

Vilniaus universitetas
Fizikos fakultetas
Lazerinių tyrimų centras

Paulius Zakarauskas

**AKUMULIACINIŲ PROCESŲ TAIKYMAS PAVIRŠIAUS ŠIURKŠTUMUI MAŽINTI
LAZERINĖS ABLIACIJOS PROCESE**

Magistrantūros studijų baigiamasis darbas

Lazerinės technologijos studijų programa

Studentas	Paulius Zakarauskas
Darbo vadovas	Doc. Dr. Vytautas Jukna
Konsultantas	dokt. Evaldas Kažukauskas
Recenzentas	Dr. Simas Butkus
Centro direktorė	Dr. Dalia Kaškelytė
Leista gintis	2026-05-22

Vilnius 2026

Turinys

Įvadas	3
1 Teorinis įvadas	4
1.1 Paviršiaus abliacija ir spinduliuotės parametrų įtaka	4
1.1.1 Impulso trukmė	4
1.1.2 Bangos ilgis	5
1.1.3 Energijos tankis	6
1.2 Inkubacija ir abliacijos slenkstis	7
1.3 Paviršiaus šiurkštumas ir jo priklausomybė nuo apdirbimo parametrų	8
1.4 Lazerių sukeltos periodinės paviršiaus struktūros (LIPSS): Klasifikacija ir formavimosi mechanizmai	10
1.4.1 Teorinis LIPSS formavimosi pagrindas	11
1.4.2 Medžiagos "metalizacija" ir netiesinė jonizacija	11
1.4.3 Orientacijos priklausomybė nuo poliarizacijos	12
2 Literatūros apžvalga	12
2.1 Motyvacija sub-slenkstinės abliacijos tyrimams	12
3 Metodika	14
3.1 Įranga	14
3.2 Eksperimentas	15
4 Rezultatai ir aptarimas	15
4.1 Akumuliacinių procesų taikymas ant lygaus stiklo paviršiaus	16
4.2 Akumuliacinių procesų taikymas ant šiurkštaus, lazeriu modifikuoto paviršiaus	21
Išvados	24
Literatūra	25
Santrauka	27
Summary	28

Įvadas

Pastaraisiais dešimtmečiais didėja susidomėjimas apdirbimo metodais, galinčiais įgyvendinti itin aukštos kokybės mikroapdirbimą įvairiems taikymams elektronikoje, optikoje, medicinoje ir kt. Vienas iš perspektyviausių mikroapdirbimo būdų yra lazerinis mikroapdirbimas, naudojant femtosekundinę lazerinę spinduliuotę. Gerai žinoma, kad naudojant ultratrumpuosius impulsus, lyginant su ilgesniais, galima geriau kontroliuoti abliacijos procesą, nes medžiagą galima šalinti mažesniais kiekiais, ir išlaikyti aukštą mikroapdirbimo kokybę - sumažinti šiluminio poveikio zonas aplink pažeidimus, nes impulso trukmė yra trumpesnė už šiluminės difuzijos trukmę [1]. Šiuolaikinėje optinėje inžinerijoje sparčiai auga poreikis kurti aukšto tikslumo difrakcinius optinius elementus (DOE), gebančius manipuluoti šviesos faze submikroniniame lygmenyje. Tradiciniai stiklo apdirbimo metodai, tokie kaip cheminis ėsdinimas ar mechaninis poliravimas, dažnai susiduria su apribojimais siekiant suformuoti sudėtingas, laisvos formos (angl. freeform) struktūras. Ultratrumpų femtosekundinių lazerių technologijos atveria naujas galimybes tiesioginiam skaidrių dielektrikų modifikavimui, tačiau pagrindiniu iššūkiu išlieka paviršiaus kokybės kontrolė. Net ir naudojant ultratrumpius impulsus, viršijus abliacijos slenkstį, medžiagos šalinimą dažnai lydi nepageidaujami šalutiniai efektai: padidėjęs šiurkštumas, mikroskilinėjimai ir intensyvūs mechaniniai įtempiai.

Siekiant sukurti DOE, pavyzdžiui, fazines plokšteles BF33 stikle, būtina pasiekti tikslų fazinį poslinkį (pvz., 2π), išlaikant optiškai lygų struktūros dugną. G. Chen ir J. Qiao (2022) [2] pademonstravo, kad subnanometriniis šiurkštumas yra pasiekiamas dirbant žemiau abliacijos slenksčio, tačiau fizikinis atsakas į impulsus, kurių energijos tankis yra žemiau vieno šūvio pažaidos ribos, išlieka nepakankamai ištirtas. Sub-pažeidimo slenksčio režimas yra itin perspektyvus dėl galimybės išnaudoti inkubacijos reiškinį determinuotam ir kontroliuojamam medžiagos šalinimui, minimizuojant terminę pažaidą, bei paviršiaus šiurkštumą.

Šiame darbe tiriamas borosilikatinio BF33 stiklo paviršiaus modifikavimas femtosekundinio lazerio spinduliuote, kai impulso energija yra mažesnė nei vieno impulso pažeidimo slenkstis. Šio mokslinio tyrimo tikslas – eksperimentiškai ištirti BF33 stiklo paviršiaus lazerinį apdirbimą, kuomet medžiagos abliacija sukuriamą išskirtinai dėl akumuliacinio pažaidos efekto. Šiam tikslui pasiekti buvo keliami uždaviniai:

1. Nustatyti medžiagos pavienio impulso ir daugiašūvį pažeidimo slenkstį.
2. Nustatyti lazerinio apdirbimo parametrus, kuriais galima abliuoti medžiagą sub-pažeidimo slenksčio lazerio impulsais akumuliaciniame režime.
3. Nustatyti ar galima pasiekti medžiagos pašalinimą kelių nanometrų storio sluoksniais išlaikant medžiagos vidutinį paviršiaus šiurkštumą S_a kelių nanometrų lygyje.
4. Nustatyti, ar rastomis sąlygomis galima poliruoti, abliuoti ir šiurkščius paviršius.

1 Teorinis įvadas

1.1 Paviršiaus abliacija ir spinduliuotės parametrų įtaka

Medžiagos abliacija, sukelta tiesioginės lazerinės spinduliuotės, yra fundamentalus energijos virsmo procesas, kurio efektyvumą nusako fotonų srauto charakteristikos: intensyvumas, impulsų trukmė bei spektrinė sudėtis (bangos ilgis).

Abliacijos slenkstį ir medžiagos modifikavimo dinamiką stipriai koreguoja vidinės medžiagos savybės: elektroninė sandara (draustinės juostos plotis, lemiantis fotonų sugerties mechanizmą), šiluminis laidumas bei terminio plėtimosi koeficientas, kurie apibrėžia šilumos sklaidos zoną (HAZ) ir mechaninius įtempius. Siekiant submikroninio tikslumo mikroapdirbime, būtina optimizuoti šių parametrų lauką, užtikrinant kontroliuojamą energijos perdavimą. Šiame skyrelyje išsamiai išanalizuosime fizikinę prasmę tų parametrų, kurie yra kritiniai valdant lazerio sukeltus fazinius virsmus ir medžiagos šalinimą.

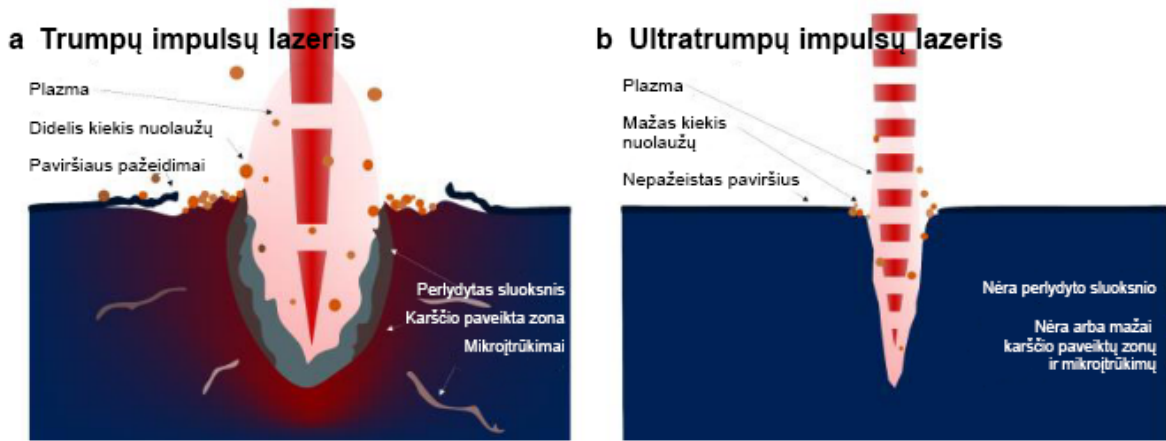
1.1.1 Impulso trukmė

Medžiagos modifikavimas trumpaisiais lazerio impulsais (nanosekundžių skalėje ar ilgiau) remiasi fototerminė sąveika, kurios metu vyrauja elektronų ir medžiagos gardelės termodinaminė pusiausvyra. Kadangi impulso trukmė viršija būdingąją elektronų-fononų relaksacijos trukmę, sugerta fotonų energija spėja pasiskirstyti gardelėje kaip šiluma [3]. Šiame režime abliacija aprašoma klasikiniiais terminiais modeliais, apimančiais nuoseklius fazinius virsmus: kietojo kūno kaitinimą, lydymąsi, tūrinį virimą bei sublimaciją. Esminis šio proceso bruožas yra terminio pažeidimo zonos (HAZ) susidarymas aplink apdirbamą vietą – tai sritis, kurioje medžiaga įkaista virš lydymosi temperatūros, tačiau nepasiekia garavimo slenkščio, todėl po aušinimo pasireiškia nepageidaujami struktūriniai pokyčiai ar medžiagos aptaškymas [4].

Siekiamas submikroninis tikslumas ir aukšta erdvinė skiriamoji geba realizuojami pasitelkiant ultratrumpuosius impulsus (pikosekundžių ir femtosekundžių eilės). Pagrindinis fizikinis pranašumas čia yra impulsų trukmė, kuri yra trumpesnė už šiluminės difuzijos trukmę (≈ 10 ps). Tai leidžia pasiekti neterminį medžiagos šalinimą, kurio metu HAZ efektas sumažinamas iki nereikšmingo lygio [1]. Šis režimas dažnai įvardijamas kaip "šaltoji abliacija", kurios mechanizmai fundamentaliai skiriasi nuo fototerminio modelio:

1. Kai individualaus fotono energija ($h\nu$) viršija medžiagos tarpatominių ryšių energiją, vyksta tiesioginis cheminis ryšių nutraukimas be tarpinio kaitinimo etapo. Sparčiai sužadinta elektronų populiacija sukelia staigią jonizaciją ir medžiagos suirimą.
2. Jei pavienio fotono energijos nepakanka ryšių nutraukimui (pvz., dielektrikuose), naudojami ypač didelio intensyvumo ultratrumpi impulsai, sužadinantys medžiagą per daugiafotonę sugertį. Kai optinio lauko intensyvumas viršija kritinę ribą (maždaug 10^{13} W/cm^2), jonizacijos procese pradeda dominuoti Zenerio tuneliavimas. Šiuo atveju stiprus lazerio elektrinis laukas taip stipriai iškreipia medžiagos potencinį barjerą, kad valentiniai elektronai gali tuneliuoti į laidumo juostą be nuoseklios fotonų sugerties [1].

Verta pažymėti, kad ultratrumpųjų impulsų režime pažeidimo sritis yra griežtai apibrėžta abliacijos slenksčiu, todėl suformuotų struktūrų matmenys gali būti tapatūs arba net mažesni už lazerio pluošto difrakcinį ribotą diametrą [5]. Skirtingos energijos perdavimo trukmės ir jų įtaka galutinei medžiagos morfologijai lyginant trumpus (nanosekundinės trukmės) bei ultratrumpus (pikosekundinės, bei femtosekundinės trukmės) impulsus vizualizuota 1 paveiksle.



1 pav. Lazerinės spinduliuotės sąveika su medžiaga trumpų (a) ir ultratrumpų (b) impulsų atvejais. Pritaikyta pagal [6].

