

Vilniaus universitetas
Fizikos fakultetas
Lazerinių tyrimų centras

Erminas Kozlovskis

VEKTORINIŲ CILINDRINIŲ PLUOŠTŲ PANAUDOJIMAS SELEKTYVIAM
LAZERINIAM ĖSDINIMUI

Magistrantūros studijų baigiamasis darbas

Lazerinės technologijos studijų programa

Studentas
Darbo vadovas
Centro direktorė

Erminas Kozlovskis
dr. Antanas Urbas
prof. dr. Dalia Kaškelytė

Vilnius 2023

Turinys

Įvadas	2
1 Literatūros apžvalga	3
1.1 Kvarcinis stiklas	3
1.2 Poliarizacijos tipai	4
1.3 Skaidrių medžiagų sąveika su ultratrumpais impulsais	5
1.3.1 Sąveikos mechanizmai	5
1.3.2 Skaidrių medžiagų modifikavimo tipai	7
1.4 S-bangos plokštelė	9
1.5 Selektyvus lazerinis ėsdinimas	12
2 Tyrimo metodai	14
2.1 Optinė schema	14
2.2 Metodika	15
3 Tyrimo rezultatai	18
3.1 Ėsdinimo spartos matavimai	18
3.2 Modifikacijų analizė	24
Pagrindiniai rezultatai ir išvados	28
Literatūros sąrašas	29

Įvadas

Per pastaruosius dešimtmečius lazeriai tapo nepakeičiamu įrankiu medžiagų pramoniniam mikroapdirbimui. Lazerinė spinduliuotė yra koherentinė, kryptinga, lokalizuota, kas įgalina precizinį medžiagų apdirbimą, tikslius interferometrinius matavimus, pagerina ir pagreitina telekomunikacijas [1]. Selektyvus lazerinis ėsdinimas (SLE) - tai universali gamybos technologija, leidžianti formuoti sudėtingus mikrokanalus, skaidrių medžiagų pjūvius, bei įvairius 3D komponentus iš stiklo arba safyro [2]. Aštriai sufokusuota femtosekundinė lazerio spinduliuotė sukelia lokalizuotus skaidrių terpių fizikinių ir cheminių savybių pokyčius. Priklausomai nuo apdirbimo sąlygų (lazerinių parametrų ir naudojamo cheminio ėsdnimo tirpalo sudėties), lazeriu modifikuotos stiklo srities ėsdinimo sparta tampa žymiai aukštesne nei nmodifikuoto stiklo. Taigi, šis metodas leidžia formuoti preciziškas 3D mikrostruktūras [3], o dėl puikaus fizinio ir cheminio stabilumo, bei biocheminio suderinamumo lydytas kvarcas tampa pagrindiniu selektyvaus lazerinio ėsdinimo medžiagų pasirinkimu.

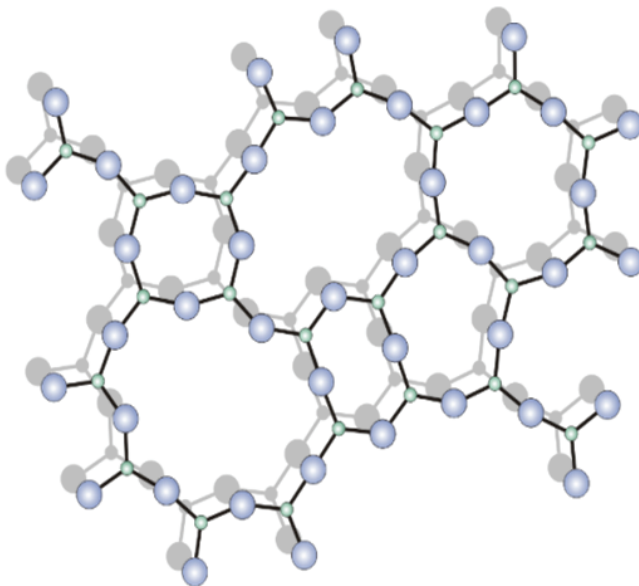
Selektyvus lazerinis ėsdinimas yra ypač patraukli technologija didelio masto mikrofluidinių prietaisų gamybai, tačiau vienas iš pagrindinių šio proceso sunkumų yra stipri ėsdinimo spartos priklausomybė nuo pluošto poliarizacijos orientacijos skenavimo trajektorijos atžvilgiu, susijusi su ultratrumpų šviesos impulsų formuojamomis nanostruktūromis lydytame kvarce [4]. Tai reiškia, kad gaminant komplikotos geometrijos struktūras reikia išlaikyti pastovią tiesinės poliarizacijos orientaciją formuojamo prietaiso atžvilgiu, o tai gali tapti gan sudėtinga ir papildomai sulėtinti visą apdirbimo procesą. Potencialus šios problemos sprendimas yra naudoti taip vadinamus vektorinius cilindrinis pluoštus, pasižyminčius žiedo formos intensyvumo skirstiniu [5]. Tokių pluoštų pavyzdžiai - radialiai bei azimutiškai poliarizuoti pluoštai, kurių poliarizacijos lauko vektoriaus kryptys atitinkamai yra nukreiptos radialine ir azimutine kryptimis. Lazeriniai pluoštai, pasižymintys tokiu poliarizaciniu lauku, suteikia galimybę eliminuoti poliarizacijos įtaką skenavimo krypties atžvilgiu, kas palengvintų, bei pagreitintų lydyto kvarco selektyvaus lazerinio ėsdinimo procesą.

Šio darbo tikslas yra ištirti įvairių lazerio parametrų įtaką selektyvaus lazerinio ėsdinimo spartai lydyto kvarco stikle, naudojant vektorinius cilindrinis lazerinius pluoštus.

1 Literatūros apžvalga

1.1 Kvarcinis stiklas

Lydytas kvarcas yra amorfinė medžiaga (SiO_2), susidedanti iš SiO_4 tetraedrų, sujungtų vienas su kitu, kad sudarytų statistiškai įvairaus dydžio žiedus (1 pav.). Egzistuoja įvairios lydyto kvarco rūšys [8]. Natūralūs lydyto kvarco stiklai turi daug priemaišų (metalo oksidų), tuo tarpu sintetiniu būdu suformuoti tokių priemaišų beveik neturi.



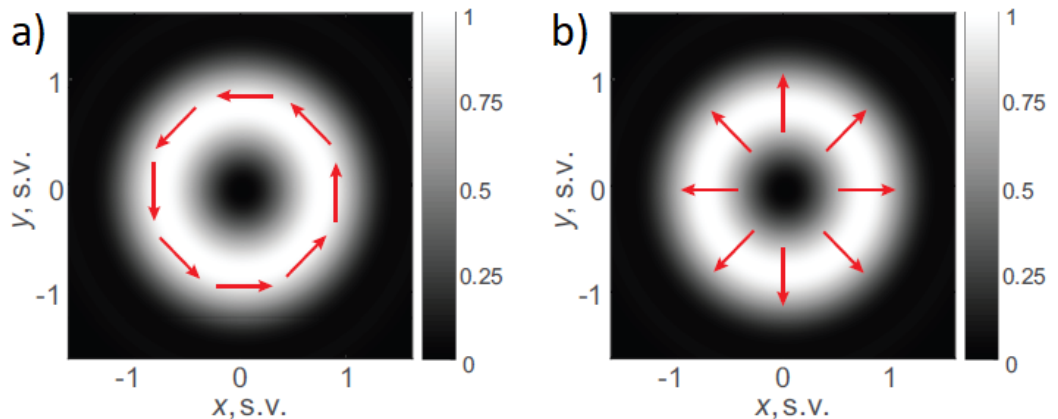
1 pav.: Amorfinio lydyto kvarco matrica, susidedanti iš SiO_4 tetraedrų, sujungtų vienas su kitu [2].

Lydytas kvarcas yra dielektrinė medžiaga, todėl yra nelaidus elektros srovei, nes jame nėra laisvų elektros krūvininkų, kurie galėtų judėti. Nepaisant to, lydytas kvarcas turi tam tikrų elektrinių savybių. Pavyzdžiui, jo atomai gali sudaryti elektrostatinis dipolius, kurie gali sąveikauti su elektriniais laukais [2]. Taipogi, lydytas kvarcas yra chemiškai stabilus, t.y. jis nereaguoja su daugeliu cheminių medžiagų, vandenilio fluorida rūgštį ir didelės koncentracijos šarminių metalų hidroksidų tirpalus. Kai lydytas kvarcas yra veikiamas įtempių, jungties kampas deformuojasi, o tai pakeičia Si-O-Si jungčių elektronų pasiskirstymą, todėl padidėja cheminis reaktyvumas [6]. Taipogi stikle, veikiant lazerio spinduliuotei susidaro defektai, kaip laisvos jungtys, deguonies skylės ir pan., kurie turi daug įtakos medžiagos reaktyvumui. Dėl skaidrumo matomų bangų ilgių diapazone, ypač UV srityje, ši medžiaga tinka aukščiausios klasės optiniams komponentams ir optiniams šviesolaidžiams, o skaidrumas IR spinduliuotei daro šią medžiagą itin patrauklia tūrinių mikropažeidimų formavimui.

