

Vilniaus universiteto  
Fizikos fakulteto  
Lazerinių tyrimų centras

Evaldas Kažukauskas

TEORINĖ IR EKSPERIMENTINĖ APDIRBAMOS MEDŽIAGOS PAVIRŠIAUS  
ŠIURKŠTUMO EVOLIUCIJOS ANALIZĖ FOKUSUOJANT FEMTOSEKUNDINIUS LAZERIO  
IMPULSUS

Magistrantūros studijų baigiamasis darbas

Lazerinės technologijos  
studijų programa

Studentas

Evaldas Kažukauskas

Darbo vadovas

dr. Simas Butkus

Konsultantas

dr. Vytautas Jukna

Centro direktorius

prof. Aidas Matijošius

Vilnius 2022

# Turinys

Įvadas.....	3
1. Teorinė dalis.....	4
1.1. Tiesinės sugerties mechanizmai ir savybės .....	4
1.2. Netiesinės sugerties mechanizmai ir savybės .....	7
1.3. Abliacijos procesas naudojant ultratrumpuosius impulsus.....	9
2. Literatūros apžvalga .....	12
3. Metodika.....	18
3.1. Teorinis modelis .....	19
3.2. Eksperimentinė schema .....	21
3.3. Paviršiaus šiurkštumą apibūdinantys parametrai .....	22
4. Rezultatai ir jų aptarimas.....	24
4.1. Vieno sluoksnio apdirbimas.....	24
4.2. Daugelio sluoksnių apdirbimas.....	29
4.3. Diskusija .....	34
Išvados.....	37
Aprobacija .....	38
Literatūros sąrašas .....	39
Santrauka .....	43
Summary.....	44

## Ivadas

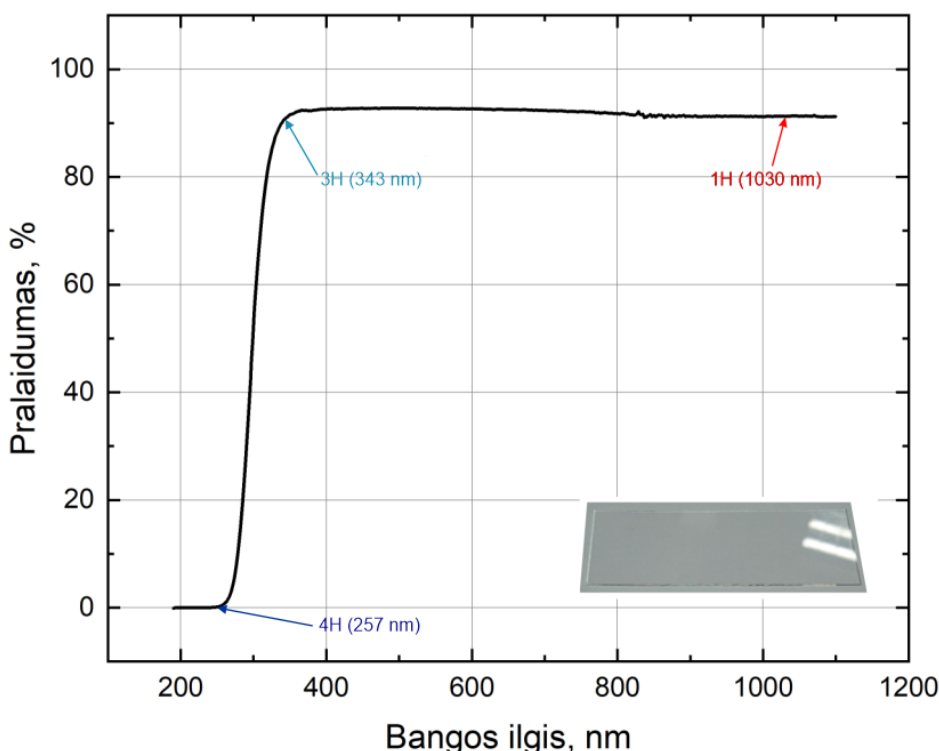
Paviršiaus šiurkštumas yra svarbus medžiagos parametras, kuris daro įtaką kitoms medžiagos savybėms. Metalams paviršiaus šiurkštumas apsprendžia jų korozines savybes [1, 2], titanui ir kitoms medžiagoms – jų paviršiaus drėgnumo savybes [3–5]. Paviršiaus šiurkštumas taip pat daro įtaką skysčių dinamikai [6, 7], optinėms medžiagos savybėms, tokioms kaip sugertis ir atspindys [8, 9]. Kita sritis, kurioje pageidaujami mažo šiurkštumo paviršiai, yra implantų gamyba. Buvo nustatyta, kad įvairių implantų, tokių kaip: kaulų, sąnarių, dantų prigijimo sėkmei didelę įtaką daro ne tik implanto bio-suderinamumas, bet ir jo paviršiaus šiurkštumas [10–13]. Tai ypač svarbu kalbant apie akių lęšiukų implantus – intraokulinius lęšius. Paviršiaus šiurkštumas apsprendžia ne tik šių implantų prigijimo sėkmę, bet ir po-operacinių komplikacijų, kaip antrinių kataraktų formavimosi, tikimybę [14]. Iš pateiktų pavyzdžių akivaizdu, kad paviršiaus šiurkštumas yra svarbus medžiagos parametras. Todėl gebėjimas kontroliuoti ar sumažinti paviršiaus šiurkštumą apdirbimo metu yra ypač paklausus, kalbant apie įvairių paviršių formavimą bei gamybą.

Industrijoje nuo seno medžiagų apdirbimui bei norimos formos išgavimui naudojami standartiniai mechaniniai įrankiai – tekinimo, frezavimo staklės. Deja, naudojant išvardintus mechaninius įrankius, paviršius po apdirbimo būna šiurkštus (1-10  $\mu\text{m}$  eilės [15–17]) ir reikalauja tolimesnio poliravimo. Pastaruoju metu vis dažniau, kaip alternatyva mechaniniams įrankiams, medžiagų apdirbimui yra naudojama lazerinė spinduliuotė [18, 19]. Atsiradus femtosekundiniams lazeriams tapo įmanoma vieno proceso metu apdirbti medžiagas ir pasiekti aukštos kokybės paviršius po apdirbimo ( $< 1 \mu\text{m}$  [20, 21]). Tačiau, net naudojant femtosekundinius lazerius, skaidrių dielektrikų abliacijos metu pasiekti optinės kokybės paviršius ( $R_q < 100 \text{ nm}$  [22]) po apdirbimo yra netrivialus uždavinys.

Šio darbo tikslas yra surasti optimalią skenavimo strategiją, kurią naudojant apdirbant silikatinio stiklo paviršių femtosekundiniais impulsais būtų galima pasiekti mažiausią paviršiaus šiurkštumą. Šiam tikslui pasiekti buvo sukurtas teorinis modelis, galintis atlikti paviršiaus abliacijos modeliavimo užduotis, bei atlikti eksperimentai, siekiant įvertinti modelio patikimumą. Iš modeliavimo ir eksperimento metu gautų rezultatų buvo nustatytas optimalus skenavimo būdas, norint pasiekti mažiausią paviršiaus šiurkštumą

## 1. Teorinė dalis

Lazerinė abliacija tai procesas, kurio metu apšvietus kieto kūno paviršių lazerine spinduliuote nuo paviršiaus yra pašalinama dalis medžiagos. Kiek medžiagos bus pašalinta bei kokios kokybės pažeidimas bus suformuotas, priklauso nuo daug skirtingų parametru, tokių kaip – spinduliuotės energijos tankio, bangos ilgio, impulso trukmės ir kt. Šio darbo metu apdirbimui buvo naudojami 1 mm storio silikatinio stiklo langeliai (langelio dydis – 75x25 mm). Apdirbimas buvo atliekamas naudojant trijų skirtingų bangos ilgių spinduliuotę: 1030 nm, 343 nm bei 257 nm. Pažvelgę į apdirbamos medžiagos pralaidumo spektrą (žr. 1 pav.) galime matyti, kad 1H ir 3H spinduliuotė



1 pav. Silikatinio stiklo (angl. „Soda-lime glass“) pralaidumo spektras. Apatiniame dešiniajame kampe bandinio nuotrauka

tokioje medžiagoje yra sugerama silpnai (> 90 % pralaidumas), kai tuo tarpu 4H spinduliuotės sugertis artima 100 %. Šios dvi skirtingos sugerties sritys dar žinomos kaip tiesinės (pralaidumas ~ 0 %) ir netiesinės (pralaidumas > 90 %) sugerties režimai. Norint tinkamai įvertinti tyrimo metu gautus rezultatus, yra svarbu suprasti, kokią įtaką apdirbimo procesui daro skirtingi sugerties režimai ir kiti parametrai. Todėl šiame skyriuje trumpai aptarsime pagrindinius tiesinės bei netiesinės sugerties mechanizmus, jų įtaką apdirbimo kokybei bei bangos ilgio ir impulso trukmės svarbą. Nors metalų ir dielektrikų sugerties mechanizmai gan stipriai skiriasi, šio darbo rėmuose bus nagrinėjamos tik dielektrikų sugerties savybės, nes darbo metu metalai apdirbami nebuvo.

### 1.1. Tiesinės sugerties mechanizmai ir savybės

Siekiant suprasti, kodėl ir kaip šviesa yra sugerama, reikėtų nagrinėti 1878 metais H. A. Lorentzo pristatytą osciliatoriaus modelį. Modelis teigia, kad dielektrikų atomuose elektronai yra surišti su

branduoliais ir laisvai po gardelę judėti negali (kitaip negu metaluose). Jėgą, kuri laiko elektronus ir branduolius surištus, galima įsivaizduoti kaip nematomą spyruoklę, o tos jėgos dydį galima aproksimuoti Hook'ο dėsnio. Tokia sistema pagal Hook'ο dėsnį turės savo rezonansinį dažnį (žr. (1) formulę).

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{K_s}{\mu}} \quad (1)$$

Čia  $\omega_0$  – rezonansinis dažnis,  $K_s$  – spyruoklės konstanta,  $\mu$  – redukuota sistemos masė. Dažniausiai atomas turi daugiau nei viena elektroną, kurie išsidėstę skirtingose orbitalėse ir turi skirtingas spyruoklės konstantas, todėl viena atomo sistema dažniausiai turės daugiau nei vieną rezonansinį dažnį. Paveikus tokią sistemą išoriniu elektriniu lauku, elektronas pradės osciliuoti. Jeigu išorinio elektrinio lauko dažnis  $\omega$  sutaps su vienu iš atomo rezonansinių dažnių  $\omega_n$ , bus stebimas rezonansas. Elektrono osciliacijų amplitudė stipriai išaugs ir vyks energijos pernaša iš išorinės bangos atomui – stebėsime išorinės elektromagnetinės bangos sugertį medžiagoje. Vadovaujantis šiuo galima nustatyti, kokio dažnio spinduliuotė gali būti sugerta medžiagoje, bet jis nėra pakankamas norint nustatyti sugerties koeficiento dydį bei medžiagos lūžio rodiklį.

Tikslesniam medžiagos sugerties savybių nustatymui naudojamas Lorentzo modelis. Modelis nagrinėja atominio dipolio dinamiką kaip slopstantį harmoninį osciliatorių. Slopinimas realybėje yra sukeliamas osciliojančių dipolių susidūrimų, kurių metu jie praranda energiją. Modelis bendriausiu pavidalu užrašomas lygtimi (2).

$$m_0 \frac{d^2 x}{dt^2} + m_0 \gamma \frac{dx}{dt} + m_0 \omega_0^2 x = -eE \quad (2)$$

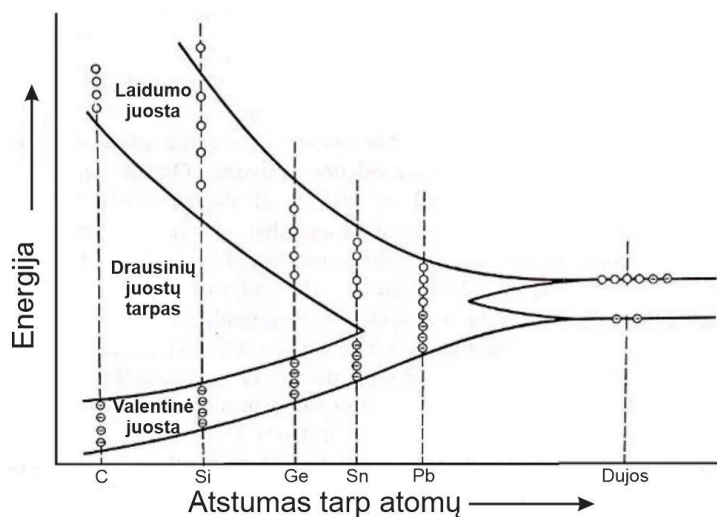
Čia  $m_0$  – elektrono masė,  $x$  – elektrono pozicija,  $\gamma$  – slopimo koef.,  $\omega_0$  – rezonansinis dažnis,  $e$  – elektrono krūvis,  $E$  – elektrinis laukas. Lygtyje pirmasis narys iš kairės aprašo elektrono judėjimą, antras narys – slopinimą dėl susidūrimų, trečiasis narys – elektrono grąžinimo jėgą pagal Hook'ο dėsnį. Dešinėje lygties pusėje aprašyta išorinio elektrinio lauko jėga, kuri veikia elektroną. Lygtyje branduolio judėjimas neįskaitytas, nes branduolio masė daug kartų didesnė už elektrono, todėl galima laikyti, kad branduolys yra stacionarus. Detalų šios diferencialinės lygties sprendimą galima rasti knygoje „Optical Properties of Solids“ [23]. Išsprendę lygtį randame realią ir menamą dielektrinės skvarbos dalis (žr. formules (3) ir (4)), iš kurių toliau galime susirasti lūžio rodiklį (formulė (5)) bei ekstincijos koeficientą (formulė (6)).

$$\varepsilon_1 = 1 + \chi + \frac{\omega_p(\omega_0^2 - \omega^2)}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 - (\gamma\omega)^2} \quad (3)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{\omega_p \gamma \omega}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 - (\gamma \omega)^2}. \quad (4)$$

$$k = \frac{1}{\sqrt{2}} (-\varepsilon_1 + (\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2)^{\frac{1}{2}})^{\frac{1}{2}}. \quad (5)$$

$$\alpha = \frac{4\pi k}{\lambda}. \quad (6)$$



2 pav. Energetinių lygmenų pasiskirstymas esant skirtingiems tarpatominiams atstumams

Čia  $\varepsilon_1$  – reali dielektrinės skvarbos dalis,  $\chi$  – dielektrinė skvarba,  $\varepsilon_2$  – menama dielektrinės skvarbos dalis,  $k$  – ekstincijos koeficientas,  $\alpha$  – sugerties koef.,  $\lambda$  – bangos ilgis,  $\omega_p$  – plazmos dažnis,  $\gamma$  – slopinimo koeficientas. Ekstincijos koeficientas stipriai išauga rezonansinio dažnio aplinkoje. Tai dar sykį parodo, kad spinduliuotė yra sugerama, kai išorinio elektromagnetinio lauko dažnis sutampa su medžiagos atomo dipolio rezonansiniu dažniu. Ekstincijos koeficiento smailės plotis priklauso nuo slopinimo koeficiento  $\gamma$ . Kuo  $\gamma$  didesnis, tuo labiau išplitęs ekstincijos koeficientas, tuo platesnėje dažnių juostoje aplink rezonansinį dažnį vyks sugertis. Sugerties koeficientas gali būti įvertintas naudojantis (6) formule. Matome, kad sugertis priklauso nuo ekstincijos koeficiento bei spinduliuotės bangos ilgio. Norint pasiekti didžiausią sugertį reikia, kad bangos ilgis būtų kuo trumpesnis, bet pataikytų į medžiagos rezonansinį dažnį (didelis ekstincijos koeficientas). Lorentzo modelis tinka medžiagų, kuriose atomai išsidėstę dideliais tarpais, aprašymui. Tipinė tokia terpė – dujos. Kietosiose medžiagose (pavyzdžiui, stikle) atomai yra arti vienas kito. Kai atstumas tarp atomų tampa pakankamai mažas, pavienių atomų elektronai pradeda jausti šalia esančių atomų kuriamus elektrinius laukus, dėl ko pavienės sugerties linijos išplinta ir tampa juostomis (žr. 2 pav.). Išplitusios juostos dar vadinamos laidumo ir valentinės juostomis. Dielektrikuose tarp laidumo ir valentinės juostos yra drausinių juostų tarpas, kuriame nėra energetinių lygmenų. Todėl norint perkelti elektroną iš valentinės juostos į laidumo, reikia, kad sugerto fotono energija būtų lygi arba didesnė už drausinių juostų tarpo energiją. Kadangi tiek laidumo, tiek valentinės juostos yra tolygiai išplitusios, galimi

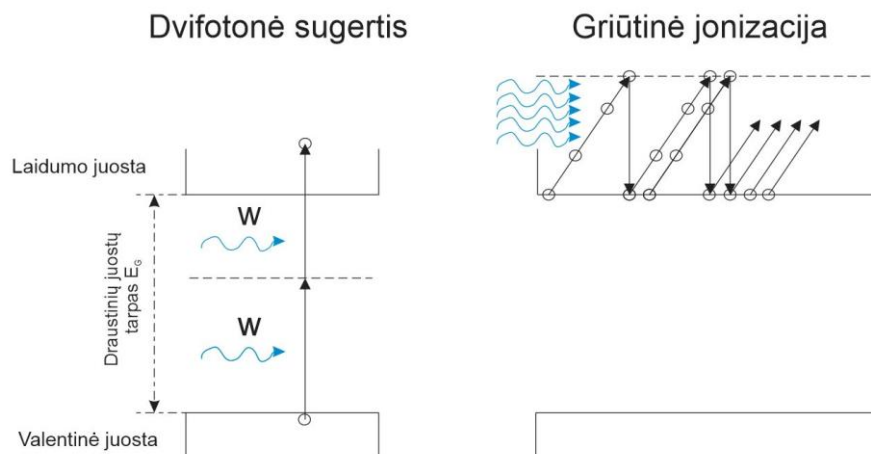
tarpuostiniai šuoliai dideliame dažnių diapazone. Tai yra stebima ir realybėje (žr. Soda-lime sugerties spektrą, 1 pav.). Išmatavus stiklo pralaidumo spektrą matome, kad, kai elektrono energija viršija draustinių juostų tarpą (4.7 eV), pralaidumas nukrenta iki minimalaus, nes visi aukštesni dažniai yra sugeriami.

Taigi, darbe apdirbamo silikatinio stiklo (ang. „Soda-lime“) sugerties spektrinės savybes geriausiai apibūdina juostinis modelis. Jeigu lazerio spinduliuotės fotono energija didesnė nei 4.7 eV, jis bus tiesiškai sugertas nagrinėjamoje medžiagoje. Sugerties koeficientą, kuris apsprendžia, kokiame gylyje bus sugerta spinduliuotė, galime įsivertinti remdamiesi Lorentzo modeliu bei (6) formule. Kaip buvo minėta anksčiau, darbe buvo naudota trijų skirtingų bangos ilgių spinduliuotė: 1030 nm (1H), 343 nm (3H) bei 257 nm (4H). Kaip matome tik ketvirtos harmonikos spinduliuotės kvantai turi pakankamai energijos, kad būtų tiesiškai sugeriami nagrinėjamos medžiagos. Tuo tarpu trečios bei pirmos harmonikų spinduliuotės įprastai šiame bandinyje nesugeriamos.

## 1.2. Netiesinės sugerties mechanizmai ir savybės

Kaip matėme praeitame skyrelyje, norint, kad spinduliuotė būtų sugerta, dielektrike reikia, kad fotono energija būtų didesnė arba lygi draustinių juostų tarpo energijai. Kitaip šviesa nebus sugerta ir pereis medžiagą kiaurai. Vis dėlto net spinduliuotė, kurios pavieniai fotonai neturi reikiamos energijos, kad perkeltų elektroną iš valentinės juostos į laidumo, gali būti sugerta. Tai pasiekama įprastai skaidrią terpę transformuojant į absorbuojančią medžiagą.

Norint skaidrią terpę transformuoti į absorbuojančią medžiagą, reikia sukelti optinį pramušimą. Kitaip tariant, sugeneruoti pakankamai daug laisvųjų elektronų (plazmą), kurie tą spinduliuotę sugertų. Medžiaga prasimuša ir tampa stipriai absorbuojančia plazma, kai pasiekiamas kritinis laisvųjų elektronų tankis, kuris matomo diapazono šviesai yra  $10^{21} \text{ cm}^{-3}$  eilės [24]. Laisvieji elektronai šiuo atveju bus sugeneruoti per netiesinius procesus – daugiafotonę sugertį ir griūtinę jonizaciją, apie kuriuos dabar plačiau pašnekėsime.



