Clean-Up Techniques,” 2013.
- [41] E. Markauskas, L. Zubauskas, B. Voisiat, and P. Gečys, “Efficient Water-Assisted Glass Cutting with 355 nm Picosecond Laser Pulses,” *Micromachines (Basel)*, 2022.

10. Santrauka anglų kalba/Summary

Combined processing of fused silica glass using femtosecond and CO₂ lasers

The potential of glass in high-tech industries such as photonics, microfluidics, and micro-electromechanical systems is significant. Furthermore, the demand for complex-shaped glass elements is constantly increasing. Traditional methods of surface shaping are not meeting modern needs, leading to a rise in laser technology for glass processing. Laser ablation allows precise material processing, improved surface quality, and faster production of glass elements. However, glass is brittle material with good thermal insulation properties. Thus, laser processing has some challenges leading to thermal accumulation and stress formation which can cause glass cracking. Fortunately, the quality of direct ablation depends on the laser pulse duration with femtosecond laser pulses being superior for micro-processing. The resulting microstructures may require further surface smoothing for optical applications which can be achieved through laser polishing.

This study aim was to investigate the ablation process of fused silica glass for forming lens arrays using 1030 nm femtosecond and 10,6 μm CO₂ laser radiation. Ablation experiments were conducted to create high quality and low roughness surfaces. System parameters were optimized for precise surface shaping. Optimal polishing parameters for lens array polishing were determined using 10,6 μm CO₂ laser radiation. Experiments were carried out to optimize parameters such as laser scanning speed, average laser power and defocus distance.

After conducting various experiments, it was found that the ablation threshold of fused silica is $F_{th} = 4,28 \text{ J/cm}^2$. Single layer glass ablation resulted in the lowest surface roughness of $R_a = 87 \text{ nm}$. For this, 209,3 kHz pulse repetition rate, 2000 mm/s scanning speed, 13.3 J/cm² fluence, and 7,5 μm distance between scanning lines (hatch) were used. Furthermore, laser polishing was optimized too. CO₂ laser polishing parameters was found: 60 mm defocusing distance, 10 kHz pulse repetition rate, 7,17 mJ pulse energy, 30 μm hatch, and 300 mm/s scanning speed. Finally, the micro-lens array was formed and polished. Polishing step reduced surface roughness S_a from 398 nm to 29 nm.