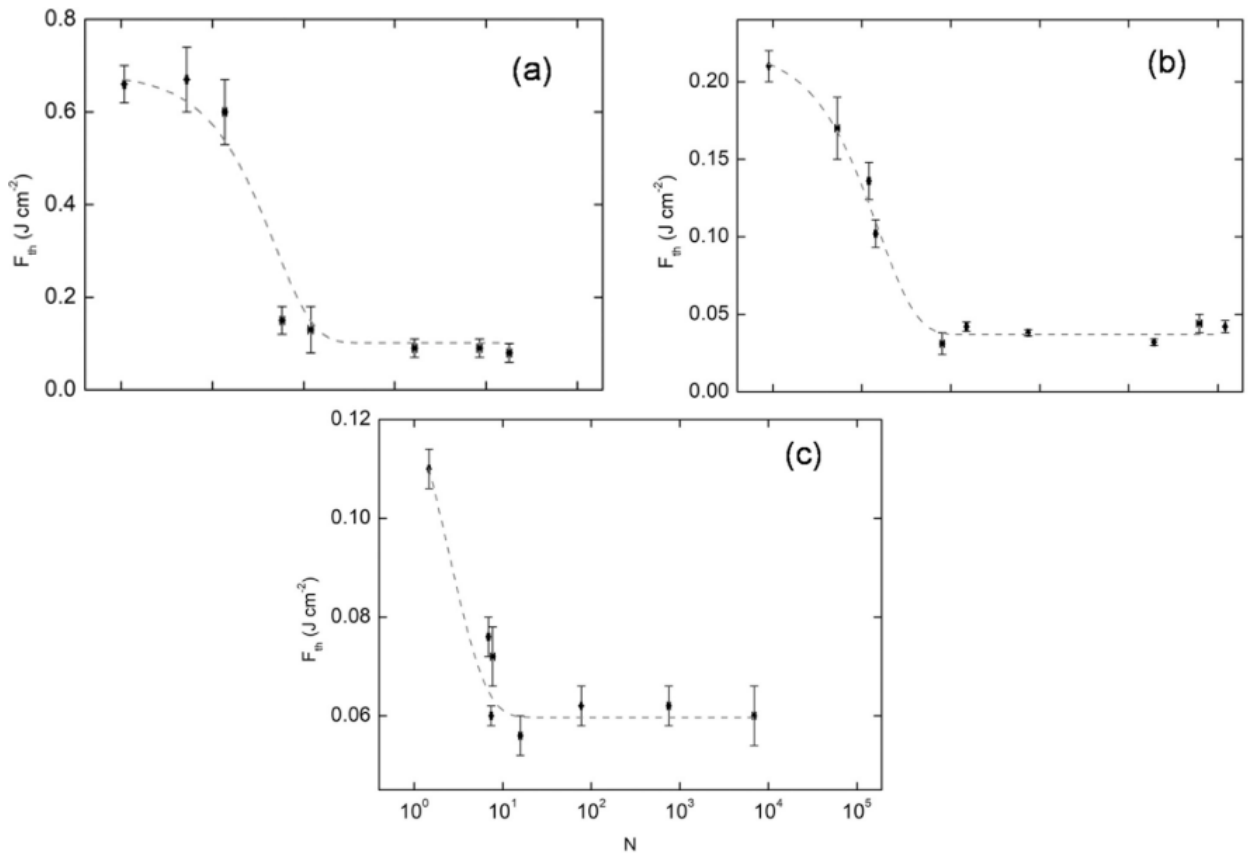
1.1.2 Bangos ilgis

Skaidrių dielektrikų, tokių kaip borosilikatinis BF33 stiklas, modifikavimas femtosekundiniais impulsais yra kritiškai priklausomas nuo parinkto bangos ilgio, kuris tiesiogiai nulemia vyraujančią fotojonizacijos mechanizmą. Esminis šviesos ir medžiagos sąveikos pobūdis slypi santykiyje tarp pavienio fotono energijos ($h\nu$) ir medžiagos draustinės juostos pločio (E_g). Draustinės juostos tarpas BF33 stiklo atveju siekia maždaug 3,7–4,0 eV (priklausomai nuo tikslios sudėties ir spektrinio skaidrumo ribos). Naudojant trumpo bangos ilgio spinduliuotę, kurios fotono energija yra didesnė už draustinės juostos tarpą, kaip pavyzdžiui vieno dažniausio lazerinės spinduliuotės bangos ilgio (1030 nm) ketvirta harmonika (257 nm), fotono energija siekia 4,8 eV. Kadangi ši vertė viršija BF33 draustinės juostos tarpą (4,8 eV > 3,7–4,0 eV), elektronų sužadinimas į laidumo juostą vyksta per tiesioginę vienifotonę sugertį. Tai užtikrina aukštą jonizacijos efektyvumą net ir esant santykinai mažam intensyvumui, nes energijos perdavimas nereikalauja tarpinių kvantinių būsenų. Priešingu atveju, naudojant infraraudonąją (IR) 1030 nm spinduliuotę, fotono energija yra gerokai mažesnė (1,2 eV). Šiuo režimu pavienio fotono energijos nepakanka tarpjuostiniam šuoliui inicijuoti, todėl jonizacija tampa netiesiniu procesu. Elektronų sužadinimas į laidumo juostą galimas tik per vienalaikę bent keturių fotonų sugertį arba stipraus lauko sukeltus efektus. Šių konkuruojančių mechanizmų – daugiafotonės jonizacijos ir optinio lauko sukeltos jonizacijos (tuneliavimo) – santykį bei jų indėlį į medžiagos modifikavimą kiekybiškai aprašo Keldyšo parametras γ_K [5, 7]:

$$\gamma_K = \frac{\omega}{e} \sqrt{\frac{m_e \epsilon_0 c n_0 E_g}{I_0}} \quad (1)$$

Čia m_e ir e žymi elektrono masę bei krūvį, ω – spinduliuotės kampinį dažnį, ϵ_0 – elektrinę konstantą, c – šviesos greitį vakuume, n_0 – medžiagos lūžio rodiklį, E_g – draustinės juostos energiją, o I_0 – lazerio intensyvumą. Fizikinė šio parametro interpretacija nurodo, kad režime, kur $\gamma_K \gg 1$, dominuoja daugiafotonė jonizacija. Priešingai, mažėjant γ_K (didėjant intensyvumui arba bangos ilgiui), stiprėja Zenerio tuneliavimo įtaka, kai lazerio elektrinis laukas tiesiogiai iškreipia potencialinį barjerą [7]. Be jonizacijos mechanizmų, bangos ilgis lemia ir proceso geometrinį tikslumą bei morfologiją:

1. Trumpesnio bangos ilgio bangos pasižymi mažesne difrakcija, todėl spinduliuotę galima sufokusuoti į mažesnę dėmę, pasiekiant aukštesnę erdvinę skiriamąją gebą ir mažesnį paviršiaus šiurkštumą.
2. Bangos ilgis įtakoja inkubacijos reiškinį – procesą, kurio metu dėl defektų akumuliacijos abliacijos slenkstis mažėja didėjant į tašką krentančių impulsų skaičiui. Eksperimentinė šios priklausomybės analizė skirtingiems spektriniais režiams pateikta 2 pav.



2 pav. GaN abliacijos slenkščio F_{th} priklausomybė nuo šūvių skaičiaus N . (a) 1030 nm, (b) 515 nm, (c) 343 nm. Pritaikyta pagal [7].

1.1.3 Energijos tankis

Lazerinės spinduliuotės energijos tankis (angl. fluence), apibrėžiamas kaip energijos kiekis tenkantis paviršiaus ploto vienetui (J/cm^2), yra kritinis parametras, nulemiantis ne tik abliacijos pra-

džia, bet ir patį medžiagos šalinimo mechanizmą bei proceso efektyvumą. Eksperimentiniai tyrimai rodo, kad abliacijos gylis h , tenkantis vienam impulsui, ultratrumpųjų impulsų režime dažniausiai aprašomas logaritminiu sąryšiu su smailiniu energijos tankiu: $h \approx \delta \ln(F_0/F_{th})$, kur δ žymi būdingąjį optinės sugerties arba šilumos sklaidos gylį (angl. skin depth) [8]. Fizikiniu požiūriu išskiriamos dvi pagrindinės energijos tankio sritys. Esant mažoms vertėms virš abliacijos slenksčio (vadinamas "mažo srauto" režimas), abliacijos gylį riboja optinės sugerties gylis, o medžiagos šalinimas pasižymi aukštu tikslumu ir minimalia termine pažaida. Priešingai, pasiekus aukštą energijos tankį, sugerties procese pradeda dominuoti elektronų šiluminis laidumas arba plazmos susidarymas, todėl abliacijos gylis pradeda augti sparčiau, tačiau kartu didėja ir šalutinių efektų rizika [9]. Svarbu pabrėžti, kad neribotas energijos tankio didinimas nebūtinai tiesiogiai proporcingai didina apdirbimo našumą. Viršijus tam tikrą kritinę vertę, pasireiškia plazmos ekranavimo reiškinys (angl. plasma shielding): virš paviršiaus susiformavusi tanki lazerio sukelta plazma pradeda sugerti ir sklaidyti likusią impulso dalį, neleidama energijai pasiekti gilesnių medžiagos sluoksnių [10]. Dėl šios priežasties optimalus mikroapdirbimas paprastai realizuojamas energijos tankio vertėse, kurios tik kelis kartus viršija abliacijos slenksčio vertę ($F_0 \approx e^2 \cdot F_{th}$), užtikrinant geriausią energijos panaudojimo efektyvumą ir aukščiausią suformuotų struktūrų kokybę [11].

1.2 Inkubacija ir abliacijos slenkstis

Medžiagos šalinimo procesas, arba abliacija, prasideda tik tada, kai lazerinės spinduliuotės energijos tankis pasiekia kritinę, specifinę kiekvienai medžiagai būdingą vertę, vadinamą abliacijos slenksčiu (F_{th}). Praktiniuose skaičiavimuose ši vertė dažniausiai nustatoma taikant plačiai pripažintą Liu metodą [12]. Šis metodas remiasi prielaida, kad lazerio pluoštas pasižymi Gausiniu intensyvumo pasiskirstymu, kuris matematiškai aprašomas energijos tankio priklausomybe nuo radialinio atstumo r :

$$F(r) = F_0 \cdot e^{-\frac{2r^2}{\omega_0^2}}, \quad (2)$$

čia F_0 žymi maksimalią (smailinę) energijos tankio vertę centre, o ω_0 reprezentuoja pluošto spindulį lygyje, kur intensyvumas sumažėja iki $1/e^2$ maksimalios vertės. Eksperimentinei analizei F_0 patogiau susieti su tiesiogiai matuojama impulso energija E_p :

$$F_0 = \frac{2E_p}{\pi\omega_0^2}. \quad (3)$$

Atitinkamai, abliacijos slenkstis F_{th} gali būti apibrėžtas per slenkstinę impulso energiją E_{th} . Liu metodo esmė yra tiesinė priklausomybė tarp išabliuoto kraterio diametro kvadrato D^2 ir natūrinio logaritmo nuo smailinio energijos tankio [13]:

$$D^2 = 2\omega_0^2 \ln\left(\frac{F_0}{F_{th}}\right). \quad (4)$$

Ši priklausomybė leidžia eksperimentiškai nustatyti tiek pluošto spindulį ω_0 (iš tiesės posvyrio), tiek abliacijos slenkstį F_{th} (iš ekstrapoliacijos į $D^2 = 0$). Tačiau tiriant daugiainpulsį medžia-

gos apdirbimą, būtina įvertinti inkubacijos reiškinį. Dėl medžiagoje akumuliuojamų mikrodefektų, mechaninių įtempių ar pakitusios sugerties, abliacijos slenkstis mažėja didėjant impulsų skaičiui N į tą patį tašką. Tradiciškai ši sąsaja aprašoma laipsnine priklausomybe:

$$F_{th}(N) = F_{th}(1) \cdot N^{S-1}, \quad (5)$$

kur S yra medžiagos inkubacijos parametras (paprastai $S < 1$; jei $S = 1$, inkubacija nevyksta). Tiksliausiam aprašymui, ypač vertinant asimptotinį slenkščio stabilizavimąsi, naudojamas eksponentinis modelis [7]:

$$F_{th}(N) = (F_{th,1} - F_{th,\infty})e^{-k(N-1)} + F_{th,\infty}, \quad (6)$$

šiam modelyje $F_{th,1}$ ir $F_{th,\infty}$ reprezentuoja abliacijos slenkščius atitinkamai po pirmojo ir begalinio impulsų skaičiaus, o koeficientas k nusako medžiagos jautrumą sukaupitai apšvitai. Šis parametras yra esminis prognozuojant medžiagos pažaidos dinamiką femtosekundinio mikroapdirbimo metu.