3 pav. Netiesinių procesų, daugiafotonės (dvifotonės) sugerties (kairėje) ir griūtinės jonizacijos mechanizmų principinės schemas

Esant lazerinės spinduliuotės intensyvumams didesniems nei  $10^{13} \text{ W/cm}^2$  [25], vyksta netiesinis procesas – daugiafotonė sugertis. Tai procesas, kada vienu metu yra sugeriami du ar daugiau fotonų (žr. 3 pav. kairėje), kurių energijos atskirai yra mažesnės už draustinės juostos tarpą, bet visų fotonų suminė energija yra pakankama perkelti elektroną iš valentinės juostos į laidumo. Kadangi šis procesas reikalauja didelių intensyvumų, todėl jis stipriausiai pasireiškia naudojant ultra-trumpuosius impulsus. Šiame darbe naudojamas lazeris generuoja 230 fs trukmės impulsus, pasiekiami impulsų smailiniai intensyvumai gali gerokai viršyti  $10^{13} \text{ W/cm}^2$ , todėl daugiafotonė jonizacija šiuo atveju bus dominuojantis laisvųjų elektronų generacijos veiksnys. Krūvininkų generacija daugiafotonės sugerties metu aprašoma kinetine lygtimi (7).

$$W_{MPI} = \sigma_K \left( \frac{I}{\hbar\omega} \right)^K N_0. \quad (7)$$

Čia  $\sigma_K$  – daugiafotonės jonizacijos skerspjūvis,  $K$  – netiesinės sugerties eilė,  $N_0$  – terpės atomų (molekulių) tankis. Prisiminus mūsų apdirbamos medžiagos pralaidumo spektrą (žr. 1 pav.) ir naudojamos spinduliuotės bangos ilgį – 343 nm, galime įsivertinti, kad netiesinės sugerties eilė  $K = 2$ , užteks dviejų fotonų, norint perkelti elektroną iš valentinės juostos į laidumo. Tuo tarpu 1030 nm bangos ilgio spinduliuotei reikės 4 fotonų, dėl ko naudojant 1H spinduliuotę reikės didesnio intensyvumo, norint sukelti optinį pramušimą bei sugertį medžiagoje.

Kitas netiesinis procesas – griūtinė jonizacija taip pat prisidės prie laisvųjų krūvininkų generacijos. Šio mechanizmo prigimtį galime įsivaizduoti labai paprastai: bet kurioje skaidrioje medžiagoje visada egzistuoja nedidelis kiekis laisvųjų elektronų dėl įvairių priežasčių (priemaišų, gardelės defektų) [26]. Mūsų atveju laisvųjų elektronų jau bus prigeneruota dėl daugiafotonės sugerties aptartos anksčiau. Šie elektronai sąveikos su lazerio spinduliuote metu įgyja energijos ir yra greitunami. Elektronai, įgiję pakankamai energijos, gali smūgio metu išlaisvinti kitus surištuosius elektronus, tokiu būdu prisidėdami prie laisvųjų elektronų generacijos (žr. 3 pav. dešinėje). Bendras laisvųjų elektronų tankio kitimas dėl daugiafotonės sugerties ir griūtinės jonizacijos aprašomas lygtimi (8).

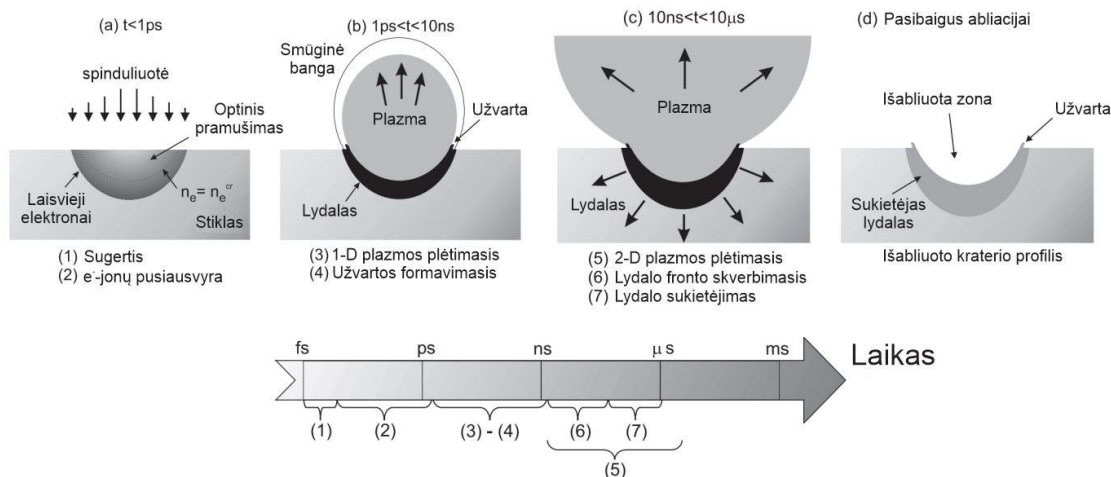
$$\frac{\partial N^e}{\partial t} = W_{MPI} N^e + \eta N^e - \alpha N^e. \quad (8)$$

Čia  $\eta$  yra griūtinės jonizacijos sparta, kuri paprastai yra tiesinė intensyvumo funkcija,  $W_{MPI}$  aprašo daugiafotonės jonizacijos (sugerties) spartą, o  $\alpha$  – laisvųjų elektronų rekombinacijos spartą. Impulsams, trumpesniems nei ( $<1 \text{ ps}$ ), paskutinįjį narį galima atmesti, nes impulsas yra per trumpas, kad elektronai spėtų rekombinuoti [27]. Taigi, matome, kad sukelti pažeidimus Soda Lime stikle naudojant 1H ir 3H spinduliuotę pavyks dėl netiesinių procesų (pagrinde – daugiafotonės sugerties). Kita vertus, kadangi netiesiniams procesams realizuoti reikia didelių spinduliuotės intensyvumų, spinduliuotės dalis, kuri neviršija reikiamo slenksčio, šildo medžiagą ir taip didina šilumos paveiktą



zoną. Todėl sukuriama šilumos paveikta zona naudojant 1H ( $\lambda = 1030$  nm) ir 3H ( $\lambda = 343$  nm) bus didesnė negu naudojant 4H ( $\lambda = 257$  nm) spinduliuotę [28].

### 1.3. Abliacijos procesas naudojant ultratrumpuosius impulsus



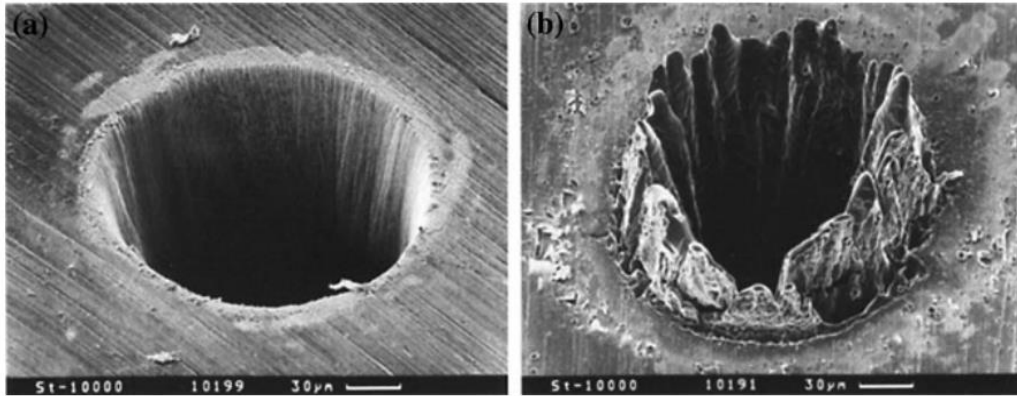
4 pav. Femtosekundinių impulsų abliacijos procesą aiškinantis paveikslėlis. Iš pradžių lazerinė spinduliuotė yra sugeriama per netiesinius procesus, sugeneruojami laisvieji elektronai, vyksta optinis pramušimas (a). Laisvieji elektronai perduoda energiją gardelei, medžiaga išgarinama, susiformuoja aukšto slėgio plazma (b). Plazma plečiasi į visas puses, išlydytos medžiagos frontas skverbiasi į medžiagą (c). Galiusiai po šios abliacijos procesas baigiasi, lydalas sukietėja, suformuojamas krateris (d). Visų procesų charakteringi laikai sužymėti laiko skalėje esančioje apačioje [30]

Abliacija yra procesas, kurio metu pašalinama dalis medžiagos naudojant lazerinę spinduliuotę. Kokie fizikiniai procesai vyks medžiagoje, apsprendžia lazerinės spinduliuotės intensyvumas, bangos ilgis, bandinio savybės ir kiti veiksniai. Kalbant apie femtosekundinių impulsų abliacijos mechanizmus, labai svarbus veiksnys tampa impulso trukmė. Kai impulsai ilgi, elektronai sugertą spinduliuotės energiją spėja perduoti gardelei dar impulso trukmės metu. Taip susidaro didelė sritis aplink spinduliuotės židinį, kuri yra įkaitinama ir išlydoma. Tačiau palyginus mažai medžiagos yra išgarinama, nes smailinė temperatūra židinio centre dėl šiluminių difuzinių reiškinių lieka santykinai maža. Ultratrumpų impulsų atveju šiluminiai difuziniai reiškiniai vyksta jau po impulso ir esant sparčiam energijos perdavimui tik maža dalis spėja difunduoti į aplinkinius sluoksnius. Taip sukuriama aukštos temperatūros sritis židinyje ir medžiaga iškart išgaruoja, praleidžiant lydymosi fazę. Išsamesnė femtosekundinių impulsų abliacijos eiga pavaizduota 4 pav. Per pirmą piko-sekundę sugeneruojami laisvieji elektronai – įvyksta optinis pramušimas ir spinduliuotė yra sugeriama laisvųjų elektronų plazmos (a). Pikosekundžių trukmės metu energija iš laisvųjų elektronų yra perduodama gardelei, kuri įkaista ir yra išgarinama. Virš apdirbamo ploto susiformuoja aukšto slėgio plazma (b), kuri plečiasi ir slegia po savimi esantį ploną lydalo sluoksnį. Plazmos slegiamas lydalas yra stumiamas iš apačios į viršų. Per pirmas 10 nanosekundžių plazmos slėgis drastiškai nukrenta [29], lydalas nebėra stumiamas aukštyn. Išstumtas lydalo sluoksnis veikiamas slėgio skirtumo tarp plazmos ir aplinkos subliūkšta, susiformuoja užvartos (c). Praėjus vienai mikro-sekundei po proceso

pradžios, abliacija visiškai pasibaigia, lydalas sustingsta (d) [30]. Kai impulsai tokie trumpi, medžiagoje elektronų ir gardelės šiluminius mainus aprašo dviejų temperatūrų modelis (žr. (9) ir (10) lygtis):

$$\rho_e c_e \frac{\partial T_e}{\partial t} = D_e \nabla^2 T_e - \gamma(T_e - T_L) + S_e \quad (9)$$

$$\rho_L c_L \frac{\partial T_L}{\partial t} = D_L \nabla^2 T_L + \gamma(T_e - T_L) \quad (10)$$



5 pav. Lazerinės abliacijos būdu padaryti krateriai 100  $\mu\text{m}$  storio plieno plokštelėje, naudojant (a) 200 fs, 780 nm ir 120  $\mu\text{J}$  impulsus, (b) 3.3 ns, 780 nm, 1 mJ impulsus [21]

Čia  $T_e$  – elektronų temperatūra,  $T_L$  – gardelės temperatūra,  $D$  – difuzijos koeficientas,  $\gamma$  – parametras ryšiui tarp dviejų posistemių charakterizuoti,  $S$  – spinduliuotės laisviesiems elektronams perduotas šilumos kiekis. Pasinaudojus šiomis lygtimis galime susiskaičiuoti charakteringą laiką, per kurį elektronų ir gardelės temperatūros tampa vienodomis. Šis charakteringas laikas daugeliui medžiagų yra kelių ar kelių dešimčių pikosekundžių eilės [31]. Tai parodo, kad naudojant femtosekundinius impulsus visa spinduliuotė yra sugerama dar elektronams nespėjus perduoti šilumos gardelei, dėl ko šilumos paveikta zona yra minimali, o pažeidimų kokybė – aukšta. Tuo galime įsitikinti pažvelgę į 5 pav., kur matome pliene padarytus pažeidimus naudojant femtosekundinius ir nanosekundinius impulsus. Akivaizdu, kad naudojant femtosekundinius impulsus, medžiagos paveikta zona mažesnė ir pažeidimo kokybė geresnė nei naudojant nanosekundinius. Kita vertus, nors 5 pav. pateiktoje nuotraukoje matome, kad pažeidimas padarytas naudojant femtosekundinį impulsą yra be užvartų, taip bus nevisada [32]. Buvo nustatyta, kad suformuotų užvartų aukštis naudojant femtosekundinius impulsus stipriai priklauso nuo pažeidimo pločio. Siauro pažeidimo atveju susiformavusi aukšto slėgio plazma savo gyvavimo trukmės metu išstumia lydalą iš poveikio zonos, susiformuoja užvartos. Tuo tarpu, kai pažeidimas platus ( $d_{\text{pažeidimo}} > 40 \mu\text{m}$ ), atstumtas, kuri reikia įveikti lydalui, kad jis būtų išstumtas, išauga. Susidaro tokios sąlygos, kad aukšto slėgio plazma nespėja išstumti lydalo per savo gyvavimo trukmę, todėl užvartos nėra suformuojamos [33]. Taigi, nors pažeidimų padarytų naudojant femtosekundinius impulsus kokybė priklauso ir nuo kitų faktorių kaip pažeidimo plotis ir kt., bet dėl

ypač trumpos impulso trukmės formuojami krateriai turi minimalią šilumos paveiktą zoną ir yra aukštesnės kokybės lyginant su pažeidimais sugeneruotais naudojant ilgesnių trukmių impulsus.

## 2. Literatūros apžvalga

Šio darbo pagrindinis uždavinys yra surasti optimalią skenavimo strategiją, t.y. kaip išdėlioti pavienius impulsus, kad bandinio (mūsų atveju Soda Lime stiklo) paviršius po lazerinio mikroapdirbimo būtų kuo mažiau šiurkštus. Šiame skyrelyje aptarsime kitų autorių pasiektus darbus šioje srityje, jų pasiūlytas skenavimo technikas ir techninius išpildymus.



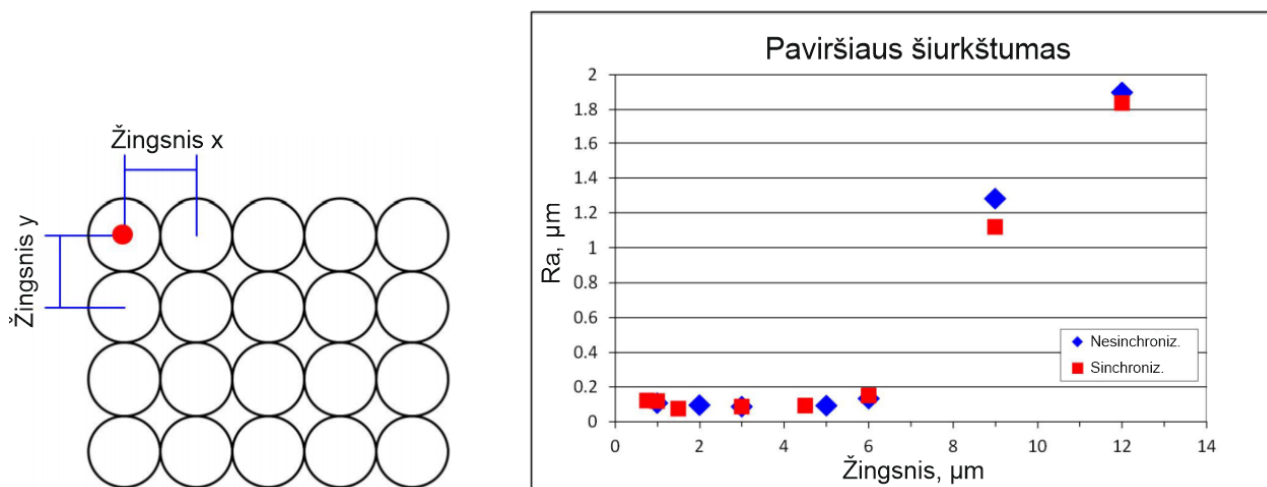
6 pav. Impulsų išdėliojimas naudojant skirtingas skenavimo sistemas. (a) sistema be „sky writing“ režimo, (b) sistema su „sky-writing“ režimu, bet nesinchronizuota, (c) sistema su „sky-writing“ režimu ir sinchronizuota [34]

Standartiškai paviršiaus struktūrizavimas atliekamas norimą formą užpildant dalinai perklotomis linijomis, sudarytomis iš dalinai perklotų pavienių impulsų. Linijų ir impulsų linijose išdėstymas atliekamas pasitelkiant ašį ir galvo-skenerio kombinaciją. Dažniausiai galvo-skeneris ir lazeris yra valdomi per išorinį modulį, kuriam signalą siunčia programinė įranga. Esant tokiai konfiguracijai galimi keli skirtingi impulsų išsidėliojimo būdai, kurie pavaizduoti 6 pav. Pirmu atveju (a) lazeris įjungiamas kartu su skeneriu (arba ašimis) vienu metu. Didėjant ašį pagreičiui atstumai tarp pavienių impulsų didėja, kol pasiekiamas reikiamas greitis ir atstumai tarp impulsų tampa vienodi. Sistemai veikiant tokiam režime matysime gilesnius pažeidimus, sukeltus didelio impulsų persiklojimo apdirbamo plotelio pradžioje. Tokie reiškiniai yra nepageidaujami, todėl jų siekiama išvengti. Išvengti to galime naudojant taip vadinamą pastovaus greičio (angl. „sky-writing“) funkciją, kurios rezultatas pavaizduotas 6 pav. (b) dalyje. Naudojant šią funkciją, ašys yra įgreitinamos iš anksčiau ir lazeris įjungiamas tik tada, kai ašys būna pasiekusios norimą pastovų greitį. Taip galima išvengti impulsų susigrūdimo skenavimo pradžioje. Deja, kaip galime pastebėti paveikslėlyje, jeigu mūsų lazeris šaudo pastoviu pasikartojimo dažniu ir mes kontroliuojame tik „shutterio“ uždarymą-atidarymą, mūsų sistema nebus sinchronizuota ir starto pozicija kiekvienoje linijoje bus atsitiktinai pastumta (atstumą apspręs lazerio pasikartojimo dažnis ir skenerio/ašių greitis). Neapibrėžta starto pozicija taip pat yra nepageidaujamas reiškinys didelio tikslumo paviršių struktūrizavimo kontekste. Galiausiai 6 pav. (c) dalyje matome sistemą, kuri veikia „sky-writing“ režime ir yra sinchronizuota. Naudojant tokią sistemą galima atlikti tikslų paviršiaus struktūrizavimą lazerine spinduliuote.

Visos šio darbo sistemos naudojo „sky-writing“ funkciją, todėl įgreitėjimo zonų buvo išvengta. Darbo metu buvo naudotos sinchronizuotos ir nesinchronizuotos sistemos siekiant nustatyti, kokią

įtaką galutiniam paviršiaus šiurkštumui daro sistemos sinchronizacija. Apie tai bus kalbama plačiau rezultatų skyriuje.