1.2 Poliarizacijos tipai

Poliarizacija yra viena iš svarbių EM spinduliuotės savybių. Ši vektorinė šviesos prigimtis ir jos sąveika su medžiaga leidžia sukurti daugybę optinių įrenginių ir optinių sistemų [7]. Lazerinėse sistemose dažniausiai yra sutinkami keli poliarizacijos tipai: tiesinė - kai elektrinio lauko vektoriai išdėstyti vienoje plokštumoje, bei apskritiminė - kai poliarizacijos vektoriaus dydis nekinta, o kryptis sukasi statmenoje sklidimui plokštumoje bėgant laikui. Lazerio pluošto poliarizacija turi didelę įtaką lazerinio mikroapdirbimo procesams ir yra ypač svarbi nanogardelių susidarymui [4], metalų ir stiklų abliacijai [7], bei skilimų krypties kontrolei pjaustant kristalines medžiagas Beselio-Gauso pluoštais [8].

Egzistuoja ir kiek kitokią - ašinę poliarizacijos simetriją turintys pluoštai, dar vadinami vektoriniais cilindriniais (VC) pluoštais [5]. Vektorinių cilindrinų pluoštų poliarizacijos būseną pasižymi cilindrine simetrija ir jie turi žiedo formos intensyvumo skirstinį. Ryškiausi šių pluoštų pavyzdžiai yra radialiai ir azimutiškai poliarizuoti pluoštai (2 pav.). Tokių pluoštų poliarizacijos vektoriaus kryptis centre yra neapibrėžta, o einant tolyn nuo pluošto centro vektorius bus atitinkamai nukreiptas radialine ar azimutine kryptimis [9].

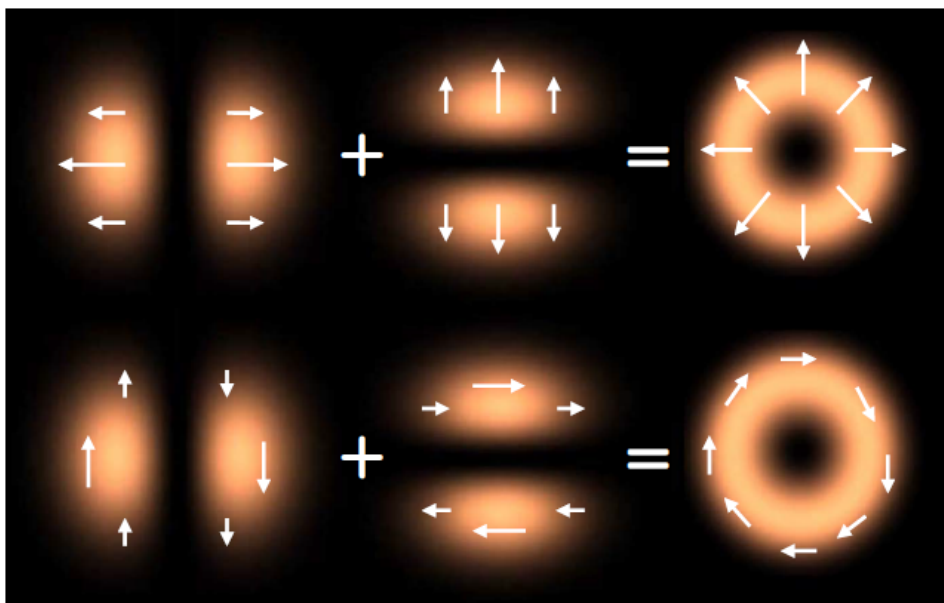


2 pav.: a) Azimutinės ir b) radialinės poliarizacijos pluoštai. Rodyklės rodo poliarizacijos vektoriaus kryptį [9].

Vektoriniai cilindriniai pluoštai gali būti išreikšti kaip ortogonaliai poliarizuotų Hermito-Gauso HG_{01} ir HG_{10} modų superpozicija [7]:

$$\begin{aligned}\vec{E}_{rad} &= HG_{10}\vec{e}_x + HG_{01}\vec{e}_y \\ \vec{E}_{azim} &= HG_{01}\vec{e}_x + HG_{10}\vec{e}_y\end{aligned}\tag{1}$$

čia \vec{E}_{rad} ir \vec{E}_{azim} atitinkamai žymi radialiai ir azimutiškai poliarizuotos šviesos elektrinio lauko vektorius. Tokios superpozicijos rezultatas yra atvaizduotas 3 pav.



3 pav.: Radialinės ir azimutinės poliarizacijos pluoštų formavimas naudojant tiesinės poliarizacijos pluoštų superpoziciją [7].

Vektoriniai cilindriniai pluoštai pasižymi unikaliomis fokusavimo savybėmis naudojant didelės skaitmeninės apertūros objektyvus. Pluoštus su radialine poliarizacija galima sufokusuoti į mažesnę dėmę nei tradiciškai poliarizuotus ir radialinei poliarizacijai - naudojant žiedinę apertūrą buvo gauta $0,16 \lambda^2$ dydžio dėmė židinio plokštumoje [5]. Azimutiškai poliarizuotų pluoštų atveju sufokusuotas laukas sukuria žiedo formos dėmę su simetrišku poliarizacijos pasiskirstymu. Unikali VC pluoštų fokusavimo savybės leidžia juos pritaikyti dalelių gaudymui, medžiagų mikroapdirbimui (metalų abliavimui) [7] ir paviršiaus plazmonų sužadinimui [5]. Egzistuoja keletas būdų, kaip galima suformuoti radialiai ar azimutiškai poliarizuotus pluoštus, įskaitant dvejetainiškumo manipuliavimą skystųjų kristalų pagalba (panaudojant erdvinį šviesos moduliatorių) [7], poliarizacijos kontroliavimą lazerio rezonatoriaus viduje [10] ir naudojant S-bangos plokštelę (angl. S-waveplate) [11], kurią plačiau aptarsime kiek vėliau.

1.3 Skaidrių medžiagų sąveika su ultratrumpais impulsais

1.3.1 Sąveikos mechanizmai

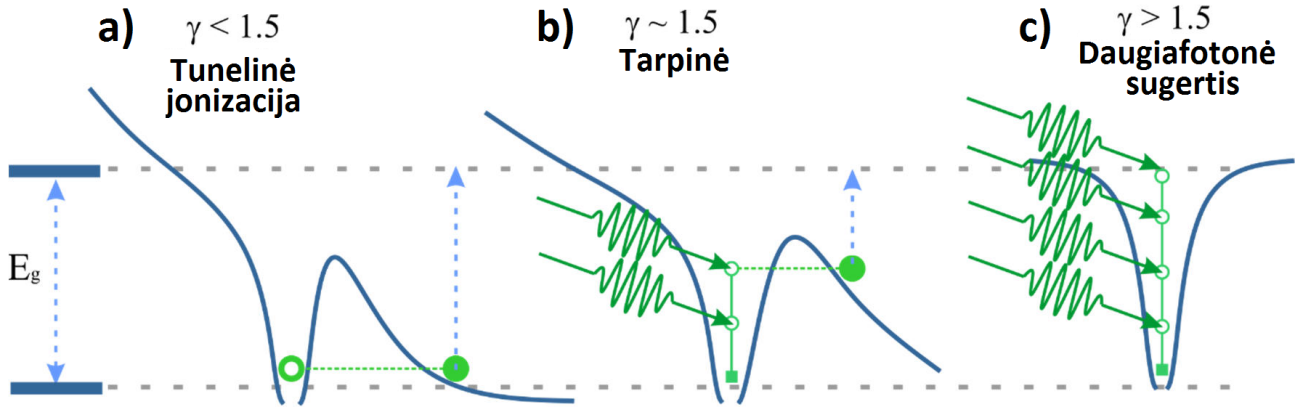
Iš įvairių literatūros šaltinių ir ankstesnių darbų [12] yra žinoma, jog žemo intensyvumo lazerio pluoštui apšvitinus skaidrią terpę, galima pastebėti tik tiesinius optinius efektus, tokius kaip atspindys, difrakcija, pralaidumas ir sugertis [13]. Tačiau kai lazerio intensyvumas yra pakankamai aukštas ($I > \sim 10^{13} \text{ W/cm}^2$), pasireiškia netiesiniai optiniai efektai ir medžiaga, kuri paprastai yra skaidri atitinkamam bangos ilgiui, tampa sugeriančia ir pasidaro įmanoma sukelti

ti įvairių tipų struktūrinius medžiagos pokyčius (aptariami tolesniame skyriuje) [13]. Bendru atveju, fotonų skaičių (m), reikalingą netiesinei sugerčiai inicijuoti medžiagoje su draustinės juostos tarpu E_g , nustato mažiausias sveikasis skaičius m , kuris tenkina tokį sąryšį [2]:

$$mh\nu = E_g \quad (2)$$

čia h yra Planko konstanta, o ν - lazerio dažnis, nusakomas kaip c/λ (c yra šviesos greitis ir λ lazerio spinduliuotės bangos ilgis).