1.3 Paviršiaus šiurkštumas ir jo priklausomybė nuo apdirbimo parametrų

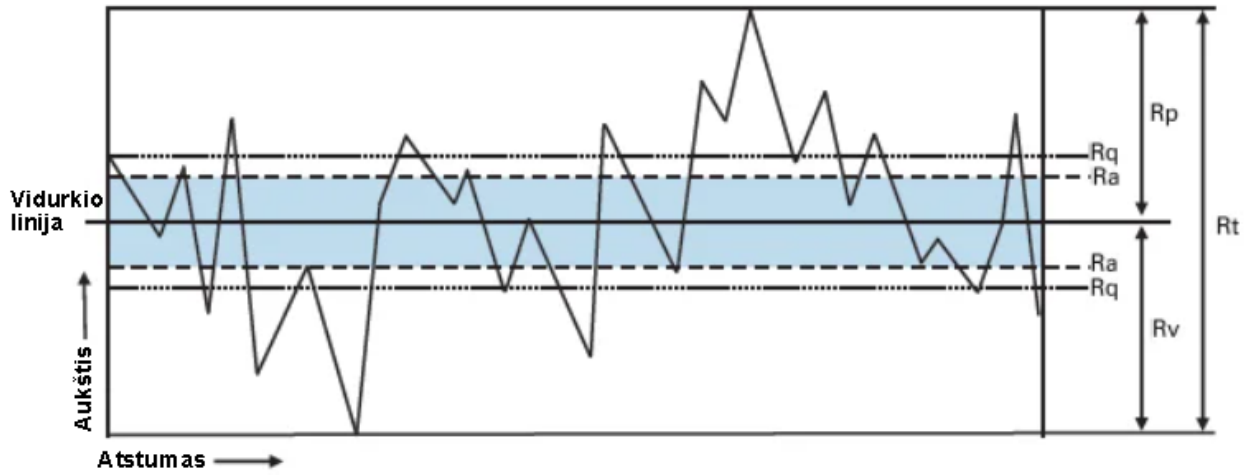
Paviršiaus šiurkštumas yra vienas pagrindinių parametrų, apibūdinančių lazeriu modifikuoto paviršiaus topografinę kokybę ir optines savybes. Paviršiaus morfologijos kokybė lazeriniame mikroapdirbime vertinama naudojant skaitinius parametrus, kurie skirstomi į profilio (2D) ir paviršiaus ploto (3D) charakteristikas [14]. Nors istoriškai dažniausiai buvo naudojami 2D parametrai, šiuolaikiniame moksliniame darbe, ypač analizuojant femtosekundinio lazerio sukeltas struktūras, 3D įvertinimas yra būtinas, nes jis geriau atspindi erdvinį medžiagos pasiskirstymą ir apdirbimo tolygumą.

2D šiurkštumas vertinamas išilgai vienos linijos (profilio). Supaprastinta schema pavaizduota 3 pav. Pagrindinis ir dažniausiai naudojamas parametras yra aritmetinis vidutinis nuokrypis (R_a), kuris apibūdinamas kaip profilio aukščio absoliutinių verčių vidurkis pasirinktame atskaitos ilgyje L :

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |z(x)| dx \quad (7)$$

Čia $z(x)$ yra profilio aukščio nuokrypis nuo vidurkio linijos taške x . Nors R_a yra paprastas apskaičiuoti, jis ne toks jautrus įduboms ir smailėms. Daugiau informacijos apie paviršiaus energiją ir sklaidą suteikia vidutinis kvadratinis šiurkštumas (R_q), kuris yra jautresnis įduboms ir smailėms:

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{L} \int_0^L z^2(x) dx} \quad (8)$$



3 pav. Supaprastinta 2D paviršiaus šiurkštumo parametrų schema.

Kadangi lazerio abliacija sukuria erdvinės struktūros (pvz., kraterius ar kanalus), 2D matavimas gali būti klaidingas, jei linija praeina pro atsitiktinį nelygumą. Todėl naudojamas 3D įvertinimas pagal ISO 25178 standartą [15]. Svarbiausias parametras čia yra vidutinis aritmetinis paviršiaus šiurkštumas (S_a), skaičiuojamas plotui A :

$$S_a = \frac{1}{A} \iint_A |z(x, y)| dx dy \quad (9)$$

Šis parametras yra bene dažniausiai literatūroje, kai kalbama apie paviršiaus šiurkštumo vertinimą, ir parodo bendrą paviršiaus lygumą. Šiame darbe S_a bus naudojamas kaip paviršiaus šiurkštumo įvertinimo parametras. Rečiau, bet paviršiaus šiurkštumas vertinamas ir naudojant vidutinį kvadratinį šiurkštumą S_q :

$$S_q = \sqrt{\frac{1}{A} \iint_A z^2(x, y) dx dy} \quad (10)$$

Šis parametras paprastai būna šiek tiek didesnis už S_a , nes yra jautresnis įdubų ir smailių dydžiui. Verta paminėti ir rečiau lazerinei abliacijai vertinti naudojamus parametrus, kaip paviršiaus smailumas (ekscesas) (S_{ku}) ir asimetrija (S_{sk}), matematiškai apibrėžiami kaip trečiasis ir ketvirtasis standartizuoti paviršiaus aukščių pasiskirstymo momentai plotui A :

$$S_{sk} = \frac{1}{S_q^3} \cdot \frac{1}{A} \iint_A z^3(x, y) dx dy \quad (11)$$

$$S_{ku} = \frac{1}{S_q^4} \cdot \frac{1}{A} \iint_A z^4(x, y) dx dy \quad (12)$$

Čia S_q yra vidutinis kvadratinis šiurkštumas, o $z(x, y)$ – paviršiaus aukščio nuokrypis nuo vidurkio koordinatėje (x, y) . Šie parametrai leidžia nustatyti, ar paviršiuje dominuoja atsitiktinės smailės (kurios didina sklaidą), ar gilios duobelės (kurios gali rodyti lokalią abliaciją). Pavyzdžiui, jei $S_{sk} < 0$, paviršiuje dominuoja įdubos, o tai būdinga kokybiškai lazerinei abliacijai. Vertinant smailumą, atskaitos tašku laikoma vertė $S_{ku} = 3$, atitinkanti idealų normalųjį (Gauso) aukščių pasiskirstymą,

tuo tarpu reikšmės $S_{ku} > 3$ rodo aštirus, spygliškus mikroprofilio nelygumus bei defektus, o $S_{ku} < 3$ signalizuoja apie lėkštas, suapvalintas paviršiaus struktūras.

Galutiniam paviršiaus reljefui kritinę įtaką daro lazerio pluošto impulsų persidengimo procentas (angl. pulse overlap), skirstomas į persidengimą išilgai skenavimo linijos ir tarp gretimų takelių. Nustatyta, kad nepakankamas impulsų persidengimas sukelia periodiškus aukščio netolygumus, tuo tarpu perteklinė energijos akumuliacija dėl per didelio persidengimo gali iššaukti lokalius terminius efektus, skatinančius medžiagos lydymąsi ir antrinę šiurkštumo didėjimą [16].

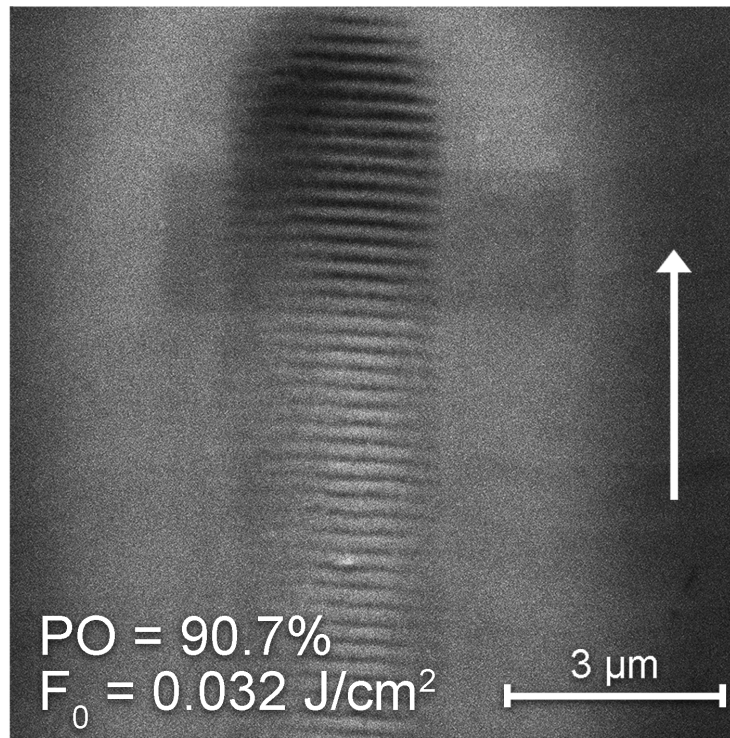
Naudojant ultratrumpius femtosekundinius impulsus, paviršiaus šiurkštumas yra glaudžiai susijęs su abliacijos sprogimo dinamika ir nanodalelių redepozicija (nusėdimu) ant apdirbamo paviršiaus. Fizikiniai tyrimai rodo, kad dirbant režime, kuris tik nežymiai viršija abliacijos slenkstį ($F \approx F_{th}$), galima pasiekti minimalų šiurkštumą, nes išvengiama intensyvaus fazinio sprogimo ir didelių fragmentų atplėšimo [17]. Tačiau specifinis šiurkštumo komponentas atsiranda dėl savaiminio struktūrizavimosi (LIPSS formavimosi), kuris gali būti vertinamas arba kaip defektas (padidėjęs R_a), arba kaip funkcinis nanostruktūrizavimas, priklausomai nuo taikymo srities [18]. Optimizuojant procesą, siekiama rasti pusiausvyrą tarp skenavimo greičio ir impulso energijos [11].

1.4 Lazeriu sukeltos periodinės paviršiaus struktūros (LIPSS): Klasifikacija ir formavimosi mechanizmai

Lazeriu sukeltos periodinės paviršiaus struktūros (angl. Laser-Induced Periodic Surface Structures, LIPSS) yra savaiminio medžiagos organizavimosi reiškiny, pirmą kartą pastebėtas dar anksčiau esančiuose lazerių fizikos eksperimentuose. Šios struktūros pasižymi unikaliumi periodiškumu ir yra skirstomos į dvi fundamentalias grupes, remiantis jų periodo Λ ir sužadinto bangos ilgio λ santykiu:

1. Žemo erdvinio dažnio LIPSS (LSFL): Tai struktūros, kurių periodas yra artimas krintančios spinduliuotės bangos ilgiui ($\Lambda \approx \lambda$) arba šiek tiek mažesnis.
2. Aukšto erdvinio dažnio LIPSS (HSFL): Jos pasižymi gerokai mažesniu periodu ($\Lambda \ll \lambda$), dažnai nesiekiančiu nė pusės bangos ilgio. Dėl savo submikroninės morfologijos šios struktūros dažnai mokslo literatūroje įvardijamos kaip nanogardelės [19].

Bakalauro baigiamojo darbo metu daryta GaN paviršiaus SEM nuotrauka, vaizduojanti aukšto erdvinio dažnio LIPSS pavaizduota 4 pav.



4 pav. Aukšto erdvinio dažnio nanogardelės, susiformavusios ant GaN paviršiaus, apdirbant 257 nm spinduliuote. Poliarizacijos kryptis yra išilgai skenavimo krypties (balta linija).