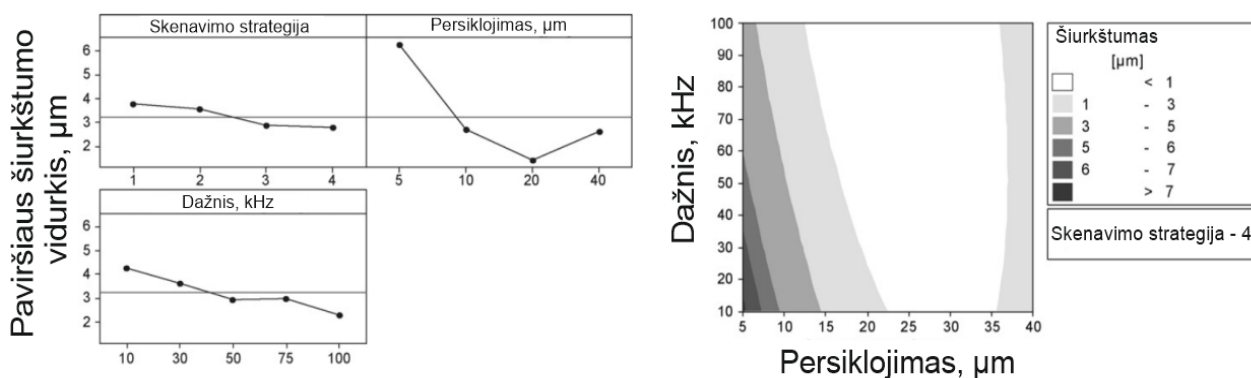
B. Jaeggi, et. al. [34] savo darbe nagrinėjo skirtingas skenavimo technikas ir pasiekiamus paviršių šiurkštumus, naudojant anksčiau aptartas sistemų konfigūracijas, kada skeneris ir lazeris sinchronizuoti ir nesinchronizuoti. Autoriai savo darbe naudojo 532 nm bangos ilgio lazerinį šaltinį, generuojantį 10 ps. trukmės impulsus 50 – 1000 kHz pasikartojimo dažniu. Pluoštas buvo valdomas IntelliScan 14 skeneriu ir fokusuojamas naudojant 100 mm f-tetą telecentrinį lęšį ant bandinio (vario plokštelės) paviršiaus. Sufokusuoto pluošto dėmės spindulys – 5.7  $\mu\text{m}$ . Tyrimo metu, ieškant optiamlios skenavimo strategijos, buvo skenuojamas 1 x 1 mm<sup>2</sup> kvadrato formos plotas kaip parodyta 7 pav. kairėje. Toks raštas buvo skenuojamas 120 kartų keičiant pradžios poziciją skirtingomis strategijomis. Nekeičiant pradžios pozicijos arba keičiant pradžios poziciją atsitiktinai nuo 0 iki  $\lambda/2$  dėl dažnai pasikartojančių impulsų pozicijų po apdirbimo dugne susiformavo periodinės struktūros. Keičiant pradžios poziciją atsitiktinai pagal gausinį pasiskirstymą, kur centras – 0, o standartinis nuokrypis ( $\sigma$ ) –  $\lambda/4$ , periodinės struktūros dugne išnyko. Autoriai nustatė, kad tik naudojant gausinį pasiskirstymą pradžios pozicijai galima išvengti periodinių struktūrų



7 pav. Skenavimo (impulsų išdėliojimo) schema (kairėje), kur raudonas taškas žymi starto poziciją, o mėlynos linijos žingsnio x ir y kryptimis apibrėžimą. Dešinėje autorių pasiekti rezultatai, paviršiaus šiurkštumo priklausomybė nuo žingsnio x ir y kryptimis, kai skeneris ir lazeris sinchronizuoti (raudoni žymekliai) ir nesinchronizuoti (mėlini žymekliai) [34]

formavimosi po apdirbimo ir taip pasiekti mažesnę dugno šiurkštumą. Atliekant paviršiaus šiurkštumo priklausomybės nuo žingsnio tyrimą (žr. 7 pav. dešinėje) autoriai nustatė, kad mažiausias šiurkštumas (~ 90 nm) pasiekiamas, kai žingsnis lygus pusei sufokusuotos dėmės spindulio (2.85  $\mu\text{m}$ ). Palyginus sinchronizuotos ir nesinchronizuotos sistemų pasiekiamus paviršių šiurkštumus, didelio skirtumo nesimato, absoliutinės vertės panašios. Mažinant impulsų persiklojimą stebimas paviršiaus šiurkštumo didėjimas, padidinus žingsnį iki matuojamo lauko matmenų, šiurkštumas turėtų pasiekti pradinį medžiagos šiurkštumą.

Kita mokslininkų grupė [35] taip pat bandė įvertinti paviršiaus priklausomybę nuo lazerio mikroapdirbimo parametrų tokių kaip, impulsų persiklojimas, skenavimo greitis ir kt. Jie naudojo 1064 nm bangos ilgio Nd:YVO<sub>4</sub> lazerį abdirbti aliuminio ir magnio lydiniui. Tokio lazerio impulso trukmė – 5 ns, o sufokusuoto pluošto skersmuo – 40 μm. Pirmos tyrimo dalies metu buvo mėginama nustatyti, prie kokių impulso persiklojimo ir pasikartojimo dažnio parametrų pašalinama daugiausia medžiagos. Buvo nustatyta, kad daugiausia medžiagos pašalinama naudojant mažiausią impulsų persiklojimą (5 μm) ir lazerio pasikartojimo dažnį (30 kHz). Autoriai impulsų persiklojimu laiko atstumą tarp gretimų impulsų. Antros tyrimo dalies metu buvo tirta paviršiaus šiurkštumo priklausomybė nuo skenavimo strategijos, impulsų persiklojimo bei pasikartojimo dažnio. Autoriai naudojo 4 skirtingas skenavimo strategijas. 1 strategija – lygegriaičios linijos visuose sluoksniuose, kaip praeitame aptartame darbe. 2 strategija – lygiagrečios linijos pirmame sluoksnyje, o kiti sluoksniai pasukti 90 laipsnių. Trečia strategija – linijos pasuktos 45 laipsniais pirmame sluoksnyje ir papildomai pasukamos kas 90 laipsnių kituose sluoksniuose. 4 strategija – lygiagrečios linijos



8 pav. Paviršiaus šiurkštumo priklausomybė nuo skenavimo strategijos, persiklojimo bei dažnio (kairėje). Paviršiaus šiurkštumo priklausomybė nuo persiklojimo ir dažnio, kai skenavimo strategija – 4 (dešinėje) [35]

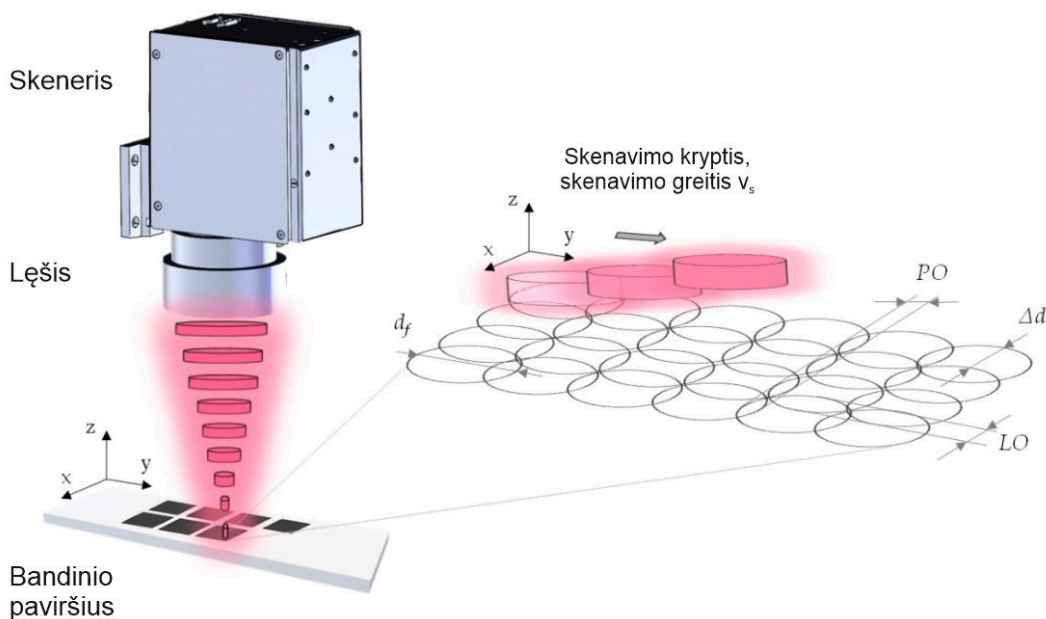
pirmame sluoksnyje ir pasukamos kas 45 laipsniai kituose sluoksniuose. Rezultatai pavaizduoti 8 pav. Paveikslėlio kairėje matome, kad autoriai nustatė, kad mažiausias paviršiaus šiurkštumas pasiekiamas naudojant 4-tą skenavimo strategija, kai pirmame sluoksnyje linijos lygiagrečios ir kiti sluoksniai yra pasukami 45 laipsniais. Tuo tarpu pažvelgus į paviršiaus šiurkštumo priklausomybę nuo persiklojimo, matome, kad geriausios kokybės paviršiai pasiekiami, kai persiklojimas 20 μm, kas šiuo atveju reikštų 50 % impulsų persiklojimą. Toliau autoriai pasirinkę 4 skenavimo strategiją tyrė paviršiaus šiurkštumo priklausomybę nuo persiklojimo ir dažnio. 8 pav. dešinėje galime matyti rezultatus vaizduojantį kontūrinį grafiką. Iš grafiko galime matyti, kad parametrų erdvė, kada pasiekiamas mažas paviršiaus šiurkštumas (< 1 μm), yra gan didelė. Taigi, iš šių rezultatų matome, kad optimalūs parametrai siekiant pašalinti daugiausia medžiagos ir pasiekti geriausią paviršiaus kokybę skiriasi, todėl juos reiktų pasirinkti atitinkamai pagal savo siekiamą tikslą.



Dar viename darbe [36] mokslininkų grupe tyrė Ti6Al4V medžiagos, kuri naudojama implantų gamyboje, paviršiaus šiurkštumo po lazerinio mikroapdirbimo priklausomybę nuo impulsų bei linijų persiklojimo. Paviršiaus šiurkštumas implantų gamyboje yra svarbus veiksnys, nes nuo to priklauso, ar organizmas neatmes implantu ir ar ląstelės sėkmingai prie jo prisikabins. Darbe buvo naudojamas 1030 nm bangos ilgio lazerinis šaltinis, generuojantis 300 fs trukmės impulsus. Spinduliuotės fokusavimui naudojamas 163 nm f-teta lęšis, kuris sufokusuoja pluoštą į 36 μm (1/e<sup>2</sup> aukštyje) skersmens dėmę. Šio tyrimo metu norint pasiekti geriausios kokybės paviršių buvo keičiami PO (impulsų persiklojimas) ir LO (linijų persiklojimas) parametrai. Parametrai paaiškinti principine schema 9 pav. dešinėje bei apibrėžti formulėmis (11) ir (12).

$$PO = \left(1 - \frac{v_s}{d_f * f_{REP}}\right) * 100 \% \quad (11)$$

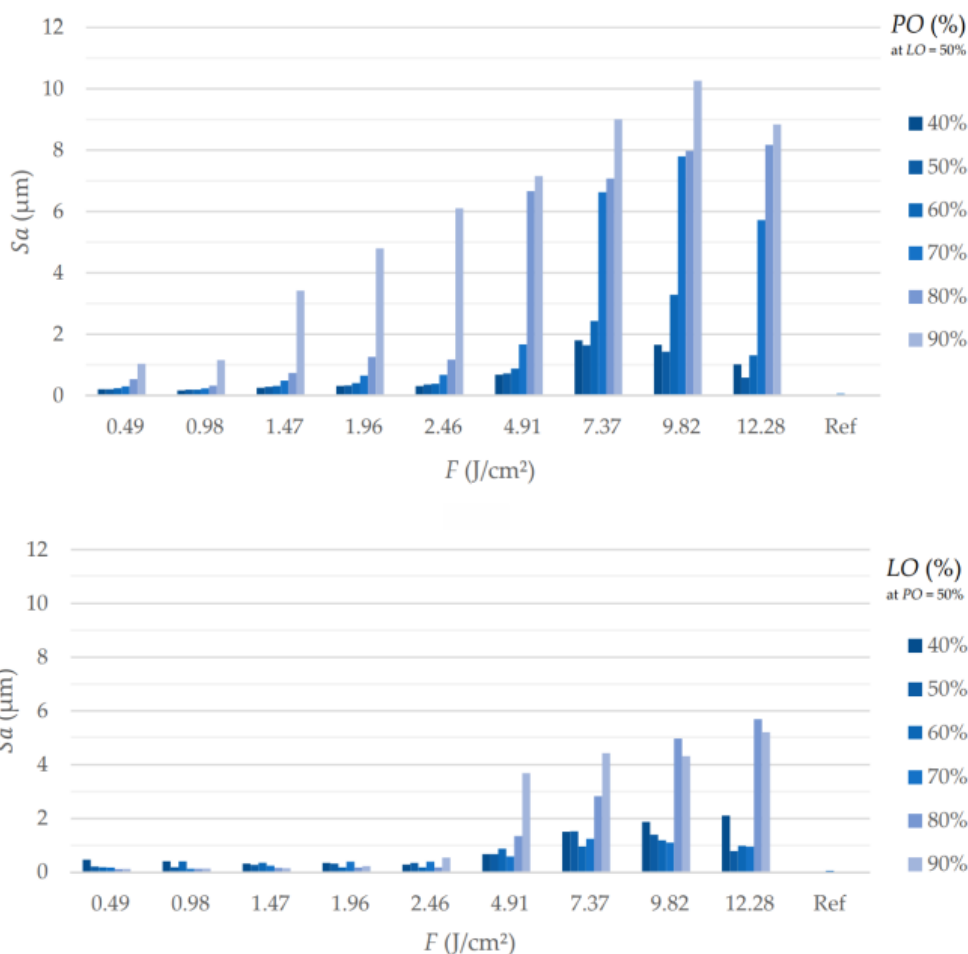
$$LO = \left(1 - \frac{\Delta d}{d_f}\right) * 100 \% \quad (12)$$



9 pav. Goerge Schnell, et. al. darbe naudojama lazerinio mikroapdirbimo sistema (kairėje) ir skenavimo strategijos žymėjimų aiškinimas (dešinėje) [36]

Čia  $v_s$  – skenavimo greitis,  $d_f$  – pluošto skersmuo sąsmaukoje,  $f_{REP}$  – lazerio pasikartojimo dažnis,  $\Delta d$  – tarpas tarp linijų. Persiklojimas tarp impulsų buvo keičiamas, keičiant skenavimo greitį, o linijų persiklojimas, keičiant  $\Delta d$ . Šio tyrimo rezultatai pateikti 10 pav., kur galime matyti, kaip priklauso paviršiaus šiurkštumas nuo naudojamos spinduliuotės energijos tankio, esant skirtingiems impulsų bei linijų persiklojimams. Stebima ryški priklausomybė tarp didelių impulsų bei linijų persiklojimo ir padidėjusio paviršiaus šiurkštumo. Tai galima aiškinti tuo, kad prie didelių impulsų persiklojimų vyksta didesnė šilumos akumuliacija ploto vietoje ir pašalinama daugiau medžiagos. Pašalinus

daugiau medžiagos atsiranda didesni aukščių skirtumai tarp lokalių minimumų ir maksimumų, kas lemia padidėjusį paviršiaus šiurkštumą. Palyginus PO ir LO įtakas, matome, kad PO labiau prisidėda



10 pav. Paviršiaus šiurkštumo priklausomybė nuo naudojamos spinduliuotės energijos srauto esant skirtingiems impulsų bei linijų persiklojimams [36]

prie paviršiaus šiurkštumo didinimo. Tai galime suprasti įsivertinę, kad laiko intervalai tarp skirtingų linijų skenavimo yra milisekundžių eilės (apsprendžia skenavimo greitis bei linijos ilgis), o laiko intervalai tarp pavienių impulsų – mikrosekundžių eilės (nustato pasikartojimo dažnis). Taigi, PO atveju šiluma nespėja taip greitai difunduoti iš poveikio zonos lyginant su LO atveju, todėl persiklojimai tarp pavienių impulsų yra pagrindinis paviršiaus šiurkštumą apsprendžiantis veiksnys. Kita vertus, tyrimo metu buvo nustatyta, kad geriausi paviršiaus šiurkštumai pasiekiami, kai impulsų persiklojimas 40-50%, o linijų persiklojimas 50-70 % (žr.10 pav.).

Tuo tarpu Dave F. Farson, et. al. [37] apdirbinėdami silikatinį stiklą (angl. soda lime) naudojant  $\text{Ti}:\text{Al}_2\text{O}_3$  lazerį (755 nm) ir generuojant 150 fs trukmės impulsus stebėjo, kaip kinta paviršiaus šiurkštumas vienodai keičiant persiklojimą tarp impulsų ir linijų. Paviršius buvo skenuotas 5 kartus išlaikant pastovų pluošto dydį sąsmaukoje ( $10 \mu\text{m}$ ). Autoriai nustatė, kad paviršiaus šiurkštumas gali būti sumažintas naudojant didelį impulsų persiklojimą ir mažą energijos srautą, tačiau šios abi strategijos lemia mažesnę pašalinamą medžiagos kiekį. Darbo metu buvo pademonstruota, kad



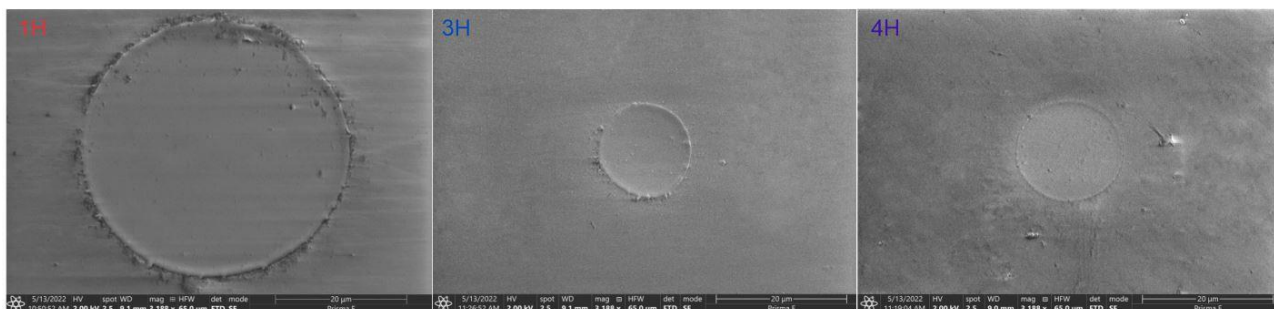
naudojant minėtąją sistemą ir 75 % impulsų persiklojimą po 5 sluoksnių skenavimo galima pasiekti 100 nm paviršiaus šiurkštumą, tuo tarpu impulsus perklojant tik 25 % pasiekiamas paviršiaus šiurkštumas – 270 nm. Autoriai spekuliuoja, kad sumažėjęs paviršiaus šiurkštumas prie 75 % impulsų persiklojimo lemiamas didesnės abliacijos spartos bei izotropinio išabliuotos medžiagos nusėdimo.

Taigi, iš apžvelgtų ir kitų literatūroje randamų skenavimo strategijas nagrinėjančių straipsnių [38–42] matome, kad daugelis nagrinėja tik vieno sluoksnių skenavimo strategijas, t.y. paviršiaus šiurkštumo priklausomybę nuo impulsų persiklojimo. Skirtinguose literatūros šaltiniuose randamos skirtingos optimalios impulsų persiklojimo vertės, dažniausiai aptinkama vertė – 50 %. Deja, atliekant lazerinį mikroapdirbimą realiems pritaikymams, yra reikalaujama pašalinti kelis ar net kelis šimtus mikrometrų medžiagos, kas yra atliekama skenuojant paviršių ne vieną, bet daugelį kartų. Skenuojant paviršių daug kartų skirtingų skenavimo strategijų variacijų skaičius auga laipsniškai, todėl tiesiog eksperimentiškai ieškant optimalios skenavimo strategijos siekiant išgauti lygiausią paviršių gali užtrukti labai ilgai. Pakeitus lazerinį šviesos šaltinį ir apdirbamą medžiagą, reikėtų ieškoti optimalios skenavimo strategijos iš naujo. Adresuodami šią problemą, mes sukūrėme teorinį modelį, kur įvedus medžiagos ir lazerinio šaltinio parametrus, galima pamatyti, kaip kis medžiagos paviršius po lazerinio mikroapdirbimo su pasirinktais parametrais (impulsų persiklojimų, sluoksnių posūkių ir kt.), ir taip surasti optimalią skenavimo strategiją. Šis modelis sutaupo ne tik laiko ieškant optimalios skenavimo strategijos norint pasiekti mažiausią paviršiaus šiurkštumą, bet ir resursų, kadangi nereikia atlikti realių eksperimentų.