Už netiesinės sugerties efektą yra atsakingi du pagrindinei procesai: fotojonizacija ir griūtinė jonizacija (elektronų griūtis) [14, 15]. Fotojonizacijos metu elektronai, gavę energijos iš atsklidusio lazerio impulso fotonų, yra sužadinti iš valentinės į laidumo juostą. Jonizacija gali pasireikšti dvejais būdais: tunelinė jonizacija ar daugiafotonė sugertis [14]. Daugiafotonė sugertis yra dominuojantis procesas esant mažesniai lazerio intensyvumui ir aukštesniai pasikartojimo dažniui. Šio proceso metu elektronas sugeria kelis fotonus tuo pačiu metu (4 pav. c). Prie



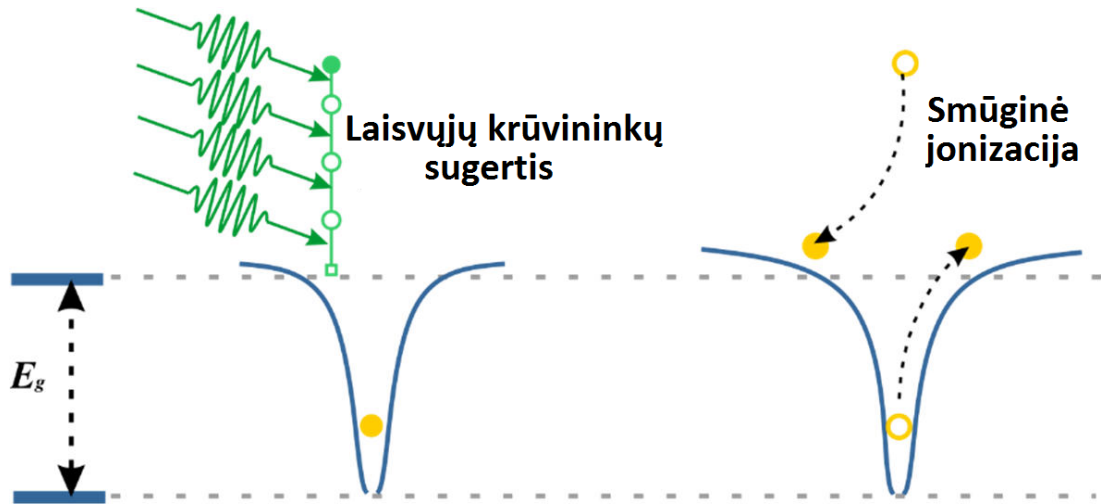
4 pav.: Medžiagos netiesinės sugerties mechanizmai, ją veikiant ultratrumpais impulsais: a) tunelinė jonizacija; b) tarpiniai (kombinuoti) netiesiniai procesai; c) daugiafotonė sugertis [14].

itin didelių intensyvumų ir žemų dažnių [14] gali pasireikšti kitas jonizacijos mechanizmas - tunelinė jonizacija, kurios metu elektronai gali tuneliuoti pro energetinį barjerą ir taip atsidurti laidumo juostoje (4 pav. a). Vyraujantį jonizacijos mechanizmą galima nusakyti per Keldyšo (angl. Keldysh) parametru, kurį nusako tokia išraiška [16]:

$$\gamma = \frac{\omega}{e} \sqrt{\frac{m_e c n \varepsilon_0 E_g}{I}} \quad (3)$$

čia ω yra lazerio spinduliuotės dažnis, e elektrono krūvis, m_e elektrono masė, c šviesos greitis, n medžiagos lūžio rodiklis, ε_0 dielektrinė konstanta, E_g medžiagos draustinės juostos tarpas, I lazerio spinduliuotės intensyvumas. Kai Keldyšo parametras viršija 1.5, pagrindinį vaidmenį atlieka daugiafotonė sugertis; jei jo vertė yra žemesnė už 1.5, tai dominuoja tunelinė jonizacija. Tarpinėje situacijoje ($\gamma = 1.5$) dalyvauja abu jonizacijos mechanizmai.

Kai elektronai jau yra laidumo juostoje, jie gali paeiliui sugerti kelis fotonus ir įgyti energijos per laidumo juostos dugną (5 pav.) [2]. Elektronai, esantys laidumo juostoje, gali sužadinti kitą elektroną iš valentinės juostos smūginės jonizacijos būdu. Tokiu būdu yra sugeneruojami du laisvieji krūvininkai, esantys laidumo juostos apačioje [14, 17]. Kiekvienas iš jų gali sugerti energiją per fotonų sugertį ir vėl pakartoti energijos perdavimo ciklą. Šis procesas yra vadinamas griūtine jonizacija ir jis kartosis tol, kol veikia žadinanti spinduliuotė, eksponentiškai didindamas elektronų tankį laidumo juostoje.

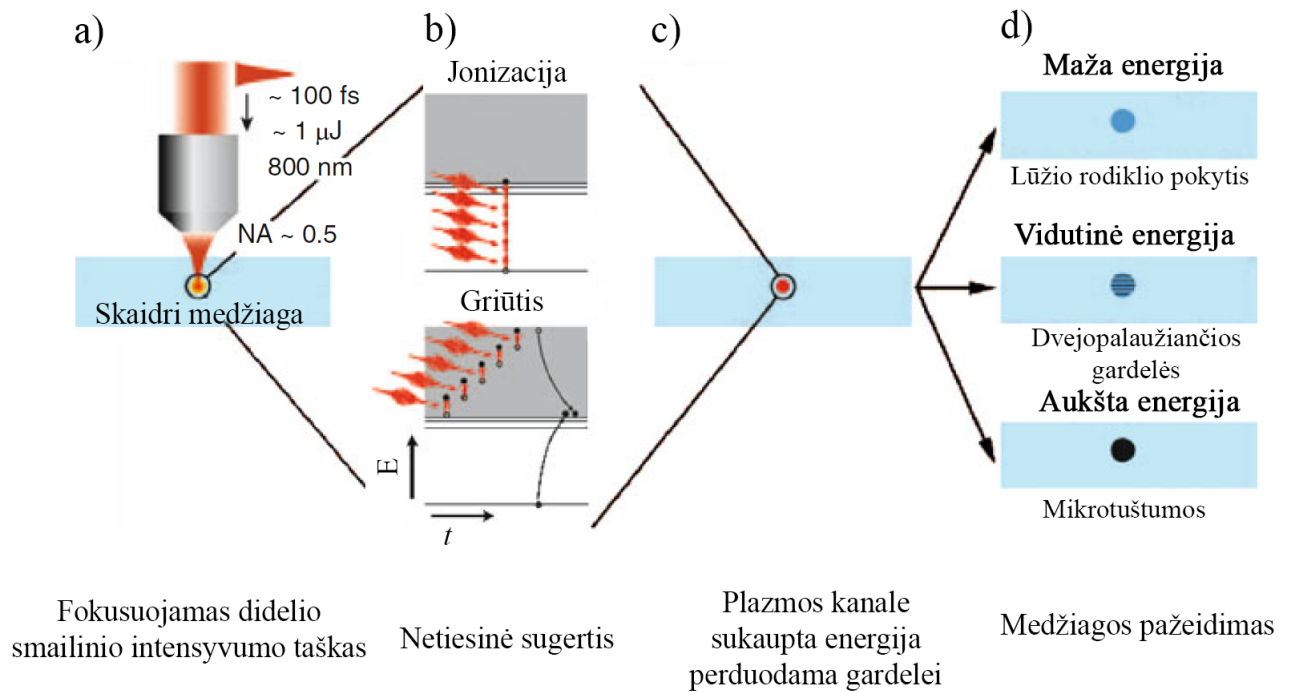


5 pav.: Griūtinės jonizacijos schematinė iliustracija [14].

1.3.2 Skaidrių medžiagų modifikavimo tipai

Daugumoje skaidrių medžiagų, naudojant femtosekundinius lazerio impulsus, paprastai galima sukelti tris skirtingus medžiagų modifikavimo tipus: 1) izotropinis lūžio rodiklio pokytis; 2) savitvarkių periodinių struktūrų (nanogardelių) susidarymas ir 3) mikrotuštumų atsiradimas (6 pav. d) [13]. Sukurtos modifikacijos tipas dažniausiai priklauso nuo lazerio parametrų (impulso trukmės, energijos, bangos ilgio ir pasikartojimo dažnio), medžiagos parametrų (draustinės juostos tarpo, šiluminio plėtimosi koeficiento ir kt.), bei fokusavimo skaitinės apertūros (NA) [18]. Viena iš populiariausių medžiagų įvairių tipų modifikacijoms tirti yra lydytas kvarcas, todėl būtent ties šia medžiaga mes ir susitelksime.