1.4.1 Teorinis LIPSS formavimosi pagrindas

Per pastaruosius tris dešimtmečius nanogardelių prigimtis buvo intensyviai tyrinėjama, siekiant nustatyti, kaip išoriniai parametrai – bangos ilgis, impulsinė energija, poliarizacijos būseną bei skenavimo greitis – moduliuoja galutinę paviršiaus topografiją [20]. Nors ankstyvieji modeliai rėmėsi paprasta interferencija tarp krentančios bangos ir paviršiaus sklaidos [21] arba stovinčių bangų susidarymu [22], moderni lazerių fizika prioritetą teikia paviršiaus plazmonų poliaritonų (SPP) sužadavimo teorijai.

Priešingai nei klasikiniai optiniai modeliai, SPP teorija leidžia tiksliai numatyti ne tik struktūrų periodą, bet ir jų orientaciją poliarizacijos atžvilgiu, nes ji tiesiogiai įvertina dinaminę medžiagos optinių savybių kitimą impulso metu. Plazmonai poliaritonai yra kolektyviniai elektronų tankio svyravimai, sklindantys metalo ir dielektriko (oro) ribiniu paviršiumi kaip elektromagnetinės bangos.

1.4.2 Medžiagos "metalizacija" ir netiesinė jonizacija

Skaidrių medžiagų (puslaidininkių ar dielektrikų) atveju LIPSS susidarymui būtina sąlyga yra pakankama laisvųjų elektronų koncentracija laidumo juostoje. Veikiant ultratrumpiems impulsams, dėl intensyvios tiesinės bei netiesinės (daugiafotonės) sugerties generuojama tanki elektronų plaz-

ma. Kai elektronų tankis pasiekia kritinę vertę ir jų gyvavimo trukmė viršija impulso trukmę, medžiagos paviršinis sluoksnis įgyja metalams būdingų savybių (neigiamą dielektrinės skvarbos realiąją dalį). Ši momentinė "metalizacija" sudaro sąlygas SPP sklidimui, kurie yra pagrindinis faktorius, formuojantis periodinę energijos pasiskirstymą paviršiuje [23].

1.4.3 Orientacijos priklausomybė nuo poliarizacijos

LIPSS orientacija yra griežtai susijusi su elektrinio lauko vektoriaus kryptimi, tačiau mechanizmai skiriasi priklausomai nuo erdvinio dažnio:

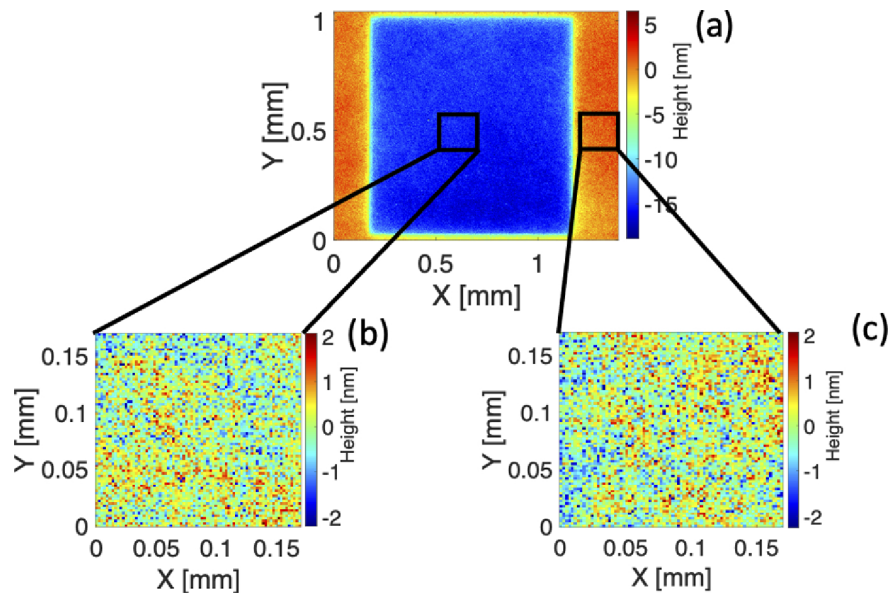
1. HSFL formavimasis: Šios struktūros paprastai orientuojasi statmenai poliarizacijos kryptčiai. Jos formuojasi krintančiais spinduliuotei interferuojant su artimojo lauko (angl. near-field) išsklaidytomis bangomis. Ši lokali elektrinio lauko moduliacija sukuria itin smulkaus periodo gardeles, kurios yra jautrios subpaviršiniams defektams ir nanoplazminiams efektams.
2. LSFL formavimasis: Šio tipo struktūros formuojasi išilgai (lygiagrečiai) poliarizacijos kryptties (arba statmenai jai, priklausomai nuo medžiagos tipo ir srauto). Jos kyla dėl sferinių bangų, išsklaidytų nuo paviršiaus nelygumų, interferencijos su krentančiu spinduliu. Eksperimentiškai pastebėta, kad LSFL dažniau dominuoja didesnio energijos tankio (srauto) režimuose, kur paviršiaus sklaida tampa intensyvesnė [24].

Šiuolaikiniame mikroapdirbime LIPSS technologijos naudojamos kuriant antirefleksinius paviršius, kontroliuojant trintį (tribologija) arba gaminant spalvinius efektus dėl difrakcijos, todėl tikslus šių fizikinių parametrų valdymas yra esminis inžinerinis uždavinys.

2 Literatūros apžvalga

2.1 Motyvacija sub-slenkstinės abliacijos tyrimams

Šiuolaikinėje aukštos pridėtinės vertės optikos pramonėje tradiciniai mechaninio šlifavimo ir poliravimo procesai tampa pagrindiniu stabdžiu siekiant gamybos efektyvumo ir itin sudėtingų, laisvos formos (freeform) paviršių kūrimo. G. Chen ir J. Qiao (2022) atliktas tyrimas [2] tapo esminiu proveržiu šioje srityje, pademonstravusiu, kad femtosekundiniai lazeriai gali ne tik formuoti medžiagą, bet ir vienu metu pasiekti subnanometrinių šiurkštumą ($S_a < 1$ nm). Šių autorių pasiekta paviršiaus kokybė prilygsta arba net lenkia klasikinį cheminį-mechaninį poliravimą. Vienos iš jų modifikuotos zonos nuotrauka pateikta 5 pav.



5 pav. (a) 30 kartų skenuoto paviršiaus topografija ir priartinta (b) lazeriu paveiktos vietos, ir (c) nemodifikuoto paviršiaus topografija. Pritaikyta pagal [2].

Nors Chen ir Qiao darbas įrodė "glotniosios abliacijos" galimybę dirbant ties abliacijos slenksčiu, kyla poreikis dar giliau suprasti medžiagos atsaką į sub-pažeidimo slenksčio (angl. sub-damage threshold) impulsus. Būtent ši sritis tampa pagrindine šio darbo motyvacija dėl kelių priežasčių:

1. Determinuotas medžiagos šalinimas per inkubaciją: Chen ir Qiao tyrimas parodė, kad mažėjant srautui, procesas tampa vis labiau nuspėjamas. Tyrinėjant sritį žemiau vieno šūvio pažaidos slenksčio, galima išnaudoti inkubacijos reiškinių – procesą, kurio metu medžiagoje akumuluojami mikro-pažeidimai galiausiai sukelia itin kontroliuojamą medžiagos šalinimą atominių sluoksnių tikslumu.
2. Terminės pažaidos minimizavimas: Dirbant sub-slenkstiniame režime, dar labiau sumažinama "fazinio sprogo" ir medžiagos aptaškymo rizika, kuri net ir ultratrumpų impulsų atveju gali atsirasti esant per dideliu srautui. Tai atveria galimybes apdirbti ypač jautrias skaidrias medžiagas, išlaikant jų optinį skaidrumą ir struktūrinį vientisumą.
3. Erdvinės skiriamosios gebos didinimas: Kadangi sub-slenkstinė abliacija priklauso nuo netiesinės energijos akumuliacijos, ji leidžia pasiekti pažeidimo sritį, kuri yra gerokai mažesnė už patį lazerio pluošto diametrą, taip peržengiant difrakcinę ribą ir užtikrinant aukščiausią įmanomą apdirbimo tikslumą.

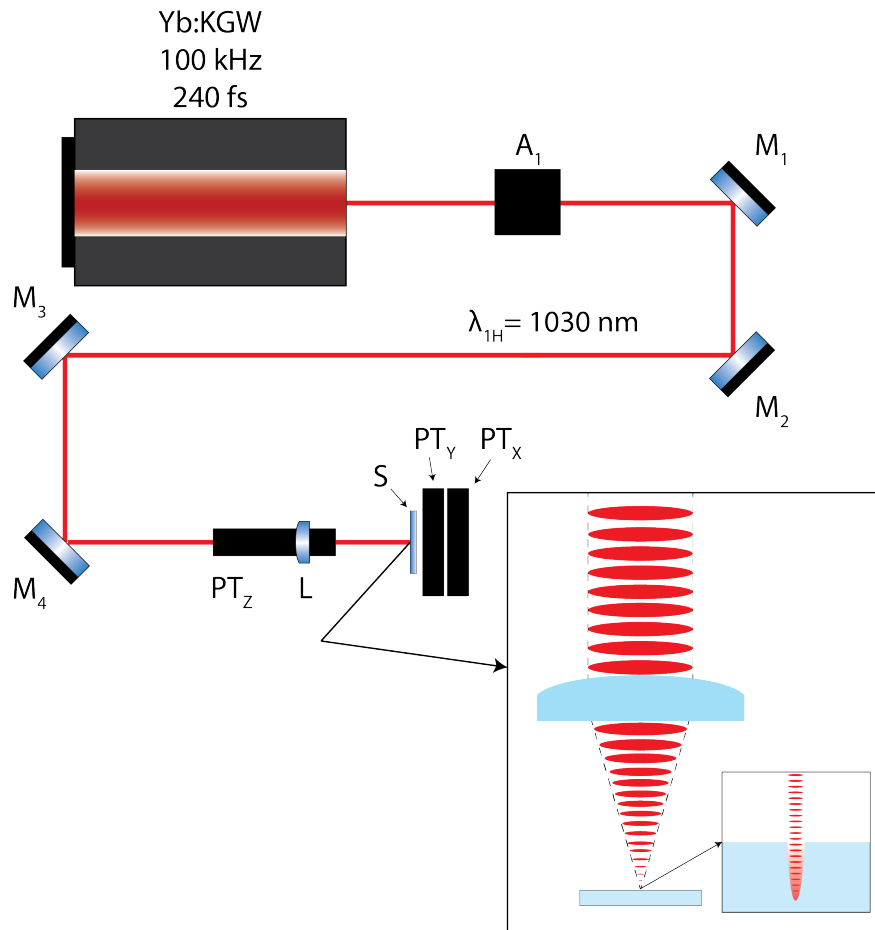
Apibendrinant, šis tyrimas, orientuotas į lygaus paviršiaus abliaciją naudojant sub-pažeidimo slenksčio impulsus, siekia pasigilinti į šią metodiką. Gilinimasis į fizikinius reiškinius, vykstančius žemiau abliacijos slenksčio, yra būtinas žingsnis siekiant sukurti naujos kartos, bedefektų optinių komponentų gamybos metodą.

3 Metodika

Šiame skyriuje bus aptariama eksperimentinė įranga ir pagrindiniai eksperimento principai bei eiga.

3.1 Įranga

BF33 stiklo apdirbimui naudota optinė sistema pavaizduota 6 pav. Spinduliuotės šaltinis yra Yb:KGW kieto kūno lazeris (CARBIDE, UAB "Light Conversion"), spinduliuojantis 1030 nm bangos ilgio, 40 W galios ir 2 MHz impulsų pasikartojimo dažnio femtosekundinę ($211 \text{ fs } 1/e^2$ lygyje) lazerinę spinduliuotę. Motorizuotas ir kompiuteriu programiškai valdomas atenuatorius naudojamas spinduliuotės galios valdymui, o valdomai optinei galiai įvertinti naudojamas terminis galios matuoklis ("Ophir 3A-P"). Bandinio ir lęšio pozicionavimui pasinaudota mikropozicionavimo moduliais ("Aerotech ANT180"), kurie taip pat buvo programiškai valdomi kompiuteriu, mikroapdirbimo programa "DMC" (UAB "Direct Machining Control").