### 3. Metodika

1 lentelė. Darbe naudotų lazerinių šaltinių parametrai

	Lazeris	Bangos ilgis	Impulso trukmė	Impulso energija	Pasikartojimo dažnis	Pluošto skersmuom sasmaukoje (1/e aukštyje)	Pažeidimo skersmuo	Pažeidimo gylis
Šaltinis 1	Yb:KGW lazerinis šaltinis „Carbide“	1030 nm (1H)	300 fs	173 μJ	200 kHz	24.4 μm	38 μm	432 nm
Šaltinis 2	Yb:KGW lazerinis šaltinis „Carbide“	343 nm (3H)	220 fs	10.8 μJ	602 kHz	12.6 μm	13 μm	226 nm
Šaltinis 3	Yb:KGW lazerinis šaltinis „Pharos“	257 nm (4H)	220 fs	8.72 μJ	50 kHz	22 μm	15 μm	113 nm

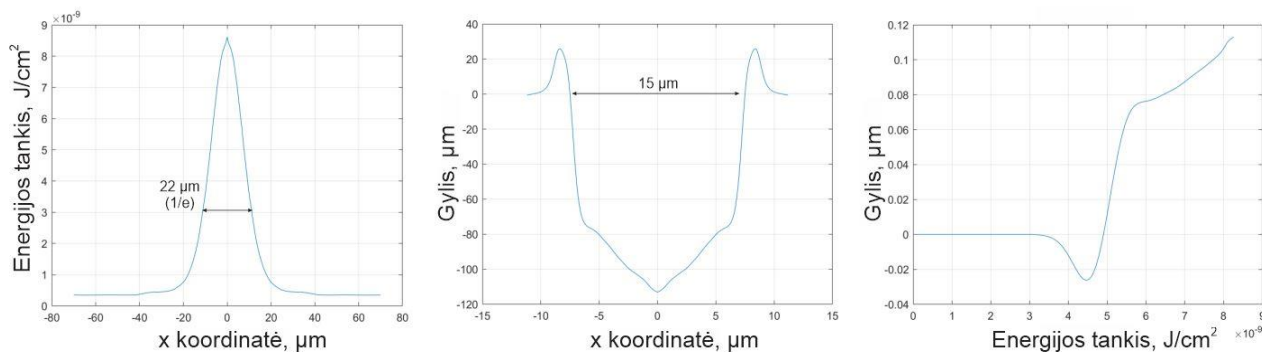


11 pav. Krateriai padaryti su pavieniais šūviais naudojant skirtingus lazerinius šaltinius. Kairėje naudojant šaltinį 1, per viduri naudojant šaltinį 2, dešinėje naudojant šaltinį 3. Nuotraukos darytos su skenuojančiu elektroniniu mikroskopu „Thermo Scientific™ Prisma™ E SEM“

Tyrimo metu buvo naudoti du skirtingi lazeriniai šaltiniai (Yt:KGW lazeriai „Pharos“ bei „Carbide“) bei trys skirtingi bangos ilgiai (1030 nm, 343 nm, 257 nm). Buvo siekiama išsiaiškinti, ar tyrimo metu nustatytos skenavimo strategijos išsilaiko naudojant skirtingus bangos ilgius. Prie to paties buvo ištirta paviršiaus šiurkštumo priklausomybė nuo bangos ilgio. Darbo metu naudoti lazeriniai šaltiniai ir jų savybės pateiktos lentelėje 1. Pavienių šūvių suformuoti krateriai naudojant skirtingus lazerinius šaltinius pavaizduoti 11 pav. Kadangi lazerinio šaltinio 1 energijos tankis buvo daug kartų didesnis nei šaltinių 2 ir 3, pažeidimas, padarytas naudojant lazerinį šaltinį 1, atitinkamai didesnis. Galime pastebėti, kad visais trim atvejais išabliuoti krateriai taip pat turi užvartas (kodėl užvartos formuojasi skaitykite 1.3 skyriuje). Taip pat matoma, kad visų pažeidimų dugno kokybė yra aukšta, palyginama su neapdirbto paviršiaus. Taip yra dėl to, kad naudojant femtosekundinius impulsus sukuriama šilumos paveikta zona yra minimali, todėl formuojami aukštos kokybės pažeidimai [43]. Visi eksperimentai buvo atlikti ant 1 mm storio silikatinio stiklo paviršiaus (daugiau apie bandinio savybes ir jų sąryšį su darbe naudojamais lazeriniais šaltiniais skaitykite 1 skyriuje). Pradinis bandinių šiurkštumas buvo  $R_a < 10$  nm.

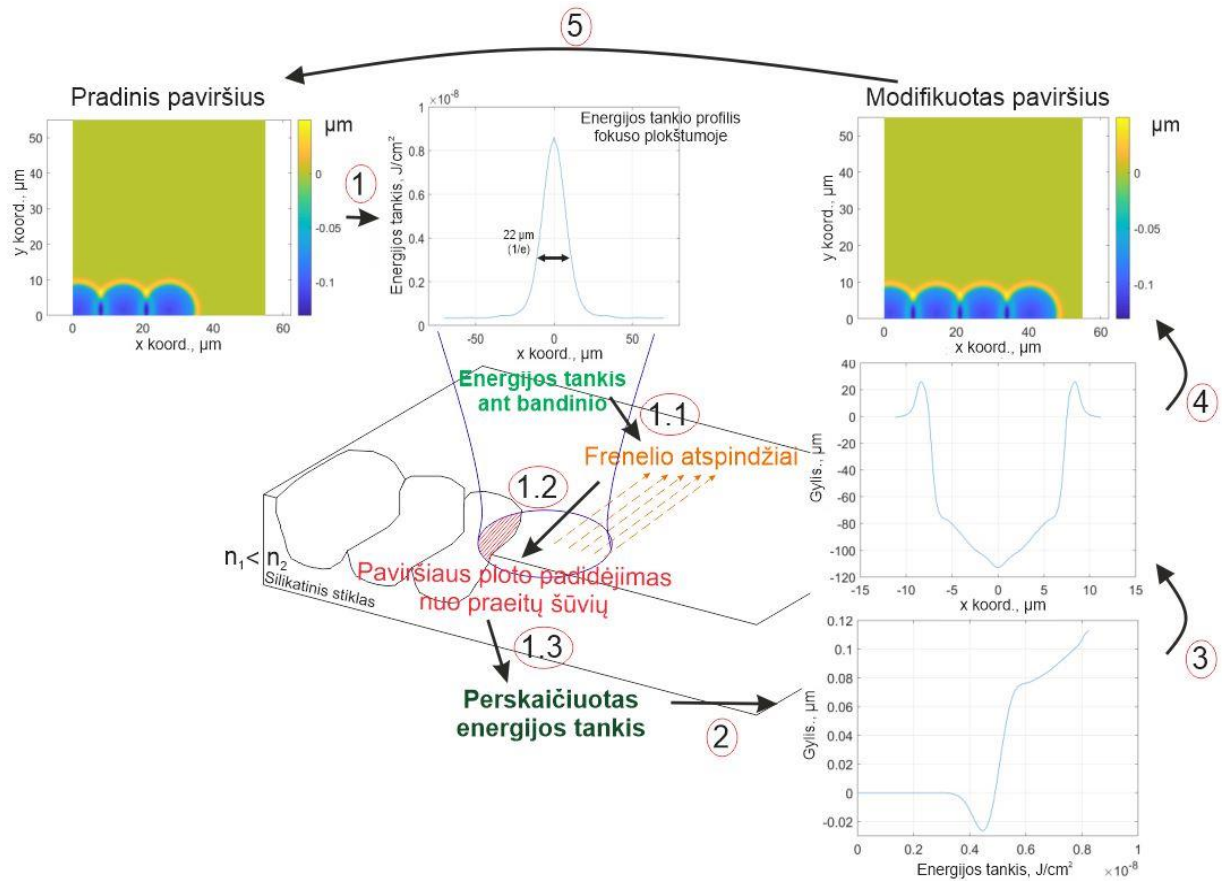
### 3.1. Teorinis modelis

Teorinio modelio kūrimas ir visos modeliavimo užduotys buvo atliktos naudojant „MATLAB R2018a“ programinės įrangos paketą. Sukurto teorinio modelio veikimas yra pagrįstas realių eksperimentinių duomenų įvedimu. Ką tai reiškia ir kaip modelis veikia, dabar trumpai aptarsime.



12 pav. Išmatuotas naudojamo lazerio pluošto energijos tankio skirstinys fokuse (kairėje). Išmatuota pavienio šūvio geometrija (per vidurį). Iš pastarųjų dviejų duomenų masyvų sugeneruota medžiagos atsako funkcija (dešinėje). Naudotas lazerinis šaltinis - 3

Visų pirma yra išmatuojamas naudojamo lazerio pluošto intensyvumo skirstinys darbiniam atstume (mūsų atveju - židinio plokštumoje). Pluoštas buvo matuojamas naudojant „SP503U“ CCD kamerą. Kadangi kameros pikselio dydis  $10 \times 10 \mu\text{m}$ , o pluoštas fokusuojamas į  $22 \mu\text{m}$  dėmę ( $1/e$  aukštyje), buvo nuspręsta pluoštą išplėsti, siekiant tiksliau jį išmatuoti. Pluoštas buvo išplėstas 6.6 kartus naudojant 4F sistemą, sudarytą iš dviejų lęšių ( $f_1 = 15 \text{ mm}$  ir  $f_2 = 100 \text{ mm}$ ). Išmatuotas pluošto intensyvumo skirstinys, perskaičiuotas į energijos tankio skirstinį bei sumažintas 6.6 karto, pavaizduotas 12 pav. kairėje. Naudojant išmatuotą pluoštą padaroma serija pavienių pažeidimų bandinio paviršiuje. Išmatuojamos pažeidimų geometrijos. Pažeidimų geometrijos buvo matuojamos naudojant „Olympus LEXT OLS5100“ lazerinį mikroskopą ( $100 \times$  didinimas). Išmatuota vidutinė pažeidimo geometrija pavaizduota 12 pav. viduriniame grafike. Kadangi tiek pažeidimas, tiek lazerio pluoštas buvo simetriški, siekiant palengvinti skaičiavimus buvo naudojami tik jų viduriniai profiliai. Išmatavus lazerio pluošto skirstinį ir kokios geometrijos pažeidimą toks pluoštas padaro, buvo sugeneruota medžiagos atsako funkcija (žr. 12 pav. dešinėje). Ši funkcija parodo, kiek medžiagos yra pašalinama prie tam tikros energijos tankio vertės. Turint medžiagos atsako funkciją, t.y. žinant koks medžiagos kiekis yra pašalinamas kiekviename kritusio pluošto taške, teorinis modelis geba atlikti paviršiaus abliacijos skaitmeninio modeliavimo užduotis ir prognozuoti paviršiaus šiurkštumą po apdirbimo. Modelio veikimas pavaizduotas 13 pav. Iš pradžių sukuriama apdirbama erdvė ant vieno tinklelio ( $108.8 \times 108.8 \mu\text{m}$ , kur vieną kraštinę sudaro 1024 taškai) ir įvedamas išmatuotas lazerio pluoštas ant kito tinklelio. Tinkeliai pasirinktoje vietoje yra perklojami (1). Suskaičiuojam energijos tankio sumažėjimą dėl frenelio atspindžių (1.1) bei paviršiaus ploto padidėjimo (1.2). Atsižvelgdami į medžiagos atsako funkciją (2) įsivertinam, kokios geometrijos pažeidimas bus padarytas (3). Iš



13 pav. Skaitmeninio modelio veikimą aiškinantis paveikslas. Medžiagos ir pluošto tinkeliai perklojami pasirinktoje vietoje (1). Įsivertinamas energijos tankio sumažėjimas dėl Frenelio atspindžių (1.1) bei paviršiaus ploto padidėjimo (1.2). Atsižvelgiant į medžiagos atsako funkciją (2) suskaičiuojama sugeneruoto pažeidimo geometrija (3). Iš medžiagos tinklelio atimamas suskaičiuotas pašalintos medžiagos tūris (4). Pluošto tinkelėlis perstumiamas ir žingsniai 1-5 kartojami medžiagos matricos atimam suskaičiuotą pašalintos medžiagos tūrį (4). Perstumiam laserio pluošto tinkelėlį per norimą atstumą (5) ir kartojam žingsnius (1-5). Šis procesas matematiškai aprašomas lygtimis (13), (14), (15), (16).

$$H(x, y, N) = H(x, y, N - 1) - h(x, y, F_{imp.}(x - x_n, y - y_n)) \quad (13)$$

$$F_{imp.} = F * L_{Fresnel} * L_{proj.} \quad (14)$$

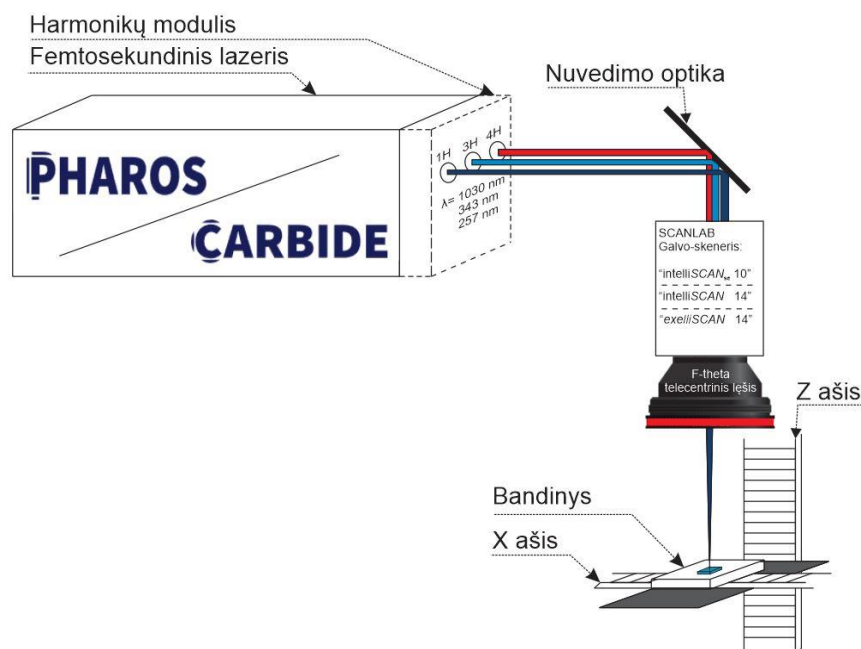
$$L_{proj.} = 1 / \sqrt{1 + \left( \frac{\partial H(x, y, N - 1)}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial H(x, y, N - 1)}{\partial y} \right)^2} \quad (15)$$

$$L_{Fresnel} = 1 - R_s(x, y) * I_s - R_p(x, y) * I_p \quad (16)$$

Čia  $H$  – paviršiaus aukštis,  $x, y$  – paviršiaus koordinatės,  $N$  – impulso skaičius (nuo 0 iki kiek reikia pagal pasirinktus parametrus užpildyt apdirbamą erdvę),  $h$  – medžiagos atsako funkcija, o  $x_n, y_n$  – tojo impulso koordinatės.  $F$  – išmatuotas energijos tankis, krintantis ant paviršiaus,  $F_{imp.}$  – energijos tankis ant bandinio įvertinus nuostolius dėl Frenelio atspindžių bei paviršiaus ploto padidėjimo.  $L_{Fresnel}$  – nuostoliai dėl frenelio atspindžių,  $L_{proj.}$  – nuostoliai dėl paviršiaus ploto padidėjimo,  $R_s$  ir  $R_p$  – Frenelio atspindžiai s arba p poliarizacijos šviesai, o  $I_s$  bei  $I_p$  parodo, kurios poliarizacijos spinduliuotė buvo naudota ( $I_s + I_p = 1$ ), santykis  $I_s/I_p$  apibrėžia poliarizacijos eliptiškumą.  $h$  –

funkcija, kuri gražina, kiek medžiagos pašalinama prie tam tikro energijos tankio. Lygtis (13) aprašo apdirbamo ploto evoliuciją po kiekvieno impulso, lygtis (14) aprašo energijos tankio sumažėjimą dėl Frenelio atspindžių bei ploto padidėjimo nuo praeitų šūvių. Lygtys (15) bei (16) apibrėžia nuostolius sukeltus Frenelio atspindžių bei paviršiaus ploto padidėjimo. Be to, siekiant įskaityti realioje eksperimentinėje sistemoje vyraujančias vibracijas, buvo įvesti pluošto pozicijos neapibrėžtumai iki  $0.5 \mu\text{m}$  x ir y kryptimis. Taip pat dalis modeliavimų buvo atlikti įvedant pirmo impulso eilutėje pozicijos neapibrėžtumą, kuris kilo dėl sinchronizacijos trūkumo tarp lazerio-skenerio sistemų (daugiau apie sinchronizacijos įtaką skenavimui skaityti skyriuje Literatūros apžvalga). Kokią įtaką galutiniam paviršiaus šiurkštumui turėjo lazerio-skenerio sinchronizacija ir jos nebuvimas aptarsime rezultatų skyriuje.

### 3.2. Eksperimentinė schema



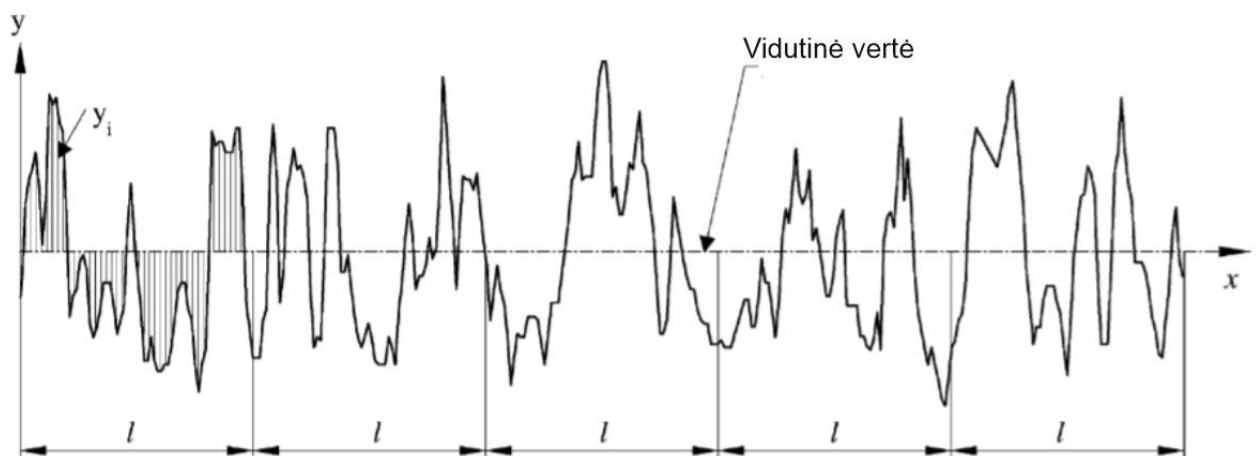
14 pav. Eksperimentinės sistemos principinė schema

Siekiant nustatyti sukurto teorinio modelio patikimumą buvo atlikta serija modeliavimų identiškų eksperimentų. Rezultatai, gauti naudojant skaitmeninį modelį, buvo lyginami su rezultatais pasiektais eksperimentiškai. Šiame darbe naudota eksperimentinė schema pavaizduota 14 pav. Kaip lazerinis šaltinis buvo naudojamas Yt:KGW lazeris „Pharos“ arba „Carbide“, išorinio harmonikų modulio pagalba buvo generuojamos aukštesnės harmonikos (3H – 343 nm, 4H – 257 nm). Spinduliuotė buvo nuvedama iki galvo-skenerio, naudojant dielektrinius veidrodžius, dengtus aukšto atspindžio dangomis atitinkamos harmonikos spinduliuotėms. Pluoštui kontroliuoti buvo naudojamas galvo skeneris (“SCANLAB exelliSCAN 14“, “SCANLAB intelliSCAN 14” ir “SCANLAB intelliSCAN<sub>se</sub> 10” atitinkamai 1,3 ir 4 harmonikoms). Pluoštas buvo fokusuojamas ant bandinio paviršiaus naudojant telecentrinį f-tetą lęšį (lęšio židinio nuotolis 100 mm, 100 mm ir 160 mm

atitinkamai 1,3 ir 4 harmonikoms). Bandinys buvo pozicionuojamas naudojant motorizuotas x/z ašis. Kiekvienas eksperimentas buvo atliktas abliuojant 1x1 mm plotelius. Skenerio darbinis laukas buvo sumažintas iki 1x1 mm, siekiant užtikrinti statmeną spinduliuotės kelią iki bandinio paviršiaus. Visų eksperimentų metu bandinio viršutinis paviršius buvo pozicionuotas lęšio fokuso plokštumoje. Eksperimentų metu pozicija z kryptyje keičiama nebuvo. Po eksperimentų bandinio paviršius buvo apžiūrimas naudojant optinį mikroskopą „Olympus BX51“. Paviršiaus šiurkštumas buvo matuojamas naudojant optinį profilometrą „Sensofar PLU 2300“, veikiančią konfokaliniame režime (50x didinimas, matavimo langas 85x85  $\mu\text{m}$ ). Paviršiaus šiurkštumas buvo matuojamas trijose skirtingose apdirbamo ploto vietose, kaip rezultatas buvo imamas trijų verčių vidurkis.

### 3.3. Paviršiaus šiurkštumą apibūdinantys parametrai

Šio tyrimo ir literatūros apžvalgoje aptartų darbų objektas yra medžiagos paviršiaus kokybė po lazerinio mikroapdirbimo – abliacijos. Paviršiaus kokybė dažniausiai yra apibrėžiama ir įvertinama naudojant paviršiaus šiurkštumo parametrus. Šiame skyrelyje aptarsime, kokie yra pagrindiniai paviršiaus šiurkštumo parametrai ir ką jie reiškia.