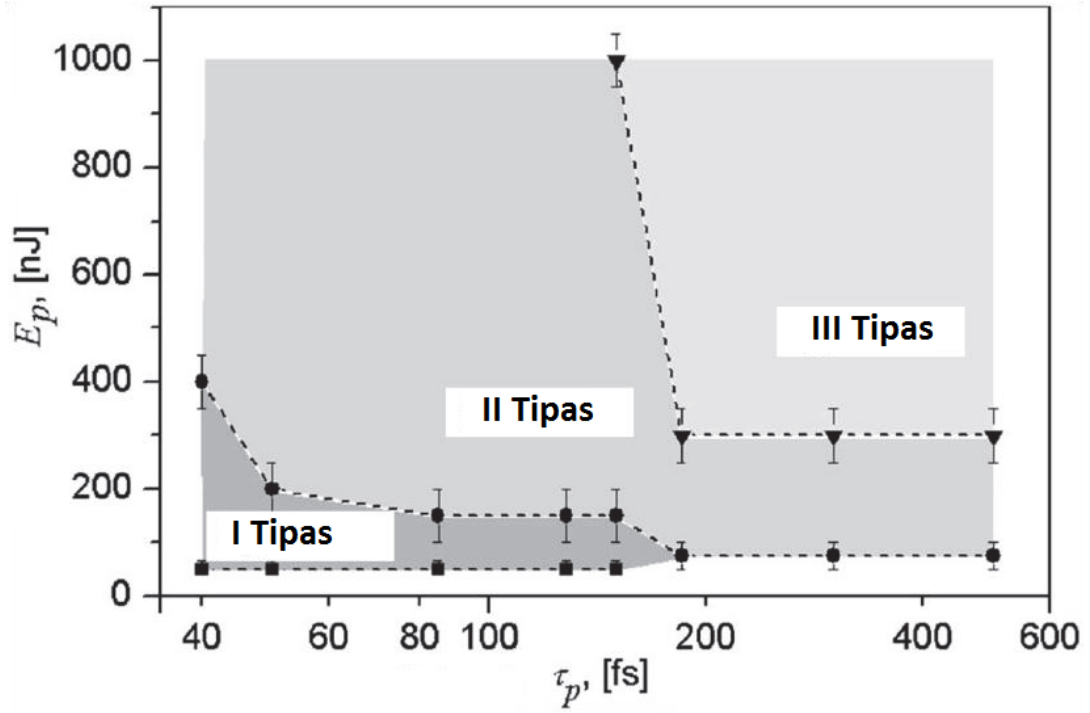
I modifikacijų tipas - kai lazeriu paveiktoje zonoje pastebimos homogeniški pokyčiai, lemiantys lūžio rodiklio padidėjimą [19] ir ėsdinimo spartos augimą [20]. Lydytame kvarce, I tipo modifikacijas gali sukelti 100 fs impulsai, turintys 40-150 nJ energijos ir sufokusuoti 0,65 NA (7 pav.) [18]. Šis teigiamas lūžio rodiklio pokytis, pastebėtas I modifikacijų tipe, gali būti panaudotas bangolaidžių fabrikavime. Eksperimentiniai duomenys rodo, kad būtent lokalizuotas medžiagos sutankėjimas yra atsakingas už šių pokyčių atsiradimą medžiagoje [21].



6 pav.: Pagrindinių, femtosekundinio lazerio sukeltų, skaidrių medžiagų modifikacijų tipų iliustracija. a) Medžiagos tūryje sufokusuojamas fs lazerio impulsas. b) Inicijuojama netiesinė sugertis ir fotojonizacija. c) Karšta elektronų-jonų plazma perduoda energiją medžiagos gardelei. d) Priklausomai nuo plazmoje esančios energijos kiekio, gali įvykti trys skirtingi struktūrinių pokyčių tipai: izotropinis lūžio rodiklio pokytis esant žemai energijai, dvejopalaūžiančių nanogardelių atsiradimas esant vidutinei energijai arba tuštumų susidarymas esant aukštai energijai [18].

Toliau didinant energiją ir impulso trukmę (100 fs, 150-500 nJ) yra suformuojami periodiniai dariniai, sudaryti iš nanogardelių [22]. Šių nanostruktūrų periodas visada apytiksliai lygus $\lambda/2n$ (λ yra bangos ilgis, o n - apdirbamos medžiagos lūžio rodiklis), o jų kryptis yra statmena jas įrašancio lazerio pluošto poliarizacijos kryptčiai [4]. II modifikacijų tipas yra ypatingas tuo, kad pasižymi įdomia optine savybe - dvejopalaūžiškumu [6], t.y. medžiagos lūžio rodiklio priklausomybe nuo šviesos sklidimo krypties [23]. Ši svarbi savybė gali būti praktiškai pritaikoma gaminant geometrinės fazės optinius elementus tinkamus pageidaujamo bangos fronto pluoštų formavimui [11] ar kuriant įvairius fotoninius prietaisus, tokius kaip poliarizacijos keitikliai [24]. Nanogardelių susiformavimas taipogi pakeičia medžiagos chemines savybes, dėl to, priklausomai nuo lazerinių parametrų, lazeriu modifikuotos stiklo srities ėsdinimo sparta gali būti šimtus kartų aukštesnė lyginant su nepaveiktu stiklu (plačiau kitame skyriuje).

Paskutinis iš skaidrių terpių modifikacijų tipų yra mikrotuštumų susidarymas. Tuštumų susidarymas skaidriose terpėse yra dažnas reiškinys, pastebimas įvairiuose kristaluose ir stikluose



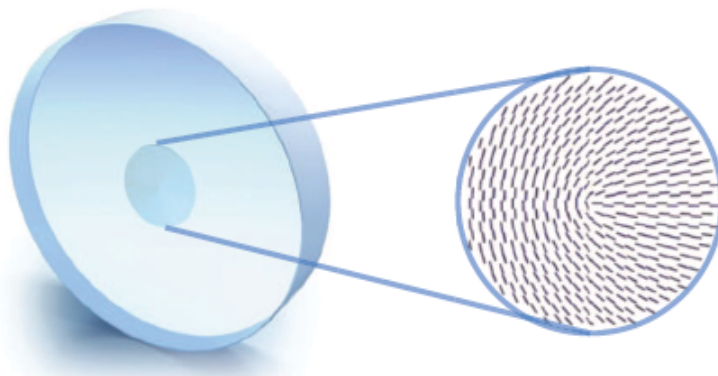
7 pav.: Lydytame kvarce, femtosekundiniu lazeriu indukuojamų, skirtingų medžiagos modifikavimo tipų formavimosi priklausomybė nuo lazerio parametrų (impulso trukmės ir energijos) [22].

pasiekus tam tikrą impulso energijos ribą (>300 nJ ir 200 fs) [2]. Medžiagą veikiant aukštos energijos impulsais, jos temperatūra pradeda staigiai kilti. Sparčią temperatūros kaitą lydi termoelastinių bangų generavimas, kurios, priklausomai nuo kaitinimo lygio ir šilumos lokalizacijos, gali arba visiškai išsisklaidyti, arba sukelti reikšmingas medžiagos deformacijas tokias kaip, mikrotuštumos [25]. Tokių mikrotuštumų susiformavimas gali būti pritaikytas selektyvaus lazerinio ėsdinimo procese [26], stiklų skaldyme, tikslingai išdėstant formuojamus įtrūkius medžiagoje [27] arba informacijos saugojime medžiagos tūryje [18].

1.4 S-bangos plokštelė

S-bangos plokštelė - bangos plokštelė, galinti krentančią tiesinę poliarizaciją paversti radialine arba azimutine [28]. Iš esmės, šis optinis elementas prilygsta $\lambda/2$ fazinei plokštelei, tik jos optinės ašies orientacija priklauso nuo azimutinio kampo kaip $\theta = n\phi/2$, kur ϕ - azimutinis kampas, o n - sveikas skaičius nusakantis eilę. S-bangos plokštelės gaminamos femtosekundiniais impulsais tūryje formuojant nanogardeles lydyto kvarco padėkliukuose [11], kurios pasižymi dvejopalauiškumu ir priklausomai nuo įrašytos struktūros aukščio bei krentančios bangos ilgio, jos indukuoja fazinį vėlinimą (delsą). Nanogardelių orientacijos S-bangos plokštelės atveju

pavaizduotos 8 pav.



8 pav.: $n = 1$ S-bangos plokštelė ir schematinis nanogardelių išdėstymo vaizdavimas joje [29].

Tokio tipo banginė plokštelė, veikianti kaip poliarizacijos keitiklis, priklausomai nuo nanogardelių indukuojamos delsos, gali formuoti tiek radialinės tiek ir azimutinės poliarizacijos pluoštus, bei jų superpozicijas, priklausomai nuo i plokštelę krentančios tiesinės poliarizacijos orientacijos ir plokštelės parametro n . Be to, S-bangos plokštelės pagalba galima formuoti šviesos sūkurius - sūkurine fazę turinčius pluoštus, kai plokštelė apšviečiama apskritimiškai poliarizuota šviesa [28].