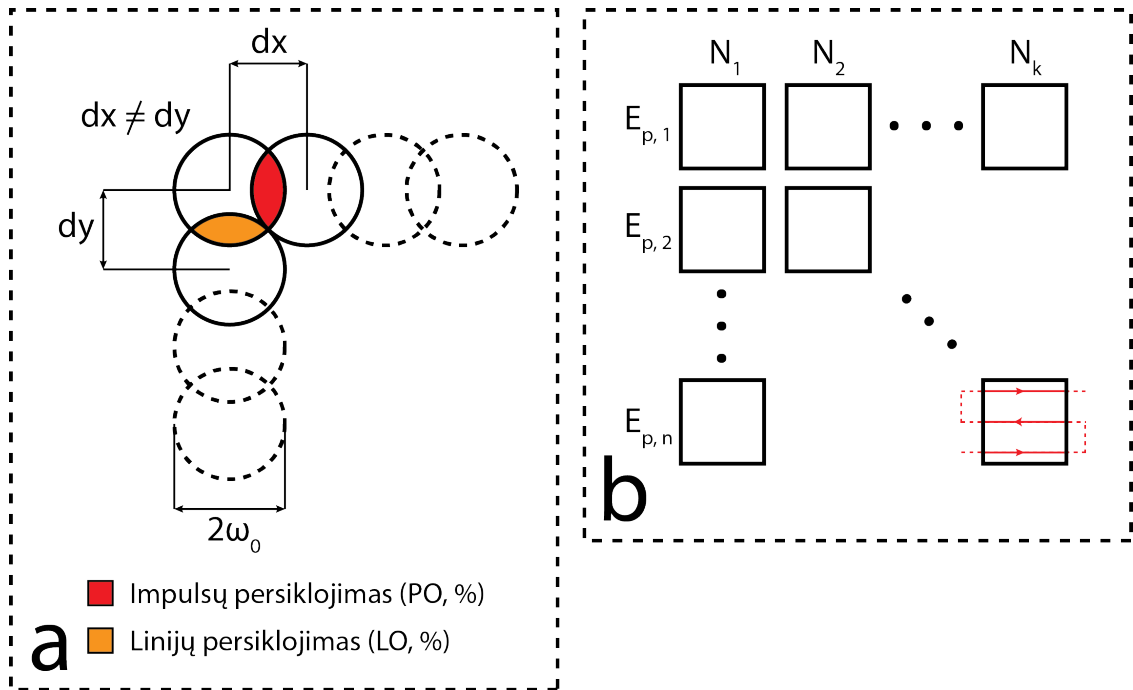


6 pav. Supaprastinta optinės sistemos schema. Čia M_n - dielektriniai veidrodžiai, A_n - motorizuoti atenuatoriai, $PT_{x,y,z}$ - pozicionavimo staleliai, S - bandinys, L - 35 mm židinio nuotolio lęšis.

Pažeidimų topografijos analizei - optinis profilometras ("Lext OLS5100").

3.2 Eksperimentas

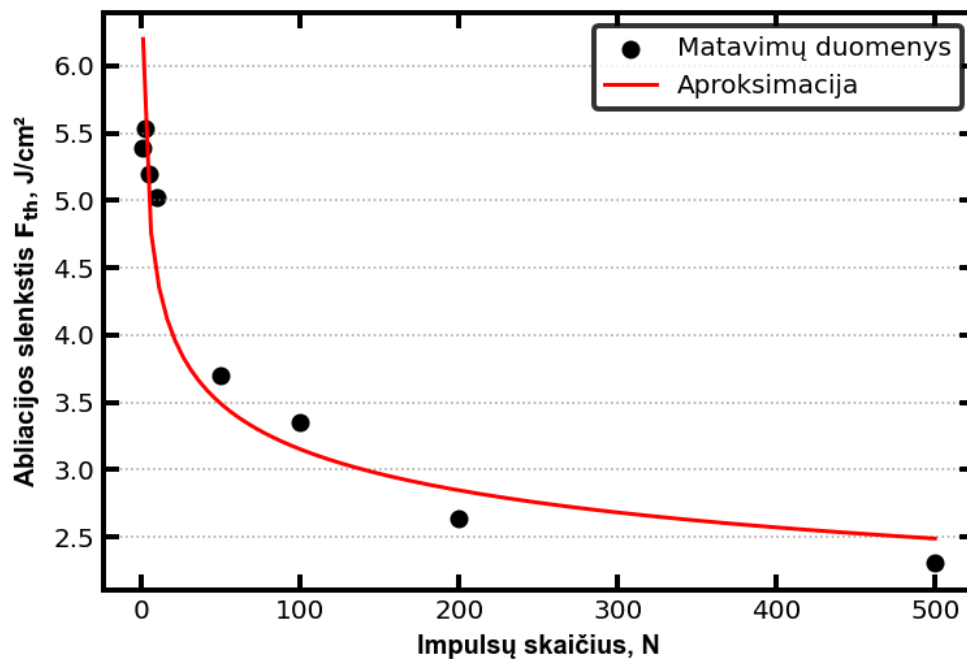
BF33 stiklo abliacijos metodikos principinė schema pateikta 7 pav. Tyrimui buvo išabliuotos "baseinėlių" matricos, impulso energiją kontroliuojant išoriniu atenuatoriumi (lazerio parametrai: 211 fs impulso trukmė, 10 kHz impulsų pasikartojimo dažnis ir 1 W vidutinė pluošto optinė galia). Tarpas tarp impulsų išilgai skenavimo krypties žymimas dx ir viso tyrimo metu buvo konstanta - 0,1134 μm ($PO = 99,15\%$), o tarpas tarp takelių dy - 4,01 μm (žr. 7-a). Kvadratai lazeriu buvo abliuojami linijomis horizontaliai (raudona linija), punktyrinė linija pavaizduota stalelio įsibėgėjimas prieš ir sulėtėjimas už abliacijos zonos, reikalingas išlaikyti pastovų abliavimo greitį (žr. 7-b). Pastovus greitis reikalingas norint išlaikyti kokybę ir vienodas sąlygas viso eksperimento metu. Tarpas tarp impulsų lazerio skenavimo kryptimi buvo valdomas skenavimo greičiu v ir buvo lygus 1,134 mm/s. Vertikalus tarpas tarp impulsų dy kontroliuojamas keičiant bandinio poziciją. Profilometru buvo išmatuoti pasirinktų išabliuotų zonų gyliai h ir vidutinis paviršiaus šiurkštumas S_a .



7 pav. Abliacijos eksperimento supaprastinta principinė schema: a) impulsų persiklojimo pavyzdys, b) formuotų pažeidimų masių pavyzdys.

4 Rezultatai ir aptarimas

Tyrimo pradžioje, siekiant nustatyti BF33 stiklo jautrumą lazerio apšvitai, taikytas Liu metodas (žr. 1.2 skyrių). Eksperimentiškai nustatyti vienašūvis ir daugiašūviai abliacijos slenksčiai $F_{th}(N)$ bei įvertintas pluošto juosmens diametras $2w_0 = 12,66 \mu\text{m}$. Gauta inkubacinė kreivė (8 pav.) demonstuoja klasikinį dielektrikų elgsenos modelį ultra-trumpų impulsų režime.



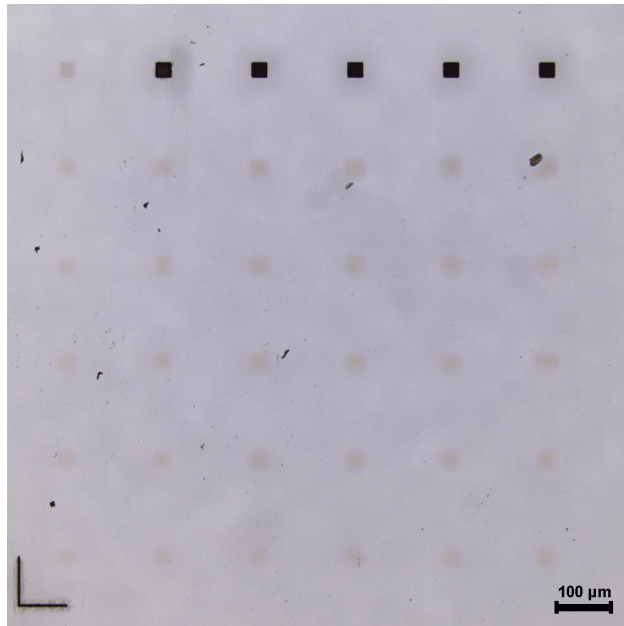
8 pav. Suskaičiuota BF33 stiklo inkubacijos kreivė naudojant 5 formulę.

Grafike matoma, jog didėjant impulsų skaičiui N , energijos tankio slenkstis dėsningai mažėja. Tai aiškinama medžiagos nuovargiu“ arba inkubacijos efektu: kiekvienas sub-slenkstinis impulsas sukuria lokalius struktūrinius defektus, spalvinius centrus ar laisvųjų elektronų tankio pokyčius, kurie padidina medžiagos netiesinę sugertį kitiems impulsams. BF33 stiklui nustatyta inkubacijos konstanta $k = -0,147$ yra esminis parametras, leidžiantis prognozuoti, kada sub-slenkstinis apdirbimas pereis į destruktivią abliaciją.

4.1 Akumuliacinių procesų taikymas ant lygaus stiklo paviršiaus

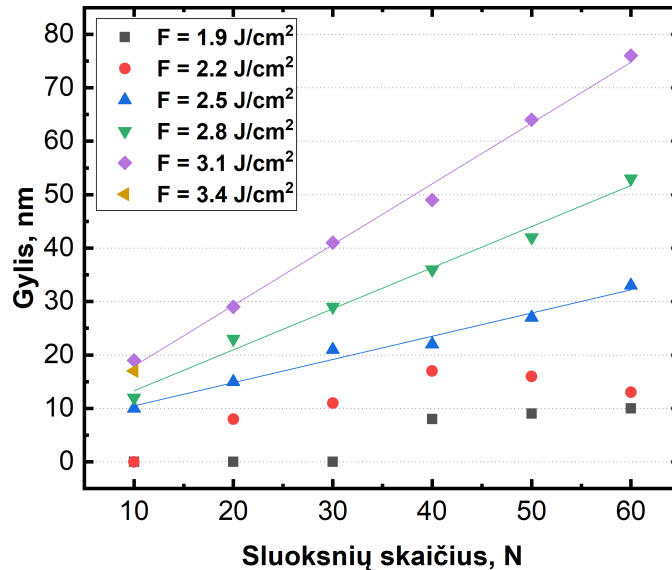
Nustačius slenksčius, pasirinkta strategija dirbti žemiau vienašūvio abliacijos slenksčio, pradedant nuo $F = 1,9 \text{ J/cm}^2$ (35% $F_{th}(1)$). Eksperimento tikslas buvo rasti "švelnios" abliacijos langą, kuriame medžiaga šalinama atominiu lygmeniu, išlaikant pradinį paviršiaus lygumą. Vizuali paviršiaus analizė (9 pav.) atskleidė kritinę ribą tarp dviejų režimų:

1. Fotocheminė/švelni abliacija: Šviesios zonos, kuriose pasiektas kontroliuojamas gylis nepažeidžiant paviršiaus kokybės.
2. Termomechaninė/stipri abliacija: Tamsios zonos, kuriose dėl inkubacijos energijos tankis viršijo sumažėjusį slenkstį, sukeldamas masinį medžiagos šalinimą ir paviršiaus šiurkštumo padidėjimą.



9 pav. BF33 stiklo paviršiaus nuotrauka.