15 pav. Paviršiaus šiurkštumo vertės  $R_a$  schematinis pavaizdavimas

Paviršiaus šiurkštumo parametrai dar smulkiau gali būti skirstomi į amplitudinius (parodo vertikalius paviršiaus nukrypimus), erdvinius (parodo horizontalius paviršiaus nukrypimus) bei hibridinius, kurie apjungia abu anksčiau minėtus. Šiame darbe mums aktualūs yra tik amplitudiniai paviršiaus šiurkštumo parametrai. Pagrindinis ir dažniausiai naudojamas parametras –  $R_a$  (aritmetinis aukščių nuokrypis). Jis apibrėžiamas kaip vidutinis absoliutus nuokrypis nuo vidutinės vertės (žr. (17) formulę). Kalbant apie paviršius, vidutinė vertė būtų lygus paviršius, o nuokrypiai - tai įvairūs netolygumai (duobutės ir iškilimai) (žr. 15 pav.). Šis parametras naudojamas vertinant 2D profilio šiurkštumą, kurio ilgis  $l$ .

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx. \quad (17)$$

Šis parametras yra lengvai išmatuojamas ir gerai apibūdina paviršiaus šiurkštumą. Dėl šių patogumų jis yra dažniausiai naudojamas parametras apibūdinant paviršiaus šiurkštumą. Jeigu norima įvertinti ne pavienio profilio šiurkštumą, bet tam tikro ploto, skaičiuojamas  $S_a$  parametras, kuris parodo vidutinį nuokrypį nuo vidurkio per visą plotą. Kitas taip pat dažnai naudojamas šiurkštumo parametras yra vidutinis kvadratinis nuokrypis –  $R_q$  (žr. (18) formulę). Jis parodo standartinį nuokrypį nuo vidutinės reikšmės. Šis parametras yra labai panašus į  $R_a$ , todėl dažnai vertinant paviršiaus šiurkštumą  $R_a$  ir  $R_q$  parametrai randami kartu.

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l \{y(x)\}^2 dx}. \quad (18)$$

Kadangi  $R_q$  parametras skaičiuojamas per kvadratus, jis jautresnis dideliems paviršiaus nuokrypiams nei  $R_a$ . Taip pat dažnai aptinkamas paviršiaus šiurkštumo parametras –  $R_{ti}$ . Šis parametras parodo atstumą tarp didžiausio maksimumo ir minimumo matuojamame intervale. Šis parametras dar geriau žinomas kaip „peak to valley“ arba „PV“. Jeigu du skirtingi paviršiai turi vienodas  $R_a$  vertes, galima naudoti paviršiaus asimetrijos parametras –  $R_{sk}$  (žr. (19) formulę). Jis įvertina paviršiaus profilio simetriją vidurkio linijos atžvilgiu. Asimetrijos koeficientas bus teigiamas, kai nuokrypiai nuo vidurkio bus didesni į teigiamą pusę, ir atitinkamai neigiamas, kai paviršiuje vyraus įdubimai.

$$R_{sk} = \frac{1}{NR_q^3} \left( \sum_{i=1}^N Y_i^3 \right). \quad (19)$$

Čia  $Y$  – paviršiaus aukštis taške  $i$ . Dar vienas parametras, į kurį verta atkreipti dėmesį, yra paviršiaus ekscesas –  $R_{ku}$  (žr. (20) formulę). Jis apibūdina profilio tikimybės tankio aštrumą, parodo, kiek daug matuojamame intervale yra minimumų ir maksimumų. Jeigu  $R_{ku} < 3$ , paviršius turi palyginti mažai

$$R_{ku} = \frac{1}{NR_q^4} \left( \sum_{i=1}^N Y_i^4 \right). \quad (20)$$

išsišokimų, jeigu  $R_{ku} > 3$ , paviršiuje gausu didelės amplitudės nelygumų. Čia  $Y$  – paviršiaus aukštis taške  $i$ . Be jau išvardintų parametru yra dar daugybė: dešimties taškų aukštis  $R_z$ , maksimalus profilio aukštis  $R_t$  ir kt. [44]. Šiame darbe paviršių šiurkštumui įvertinti naudosime  $R_a$  parametras. Šiurkštumas  $x$  kryptimi reiškia  $R_a$  parametro vidurkį per visus profilius  $x$  kryptimi. Šiurkštumas  $y$  kryptimi reiškia  $R_a$  parametro vidurkį per visus profilius  $y$  kryptimi.

## 4. Rezultatai ir jų aptarimas

Dėl didelės imties galimų skirtingų skenavimo strategijų darbas buvo suskirstytas į dvi dalis. Pirmiausia buvo tiriama paviršiaus šiurkštumo priklausomybė nuo skirtingų skenavimo strategijų, kai paviršius skenuojamas vieną kartą. Nustačius optimalią skenavimo strategiją vieno sluoksnio apdirbimui, paviršius buvo skenuojamas daugiau nei vieną kartą. Buvo tiriama, kaip priklauso paviršiaus šiurkštumas nuo skirtingų skenavimo strategijų, kai paviršius skenuojamas daugiau nei vieną kartą. Kokie buvo pasiekti rezultatai ir nustatytos skenavimo strategijos, aptarsime šiame skyriuje.

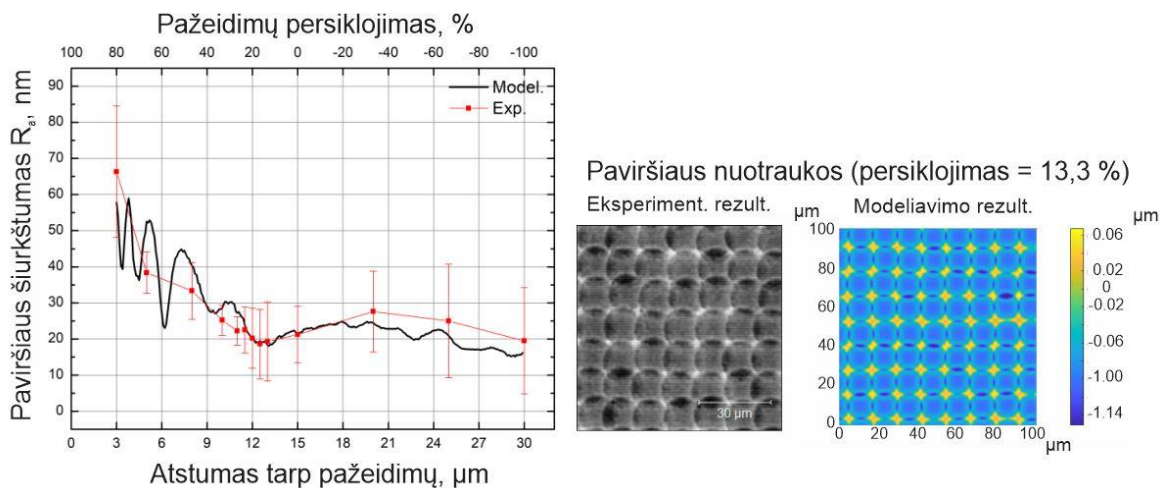
### 4.1. Vieno sluoksnio apdirbimas

Iš literatūros apžvalgos (žr. 2 skyrelius) pamatėme, kad skenuojant paviršių vieną kartą didelę įtaką galutiniam paviršiaus šiurkštumui daro impulsų persiklojimas. Buvo nuspręsta vieno sluoksnio apdirbimo metu, kaip skenavimo strategiją, nagrinėti pažeidimų persiklojimą. Svarbu paminėti, kad impulsų ir pažeidimų persiklojimas yra skirtingi dalykai. Impulsų persiklojimas parodo, kiek persikloja pluoštų matmenys. Pažeidimų persiklojimas parodo, kiek persikloja lazerinio pluošto sugeneruotų pažeidimų matmenys. Nors, kaip matėme literatūroje, dažniausiai adresuojamas parametras yra impulsų persiklojimas [36, 45], mes teigiame, kad tai yra mažai kokybiškos informacijos teikiantis parametras ir vietoj jo reikėtų naudoti pažeidimų persiklojimą. Yra žinoma, kad paviršiaus morfologija, kuri lemia paviršiaus šiurkštumą, yra superpozicija daugelio pažeidimų. Žinant tik pluošto skersmenį negalima prognozuoti, kokį pažeidimą jis padarys. Tai priklauso ne tik nuo pluošto skersmens, bet ir impulso formos, bangos ilgio, medžiagos savybių ir t.t. Todėl randamas optimalus persiklojimas literatūroje turi daug skirtingų verčių, nes naudojamos skirtingos sistemos ir apdirbamos medžiagos negali būti lyginamos. Tuo tarpu pažeidimas yra galutinis produktas daugelio skirtingų impulso bei medžiagos parametrų. Pažeidimų persiklojimas yra parametras, kurį galima palyginti, o pažeidimo geometrija parodo, kokį pažeidimų persiklojimą reikia rinktis (apie tai šiek tiek vėliau) ir kokį paviršiaus šiurkštumą galima pasiekti. Taigi, mes parodėme, kad impulsų persiklojimas yra mažai informacijos teikiantis parametras, todėl jo reiktų vengti ir naudoti pažeidimų persiklojimą. Šiame darbe pažeidimų persiklojimas apibrėžiamas kaip:

$$Persiklojimas = \left( 1 - \frac{dx}{d_{pažeidimo}} \right) * 100\% \quad (21)$$



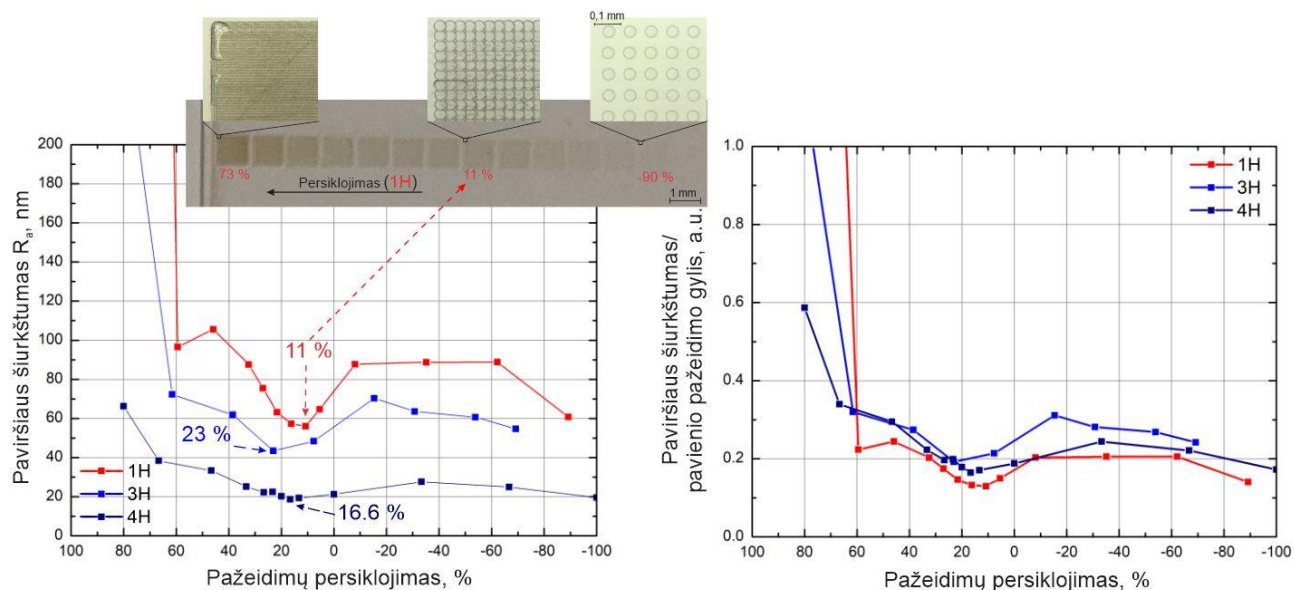
Kur  $dx$  – atstumas tarp pažeidimų,  $d_{pažeidimo}$  – pavienio pažeidimo skersmuo. Ši išraiška taip pat randama literatūroje [36]. Pažeidimų persiklojimas buvo išlaikomas vienodas x ir y kryptimis norint pasiekti tolygią abliaciją. Paviršiaus šiurkštumo priklausomybė nuo pažeidimų persiklojimo, naudojant lazerinį šaltinį 3 ir skenuojant paviršių vieną kartą, pateikti 16 pav. kairėje. Matome, kad



16 pav. Paviršiaus šiurkštumo priklausomybė nuo pažeidimų persiklojimo, kai paviršius skenuojamas vieną kartą (kairėje). Paviršių nuotraukos po apdirbimo, kai paviršius skenuojamas vieną kartą, o pažeidimų persiklojimas 13,3 % (dešinėje). Nespalvotas pav. atitinka eksperimentiškai gautą paviršių, spalvotas – modeliavimo metu sugeneruotą paviršių. Naudotas lazerinis šaltinis – 3. Šiurkštumas  $x$  (skenavimo) kryptimi

skaitmeninių modeliavimų metu gauti (juoda kreivė) ir eksperimentiškai pasiekti (raudona kreivė) rezultatai gerai sutampa. Taip pat galime pastebėti, kad abi kreivės turi minimumą toje pačioje srityje. Mažiausias paviršiaus šiurkštumas pasiekiamas, kai pažeidimų persiklojimas 10-20 %. Esant tokiam pažeidimų persiklojimui, pasiekiamas paviršiaus šiurkštumas  $R_a = 20$  nm. Žiūrint į paveikslėlį, atrodo, kad dar labiau didinant atstumą tarp gretimų pažeidimų (daugiau už 30  $\mu\text{m}$ ) galima pasiekti dar mažesnę paviršiaus šiurkštumą. Vis dėlto tai nėra tiesa. Stipriai padidinus atstumą tarp gretimų pažeidimų, pažeidimai gali nutolti daugiau negu profilometro matavimo langas. Tokiu atveju mes matuosime pradinį medžiagos šiurkštumą ( $R_a < 10$  nm), sukurdami gerų rezultatų iliuziją. Taigi, stebimas paviršiaus šiurkštumo mažėjimas, kai atstumas tarp gretimų pažeidimų yra didesnis nei 18  $\mu\text{m}$ , yra lemiamas tuo, kad vis daugiau matuojama lygaus, pradinio medžiagos paviršiaus. Kitoje kreivės pusėje stebime paviršiaus šiurkštumo didėjimą, didinant pažeidimų persiklojimą. Viršijus pažeidimų persiklojimą daugiau nei  $\geq 80$  %, buvo stebimas stiklo skeldėjimas. Tai aiškinama tuo, kad esant dideliame termodinaminiam įtekiui į ploto vienetą, formuojasi įtempiai, kol galiausiai stiklas suskeldėja. Tokiu atveju paviršiaus šiurkštumas drastiškai išauga. Toks paviršius laikomas sugadintu ir realių pritaikymų neturi, dėl to šis režimas toliau nebuvo tirtas ir daugiau apie tai šio darbo rėmuose nebus kalbama. Siekiant įsitikinti nustatyto optimalaus pažeidimų persiklojimo universalumu, analogiški eksperimentai bei modeliavimo užduotys buvo atliktos naudojant skirtingus lazerinius šaltinius (žr. lentelė 2). Paviršiaus šiurkštumo priklausomybė nuo pažeidimų persiklojimo skenuojant bandinį vieną kartą, naudojant skirtingus lazerinius šaltinius, pavaizduotą 17 pav. kairėje. Matyti, kad

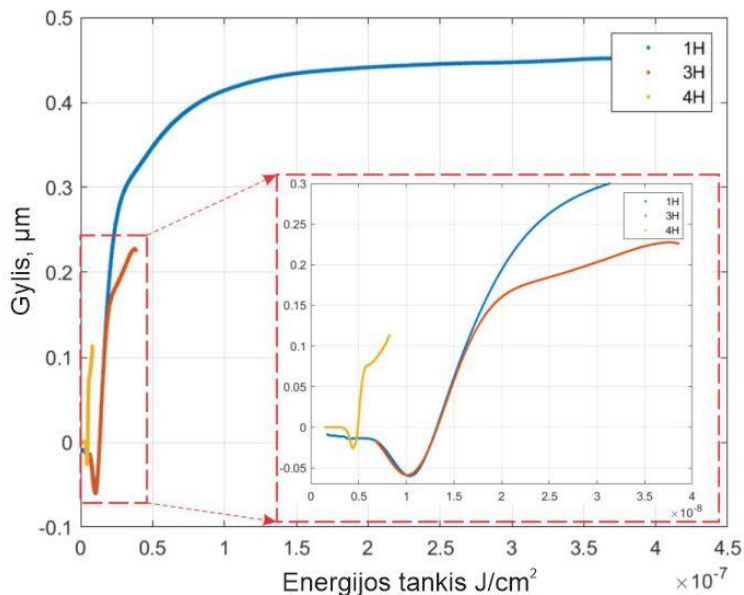
nors kreivės ir išsiskiria absoliutinėmis vertėmis, bet visos pasižymi ta pačia tendencija. Mažiausias paviršiaus šiurkštumas visais trimis atvejais ( $R_a(1H) = 56 \pm 22 \text{ nm}$ ,  $R_a(3H) = 43 \pm 10 \text{ nm}$ ,  $R_a(4H) = 20 \pm 9 \text{ nm}$ ) pasiekiamas, kai pažeidimų persiklojimas 10-25 % intervale (1H = 11%, 3H = 23%, 4H = 16,6%).



17 pav. Paviršiaus šiurkštumo priklausomybė nuo pažeidimų persiklojimo, kai silikatinio stiklo paviršius skenuojamas vieną kartą naudojant skirtingus lazerinius šaltinius (kairėje). Paviršiaus šiurkštumo sunormuoto į pavienio pažeidimo gylį priklausomybė nuo pažeidimų persiklojimo. Rezultatai pasiekti eksperimentų metu. Šiurkštumas  $x$  (skenuojami) kryptimi

4H = 16,6%). Tai parodo, kad optimalus pažeidimų persiklojimas mažai priklauso nuo spinduliuotės bangos ilgio. Kita vertus, svarbu prisiminti (žr. lentelė 3), kad visi trys lazeriniai šaltiniai generavo femtosekundinius impulsus. Ultratrumpųjų impulsų padaryti pažeidimai pasižymi stačiais kraštais [46, 47]. Tą stebėjome ir mes (žiūrėti 12 pav. vidurinę grafiką). Perklojant tokius pažeidimus 10-25 % (kaip tai atrodo galima matyti 16 pav. dešinėje) statūs kraštai yra pašalinami abliacijos būdu, o palyginti lygus dugnas lieka nepalietas. Tokiu būdu suformuotas paviršius turės itin mažą paviršiaus šiurkštumą. Tai parodo, kad optimalus pažeidimų persiklojimas stipriai priklauso nuo sienelių statumo. Femtosekundinių impulsų padarytiems pažeidimams optimalus pažeidimų persiklojimas yra 10-25 % intervale. Grafiko viršuje pateikta bandinio nuotrauka po vieno sluoksnio apdirbimo naudojant skirtingus persiklojimus (naudotas lazerinis šaltinis – 1). Galime matyti, kaip vizualiai skiriasi paviršiai, turintys skirtingus paviršiaus šiurkštumus. Matome, kad kuo paviršius šiurkštesnis, tuo jis mažiau skaidrus. Esant didesniai paviršiaus šiurkštumui daugiau šviesos yra išsklaidoma, todėl paviršius atrodo mažiau skaidrus. Iš paveikslėlio taip pat matyti, kad mažesnis paviršiaus šiurkštumas pasiekiamas naudojant mažesnio bangos ilgio spinduliuotę. Kita vertus, reikia nepamiršti, kad skirtingų lazerinių šaltinių energijos tankiai taip pat skiriasi. Norint į tai atsižvelgti, kiekviena kreivė buvo padalinta iš pavienio pažeidimo, padaryto su tuo lazeriniu šaltiniu, gylio. Rezultatai pavaizduoti 17 pav. dešinėje. Galime matyti, kad sunormavus paviršiaus šiurkštumus į pažeidimo gylį, kitaip tariant atsiribojus nuo impulso energijos, visos kreivės daugmaž susilygiavo. Galima daryti išvadą, kad didesnis paviršiaus šiurkštumas, pasiektas naudojant 1 H spinduliuotę, buvo

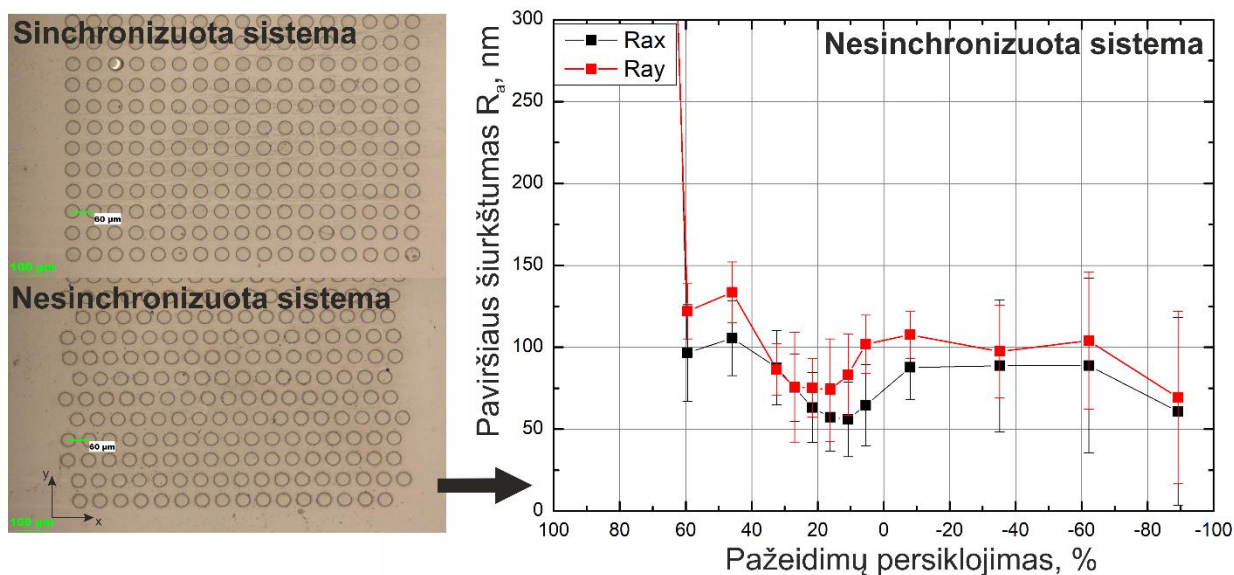
sąlygotas ne bangos ilgio, bet didesnio energijos tankio. Naudojant mažesnę energijos tankį ir turint stipresnę sugertį, formuojami mažiau gilūs pažeidimai, ko pasekoje turime mažesnius nuokrypius z kryptimi – mažesnę paviršiaus šiurkštumą. Norint tiksliau pasakyti, kiek įtakos mažėjančiam paviršiaus šiurkštumui turėjo energijos tankis, o kiek bangos ilgis, reikia atlikti papildomus tyrimus, kurie yra už šio darbo ribų. Vis dėlto naudoti trumpo bangos ilgio spinduliuotę dažnai yra patogiau. Tuo įsitikinti galime pažvelgę į 18 pav., kur pavaizduotos visų trijų bangos ilgių atsako funkcijos.