Šiuos poliarizacijos keitikius galima nesudėtingai aprašyti naudojant Jones matricų formalizmą [11]. Pagrindinė šio modelio idėja yra atvaizduoti poliarizacijos būseną ir anizotropinio prietaiso poveikį jai naudojant Jones vektorių $\vec{E}_{\text{prieš}}$ ir 2×2 elementų turinčią matricą S . Tada pluošto poliarizacijos būseną už S-bangos plokštelės ($\vec{E}_{\text{už}}$) gali būti parašyta taip [29]:

$$\vec{E}_{\text{už}} = S \vec{E}_{\text{prieš}}, \quad (4)$$

čia S - S-bangos plokštelę aprašanti, 2×2 matrica [29]:

$$S = \begin{bmatrix} \cos(n\phi) & \sin(n\phi) \\ \sin(n\phi) & -\cos(n\phi) \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Tuo tarpu vertikalios, horizontalios, bei apskritiminės poliarizacijos Jones matricas atitinkamai galima išreikšti taip [29]:

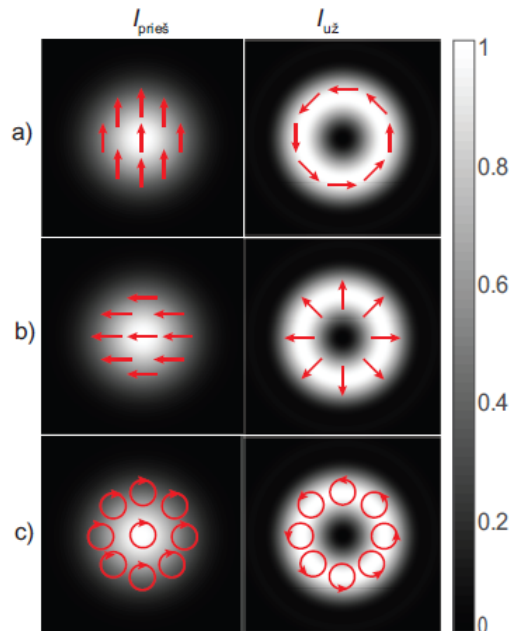
$$\vec{E}_v = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \vec{E}_h = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad \vec{E}_{\text{apskr}} = \begin{bmatrix} 1 \\ \pm i \end{bmatrix}. \quad (6)$$

čia i yra menamas vienetas, kurio ženklas nusako apskritiminės poliarizacijos kryptį ($+i$ kairinė ir $-i$ dešininė). Pirmos eilės S-bangos plokštelės atveju ($n = 1$), kai į elementą krenta horizon-

talios (\vec{E}_h) ir vertikalios (\vec{E}_v) poliarizacijos pluoštas, gauname, jog S-bangos plokštelė pakeičia poliarizaciją į azimutinę \vec{E}_{azim} ir radialinę \vec{E}_{rad} atitinkamai [29]:

$$\vec{E}_{azim} = \begin{bmatrix} \cos(\phi) \\ \sin(\phi) \end{bmatrix}, \quad \vec{E}_{rad} = \begin{bmatrix} \sin(\phi) \\ -\cos(\phi) \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Kitais atvejais gaunamas kompliksiškesnis poliarizacinis laukas, kuriame poliarizacijos vektorius apsisuka n kartų 360° kampu, priklausomai nuo azimutinio kampo. Gausinio pluošto poliarizacijos bei skersinio intensyvumo skirstinio transformacija, naudojant $n = 1$ S-bangos plokštelę, yra grafiškai pavaizduota 9 pav. Matome, kad S-bangos plokštelė pakeičia ne tik pluošto poliarizacinį lauką, bet ir intensyvumo skirstinį - Gauso skirstinys įgauna žiedo formos intensyvumą.



9 pav.: Gausinio pluošto intensyvumo skirstinio ir poliarizacijos transformacija, naudojant $n = 1$ S-bangos plokštelę, kai kritusio pluošto poliarizacija yra: vertikali (a), horizontali (b) ir apskritiminė (c). Rodyklės indikuoja poliarizacijos vektoriaus kryptį, o ilgis nusako fazę [29].

Taigi, S-bangos plokštelė yra vienas iš būdų, galinčių nesunkiai keisti krentančios lazerinės spinduliuotės poliarizaciją ir intensyvumo skirstinį. Tai leidžia suformuoti netradicinio - žiedo formos lazerinių pluoštų intensyvumo skirstinius, pasižyminčius radialine, azimutine, apskritimine poliarizacija, bei pritaikyti juos medžiagų mikroapdirbimui, nes plokštelė pasižymi aukštu pramūšimo slenksčiu.

1.5 Selektyvus lazerinis ęsdinimas

Poliarizacijai jautrios sub-paviršinęs nanogardelęs, įrašytos femtosekundiniais impulsais lydytame kvarce pritraukia vis daugiau dėmesio dėl jų indukuojamo selektyvaus lazerinio ęsdinimo. Selektyvus lazerinis ęsdinimas (SLE) yra dviejų etapų gamybos technologija, leidžiantis formuoti sudėtingus 3D komponentus iš stiklo arba safyro [2]. Pirmajame žingsnyje, ultratrumpas lazerinis pluoštas yra sufokusuojamas į skaidrios medžiagos paviršių / tūrį ir dėl netiesinės sugerties, medžiaga sugeria spinduliuotę tik fokuso taške. Procesas modifikuoja skaidrią terpeę jos nepažeisdamas, tik modifikuojant jos chemines savybes. Tokiu būdu medžiagą galima selektyviai chemiškai ęsdinti [13].

Aukštesnė lazeriu modifikuotų sričių ęsdinimo sparta lyginant su neeksponuota medžiagos dalimi yra pasiekama naudojant praskiestą HF rūgštį [22] arba KOH šarmo tirpalą [30]. Padidęjęs lydyto kvarco ęsdinimo greitis po sąveikos su femtosekundiniais lazerio impulsais atsiranda dėl kelių mechanizmų [31]. Pirmasis yra susijęs su silicio dioksido tankinimu, kuris sumažina Si–O–Si ryšio kampą dėl atsiradusio hidrostatinio slėgio arba įtempių, susiformuojančių lazeriu eksponuotoje srityje [32]. Taigi deguonies atomų reaktyvumas padidėja dėl deformuotos valentinės juostos [33], o tai padidina lazeriu modifikuotų zonų ęsdinimo spartą. Šis paaiškinimas ypač tinka mažo intensyvumo modifikavimo režimui (I tipas), kai stebimas bangolaidžių susidarymas. Antrasis mechanizmas yra tinkamas II tipo modifikacijoms ir lemia daug didesnį apšvitintų sričių ęsdinimo selektyvumą, kai susidaro periodinės nanogardelinės struktūros, statmenos lazerio poliarizacijos kryptčiai [22]. Cheminis procesas, atsakingas už lydyto kvarco ęsdinimą HF rūgštyje, apibūdinamas tokia chemine reakcija [13]:



F⁻ jonai atakuoja silicio atomus, o H⁺ jonai atakuoja deguonies atomus. KOH šarme hidroksido jonas OH⁻ veikia $\equiv Si - O - Si \equiv$ grupes ir yra atskiriamos:



Taigi, pagrindiniai selektyvaus lazerinio ęsdinimo ypatumai yra [13]:

1. Šiam procesui yra reikalingi keletas femtosekundinių impulsų, pataikančių į tą patį tašką, norint indukuoti kumuliatyvų efektą. Todėl šis procesas reikalauja tinkamos lazerio spinduliuotės intensyvumo ir lazerio skenavimo greičio (impulsų tankio / persiklojimo) kombinacijos proceso metu.

2. Norint tinkamai indukuoti "įrašymo" procesą, reikia suderinti lazerio poliarizacijos kryptį skenavimo krypties atžvilgiu [22], t.y. tiesinė poliarizacija turi būti orientuota statmenai modifikacijų formavimo kryptčiai. Šiuo atveju nanogardelės yra nukreiptos išilgai kanalo ašies ir tai pagerina ėsdinimo tirpalo difuziją ir jis gali laisvai prasiskverbti į ėsdinamą medžiagą. Tuo tarpu, tiesinei poliarizacijai, orientuotai lygiagrečiai transliacijos kryptčiai, ėsdinimo difuzija blokuojama - nanogardelės yra statmenos transliacijos kryptčiai ir nesiformuoja vienalytis difuzijos kanalas.

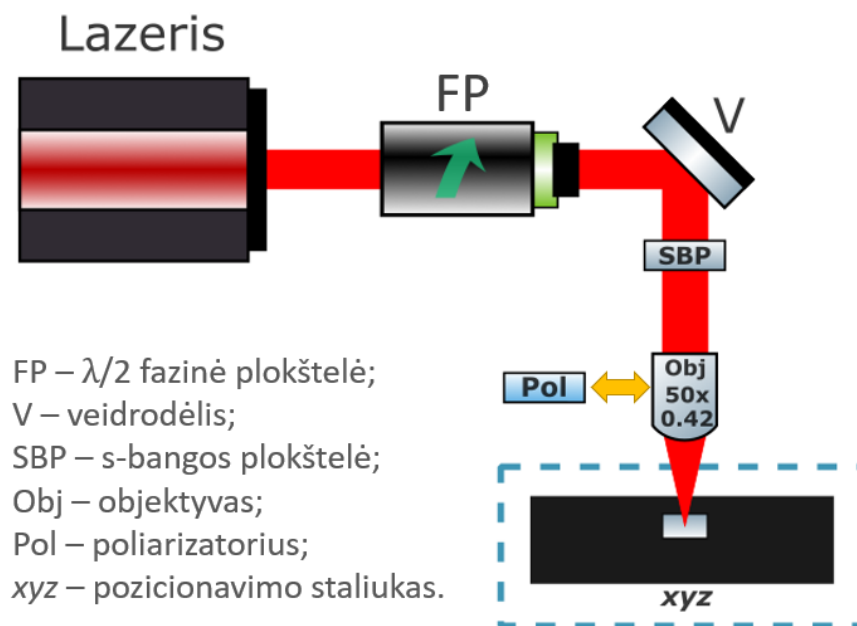
III tipo modifikacijos taipogi gali indukuoti selektyvų lazerinį ėsdinimą ir jų mechanizmas yra panašus į II tipo: šiuo atveju lazeriu paveikta zona (angl. LAZ - laser affected zone) yra sudaryta ne iš nanogardelių, o iš nanotuštumų rinkinio, kuris suformuoja papildomą difuzijos kanalą, leidžiantį ėsdinimo tirpalui laisvai tekėti modifikuotoje zonoje, ko pasekoje išauga medžiagos ėsdinimo sparta [26].