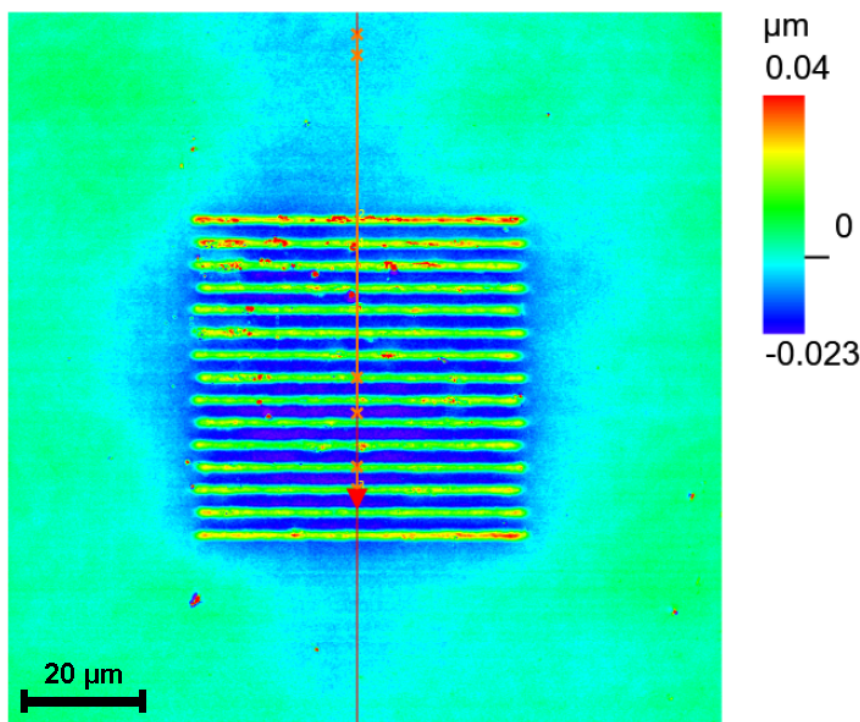
Visi šviesūs baseinėliai buvo matuojami profilometru. Išmatuotų gylių priklausomybė nuo skenuotų sluoksnių skaičiaus pateikta 10 pav. Visais matuotais atvejais vidutinis paviršiaus šiurkštumas buvo mažesnis už profilometro skyrą (išmatuotos vertės: $S_a = 1-2$ nm).



10 pav. BF33 stiklo paviršiaus pažeidimų zonų gylio matavimų rezultatai. Aparatinė profilometro gylio nustatymo paklaida yra 12nm.

Profilometrinė analizė (10 pav.) parodė, kad gylis tiesiškai priklauso nuo skenuotų sluoksnių skaičiaus, kai energijos tankis yra $F = 2,5 \text{ J/cm}^2$ ir daugiau, o tai leidžia itin tiksliai (nanometrų tikslumu) kontroliuoti įdubų gylį. Energijos tankiui neviršijant minėtos vertės, tiesinės priklausomybės nematoma dėl profilometro skyros matuojant gylius, mažesnius už 12 nm (aparatinė paklaida). Stebėtina, kad šiame režime šiurkštumas S_a išliko stabilus (1–2 nm), kas yra kritiškai svarbu

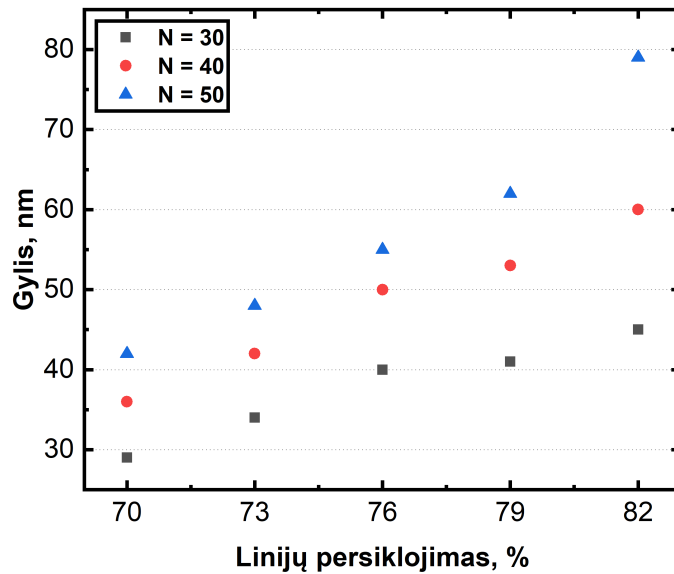
gaminant aukšto efektyvumo difrakcinius elementus, kur bet kokia sklaida mažina prietaiso naudingumo koeficientą. Tačiau ties $F = 3,1 \text{ J/cm}^2$ riba pastebėtas specifinis reiškinys – periodinės struktūros, sutampančios su skenavimo žingsniu dy (11 pav.). Tai, kad struktūros iškilo iki 20 nm virš pradinio paviršiaus, rodo, kad vyksta suminkštėjusios medžiagos pernešimo procesas, kuris, mūsų manymu, yra sukeltas smūginių bangų. Stiklo paviršinis sluoksnis nespėja visiškai atvėsti, todėl suminkštėjusi masė yra išstumama į takelių persiklojimo zonas. Šis efektas brėžia viršutinę energijos tankio ribą, norint išlaikyti optinį lygumą.



11 pav. BF33 stiklo paviršiaus pažeidimo, kur pasireiškė periodinės struktūros aukštesnės už nepažeistą paviršių morfologijos nuotrauka. Energijos tankis ir skenuotų sluoksnių skaičius atitinkamai lygus $F = 3,4 \text{ J/cm}^2$ ir $N = 10$.

Šios periodinės struktūros formuojasi labai siaurame energijos tankio intervale, kai energijos tankis yra pakankamai didelis, kad medžiaga nespėja pilnai atvėsti iki ateinant sekančiam impulsui ir vis dar yra minkšta. Būtent dėl to, medžiaga yra sustumama į matomas struktūras.

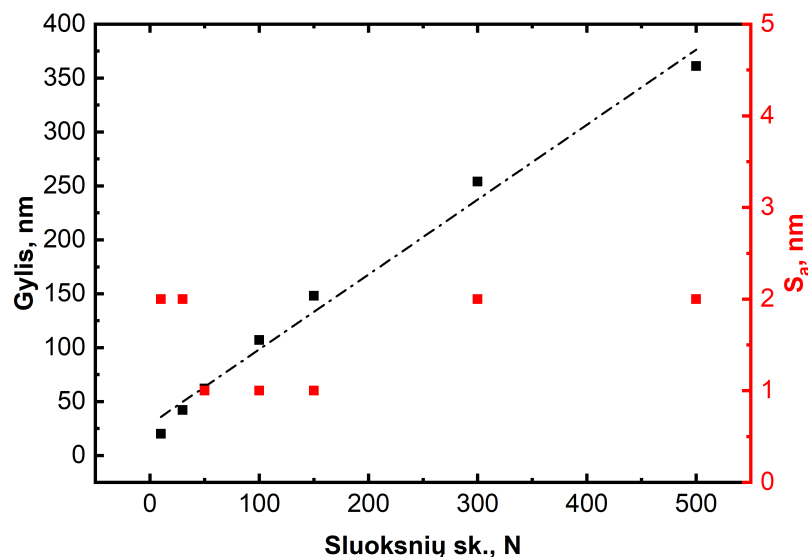
Periodinių struktūrų priklausomybei nuo takelių persiklojimo LO buvo padarytas papildomas eksperimentas, naudojant $F = 3,1 \text{ J/cm}^2$ energijos tankį ir didinant LO vertę nuo 70% iki 82% kas 3%, tačiau itin parametrus jautrių periodinių struktūrų išgauti nepavyko dėl pasikeitusių eksperimento sąlygų (buvo perjustiruotas optinis kelias ir iš naujo surastas židiny). Pažeidimų gylių priklausomybė nuo skenavimų skaičiaus pateikta 12 pav.



12 pav. BF33 stiklo paviršiaus pažeidimų priklausomybė nuo skenavimų skaičiaus, naudojant skirtingas takelių persiklojimo vertes. Aparatinė profilometro gylio nustatymo paklaida yra 12nm.

Iš matavimo duomenų matyti, kad pažeidimų gylių kitimo greitis taip pat yra proporcingas atstumui tarp takelių.

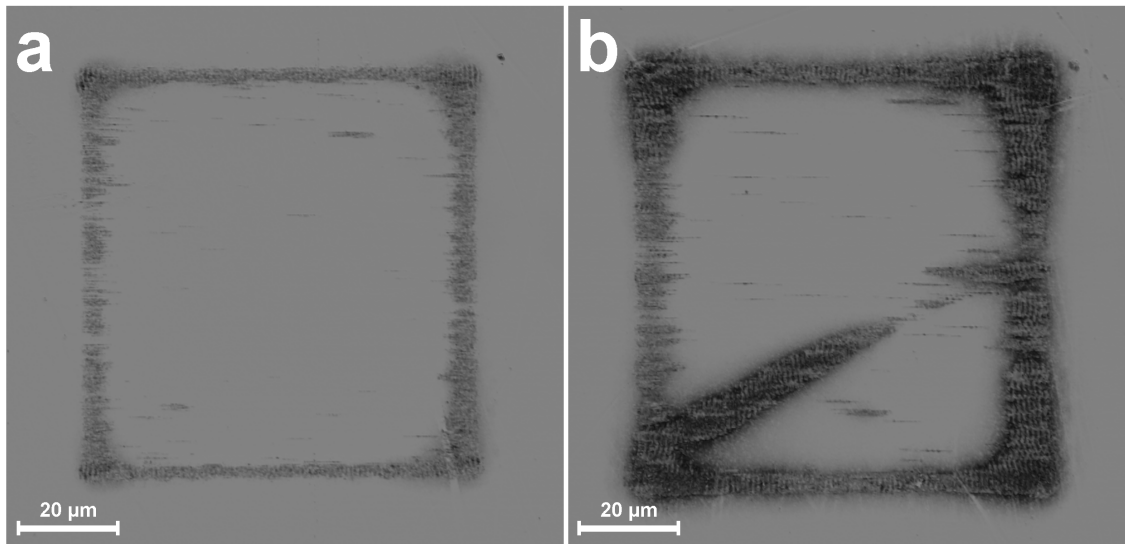
Pabaigai, atliktas eksperimentas, naudojant $F = 3,0 \text{ J/cm}^2$ energijos tankį ir skenuojant iki 1000 sluoksnių skirtingais intervalais, pamatyti, ar galima išgauti pakankamai gilius pažeidimus 2π faziniam poslinkiui, išvengiant nanogardelių susidarymo. Matavimo duomenys pateikti 13 pav.



13 pav. BF33 stiklo paviršiaus pažeidimų gylio ir vidutinio paviršiaus šiurkštumo priklausomybė nuo skenavimų skaičiaus, naudojant $F = 3,0 \text{ J/cm}^2$ energijos tankį. Aparatinė profilometro gylio nustatymo paklaida yra 12nm.

Iš grafiko matyti, kad gylio priklausomybė didėjant skenuojamų sluoksnių skaičiui taip pat yra

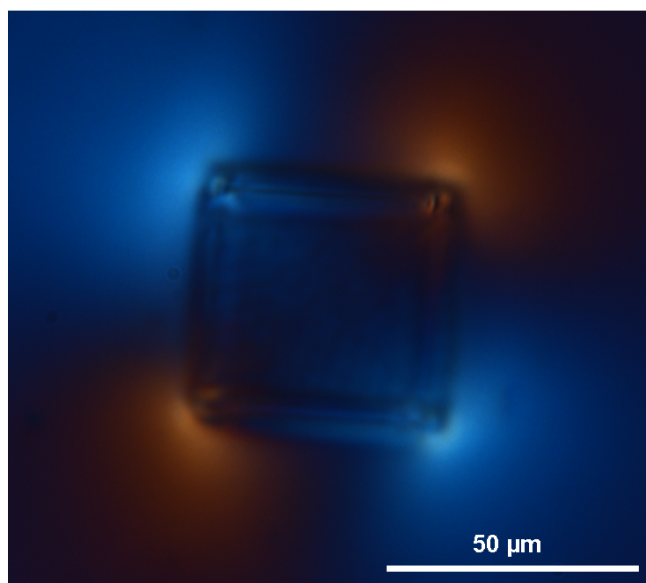
tiesinė. Taip pat buvo išgautas net 361 nm gylis, išlaikant vidutinį paviršiaus šiurkštumą artimą nepažeistam paviršiui (norint BF33 stiklą taikyti difrakciniams elementams 515 nm bangos ilgiui, 2π faziniam poslinkiui išgauti reikia 1,07 μm gylio duobutės). Tačiau prie 300, 500 ir 1000 skenavimų (pastarasis grafike nėra atvaizduotas) matyti nepageidautini paviršiaus pažeidimai. 1000 skenuotų sluoksnių atveju pasireiškė stipri abliacija, kurios metu buvo gauta 42 μm gylio atvirkštinės piramidės formos duobė, kurios sienelių vidutinis paviršiaus šiurkštumas buvo 492 nm, kas įrodo, kad šiame procese maksimalus išgaunamas gylis yra ribotas. Tuo tarpu skenuojant 300 ir 500 kartų, išryškėjo pažeidimai baseinėlio kraštuose. Šių baseinėlių nuotraukos pavaizduotos 14 pav.