18 pav. Medžiagos atsako funkcijos trims skirtingiems lazeriniams šaltiniams. Mėlyna kreivė atitinka 1H spind., raudona kreivė – 3H, geltona kreivė – 4H

Kaip matome, 4H atsako funkcija yra pasislinkusi į mažesnių energijos tankio verčių pusę. Manoma, kad taip yra dėl to, kad bangos ilgis 257 nm (4H) pataiko į tiesinę bandinio sugerties sritį [48]. Tai leidžia padaryti tokio paties gylio pažeidimus naudojant 3 kartus mažesnę energijos tankį lyginant su 3 bei 1 harmonikomis. Tai reiškia, kad didesnė dalis energijos yra skiriama abliacijai ir mažesnė – šildyti medžiagai. Taip susiformuoja mažesnė šilumos paveikta zona, gaunami aukštesnės kokybės pažeidimai. Be to, netiesinės sugerties atveju, dalis spinduliuotės visada liks nesugerta, o tiesinės sugerties – praktiškai visa bus sugerta bandinyje. Todėl naudojant ilgesnio bangos ilgio spinduliuotę reikės didesnio intensyvumo norint pasiekti tokius pačius rezultatus, kaip su 4 harmonika. Galiausiai, naudojant trumpesnio bangos ilgio spinduliuotę dėl žemesnio abliacijos slenksčio nereikia didelių galių lazerinių šaltinių, su kuriais dažnai būna sudėtinga ar pavojinga dirbti.

Kaip jau buvo minėta, dalis lazerinių šaltinių, naudotų šiame darbe, buvo nesinchronizuoti. Ką tai reiškia ir ką lemia sinchronizacijos nebuvimas tarp lazerio ir skenerio sistemų, skaitykite 2 skyrelyje. 19 pav. kairėje matome, kaip atrodo paviršius, apdirbtas naudojant sinchronizuotą ir nesinchronizuotą sistemas. Galime matyti, kad tuo atveju, kai sistema nėra sinchronizuota, eilutės viena kitos atžvilgiu yra persistumusios atsitiktinai. Persistūmimo dydis priklauso nuo lazerio pasikartojimo dažnio ir skenavimo greičio. Ką tai lemia galime stebėti to paties paveikslo dešinėje pateiktame grafike.



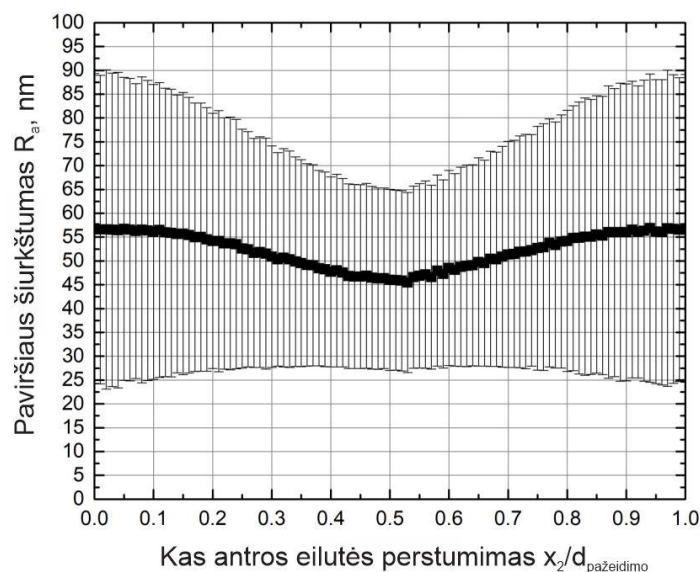
19 pav. Sinchronizuotos ir nesinchronizuotos sistemų apdirbtų paviršių pavyzdžiai (kairėje). Paviršiaus šiurkštumo priklausomybė nuo pažeidimų persiklojimo  $x$  ir  $y$  kryptimis, kai naudojama nesinchronizuota sistema. Naudojtas lazerinis šaltinis – I. Rezultatai pasiekti eksperimentų metu

Naudojant nesinchronizuotą sistemą paviršiaus šiurkštumas  $x$  ir  $y$  kryptimis nebeatitinka.  $Y$  (statmena skenavimo) kryptimi paviršiaus šiurkštumas dažniausiai būna didesnis. Skirtumas tarp šiurkštumo verčių gali siekti iki 37 % ( $R_a(y) = 102$  nm,  $R_a(x) = 64$  nm, kai persiklojimas 5.4 %). Kadangi paviršiaus šiurkštumas daro didelę įtaką kitoms medžiagos savybėms (daugiau apie tai skaitykite skyriuje „Įvadas“), skirtingi šiurkštumai  $x$  ir  $y$  kryptimis gali būti panaudoti įvairiems pritaikymams. Pavyzdžiui, esant šiurkštumo priklausomybei nuo krypties, galima valdyti skysčių ar dujų judėjimo kryptį [49, 50].

Siekiant dar labiau pagerinti paviršiaus šiurkštumą po vieno sluoksnio apdirbimo buvo ieškoma kitų skenavimo strategijų. Detaliau išnagrinėjus 16 pav. dešinėje pateiktas topografijas, galima pastebėti, kad, naudojant tokį persiklojimą, keturių pažeidimų sankirtoje visada lieka nenuabliuotos medžiagos plotas. Tai prisideda prie didesnio paviršiaus šiurkštumo. Norint to išvengti, buvo sugalvota lygines eilutes perstumti per tam tikrą žingsnį nelyginių eilučių atžvilgiu. Paviršiaus šiurkštumo priklausomybė nuo kas antros eilutės perstūmimo sunormuoto į atstumą tarp gretimų pažeidimų pavaizduota 20 pav. Galima pastebėti, kad kreivė turi minimumą, kai kas antra eilutė yra perstumta per pusę atstumo tarp gretimų pažeidimų. Tokiu būdu galima papildomai sumažinti paviršiaus šiurkštumą dar per 20 % ( $R_a(0) = 56.8$  nm,  $R_a(0.5) = 45.5$  nm), lyginant su situacija, kada eilutės nėra perstumiamos. Kodėl taip vyksta, tampa akivaizdu dar sykį prisiminus 16 pav. dešinėje pateiktas topografijas. Perstumiant kas antrą eilutę per pusę žingsnio tarp gretimų pažeidimų, nenuabliuoti medžiagos ploteliai esantys keturių pažeidimų sankirtoje būna nuabliuojami, o išlaikytas



persiklojimas kaip ir anksčiau nuabliuoja stačias pažeidimų sienes. Todėl galutinis paviršiaus šiurkštumas yra sumažinamas.



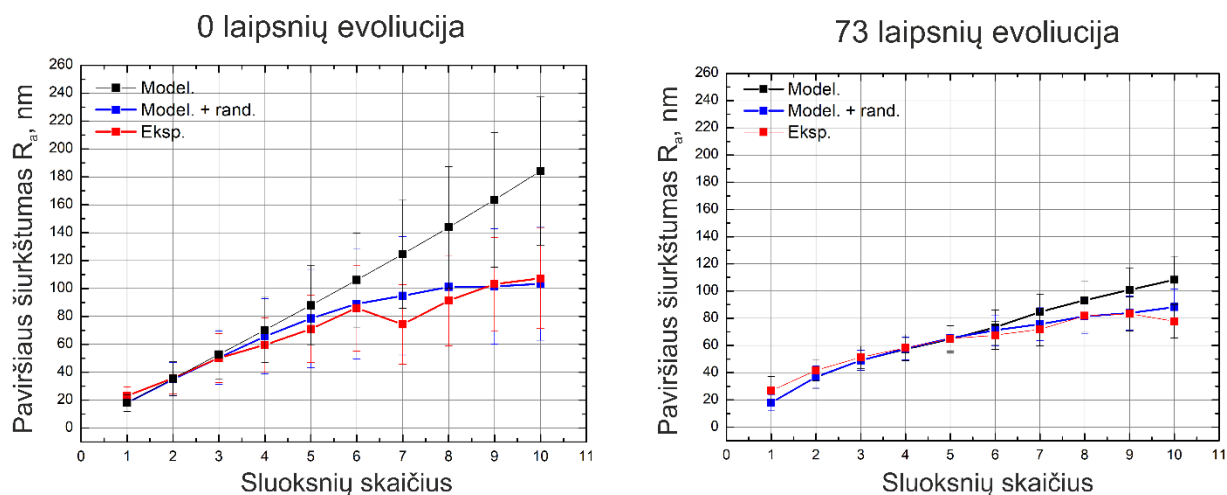
20 pav. Paviršiaus šiurkštumo priklausomybė nuo kas antros eilutės perstumimo sunormuoto į atstumą tarp gretimų pažeidimų. Naudotas lazerinis šaltinis – 3. Paviršiaus šiurkštumas  $x$  kryptimi. Sistema sinchronizuota. Teorinių modeliavimų rezultatai

Vis dėlto skenuojant paviršių vieną kartą yra pašalinama tik 100-400 nm, priklausomai nuo naudojamo lazerinio šaltinio (žr. lentelė 4). Daugeliui pritaikymų formos išgavimui reikia pašalinti dešimčių  $\mu\text{m}$  eilės medžiagos kiekius. Tai pasiekama skenuojant paviršių daugiau nei vieną kartą, kol pašalinamas reikiamas medžiagos kiekis. Daugeliui sluoksnių apdirbti, taikant nustatytas šiame skyrelyje skenavimo strategijas, formuojami paviršiai bus geresnės kokybės nei įprastai. Vis dėlto skenuojant paviršių daugiau kartų atsiranda naujų laisvės laipsnių skenavimo strategijoms papildomai sumažinti paviršiaus šiurkštumą po apdirbimo. Tą detaliau nagrinėsime kitame skyrelyje.

#### 4.2. Daugelio sluoksnių apdirbimas

Daugelio sluoksnių apdirbimo etape bandinys buvo skenuojamas 10 kartų. Pažeidimų persiklojimas buvo fiksuotas. Naudotos praeitame skyrelyje nustatytos optimalios pažeidimų persiklojimo vertės. Skenuojant paviršių daugelį kartų, kaip skenavimo strategija buvo tiriama paviršiaus šiurkštumo priklausomybė nuo kito sluoksnio posūkio kampo prieš tai buvusio atžvilgiu. Sluoksnio posūkio ašis buvo apdirbamo ploto centre. Tai reiškia, kad kiekvienas kitas sluoksnis buvo pasuktas tam tikru kampu apie savo centrinę ašį. Skenuojant bandinį daugiau kartų, natūraliai išauga ir apdirbimo laikas. Todėl šiame darbo etape labai pasitarnavo sukurtas teorinis modelis. Vis dėlto prieš naudojant teorinį modelį reikėjo įsitikinti jo patikimumu.

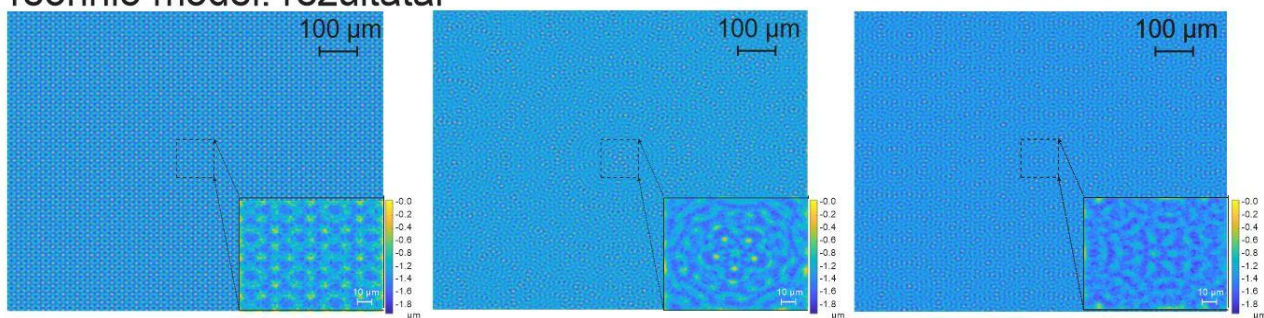
Paviršius buvo skenuojamas 10 kartų (išabliuojamas gylis po 10 sluoksnių  $\sim 2 \mu\text{m}$ ) pasukant kiekvieną kitą sluoksnį 0 bei 73 laipsniais. Teorinių modeliavimų ir eksperimentų metu gauti



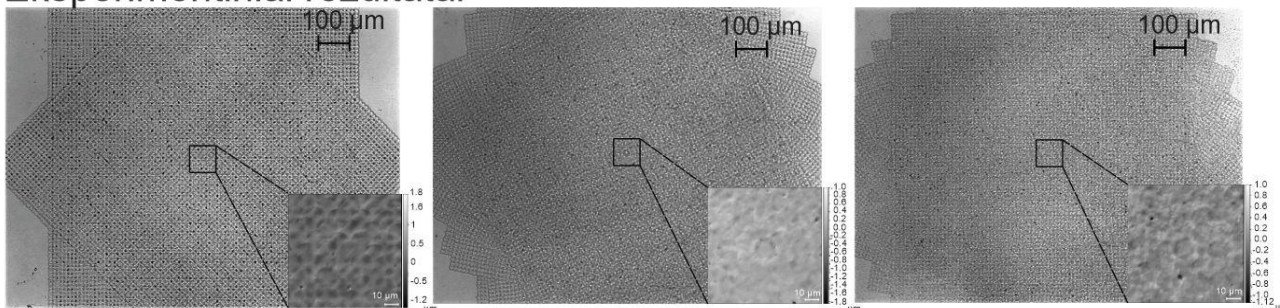
21 pav. Paviršiaus šiurkštumo priklausomybė nuo sluoksnių skaičiaus, kai kiekvienas kitas sluoksnis pasukamas 0 laipsnių (kairėje), bei 73 laipsniais (dešinėje). Juoda kreivė vaizduoja rezultatus gautus naudojant teorinį modelį, kai sluoksnio pozicijos neapibrėžtumas nėra įtrauktas. Raudona kreivė vaizduoja eksperimentiškai gautus rezultatus. Mėlyna kreivė vaizduoja rezultatus gautus naudojant teorinį modelį, kai sluoksnio pozicijos neapibrėžtumas per  $\pm 1 \mu\text{m}$  yra įskaitomas. Naudotas lazerinis šaltinis – 3

rezultatai buvo palyginti (žr. 21 pav.). Eksperimentiškai pasiekti rezultatai pavaizduoti raudona kreive, teorinių modeliavimų metu gauti rezultatai pavaizduoti juoda kreive. Galime pastebėti, kad kreivės sutampa, kai sluoksnių skaičius mažas ( $0^\circ$  atveju  $\leq 3$ ,  $73^\circ$  atveju  $\leq 5$ ). Kai sluoksnių skaičius didelis, kreivės išsiskiria. Teorinių modeliavimų kreivė auga tiesiškai, tuo tarpu eksperimentinių rezultatų kreivė pradeda sotintis. Siekiant išsiaiškinti šio neatitikimo kilmę, reikia išanalizuoti paviršiaus topografijas po 10 sluoksnių apdirbimo. Kaip atrodo bandinio paviršiai po 10 sluoksnių apdirbimo, galite matyti 22 pav. Viršutinėje eilutėje – nuotraukos, gautos naudojant teorinį modelį. Apatinėje eilutėje pavaizduotos paviršių nuotraukos, gautos atlikus eksperimentus. Nuotraukos buvo

### Teorinio model. rezultatai

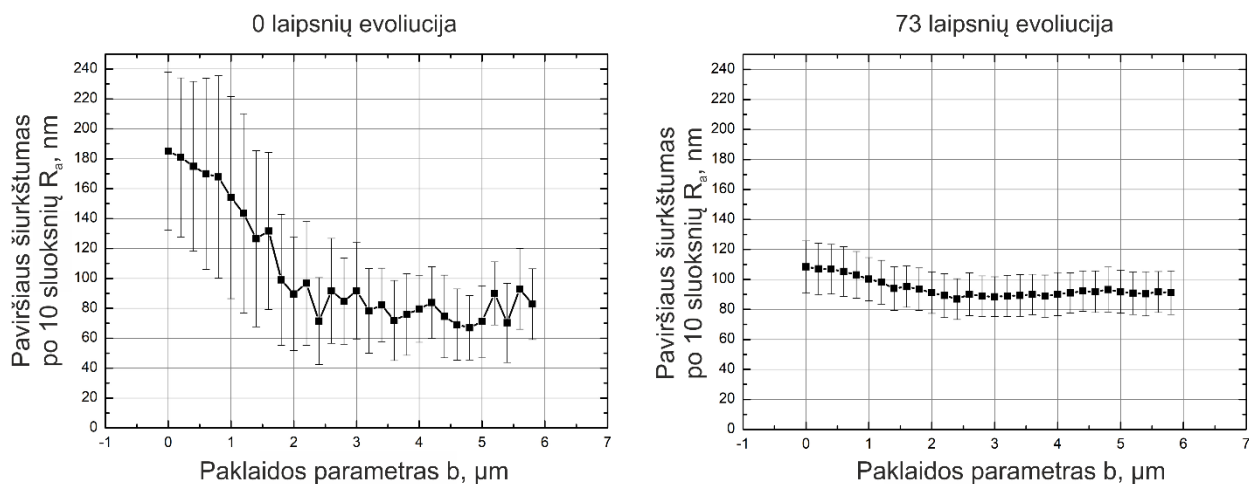


### Eksperimentiniai rezultatai



22 pav. Bandinių paviršių nuotraukos po 10 sluoksnių apdirbimo, kai kiekvienas sekantis sluoksnis pasukamas 45 deg. (kairėje), 73 deg. (per vidurį), 310 deg. (dešinėje). Apatinėje eilutėje esančios nuotraukos darytos su „Olympus BX51“ mikroskopu (10x didinimas). Naudotas lazerinis šaltinis – 3

padarytos naudojant „Olympus BX51“ mikroskopą (10x didinimas). Galime pastebėti, kad eksperimentiškai gauti paviršiai po apdirbimo neturi stipriai išreikštos struktūros, paviršiaus raštas atsitiktinis. Naudojant teorinį modelį, suformuoti paviršiai visais atvejais turi periodines struktūras. Teorinių modeliavimų rezultatai parodo, kad jeigu kiekvienas sluoksnis bus tiksliai skenuojamas vienas ant kito, po apdirbimo paviršiuje formuosis periodinės struktūros nepriklausomai, koku