Taigi, remiantis aukščiau pateiktais paaiškinimais, selektyvų lazerinį ėsdinimą galima suprasti taip: nanogardelės ir/arba mikroskilimai veikia kaip kanalai ėsdinimo difuzijai lydytame kvarce. Mikrokanalai, suformuoti taikant II ir III tipo modifikacijas, sąlygoja žymiai didesnį pločio / gylio santykį (angl. aspect ratio) palyginus su cheminiu ėsdinimu taikant I tipo modifikacijas dėl greitos ėsdinimo tirpalo difuzijos visame modifikuotame regione, o ne palaipsniui pašalinant modifikuotą medžiagą, kas ir vyksta naudojant I tipo modifikacijas [13].

2 Tyrimo metodai

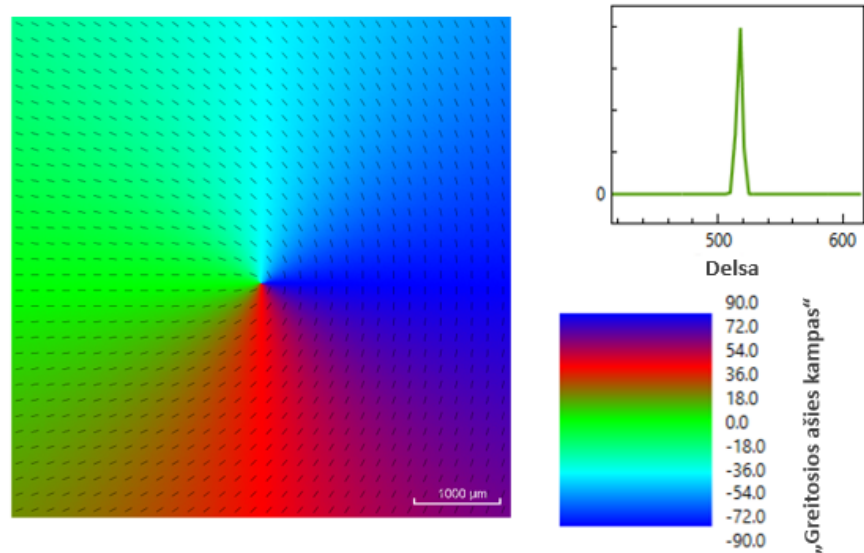
2.1 Optinė schema

Pažeidimų formavimo optinė schema yra pavaizduota 10 pav. Eksperimentui buvo naudojamas femtosekundinis 10 W kieto kūno "PHAROS" lazeris, kurio bangos ilgis yra 1030 nm. Lazerio pluoštas yra nukreipiamas ant $\lambda/2$ fazinės plokštelės, įmontuotos ant rotacinės sukimosi ašies, kurios pagalba galima manipuluoti lazerinio pluošto tiesinės poliarizacijos kryptimi. Pluoštas, praėjęs fazinę plokštelę (FP), veidrodėliu (V) nukreipiamas į s-bangos plokštelę (SBP) ir 0,42 NA 50x objektyvu pluoštas sufokusuojamas į lydyto kvarco bandinį, patalpintą ant trijų ašių (x, y, z) transliavimo staliuko, kurio pagalba modifikacijos gali būti formuojamos tiek bandinio paviršiuje, tiek tūryje. Sufokusuoto pluošto skersiniai (sąsmauka) ir išilginiai (Reilėjaus ilgis) matmenys ore buvo: $2w_0 = 2,24 \mu\text{m}$ ($1/e^2$ aukštyje) ir $Z_r = 15,3 \mu\text{m}$ ($22,19 \mu\text{m}$ lydyto kvarco bandinio tūryje).



10 pav.: Eksperimento principinė optinė schema.

Eksperimentuose buvo naudojama Workshop of Photonics pagaminta s-bangos plokštelė (11 pav.), pasižyminti itin aukštu pramušimo slenksčiu ($63,4 \text{ J/cm}^2 @1064 \text{ nm}$, 10 ns ir $2,2 \text{ J/cm}^2 @1030 \text{ nm}$, 212 fs), bei pralaidumu (94%, @1030 nm) [34].

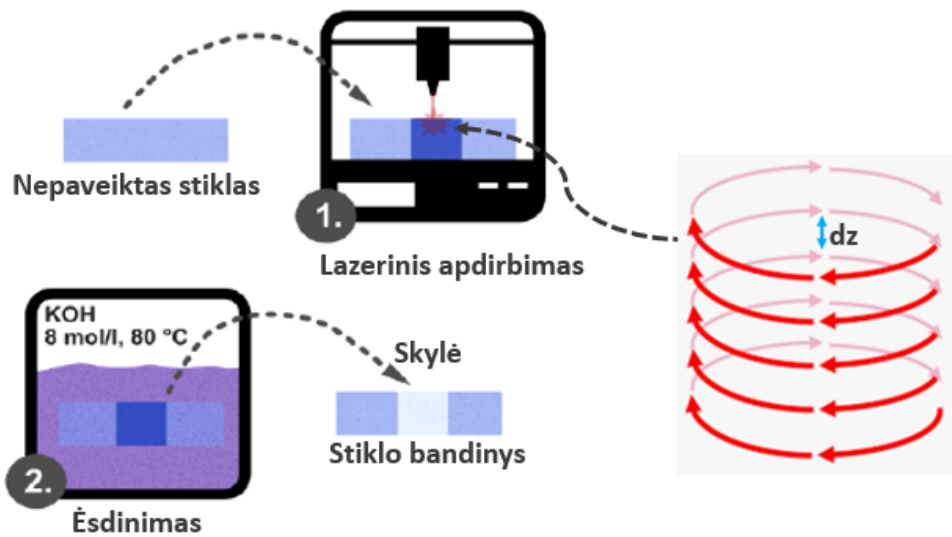


11 pav.: Išmatuotas S-bangos plokštelės greitosios ašies skirstinys (kairėje) ir indukuotos delsos dispersija (dešinėje).

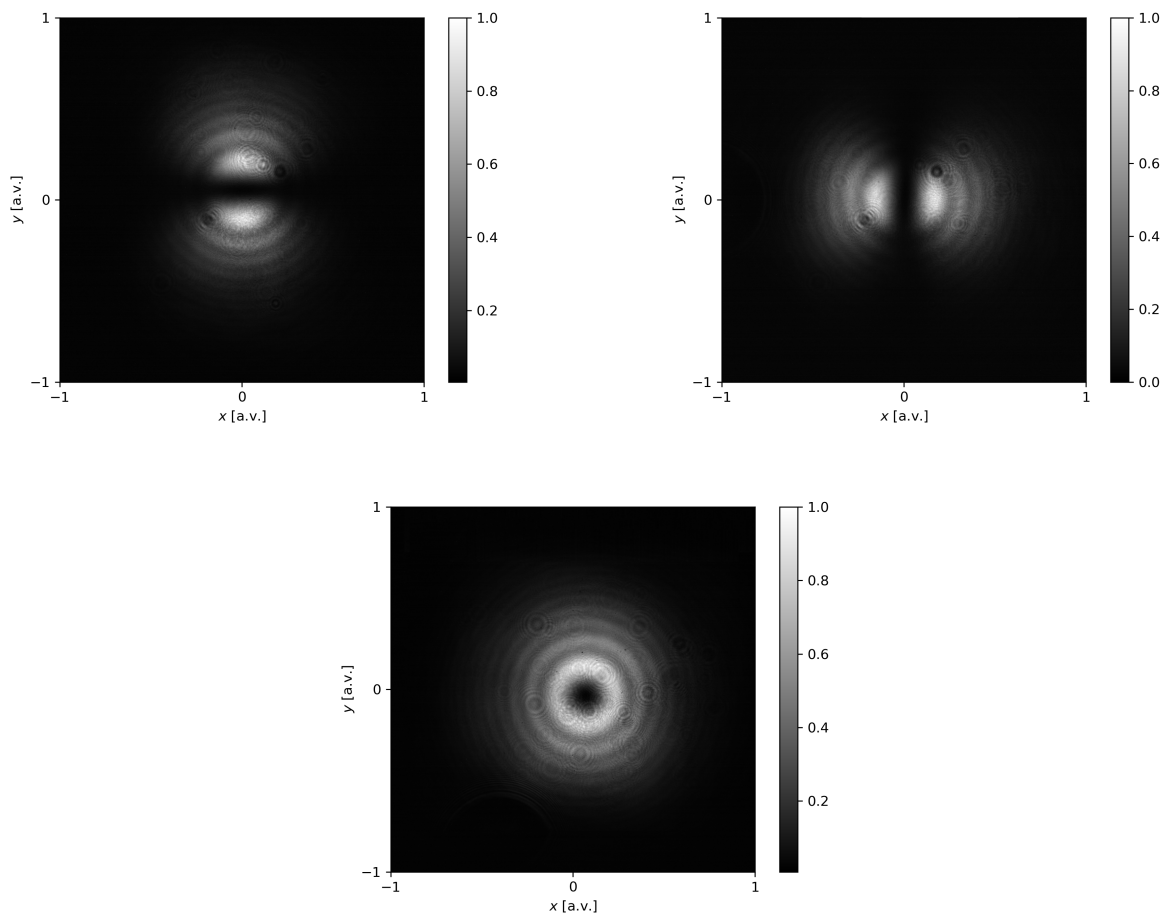
2.2 Metodika

Selektyvaus lazerinio ėsdinimo procese skirtingi lazerinio proceso parametrai turi gan didelę įtaką tolimesnio cheminio ėsdinimo rezultatui, t.y. ėsdinimo spartai ar selektyvumui. Todėl skirtingų lazerio parametrų įtaka gali būti įvertinta tik netiesiogiai, remiantis cheminio ėsdinimo rezultatais.