14 pav. BF33 stiklo paviršiaus pažeidimų formuotų naudojant $F = 3,0 \text{ J/cm}^2$ energijos tankį profilometro nuotraukos. a) 300 skenuotų sluoksnių, b) 500 skenuotų sluoksnių.

Pateiktose nuotraukose matyti, kad baseinėlių kraštuose aiškiai pradeda formotis periodinės struktūros - nanogardelės, kurių periodas yra artimas naudojamam bangos ilgiui ($\Lambda \approx 1 \mu\text{m}$), ir augimo kryptis tiek 14-a, ir 14-b atvejais yra vienodos, bei statmenos tiesinei spinduliuotės poliarizacijai. Nanogardelių formavimasis, mūsų manymu, buvo lemtas abliacijos slenkščio mažėjimu dėl inkubacijos. Prisiminus 8 pav. grafiką, matyti, kad ties 300 šūvių į vieną vietą abliacijos slenkstis yra mažesnis už naudotą energijos tankį. Tipiškai nanogardelių susidarymas yra griūtinis procesas, prasidedantis nuo pažeidimo, kuris tampa sėkla nanogardelių augimui. Naudojant energijos tankius, didesnius už abliacijos slenkstį, šių nanogardelių augimas yra gana spartus - periodinės struktūros plečiasi skenuojamame lauke kiekvieno skenavimo metu. Tačiau nuotraukos taip pat demonstruoja, kad nanogardelių augimas, naudojant žymiai mažesnę energijos tankį už abliacijos slenkstį, yra lėtesnis, kadangi net po 200 papildomų skenuotų sluoksnių nuo nanogardelių pastebėjimo, nanogardelės išplito ribotame plote.

Bandinys taip pat buvo analizuotas optiniu mikroskopu su sukryžiuotais poliarizatoriais. Optinio mikroskopo nuotrauka pavaizduota 15 pav.



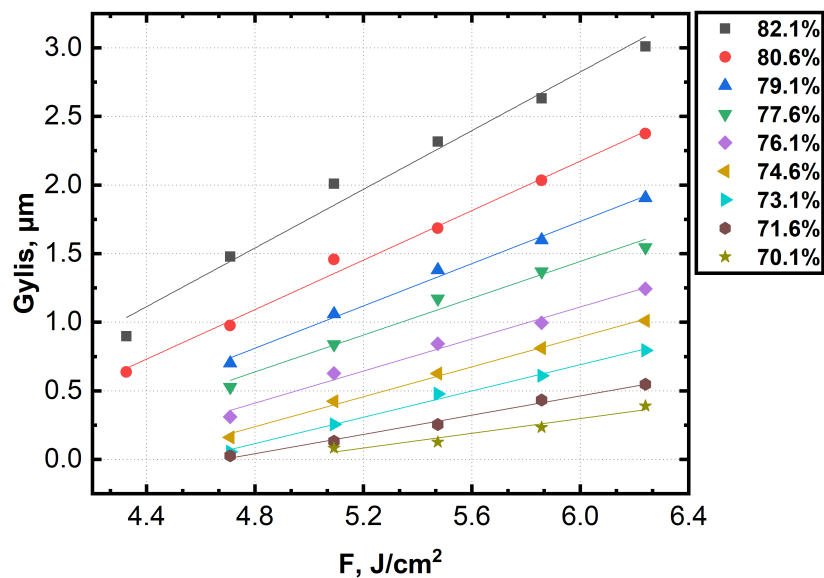
15 pav. Pažeidimo nuotrauka, daryta optiniu mikroskopu ir sukryžiuotus poliarizatorius. Skenuotų sluoksnių skaičius $N = 60$, energijos tankis $F = 2,5 \text{ J/cm}^2$.

Analizė sukryžiuotais poliarizatoriais (15 pav.) atskleidė dar vieną svarbų aspektą – mechaninius įtempius. Nors paviršius atrodo lygus, lazerio sukeltas lokalus įkaitimas ir staigus ataušimas suformuoja tankio gradientus, kurie veikia kaip dirbtinis dvejetainis šurkštumas. Optiniuose elementuose tai gali sukelti nepageidaujamą poliarizacijos sukimą, todėl galutinis produktas turėtų būti atkaitinamas (angl. annealing), siekiant sumažinti ar pašalinti mechaninius įtempius, nekeičiant paviršiaus morfologijos.

4.2 Akumuliacinių procesų taikymas ant šiurkštaus, lazeriu modifikuoto paviršiaus

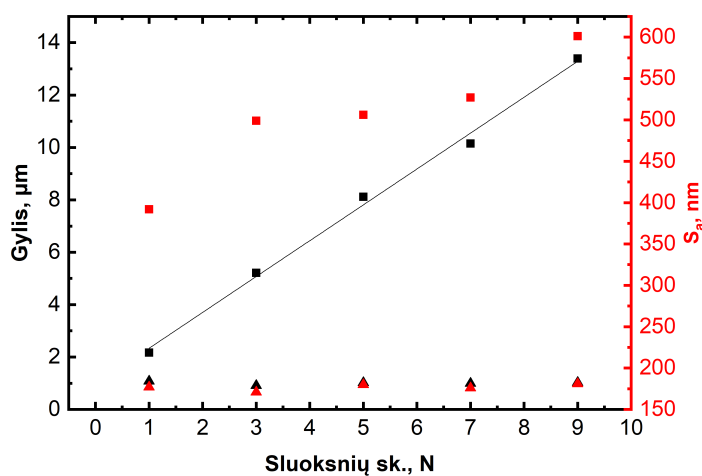
Kadangi akumuliacinius procesus taikant ant lygaus stiklo paviršiaus medžiagos šalinimui nebuvo pasiekta reikiamo baseinėlio gylio 2π faziniam poslinkiui 515 nm bangos ilgio spinduliui, padarytas papildomas eksperimentas, patyrinėti akumuliacinių procesų taikymą ant šiurkštaus, lazeriu modifikuoto paviršiaus. Šio eksperimento tikslas yra pasidaryti $\approx 1 \mu\text{m}$ gylio baseinėlius, pritaikant viršslenkstinę abliacijos procesą, kuo mažesniu vidutiniu paviršiaus šiurkštumu, ir pabandyti abliuotas zonas skenuoti prieš tai patyrinētu metodu, siekiant sumažinti pradinį vidutinį paviršiaus šiurkštumą bei patikrinti, ar galima tiksliai koreguoti abliuotos zonos gylį.

Abliacijos parametrų paieškai buvo abliuojami baseinėliai, skenuojant vieną kartą, keičiant energijos tankį bei atstumą tarp impulsų, išlaikant vienodą impulsų persiklojimą vertikaliomis ir horizontaliomis kryptimis. Eksperimento gylių matavimų duomenys atvaizduoti 16 pav.



16 pav. Pažeidimų gylių priklausomybė nuo energijos tankio, skirtingoms impulsų persiklojimo vertėms. Aparatinė profilometro gylio nustatymo paklaida yra 12nm.

Pradinės abliacijos tyrimas parodė tiesinę gylio priklausomybę nuo energijos tankio ir stiprią koreliaciją su impulsų persiklojimu (16 pav.). Šie rezultatai atitinka literatūroje aprašytų tyrimų rezultatus, kuriuose tiriama abliacijos priklausomybė nuo energijos tankio bei impulsų persiklojimo įvairiose medžiagose. Remiantis šiais duomenimis, suformuoti vienodi baseinėliai ant bandinio paviršiaus abliacijos būdu, naudojant $F = 5,1 \text{ J/cm}^2$ energijos tankį ir 79,1% impulsų persiklojimą, kurie vėliau buvo skenuojami nuo 1 iki 9 sluoksnių su $F = 2,6 \text{ J/cm}^2$ energijos tankiu. Pradinis baseinėlių dugno vidutinis paviršiaus šiurkštumas buvo lygus $S_a \approx 178 \text{ nm}$. Rezultatai, pateikti 17 pav.



17 pav. Pažeidimo gylio ir vidutinio paviršiaus šiurkštumo priklausomybė nuo skenuojamų sluoksnių skaičiaus. Trikampiai simboliai rodo pradines skenuojamo paviršiaus sąlygas. Naudotas energijos tankis $F = 2,6 \text{ J/cm}^2$. Aparatinė profilometro gylio nustatymo paklaida yra 12nm.

Pastebėta, kad akumuliacinių reiškinių taikymas abliacijai smarkiai priklauso nuo pradinio paviršiaus morfologijos ir defektų tankio. Abliacijos sparta, naudojant sub-pažeidimo slenksčio impulsus ant jau šiurkštaus, modifikuoto paviršiaus, išauga beveik trimis eilėmis: nuo 0,75 nm/sluoksniui ant lygaus stiklo iki maždaug 1,1 μm /sluoksniui abliuotoje zonoje. Tokį drastišką efektyvumo padidėjimą, mūsų nuomone, galėjo lemti kelios priežastys: pirma, abliacijos metu sukurti defektai ir spalviniai centrai drastiškai padidina medžiagos sugertį; antra, esamas paviršiaus šiurkštumas sukelia lokalaus elektromagnetinio lauko sustiprėjimą įdubose; trečia, atspindžių įtaka. Tikslios išvados, kas sukėlė tokį abliacijos spartos pokytį, remiantis tyrimo rezultatais, padaryti negalime. Tačiau rezultatai, vaizduojami 17 pav. leidžia daryti išvadą, kad akumuliacinių procesų taikymas tiksliam medžiagos šalinimui, kai spinduliuotė fokusuojama ant šiurkštaus, bei modifikuoto paviršiaus, lemia paviršiaus šiurkštumo augimą, bei gylio kontrolės praradimą. Tai rodo, kad optinių elementų gamybai BF33 stikle vienpakopis sub-slenkstinis procesas yra optimaliausias, kai parametrai, kaip impulsų persiklojimas ir energijos tankis yra optimizuojami taip, kad būtų išvengta nanogardelių, bei termokapiliarinio efekto sukeltų struktūrų formavimosi.

Išvados

1. Taikant sub-pažeidimo slenksčio režimą, pasiektas preciziškas ir determinuotas BF33 stiklo paviršiaus modifikavimas. Nustatyta, kad minimalus abliacijos gylis (per 10 sluoksnių) siekia 8 nm, o maksimalus tirto diapazono gylis – 361 nm. Įrodyta, kad sluoksninis skenavimo metodas leidžia tiesiškai kontroliuoti abliacijos gylį su 3-12 nm žingsniu (per 10 sluoksnių). Toks abliacijos gylio žingsnis leidžia itin tiksliai kontroliuoti gylį, kas gali būti naudojama optinių elementų gamyboje.
2. Eksperimentiškai patvirtinta, kad sub-slenkstinės abliacijos metu BF33 stiklo paviršiaus šiurkštumas nepakinta net abliuojant galias duobes (iki 361 nm), ir S_a siekia 1-2 nm. Toks minimalus šiurkštumas yra pasiekiamas tik dėl akumuliacinio abliacijos režimo ir gali būti asocijuotas su šaltosios abliacijos procesu.
3. Nustatyta, kad naudojant $3,0 \text{ J/cm}^2$ energijos tankį ir skenuojant 300 ir daugiau sluoksnių, formuojasi nanogardelės. Pasikeitęs abliacijos režimas rodo, kad maksimalus išgaunamas abliacijos gylis taikant akumuliacinius procesus ant lygaus BF33 stiklo yra ribotas.
4. Pastebėta, kad taikant akumuliacinius procesus susidaro medžiagos įtempiai. Šie papildomi įtempiai gali bloginti optinio elemento efektyvumą dėl atsirandančio medžiagos dvejoplaužiškumo.
5. Sub-slenkstinis apdirbimas yra netinkamas šiurkštaus (abliuoto) paviršiaus poliravimui, nes dėl defektų nulemtos padidėjusios sugerties ir lokalaus lauko stiprinimo abliacijos sparta išauga trimis eilėmis (iki $1,1 \text{ } \mu\text{m/sluoksniui}$), o tai lemia paviršiaus šiurkštumo augimą.