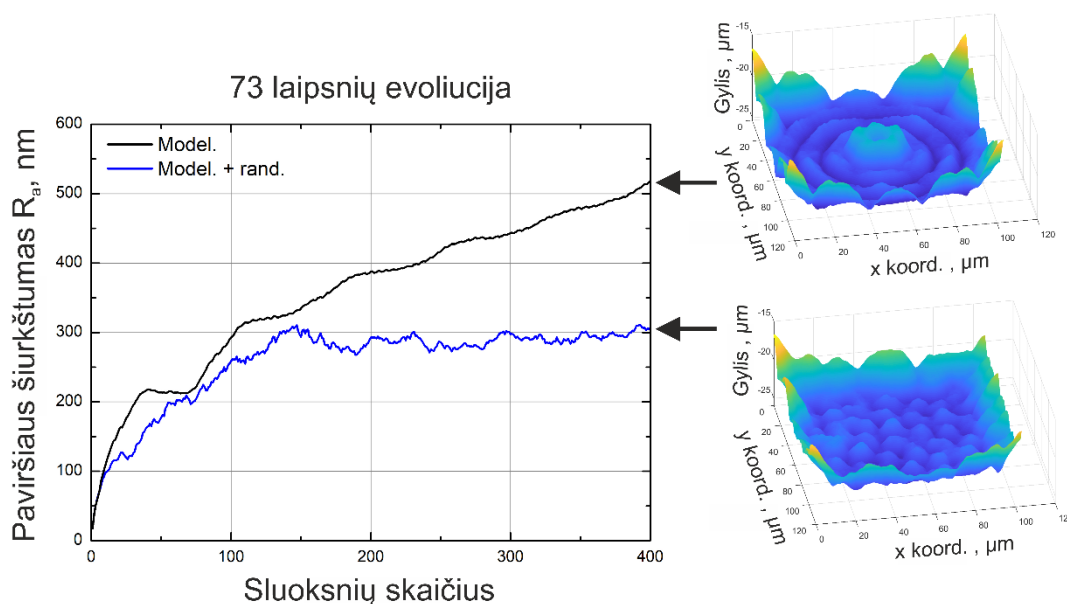
23 pav. Paviršiaus šiurkštumo po 10 sluoksnių priklausomybė nuo paklaidos parametro  $b$ , kai kiekvienas sluoksnis pasukamas po 0 laipsnių (kairėje), 73 laipsnius (dešinėje). Rezultatai gauti naudojant teorinį modelį

kampu yra pasukamas kiekvienas sekantis sluoksnis. Kadangi periodinės struktūros eksperimentiniuose rezultatuose nėra stebimos, galime teigti, kad realybėje egzistuoja tam tikros sluoksnių pozicijos paklaidos, dėl ko kiekvienas sluoksnis nėra tiksliai skenuojamas vienas ant kito, bet veikiau pastumtas vienas kito atžvilgiu per atsitiktinį dydį. Paklaidos realybėje galėtų būti sąlygotos įrangos netikslumo, išorinių vibracijų bei kitų veiksnių. Siekiant, kad modelis labiau atitiktų realybę, buvo įvestos kiekvieno sluoksnio pozicijos paklaidos, apibrėžiamos (22) formule.

$$X, Y_{poz.} = (rand. - 0.5) * b. \quad (22)$$

Kur  $X, Y_{poz.}$  yra sluoksnio pozicijos koordinatės,  $rand.$  – funkcija, grąžinanti atsitiktinę vertę nuo 0 iki 1,  $b$  – parametras, apsprendžiantis paklaidos dydį. Atlikus teorinius modeliavimus su skirtingomis  $b$  vertėmis, buvo pastebėta, kad didinant sluoksnio pozicijos neapibrėžtumą, galutinis paviršiaus šiurkštumas mažėja iki tam tikros vertės (žr. 23 pav.). Paveikslėlyje matome, kaip priklauso paviršiaus šiurkštumas po 10 sluoksnių nuo paklaidos parametro  $b$  (žr. (22) formulę), kai kiekvienas kitas sluoksnis nėra pasukamas (kairėje), pasukamas kas 73 laipsnius (dešinėje). Galime pastebėti, kad paklaidos parametras daro didesnę įtaką, kai kiekvienas kitas sluoksnis nėra pasukamas. Taip yra todėl, kad, kai skenuojami sluoksniai vienas ant kito nėra sukami, periodinių struktūrų formavimosi sparta yra pati didžiausia, tačiau įvedus tam tikrą sluoksnio pozicijos neapibrėžtumą, gaunamos mažesnės periodinės struktūros, ko pasėkoje paviršiaus šiurkštumas taip pat mažėja. Galime matyti, kad įvedus sluoksnio pozicijos neapibrėžtumą, kurio dydis  $\pm 1 \mu\text{m}$ , galime sumažinti paviršiaus šiurkštumą po 10 sluoksnių apdirbimo, kai kiekvienas sekantis sluoksnis nėra pasukamas, nuo 185

+/- 52 nm iki 90 +/- 37 nm, kas yra ~ 50 procentų paviršiaus kokybės pagerėjimas. 73 laipsnių evoliucijos atveju, įvedus tokį patį sluoksnių pozicijos neapibrėžtumą galima sumažinti paviršiaus šiurkštumą po 10 sluoksnių apdirbimo nuo 108 +/- 17 nm iki 91 +/- 13 nm, kas yra ~ 15 procentų paviršiaus kokybės pagerėjimas. Taigi, matome, kad netikslumai šiame kontekste iš tiesų yra geras dalykas ir įvedant į sistemą sluoksnių pozicijos neapibrėžtumus galima išgauti geresnės kokybės paviršius po lazerinio mikroapdirbimo. Deja, svarbu nepamiršti, kad didinant sluoksnio pozicijos

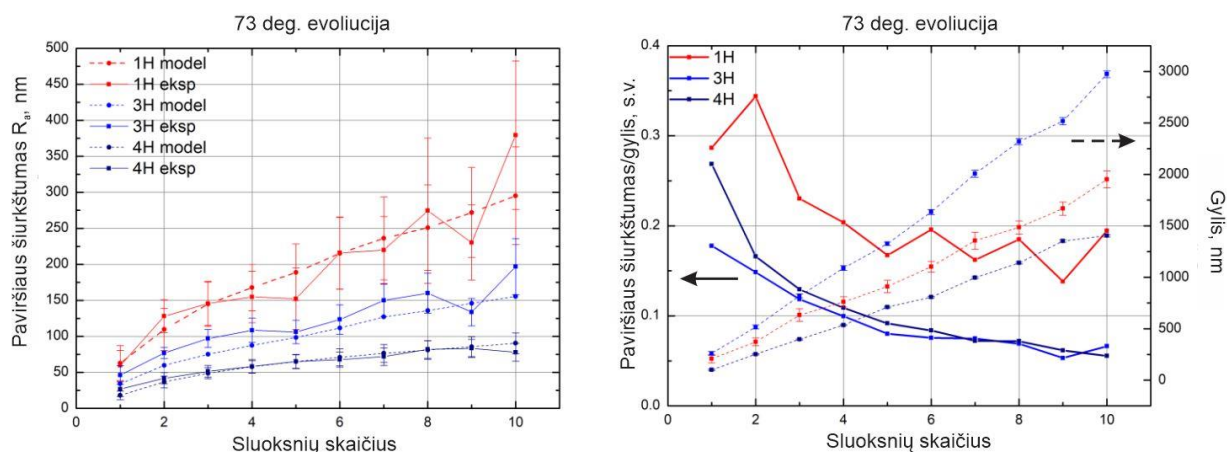


24 pav. Paviršiaus šiurkštumo priklausomybė nuo sluoksnių skaičiaus, kai kiekvienas sekantis sluoksnis pasukamas kas 73 laipsnius (kairėje), paviršių topografija po 400 sluoksnių (dešinėje) su ir be sluoksnio pozicijos neapibrėžtumo. Rezultatai pasiekti naudojant teorinį modelį

neapibrėžtumą, eksperimento atsikartojamumas mažėja. Lyginant modeliavimo rezultatus su eksperimentiniais, pavyko nustatyti paklaidos parametro  $b$  vertę ( $2.1 \mu\text{m}$ ), kuriai esant modelis gerai atitinka eksperimentą, žr. 21 pav. mėlyną ir raudoną kreives. Galime daryti išvadą, kad eksperimentinės įrangos ar kitų pašalinių veiksnių kuriamos sluoksnių pozicijos paklaidos yra  $\pm 1 \mu\text{m}$  eilės arba didesnės. Taip pat galime matyti, kad įvedus sluoksnių pozicijos paklaidas paviršiaus šiurkštumo evoliucijos kreivė pradeda sotintis. Siekiant įsivertinti, kada kreivė pasieks sotį, buvo atliktos papildomos modeliavimo užduotys. Pažvelgę į 24 pav. galime matyti, kaip kinta paviršiaus šiurkštumas skenuojant paviršių 400 kartų, kai kiekvienas sekantis sluoksnis pasukamas kas 73 laipsnius. Matome, kad įvedus sluoksnių pozicijos neapibrėžtumą ( $b$  vertė = 2.1), kreivė pasiekia sotį ties  $\sim 150$  sluoksnių ( $R_a = 300 \text{ nm}$ , preliminarus gylis =  $34 \mu\text{m}$ ) ir skenuojant paviršių daugiau kartų paviršiaus šiurkštumas nebedidėja. Turint idealią sistemą, be sluoksnių pozicijos neapibrėžtumo, paviršiaus šiurkštumas didėja be perstojo ir soties nepasiekia. Tuos pačius rezultatus galime išvelgti ir paveikslėlio dešinėje esančiuose paviršių topografijose po 400 sluoksnių. Kai sluoksniai skenuojami tiksliai – formuojasi periodinės struktūros, kurios lemia paviršiaus šiurkštumo



didėjimą, kai sluoksnių pozicijos turi paklaidas, periodinių struktūrų nėra – paviršiaus šiurkštumas užsisotina.



25 pav. Paviršiaus šiurkštumo priklausomybė nuo sluoksnių skaičiaus, kai kiekvienas kitas sluoksnis pasukamas  $73^\circ$  (kairėje), naudojant skirtingus lazerinius šaltinius. Gylio bei paviršiaus šiurkštumo padalinto iš gylio priklausomybės nuo sluoksnių skaičiaus, kai kiekvienas kitas sluoksnis pasukamas  $73^\circ$ , naudojant skirtingus lazerinius šaltinius

Toliau buvo atlikti paviršiaus šiurkštumo evoliucijos tyrimai naudojant skirtingas lazerines sistemas, siekiant nustatyti paviršiaus šiurkštumo priklausomybę nuo bangos ilgio bei naudojamo energijos tankio. Paviršiaus šiurkštumo priklausomybes nuo sluoksnių skaičiaus, kai kiekvienas kitas sluoksnis pasukamas  $73^\circ$  kampu, naudojant skirtingas lazerines sistemas pavaizduotos 25 pav. kairėje. Galime matyti, kad visais atvejais teorinio modelio rezultatai gerai atitinka eksperimentiškai pasiektas vertes. Taip pat matome, kad naudojant 4H lazerinį šaltinį pasiekiamas paviršiaus šiurkštumas yra mažiausias. Dirbant tiesinės sugerties režime, sugerties koeficientas stipriai išauga, todėl spinduliuotė yra sugerama plonesniame sluoksnyje. Tuo galima įsitikinti pažvelgus į 25 pav. dešinėje esantį grafiką. Matome, kad naudojant 4H lazerinį šaltinį nuabliuojamas medžiagos kiekis yra mažiausias. Mažesni aukščio nuokrypiai lemia mažesnę paviršiaus šiurkštumą. Kita vertus, buvo pastebėta, kad naudojant 3H lazerinį šaltinį medžiagos yra pašalinama daugiau nei naudojant 1H lazerinį šaltinį. Galimas paaiškinamas yra tas, kad 3H atveju pažeidimų persiklojimas (23 %) buvo dvigubai didesnis nei 1H atveju (11%). Tai galėjo lemti, kad kiekvieno sluoksnio metu naudojant 3H lazerinį šaltinį buvo pašalinama daugiau medžiagos. Nedidelis skirtumas kiekvieno sluoksnio metu per 10 skenavimų akumuliuosisi į reikšmingą  $1 \mu\text{m}$  (33%) skirtumą. Siekiant susieti paviršiaus šiurkštumą ir nuabliuotos medžiagos kiekį buvo atidėta paviršiaus šiurkštumo padalinto iš nuabliuoto medžiagos gylio priklausomybė nuo sluoksnių skaičiaus (žr. 25 pav. dešinėje). Galima pastebėti, kad visos trys kreivės turi neigiamą polinkio kampą, kas reiškia, kad pašalinamos medžiagos gylis didėja greičiau nei paviršiaus šiurkštumas. Kuo paviršiaus šiurkštumo ir gylio santykis mažesnis, tuo geresnės kokybės abliacijos procesas – pasiekiamas mažesnis šiurkštumas išabliuojant daugiau

medžiagos. Matome, kad mažiausias santykis pasiekiamas naudojant 1H bei 3H lazerines sistemas. Tai parodo, kad aukštesnės kokybės abliacija realizuojama naudojant trumpesnius bangos ilgius.

Galiausiai įsitikinus, kad teorinis modelis geba tiksliai atkartoti eksperimentų metų pasiektus rezultatus, buvo atliktos papildomos modeliavimo užduotys, siekiant nustatyti, koks yra optimalus sekančio sluoksnio posūkio kampas, norint pasiekti mažiausią paviršiaus šiurkštumą po lazerinio mikroapdirbimo. Kadangi įvedus sluoksnio pozicijos neapibrėžtumą modeliavimų rezultatų atsikartojamumas sumažėjo, modeliavimo užduotys buvo atliekamos 10 kartų ir skaičiuojamas šios imties vidurkis. Gauti modeliavimo rezultatai pavaizduoti 26 pav. Paveikslėlyje matoma bendra tendencija, paviršiaus šiurkštumas išauga iki  $R_a \sim 110$  nm, kai sluoksnio posūkio vertės yra  $90^\circ$



26 pav. Paviršiaus šiurkštumo priklausomybė nuo sluoksnio posūkio kampo po 10 sluoksnių apdirbimo. Rezultatai pasiekti naudojant teorinį modelį. Sluoksnio pozicijos neapibrėžtumas  $b = 2.1 \mu\text{m}$ . Šiurkštumas  $x$  (skenavimo kryptimi). Sistema sinchronizuota. Lazerinis šaltinis – 3

kartotiniai ir panašios ( $\pm 5$  laipsniai). Paviršiaus šiurkštumas ties visomis kitomis vertėmis  $R_a \sim 90$  nm. Paviršiaus šiurkštumo padidėjimas ties  $90^\circ$  kartotiniais ir artimomis vertėmis yra lemiamas periodinių struktūrų formavimosi. Tuo tarpu, kai kiekvienas kitas sluoksnis yra pasukamas atsitiktiniu kampu, pažeidimai išdėstomi atsitiktinai, dėl ko nesiformuoja periodinės struktūros. Todėl galima pasiekti mažesnę paviršiaus šiurkštumą. Taigi, matome, kad naudojant šią skenavimo strategiją, mažesnę paviršiaus šiurkštumą galima pasiekti kiekvieną kitą sluoksnį pasukant atsitiktiniu kampu, vengiant  $90^\circ$  kartotinių ir panašių verčių, siekiant išvengti periodinių struktūrų formavimosi.

### 4.3. Diskusija

Ankstesniuose skyreliuose pademonstravome bei aptarėme pagrindinius šio darbo rezultatus. Šiame skyrelyje palyginsime, kaip mūsų gauti rezultatai atrodo apžvelgtos literatūros kontekste ir kokią linkmę reikėtų judėti toliau.

Apžvelgtoje literatūroje (žr. skyrelį 2) matėme, kad pagrindinė nagrinėjama skenavimo strategija yra impulsų persiklojimas. Apžvelgus skirtingus šaltinius, dažniausiai randama optimali impulsų

persiklojimo vertė ~ 50 %. Kita vertus, šiame darbe mes teigiame, kad impulsų persiklojimas kaip parametras yra mažai informacijos teikiantis parametras ir vietoj jo mes naudojome pažeidimų persiklojimą. Mūsų darbe nustatytos optimalios pažeidimų persiklojimo vertės 10-25% intervale. Perskaičiavus šias vertes į impulsų persiklojimą gautume: 44 % - 3H atveju, 61% - 4H atveju. Gautos vertės yra artimos literatūroje randamoms vertėms. Vis dėlto naudoti šias vertes su kita lazerine sistema ir tikėtis tokių pačių rezultatų yra beprasmiška. Kaip minėjome anksčiau, visi skirtingi parametrai: impulso forma, trukmė, bangos ilgis ir kt., daro didelę įtaką pažeidimo formavimuisi. Todėl optimalus impulsų persiklojimas kitai sistemai gali kardinaliai skirtis. Nagrinėjant pažeidimų persiklojimą, yra atsiribojama nuo visų skirtingų lazerinės sistemos parametrų, dėl ko eksperimento atsikartojamumas naudojant kitą sistemą yra didesnis. Buvo pademonstruota, kad pagrindiniai kriterijai, lemiantys optimalų pažeidimo persiklojimą, yra pažeidimo plotis, sienelių statusas ir pažeidimo kokybė.

Kalbant apie daugelio sluoksnių apdirbimą, buvo nustatyta stipri priklausomybė tarp galutinio paviršiaus šiurkštumo ir periodinių struktūrų formavimosi. Siekiant išgauti aukštesnės kokybės paviršius reikia rinktis tokią skenavimo strategiją, kad periodinių struktūrų formavimasis būtų kuo mažiau išreikštas. Tai galima pasiekti įvedant sluoksnio pozicijos neapibrėžtumą, pasukant kiekvieną kitą sluoksnį kampu, kuris nėra 90° kartotinis. Šias tendencijas pastebėjo ir kiti literatūros apžvalgoje minimi autoriai. Jaeggi mokslinė grupė pademonstravo, kad įvedus sluoksnio pozicijos neapibrėžtumą galima sumažinti periodinių struktūrų formavimąsi bei taip pagerinti paviršiaus kokybę [34]. Tuo tarpu Campanelli mokslinė grupė stebėjo paviršiaus kokybės pagerėjimą, kai kiekvienas kitas sluoksnis pasukamas 45° kampu [35]. Deja, autoriai nagrinėjo tik 0°, 45° bei 90° posūkio kampus, todėl šiurkštumo priklausomybė nuo posūkio kampo nebuvo iki galo ištirta. Šis pavyzdys ir didelis trūkumas straipsnių, kurie nagrinėtų skenavimo strategijų daroma įtaką paviršiaus šiurkštumui, pademonstruoja, kad ši sritis yra dar mažai ištirta. Šiame darbe atlikto nuodugnaus paviršiaus šiurkštumo priklausomybės nuo skenavimo strategijų tyrimo metu gauti rezultatai suteikia gilesnį supratimą, nuo ko priklauso ir kaip galima kontroliuoti paviršiaus šiurkštumą mikroapdirbimo metu. Be to, tyrimo metu nustatytos skenavimo strategijos gali būti plačiai taikomos praktikoje atliekant medžiagų apdirbimą lazerine abliacija.

Galiausiai buvo pastebėta, kad skenuojant paviršių daugiau nei vieną kartą, įvedus sluoksnio pozicijos neapibrėžtumus, rezultatų atsikartojamumas stipriai sumažėjo. Praktikoje, gamyboje, yra labai svarbu, kad rezultatai – paviršiaus kokybė atsikartotų. Norint pasiekti aukštą rezultatų atsikartojamumą bei minimalią paviršiaus kokybę po apdirbimo reikėtų nagrinėti kitas skenavimo strategijas. Viena iš jų galėtų būti, paviršiaus topografijos nuskaitymas po apdirbimo ir personalizuotos skenavimo strategijos sukūrimas. Abliuojant tik tas vietas, kur didžiausi teigiami

paviršiaus nuokrypiai. Nors ši ir kitos netrivialios skenavimo strategijos darbo metu nagrinėtos nebuvo, jos turi daug potencialo ir yra numatytos kaip tolimesni tyrimų objektai.