Siekiant ištirti kokią įtaką ėsdinimo spartai turi lazerinio impulso parametrai, buvo pasitelktos įvairios parametrų matricos, keičiant impulso energiją (E_p), trukmę (τ), poliarizacijos tipą (azimutinė ir radialinė), bei lazerio skenavimo greitį (v), ko pasekoje keitėsi impulsų tankis. Eksperimente buvo naudojamas 1.05 mm storio, lydyto kvarco bandinys ir skenuojant bandinį lazerio pluoštu helikoidine trajektorija (12 pav.) per visą jo storį yra sudaromas cilindrinis kanalas, kurį išėsdinus suformuojama kiaura, 0,125 mm diametro, skylutė. Tyrimo metu yra naudojami skirtingų tipų poliarizacijos pluoštai, todėl po s-bangos plokštelės buvo papildomai įdėtas poliarizatorius (sukeistas su fokusuojančiu objektyvu), kurio pagalba patikrinta kokios poliarizacijos pluoštas yra suformuojamas, t.y. radialinės ar azimutinės. Jeigu susiformavusių lazerinio pluošto intensyvumo smailių kryptimi sutampa su poliarizatoriaus pralaidumo kryptis, tai reiškia, jog pluoštas yra radialinės poliarizacijos - priešingu atveju yra gaunamas azimutiškai poliarizuotas lazerinis pluoštas, o išėmus poliarizatorių yra gaunamas žiedo formos intensyvumo skirstinys (13 pav. apačia). Taigi, tokiu būdu buvo suformuotos modifikacijų matricos, naudojant skirtingus lazerinius parametrus.

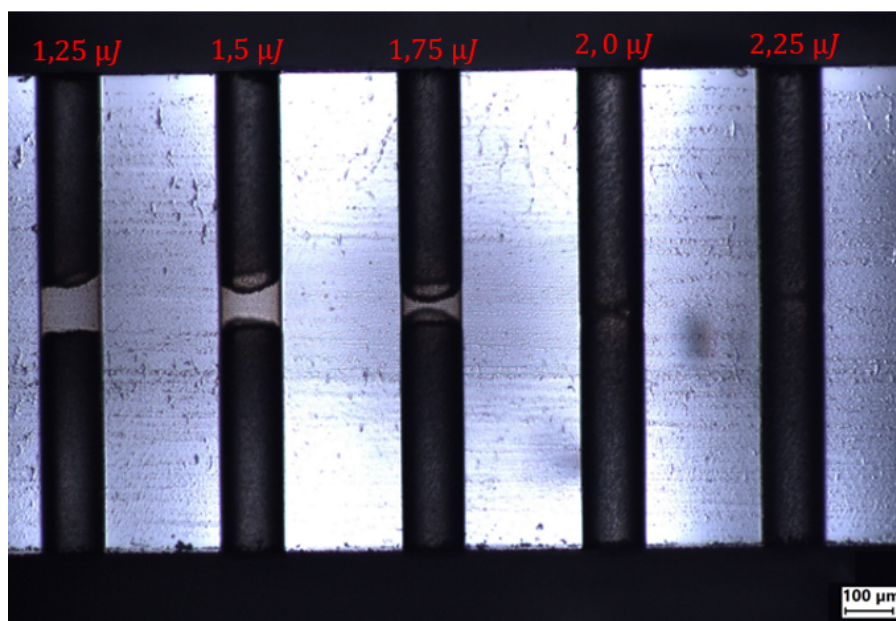


12 pav.: Selektivaus lazerinio ėsdinimo proceso iliustracija (kairėje) [26] ir mikropažaidų įrašymo trajektorija (dešinėje).



13 pav.: Eksperimentiškai išmatuotas dvimatis azimutinės poliarizacijos, žiedo formos intensyvumo skirstinys nesant poliarizatoriaus (apačioje), bei jo atskiros statmenos komponentės išskirtos poliarizatoriumi (viršuje).

Po lazerinio apdirbimo proceso buvo atliekamas suformuotų pažeidimų cheminis ėsdinimas. Ėsdinimo spartos įvertinimui lydyto kvarco bandinys 20 min laikytas 80 °C, 8 M koncentracijos kalio šarmo tirpale (KOH). Toliau stiklo bandinys buvo nupjautas šalia suformuoto kanalo, jo skerspjūvis nupoliruojamas ir optinio mikroskopo "Olympus BX 51" pagalba, matuojant selektyviai išėsdinto kanalo gylį (14 pav.), buvo įvertinta ėsdino sparta. Lazerinio impulso parametrų vertės buvo parinktos remiantis literatūros šaltiniuose demonstruojamais rezultatais ir norint tiksliau įvertinti matuojamas priklausomybes, bei matavimo paklaidas, buvo pagaminti trys vienodi bandiniai ir išmatuotos vertės suvidurkinamos.



14 pav.: Selektviai ėsdintų kanalų pavyzdys (kvarcinės plokštelės skerspjūvis po papildomo poliravimo deimantiniu popieriumi). Tamsi sritis indikuoja išėsdinto kanalo gylį.

3 Tyrimo rezultatai

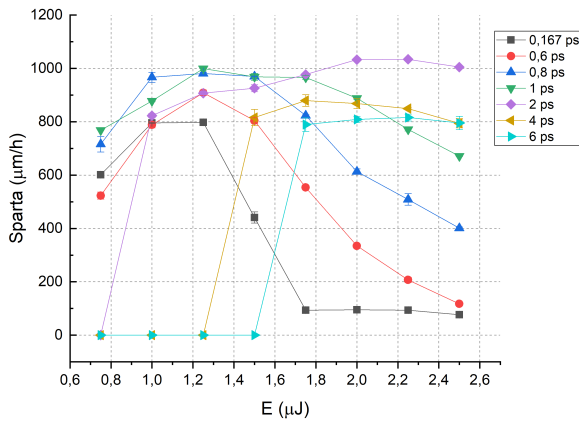
3.1 Ėsdinimo spartos matavimai

Pasinaudojant anksčiau aprašyta metodika, išmatuota selektyvaus lazerinio ėsdinimo spartos priklausomybė nuo įvairių lazerinio impulso parametrų (17 - 19 pav.). Išnagrinėjus ėsdinimo spartos priklausomybes nuo spinduliuotės energijos, modifikacijų formavimui naudojant radialinę poliarizaciją, pastebimi du esminiai ėsdinimo spartos kitimo atvejai: I atvejis apima visas impulso trukmes iki 1 ps (imtinai), o II atvejis - $\tau > 1\text{ ps}$. Pirmuoju atveju matome, jog didėjant impulso energijai, ėsdinimo sparta išauga iki tam tikros maksimalios vertės, po kurios toliau pradeda mažėti (maksimumų padėtys skiriasi kiekvienai impulso trukmei). Tuo tarpu, modifikacijų formavimui naudojant ilgesnius impulsus, nėra įžvelgiama staigių ėsdinimo spartos pokyčių - ji išlaiko panašias vertes per visą impulso energijos kitimo intervalą. Tai galima būtų paaiškinti tuo, kad ilgėjant impulso trukmei ir augant energijai, stipriau pasireiškia terminiai efektai, indukuojantys įtempius, todėl nanogardelės tolygiau persikloja z ašies kryptimi, dėl ko išauga ėsdinimo sparta. Taipogi, negalima atmesti fakto, jog ilgėjant impulsams pasikeičia lydytame kvarce indukuojamų modifikacijų tipas (7 pav.) ir jame, prie jau esamų nanogardelių, pradeda papildomai formuotis mikrotuštumos, bei mikroskilimai (III tipo modifikacijos), todėl galima spėti, kad būtent nanogardelių, mikrotuštumų, bei skilimų kombinacija yra atsakinga už difuzijos kanalo formavimą šiame lazerinio apdirbimo režime. Taip pat pastebėta, jog ilgėjant impulso trukmei, atsiranda vis daugiau nulinių¹ verčių. Tai galima paaiškinti tuo, kad ilgėjant impulsams, smailinė impulso galia nėra pakankama sukurti vienalyčiai tūrinei modifikacijai.