Literatūra

- [1] S. Prakash and S. Kumar, Microchannel fabrication via direct laser writing, *Microfabrication and Precision Engineering: Research and Development*, 2017, 163–187.
- [2] G. Chen and J. Qiao, Femtosecond-laser-enabled simultaneous figuring and finishing of glass with a subnanometer optical surface, *Optics Letters*, 2022, **47**, 3860–3863.
- [3] T. Kim, H. S. Kim, M. Hetterich, D. Jones, J. M. Girkin, E. Bente, and M. D. Dawson, Femtosecond laser machining of gallium nitride, *Materials Science and Engineering*, 2001, **82**, 262–264.
- [4] A. Žemaitis, *Efficient laser ablation for bio-inspired 3D functional surfaces*. Doctoral dissertation, Vilnius University, 2022.
- [5] D. Stonytė, Stiklinių mikromechaninių sistemų formavimas ultratrumpaisiais lazerio impulsais, Master’s thesis, Vilniaus universitetas, 2020.
- [6] L. Fengping, D. Ye, Y. Lijun, X. Yao, and M. Hong, *Surface Hybrid Structuring by Laser Removal and Subtractive Processing*, 1189–1225. Cham: Springer International Publishing, 2021.
- [7] L. K. Nolasco, G. F. Almeida, T. Voss, and C. R. Mendonça, Femtosecond laser micromachining of GaN using different wavelengths from near-infrared to ultraviolet, *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, **877**.
- [8] B. N. Chichkov, C. Momma, S. Nolte, F. von Alvensleben, and A. Tünnermann, Femtosecond, picosecond and nanosecond laser ablation of solids, *Applied Physics A*, 1996, **63**, 109–115.
- [9] S. Nolte, C. Momma, H. Jacobs, A. Tünnermann, B. N. Chichkov, B. Wellegehausen, and H. Welling, Ablation of metals by ultrashort laser pulses, *Journal of the Optical Society of America B*, 1997, **14**, 2716–2722.
- [10] C. Momma, B. N. Chichkov, S. Nolte, F. von Alvensleben, A. Tünnermann, H. Welling, and B. Wellegehausen, Short-pulse laser ablation of solid targets, *Optics Communications*, 1996, **129**, 134–142.
- [11] B. Jaeggi, B. Neuenschwander, T. Meier, M. Zimmermann, and G. Hennig, High precision surface structuring with ultra-short laser pulses and synchronized mechanical axes, *Physics Procedia*, 2013, **41**.
- [12] J. M. Liu, Simple technique for measurements of pulsed Gaussian-beam spot sizes, *Optics Letters*, 1982, **7**.
- [13] M. Garcia-Lechuga and D. Grojo, Simple and robust method for determination of laser fluence thresholds for material modifications: an extension of liu’s approach to imperfect beams, *Open Research Europe*, 2021, **1**.

- [14] N. Dahotre and S. Harimkar, *Laser Fabrication and Machining of Materials*. New York: Springer New York, 2008.
- [15] International Organization for Standardization, Geometrical product specifications (gps) — surface texture: Areal — part 2: Terms, definitions and surface texture parameters, Standard ISO 25178-2:2021, International Organization for Standardization, Geneva, CH, December 2021.
- [16] A. Y. Vorobyev and C. Guo, Direct femtosecond laser surface nano/microstructuring and its applications, *Laser & Photonics Reviews*, 2013, **7**, 385–407.
- [17] R. Gattass and E. Mazur, Femtosecond laser micromachining in transparent materials, *Nature Photonics*, 2008, **2**, 219–225.
- [18] A. Rudenko, J.-P. Colombier, S. Höhm, A. Rosenfeld, J. Krüger, J. Bonse, and T. E. Itina, Spontaneous periodic ordering on the surface and in the bulk of dielectrics irradiated by ultrafast laser: a shared electromagnetic origin, *Scientific Reports*, 2017, **7**.
- [19] Q. Sun, F. Liang, R. Vallée, and S. L. Chin, Nanograting formation on the surface of silica glass by scanning focused femtosecond laser pulses, *Optics Letters*, 2008, **15**, 2713.
- [20] F. Liang, R. Vallée, and S. Chin, Physical evolution of nanograting inscription on the surface of fused silica, *Optical Materials Express*, 2012, **2**, 900–906.
- [21] Y. Shimotsuma, P. G. Kazansky, J. Qiu, and K. Hirao, Self-organized nanogratings in glass irradiated by ultrashort light pulses, *Physical Review Letters*, 2003, **91**.
- [22] R. Buividas, L. Rosa, R. Šliupas, T. Kudrius, G. Šlekys, V. Datsyuk, and S. Juodkakis, Mechanism of fine ripple formation on surfaces of (semi)transparent materials via a half-wavelength cavity feedback, *Nanotechnology*, 2011, **22**.
- [23] D. Stonyte, V. Jukna, D. Gailevicius, and D. Paipulas, Nonthermal ablation of crystalline c-cut sapphire using femtosecond deep uv laser pulses, *Optics & Laser Technology*, 2024, **179**, 111362.
- [24] A. Rudenko, J. P. Colombier, S. Höhm, A. Rosenfeld, J. Krüger, J. Bonse, and T. E. Itina, Spontaneous periodic ordering on the surface and in the bulk of dielectrics irradiated by ultrafast laser: A shared electromagnetic origin, *Scientific Reports*, 2017, **7**.

Santrauka

Šiame magistro baigiamajame darbe atliekamas išsamus BF33 borosilikatinio stiklo paviršiaus modifikavimo tyrimas naudojant ultratrumpius femtosekundinius lazerio impulsus, siekiant nustatyti optimalias sąlygas preciziškai difrakcinių optinių elementų (DOE) gamybai. BF33 stiklas pasižymi didele draustine juosta (3,7–4,0 eV), todėl naudojant 1030 nm bangos ilgio spinduliuotę su 1,2 eV fotono energija, sąveika su medžiaga remiasi netiesiniais jonizacijos procesais – daugiafotonė sugertis ir tuneliavimas tampa pagrindiniais mechanizmais, sukeliančiais elektronų sužadinimą į laidumo juostą. Pagrindinis tyrimo dėmesys skiriamas akumuliaciniams reiškiniams, konkrečiai – inkubacijos efektui, kuris pasireiškia kaip abliacijos slenksčio mažėjimas didėjant į tą patį paviršiaus tašką krentančių impulsų skaičiui.

Eksperimentinė tyrimo dalis buvo įgyvendinta pasitelkiant Yb:KGW kietojo kūno lazerinę sistemą bei didelio tikslumo pozicionavimo įrangą, o rezultatų analizei naudotas profilometras, leidžiantis pasiekti submikroninę skiriamąją gebą vertinant paviršiaus topografiją. Taikant Liu metodą, buvo tiksliai nustatyti abliacijos slenksčiai skirtingiems impulsų skaičiams. Tyrimas atskleidė, kad dirbant sub-slenkstiniu režimu ant švaraus, poliruoto paviršiaus, galima pasiekti itin aukštą gylio kontrolės lygį, kur pašalinto sluoksnio storis tiesiškai priklauso nuo skenavimo ciklų skaičiaus, o minimalus pasiektas struktūros gylis siekia vos 8 nm. Svarbiausia išvada yra ta, kad toks apdirbimo metodas leidžia išlaikyti pradinį paviršiaus šiurkštumą S_a nanometriniame lygyje (1–2 nm), kas yra kritiškai svarbu faziniams optiniams elementams, kuriems keliama aukščiausi reikalavimai dėl minimalios šviesos sklaidos ir didelio optinio skaidrumo.

Nepaisant sėkmingo precizinio gylio valdymo, darbe identifikuotos ir fizikinės proceso ribos, kurias peržengus paviršiaus kokybė pradeda sparčiai degraduoti. Nustatyta, kad viršijus kritinę energijos tankio ribą (3, 1 J/cm²), paviršiuje ima formuotis periodinės struktūros, susijusios su skenavimo žingsniu, kurias lemia Marangoni efektas – termokapiliarinis išlydytos medžiagos judėjimas dėl atsirandančių temperatūros gradientų. Taip pat pastebėta, kad vykdant itin didelį skenavimo ciklų skaičių (virš 1000), akumuliaciniai procesai sukelia paviršiaus suirimą į atvirkštinės piramidės formos duobes, o šiurkštumas išauga iki šimtų nanometrų. Papildomi eksperimentai su jau pažeistais paviršiais parodė, kad sub-slenkstinė spinduliuotė negali būti naudojama paviršiaus lyginimui, nes esami defektai veikia kaip teigiamas grįžtamasis ryšys, drastiškai (iki 1000 kartų) padidinant abliacijos efektyvumą pažeidimo zonose ir tik dar labiau didinantis paviršiaus netolygumą.

Apibendrinant gautus rezultatus, daroma išvada, kad akumuliacinių procesų panaudojimas sub-slenkstiniame režime yra perspektyvus įrankis kurti lygius paviršius su kontroliuojamu gyliu, tačiau sėkmingam taikymui būtinas griežtas parametų optimizavimas. Difrakcinių elementų, pavyzdžiui, 4-lygių DOE, gamybą vykdyti vieno etapo procesu ant nepažeisto paviršiaus, vengiant pakartotinio šiurkščių zonų apdirbimo ir parenkant tokį energijos tankį, kuris nesukeltų nepageidaujamo termokapiliarinio medžiagos pernešimo. Šis tyrimas suteikia metodines gaires efektyvesniam ir tikslesniam lazeriniam mikroapdirbimui dielektrinėse medžiagose, išlaikant nanometrinę paviršiaus kokybę.

Summary

This Master's thesis provides a comprehensive investigation into the surface modification of BF33 glass using ultrashort femtosecond laser pulses, aiming to establish optimal conditions for the high-precision fabrication of diffractive optical elements (DOEs). Given that BF33 glass features a wide bandgap (3.7–4.0 eV), interaction with 1030 nm radiation (1.2 eV photon energy) relies on non-linear ionization processes, where multi-photon absorption and tunneling become the primary mechanisms for electron excitation into the conduction band. The research centers on accumulation phenomena, specifically the incubation effect, which manifests as a systematic reduction in the ablation threshold fluence as the number of pulses applied to a single spot increases.

The experimental phase was conducted using an Yb:KGW solid-state laser system and high-precision positioning stages, with surface topography analyzed via confocal microscopy to achieve sub-micron resolution. By applying the Liu method, ablation thresholds for various pulse numbers were precisely defined. The results demonstrate that sub-threshold irradiation on pristine, polished surfaces allows for exceptional depth control, where the removed layer thickness depends linearly on the number of scanning cycles, achieving a minimum structure depth of just 8 nm. Crucially, the surface roughness S_a remains at the nanometric level (1–2 nm) throughout this process, which is a vital requirement for phase-modulating optical elements that demand minimal light scattering and high optical transparency.

Despite the success in precision depth control, the study identified critical physical limitations where surface quality degrades rapidly. It was found that exceeding a critical fluence threshold (3.1 J/cm²) triggers the formation of periodic surface structures related to the scan step, driven by the Marangoni effect - thermocapillary movement of the melt phase due to local temperature gradients. Furthermore, when the number of scanning cycles exceeds 1000, accumulation processes lead to surface degradation characterized by the formation of pyramid-shaped basins and a dramatic increase in roughness to hundreds of nanometers. Additional experiments on pre-damaged surfaces revealed that sub-threshold pulses cannot be used for "smoothing," as existing surface defects act as positive feedback, increasing ablation efficiency by up to three orders of magnitude and further exacerbating surface non-uniformity.

In conclusion, the utilization of the incubation effect in the sub-threshold regime is a promising tool for creating smooth surfaces with controlled phase delay, provided that parameters are strictly optimized. For the fabrication of diffractive elements, such as 4-level DOEs, a single-step process on pristine surfaces is recommended, avoiding the re-processing of rough areas and maintaining a fluence that does not provoke unwanted thermocapillary transport. Additionally, thermal annealing is suggested following the laser treatment to relieve residual mechanical stresses caused by localized heating, ensuring the long-term stability and functionality of the optical component. This research provides a methodological framework for more accurate laser micro-machining in dielectric materials, with nanometric surface quality.