## Išvados

- Sukurtas teorinis modelis leidžia tiksliai prognozuoti silikatinio stiklo paviršiaus šiurkštumą po mikroapdirbimo femtosekundiniais impulsais, naudojant skirtingus apdirbimo parametrus (greitį, persiklojimą, sluoksnių skaičių, impulso energiją, kt.).
- Apdirbant silikatinį stiklą femtosekundiniais impulsais, skenuojant paviršių vieną kartą, nustatyta optimali skenavimo strategija yra perklojant pažeidimus 10-25 % intervale (minimalus pasiekiamas šiurkštumas  $R_a = 20$  nm), tokiu būdu pasiekama tolygiausia abliacija, kada nuabliuojami tik statūs kraštai, paliekant lygius dugnus nepažeistus.
- Apdirbant silikatinį stiklą femtosekundiniais impulsais, skenuojant paviršių daugiau nei vieną kartą, nustatyta optimali skenavimo strategija yra įvedant sluoksnio pozicijos neapibrėžtumus (dydžiu +/- 1  $\mu$ m) bei pasukant kiekvieną kitą sluoksnį kampų, kuris nėra  $90^\circ \pm 5^\circ$  (pasiekiamas šiurkštumas po 10 sluoksnių  $R_a = 90$  nm), tokiu būdu išvengiama periodinių struktūrų formavimosi, kurios lemia padidėjusį paviršiaus šiurkštumą.

## Aprobacija

**Magistratūros studijų laikotarpiu susijusia tema buvo išleista publikacija:**

**E. Kažukauskas**, S. Butkus, P. Tokarski, V. Jukna, M. Barkauskas and V. Sirutkaitis, Micromachining of Transparent Biocompatible Polymers Applied in Medicine Using Bursts of Femtosecond Laser Pulses, *Micromach.* **11**(12), 1093 (2020), <https://doi.org/10.3390/mi11121093>.

**Šios publikacijos rezultatai buvo pristatyti dviejuose tarptautinėse konferencijose:**

- **E. Kažukauskas**, S. Butkus, P. Tokarski, V. Jukna, C. V. D. Manikas, M. Barkauskas and V. Sirutkaitis, MICROMACHINING OF TRANSPARENT BIOCOMPATIBLE POLYMERS APPLIED IN MEDICINE USING BURSTS OF FEMTOSECOND LASER PULSES, Open Readings 2021, oral presentation, Vilnius, Lithuania, 2021. (Pranešimas buvo išrinktas kaip geriausias žodinis pranešimas konferencijoje).
- **E. Kažukauskas**, S. Butkus, P. Tokarski, V. Jukna, M. Barkauskas and V. Sirutkaitis, Micromachining of Transparent Biocompatible Polymers Applied in Medicine Using Bursts of Femtosecond Laser Pulses, „LPM 2021“, short oral presentation, Hirosaki, Aomori, Japan, 2021. (Pranešimas buvo išrinktas kaip vienas iš geriausių studentų žodinių pranešimų konferencijoje).

**Magistratūros baigiamojo darbo rezultatai buvo pristatyti dviejuose tarptautinėse konferencijose:**

- **E. Kažukauskas**, S. Butkus, V. Jukna, D. Paipulas and V. Sirutkaitis, NUMERICAL SIMULATIONS AND EXPERIMENTAL ANALYSIS OF SCANNING TECHNIQUES FOR LOW-ROUGHNESS SURFACES USING UV FEMTOSECOND PULSES, Open Readings 2022, oral presentation, Vilnius, Lithuania, 2022. (Pranešimas buvo išrinktas kaip geriausias žodinis pranešimas konferencijoje).
- **E. Kažukauskas**, S. Butkus, V. Jukna, D. Paipulas and V. Sirutkaitis, Numerical simulations and experimental analysis of scanning techniques for low-roughness surfaces using UV femtosecond pulses, SPIE Photonics Europe 2022, poster presentation, Strasbourg, France, 2022.

**Tyrimo rezultatai taip pat bus pristatyti kitoje tarptautinėje konferencijoje:**

- **E. Kažukauskas**, S. Butkus, V. Jukna, D. Paipulas and V. Sirutkaitis, Numerical simulations and experimental analysis of scanning techniques for low-roughness surfaces using UV femtosecond pulses, LPM 2022, oral presentation, Dresden, Germany, 2022.

## Literatūros sąrašas

- [1] A. Toloei, V. Stoilov, and D. Northwood, The relationship between surface roughness and corrosion, *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Proceedings (IMECE)*, 2013, **2 B**.10.1115/IMECE2013-65498
- [2] J. Mitchell, N. Crow, and A. Nieto, Effect of surface roughness on pitting corrosion of AZ31 MG alloy, *Metals (Basel)*, (2020),10.3390/met10050651
- [3] Q. Cao, S. Zheng, C. P. Wong, S. Liu, and Q. Peng, Massively Engineering the Wettability of Titanium by Tuning Nanostructures and Roughness via Laser Ablation, *J. Phys. Chem. C* **123**(50), 30382–30388 (2019),10.1021/acs.jpcc.9b08580
- [4] L. Zhang, Y. Zhong, D. Cha, and P. Wang, A self-cleaning underwater superoleophobic mesh for oil-water separation, *Sci. Rep.* **3** (2013),10.1038/srep02326
- [5] L. Liu, C. Chen, S. Yang, H. Xie, M. G. Gong, and X. Xu, Fabrication of superhydrophilic-underwater superoleophobic inorganic anti-corrosive membranes for high-efficiency oil/water separation, *Phys. Chem. Chem. Phys.* **18**(2), 1317–1325 (2015),10.1039/c5cp06305a
- [6] Y. Huang and S. Liu, Surface roughness analysis and improvement of PMMA-based microfluidic chip chamber by CO<sub>2</sub> laser cutting, *3rd Pacific International Conference on Applications of Lasers and Optics, PICALO 2008 - Conference Proceedings*, 2008, 915–918.10.2351/1.5057153
- [7] C. Kleinstreuer and J. Koo, Computational analysis of wall roughness effects for liquid flow in micro-conduits, *J. Fluids Eng. Trans. ASME* **126**(1), 1–9 (2004),10.1115/1.1637633
- [8] D. Bergström, The absorption of laser light by rough metal surfaces, Thesis 226 (2008).
- [9] M. Auinger, P. Ebbinghaus, A. Blümich, and A. Erbe, Effect of surface roughness on optical heating of metals, *J. Eur. Opt. Soc.* **9** (2014),10.2971/jeos.2014.14004
- [10] K. A. Barth, J. D. Waterfield, and D. M. Brunette, The effect of surface roughness on RAW 264.7 macrophage phenotype, *J. Biomed. Mater. Res. - Part A* **101 A**(9), 2679–2688 (2013),10.1002/jbm.a.34562
- [11] M. M. Hatamleh, X. Wu, A. Alnazzawi, J. Watson, and D. Watts, Surface characteristics and biocompatibility of cranioplasty titanium implants following different surface treatments, *Dent. Mater.* **34**(4), 676–683 (2018),10.1016/j.dental.2018.01.016
- [12] L. Le Guéhennec, A. Soueidan, P. Layrolle, and Y. Amouriq, Surface treatments of titanium dental implants for rapid osseointegration, *Dental Materials*, **23**(7), . 844–854, 2007.10.1016/j.dental.2006.06.025
- [13] J. Y. Martin *et al.*, Effect of titanium surface roughness on proliferation, differentiation, and protein synthesis of human osteoblast-like cells (MG63), *J. Biomed. Mater. Res.* **29**(3), 389–401 (1995),10.1002/jbm.820290314

- [14] R. Mukherjee, K. Chaudhury, S. Das, S. Sengupta, and P. Biswas, Posterior capsular opacification and intraocular lens surface micro-roughness characteristics: An atomic force microscopy study, *Micron* **43**(9), 937–947 (2012), 10.1016/j.micron.2012.03.015
- [15] G. M. Krolczyk and S. Legutko, Experimental analysis by measurement of surface roughness variations in turning process of duplex stainless steel, *Metrol. Meas. Syst.* (2014), 10.2478/mms-2014-0060
- [16] E. G. Mota, L. N. Smidt, L. M. Fracasso, L. H. Burnett, and A. M. Spohr, The effect of milling and postmilling procedures on the surface roughness of CAD/CAM materials, *J. Esthet. Restor. Dent.* (2017), 10.1111/jerd.12326
- [17] J. P. Davim, V. C. Clemente, and S. Silva, Surface roughness aspects in milling MDF (medium density fibreboard), *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* (2009), 10.1007/s00170-007-1318-z
- [18] N. Faisal, D. Zindani, K. Kumar, and S. Bhowmik, Laser Micromachining of Engineering Materials—A Review, , 2019. 10.1007/978-3-319-99900-5\_6
- [19] J. Cheng *et al.*, A review of ultrafast laser materials micromachining, , *Optics and Laser Technology*. 2013. 10.1016/j.optlastec.2012.06.037
- [20] S. Ameer-Beg, W. Perrie, S. Rathbone, J. Wright, W. Weaver, and H. Champoux, Femtosecond laser micro structuring of materials, *Appl. Surf. Sci.* **127–129**, 875–880 (1998), 10.1016/S0169-4332(97)00760-5
- [21] S. S. Harilal, J. R. Freeman, P. K. Diwakar, and A. Hassanein, Femtosecond laser ablation: Fundamentals and applications, *Springer Ser. Opt. Sci.* **182**, 143–166 (2014), 10.1007/978-3-642-45085-3\_6
- [22] B. Bhushan, Surface roughness analysis and measurement techniques, *Modern Tribology Handbook: Volume One: Principles of Tribology*, 2000, 49–119. 10.1201/9780849377877-10
- [23] B. Barnes, Optical Properties of Solids, 2nd edn, by Mark Fox, *Contemp. Phys.* **52**(6), 612–613 (2011), 10.1080/00107514.2011.595504
- [24] A. Bargelis, M. Barkauskas, J. Kalpokas, M. Peckus, and V. Sirutkaitis, *Lazerinių technologijų laboratoriniai darbai*. 2008.
- [25] A. L’HUIILLIER, Multiple Ionization of Atoms Through Multiphoton Absorption, *Le J. Phys. Colloq.* **48**(C9), C9-415-C9-425 (1987), 10.1051/jphyscol:1987971
- [26] A. Bargelis, A. Dementjev, and V. Sirutkaitis, *Lazerinė technologija*. 2008.
- [27] A. Dubietis, *NETIESINĖ OPTIKA Vadovėlis*. 2011.
- [28] A. Wolynski, T. Herrmann, P. Mucha, H. Haloui, and J. L’huillier, Laser ablation of CFRP using picosecond laser pulses at different wavelengths from UV to IR, 2011. 10.1016/j.phpro.2011.03.136
- [29] M. D. Perry, B. C. Stuart, P. S. Banks, M. D. Feit, V. Yanovsky, and A. M. Rubenchik,



- Ultrashort-pulse laser machining of dielectric materials, *J. Appl. Phys.* (1999),10.1063/1.370197
- [30] A. Ben-Yakar, A. Harkin, J. Ashmore, R. L. Byer, and H. A. Stone, Thermal and fluid processes of a thin melt zone during femtosecond laser ablation of glass: The formation of rims by single laser pulses, *J. Phys. D. Appl. Phys.* (2007),10.1088/0022-3727/40/5/021
- [31] M. Saghebfar, M. K. Tehrani, S. M. R. Darbani, and A. E. Majd, Femtosecond pulse laser ablation of chromium: experimental results and two-temperature model simulations, *Appl. Phys. A Mater. Sci. Process.* **123**(1), (2017),10.1007/s00339-016-0660-0
- [32] A. Ben-Yakar and R. L. Byer, Femtosecond laser ablation properties of borosilicate glass, *J. Appl. Phys.* (2004),10.1063/1.1787145
- [33] P. Duggal, An Experimental Study of Rim Formation in Single-Shot Femtosecond Laser Ablation of Borosilicate Glass by Master of Science in Engineering The University of Texas at Austin August 2006, 103 (2006).
- [34] B. Jaeggi *et al.*, Ultra-high-precision surface structuring by synchronizing a galvo scanner with an ultra-short-pulsed laser system in MOPA arrangement, *Laser Applications in Microelectronic and Optoelectronic Manufacturing (LAMOM) XVII*, 2012, **8243**, 82430K.10.1117/12.909844
- [35] S. L. Campanelli, A. D. Ludovico, C. Bonserio, P. Cavalluzzi, and M. Cinquepalmi, Experimental analysis of the laser milling process parameters, *J. Mater. Process. Technol.* **191**(1–3), 220–223 (2007),10.1016/j.jmatprotec.2007.03.005
- [36] G. Schnell, U. Duenow, and H. Seitz, Effect of laser pulse overlap and scanning line overlap on femtosecond laser-structured Ti6Al4V surfaces, *Materials (Basel)*. **13**(4), (2020),10.3390/ma13040969
- [37] D. F. Farson *et al.*, Femtosecond laser micromachining of dielectric materials for biomedical applications, *J. Micromechanics Microengineering* **18**(3), (2008),10.1088/0960-1317/18/3/035020
- [38] U. Umer, M. K. Mohammed, and A. Al-Ahmari, Multi-response optimization of machining parameters in micro milling of alumina ceramics using Nd:YAG laser, *Meas. J. Int. Meas. Confed.* **95**181–192 (2017),10.1016/j.measurement.2016.10.004
- [39] J. Schille, L. Schneider, and U. Loeschner, Process optimization in high-average-power ultrashort pulse laser microfabrication: how laser process parameters influence efficiency, throughput and quality, *Appl. Phys. A Mater. Sci. Process.* **120**(3), 847–855 (2015),10.1007/s00339-015-9352-4
- [40] A. Sikora, G. Coustillier, T. Sarnet, and M. Sentis, Laser engraving optimization for achieving smooth sidewalls, *Appl. Surf. Sci.* **492**382–391 (2019),10.1016/j.apsusc.2019.06.234

- [41] N. Chen, Z. Li, Y. Wu, G. Zhao, L. Li, and N. He, Investigating the ablation depth and surface roughness of laser-induced nano-ablation of CVD diamond material, *Precis. Eng.* **57**, 220–228 (2019),10.1016/j.precisioneng.2019.04.009
- [42] J. Eichstädt, G. R. B. E. Römer, and A. J. Huis In 't Veld, Determination of irradiation parameters for laser-induced periodic surface structures, *Appl. Surf. Sci.* **264**, 79–87 (2013),10.1016/j.apsusc.2012.09.120
- [43] R. Le Harzic *et al.*, Comparison of heat-affected zones due to nanosecond and femtosecond laser pulses using transmission electronic microscopy, *Appl. Phys. Lett.* (2002),10.1063/1.1481195
- [44] E. S. Gadelmawla, M. M. Koura, T. M. A. Maksoud, I. M. Elewa, and H. H. Soliman, Roughness parameters, *J. Mater. Process. Technol.* **123**(1), 133–145 (2002),10.1016/S0924-0136(02)00060-2
- [45] I. E. Saklakoglu and S. Kasman, Investigation of micro-milling process parameters for surface roughness and milling depth, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* (2011),10.1007/s00170-010-2953-3
- [46] M. Schwerter, D. Grabner, L. Hecht, A. Vierheller, M. Leester-Schadel, and A. Dietzel, Surface-Passive Pressure Sensor by Femtosecond Laser Glass Structuring for Flip-Chip-in-Foil Integration, *J. Microelectromechanical Syst.* (2016),10.1109/JMEMS.2016.2539202
- [47] S. Krause, P. T. Miclea, F. Steudel, S. Schweizer, and G. Seifert, Precise microstructuring of indium-tin oxide thin films on glass by selective femtosecond laser ablation, *EPJ Photovoltaics* (2013),10.1051/epjpv/2012013
- [48] L. Torrisi, A. Borrielli, and D. Margarone, Study on the ablation threshold induced by pulsed lasers at different wavelengths, *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. with Mater. Atoms* (2007),10.1016/j.nimb.2006.12.144
- [49] M. E. Thompson and S. R. Brown, The effect of anisotropic surface roughness on flow and transport in fractures, *J. Geophys. Res.* (1991),10.1029/91jb02252
- [50] B. Y. Cao, M. Chen, and Z. Y. Guo, Effect of surface roughness on gas flow in microchannels by molecular dynamics simulation, *Int. J. Eng. Sci.* (2006),10.1016/j.ijengsci.2006.06.005
- [51] N. Bloembergen, *Laser-material interactions; fundamentals and applications*, , 2008, 3–10.10.1063/1.44887

Evaldas Kažukauskas

## TEORINĖ IR EKSPERIMENTINĖ APDIRBAMOS MEDŽIAGOS PAVIRŠIAUS ŠIURKŠTUMO EVOLIUCIJOS ANALIZĖ FOKUSUOJANT FEMTOSEKUNDINIUS LAZERIO IMPULSUS

### Santrauka

Paviršiaus šiurkštumas yra svarbus medžiagos parametras, kuris daro didelę įtaką kitoms medžiagos savybėms. Metalų korozinės savybės, titano ir kitų medžiagų paviršiaus drėgnumo savybės, skysčių dinamika, optinių elementų pralaidumas bei atspindys, implantų prigijimo sėkmė – tai savybės, kurios yra nulemtos medžiagos paviršiaus šiurkštumo. Dėl šių priežasčių aukštos kokybės paviršiai turi vis didėjančią paklausą šios dienos rinkose. Tačiau, net naudojant femtosekundinius lazerius, skaidrių dielektrikų abliacijos metu pasiekti optinės kokybės paviršius ( $R_q < 0,1 \mu\text{m}$ ) po apdirbimo yra netrivialus uždavinys. Net šiai dienai nėra iki galo aišku, kaip reikia skenuoti paviršių, norint pasiekti mažiausią paviršiaus šiurkštumą po apdirbimo.

Šio darbo tikslas buvo surasti optimalią skenavimo strategiją, kurią naudojant apdirbant silikatinio stiklo paviršių femtosekundiniais impulsais būtų galima pasiekti mažiausią paviršiaus šiurkštumą. Vieno sluoksnio apdirbimo metu buvo nustatyta, kad galutiniam paviršiaus šiurkštumui didžiausią įtaką daro pažeidimų persiklojimas. Buvo parodyta, kad tolygiausia paviršiaus abliacija pasiekama, kai pažeidimų persiklojimas x ir y kryptimis vienodas, 10-25 % intervale (mažiausias pasiektas paviršiaus šiurkštumas  $R_a = 20 \pm 5 \text{ nm}$ ). Taip pat buvo stebėta, kad nustatytas optimalus pažeidimų persiklojimas išsilaiko naudojant skirtingus lazerinius šaltinius. Optimali persiklojimo vertė priklauso nuo pažeidimo sienelių statumo. Daugelio sluoksnių apdirbimo metu buvo pastebėta, kad galima sumažinti paviršiaus šiurkštumą iki 50 % po 10 sluoksnių apdirbimo, įvedant į sistemą kiekvieno sluoksnio pozicijos neapibrėžtumą per  $\pm 1 \mu\text{m}$ . Atlikus paviršiaus šiurkštumo priklausomybės nuo sluoksnio posūkio kampo tyrimą, buvo nustatyta, kad optimali skenavimo strategija, skenuojant paviršių daugiau nei vieną kartą, yra kiekvieną sekantį sluoksnį pasukti kampu, kuris nėra  $90^\circ$  kampo kartotinis arba panašus ( $\pm 5^\circ$ ). Taip yra išvengiama periodinių struktūrų formavimosi, kurios yra atsakingos už padidėjusį paviršiaus šiurkštumą. Pasiekiamas minimalus paviršiaus šiurkštumas po 10 sluoksnių apdirbimo  $R_a = 90 \text{ nm}$ .

## NUMERICAL AND EXPERIMENTAL ANALYSIS OF THE EVOLUTION OF THE SURFACE ROUGHNESS DURING EXPOSURE TO FEMTOSECOND LASER PULSES

### Summary

Surface roughness is an important parameter that has a great influence on various material properties. It determines the rate of corrosion, wettability, biocompatibility, as well as optical properties of different materials. Low roughness ( $< 100$  nm Ra) surfaces are difficult to achieve through an ablation-based process even with fs pulses, therefore investigation of the theoretical intricacies is of major interest when engraving transparent materials.

In our study we present an in-depth investigation of the scanning techniques and how they influence the final surface roughness. We numerically investigate the evolution of the surface roughness when it is scanned with UV-IR femtosecond pulses multiple times (multiple layers) and compare the numerical results to the experimentally acquired values. We found that in the case of a single scan the dominant surface roughness determining factor is the overlap of modifications. The optimal overlap of modifications was found to be somewhere in the range of 10-25 % (minimum achieved surface roughness  $R_a = 20 \pm 5$  nm). The determined optimal overlap of modifications maintained even when different laser sources were used. In the case of a multi-scanned surface we have determined that the resulting surface roughness can be minimized by introducing randomness to prevent the formation of periodic structures that are responsible for increase of surface roughness. It can be achieved by introducing the uncertainty of layer positioning by  $\pm 1 \mu\text{m}$ , or by rotating every next layer at an angle that is not a repetitive of  $90^\circ$  or similar ( $\pm 5^\circ$ ). The minimum achieved surface roughness after 10 pass  $R_a = 90$  nm. The investigated theoretical model is in good relation to the experimentally acquired results and provides valuable information when optimizing the process for minimal-roughness micromachining when performing deep engraving of transparent materials.