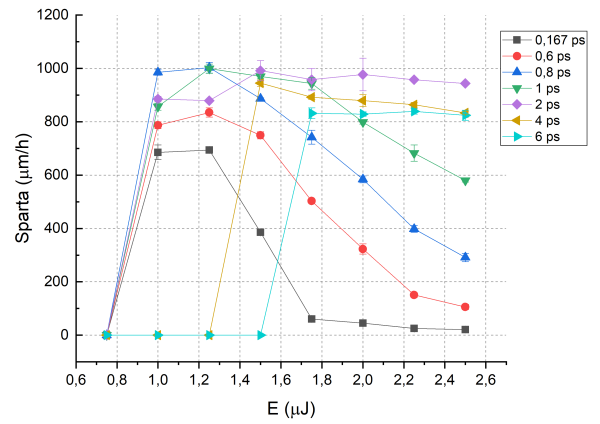
Toliau eksperimentas buvo atkartotas modifikacijų įrašymui panaudojant azimutiškai poliarizuotą pluoštą. Išmatavus selektyvaus lazerinio ėsdinimo spartos priklausomybes nuo energijos (16 pav.), pastebimi akivaizdūs skirtumai lyginant su rezultatais gautais radialinės poliarizacijos atveju. Visų pirma, stebimas aštresnis kontrastas tarp I ir II režimo ėsdinimo rezultatų: naudojant ilgesnius impulsus yra pasiekiamos iki 3 kartų aukštesnės ėsdinimo spartų vertės lyginant su mažesnės trukmės impulsais. Be to, yra stebėtina tai, jog naudojant mažesnius įrašymo greičius ($v = 4 - 5\text{ mm/s}$), I režime nėra pastebima stipri ėsdinimo spartos priklausomybė nuo energijos, o mažinant impulsų tankį ($v = 6 - 8\text{ mm/s}$) priklausomybės supanašėja į ėsdinimo spartos kreives stebėtas naudojant radialiai poliarizuotą pluoštą, nors ėsdinimo spartos mažėjimas nėra taip stipriai išreikštas. Ilgesnių impulsų atveju nėra įžvelgiama stiprių pokyčių ir priklausomybės yra analogiškos gautoms radialinės poliarizacijos atveju.

¹Grafikuose "nuliais" yra atvaizduoti atvejai, kai impulso energijos nepakako suformuoti modifikacijos stikle arba ėsdinimo sparta buvo nykstamai maža.

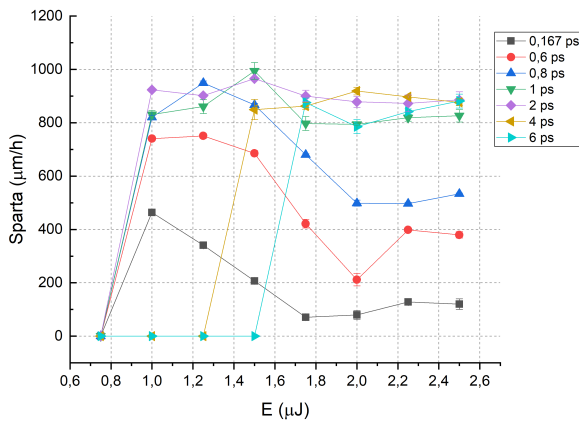
$v = 4 \text{ mm/s}$



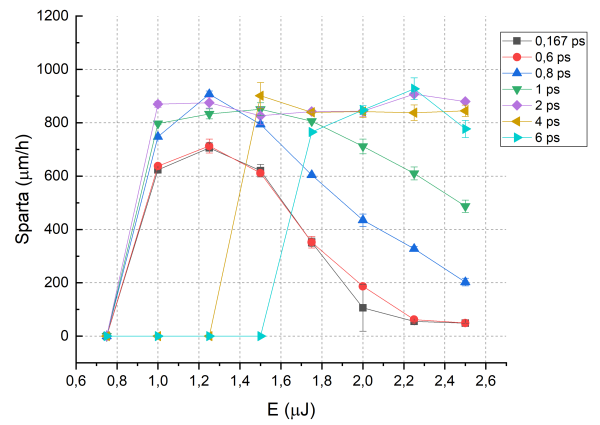
$v = 5 \text{ mm/s}$



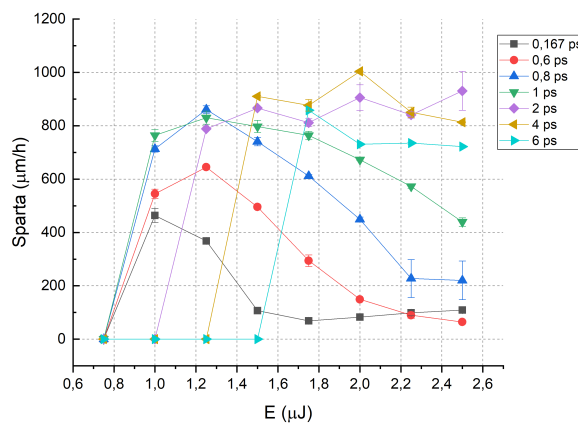
$v = 6 \text{ mm/s}$



$v = 7 \text{ mm/s}$

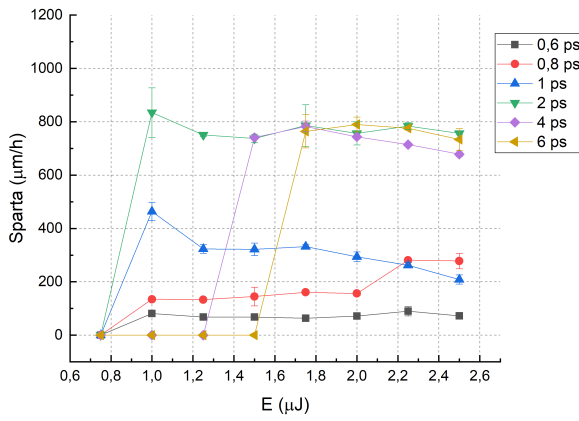


$v = 8 \text{ mm/s}$

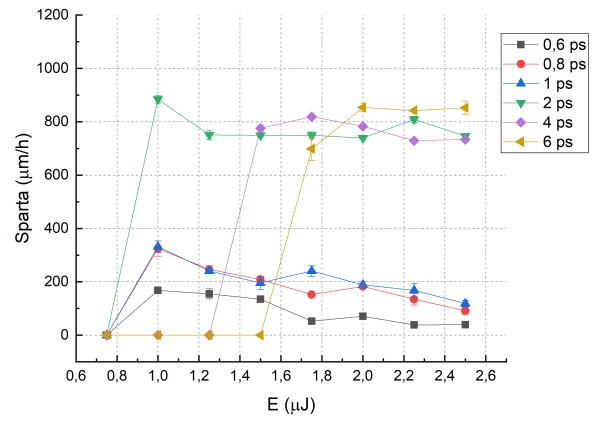


15 pav.: Kvarcinio stiklo ėsdinimo spartos priklausomybė nuo impulso energijos, naudojant azimutinės poliarizacijos pluoštą, kai lazerio skenavimo greitis $v = 4; 5; 6; 7; 8 \text{ mm/s}$.

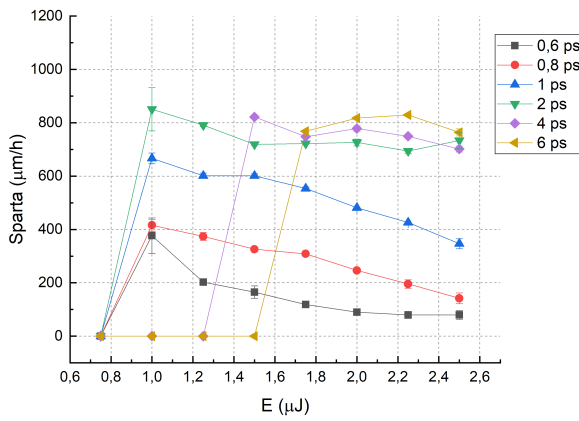
$v = 4 \text{ mm/s}$



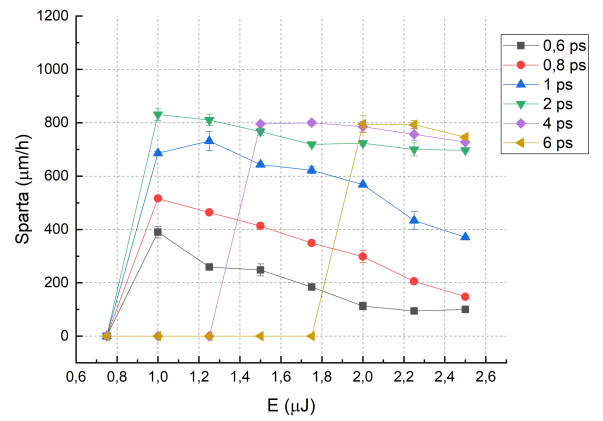
$v = 5 \text{ mm/s}$



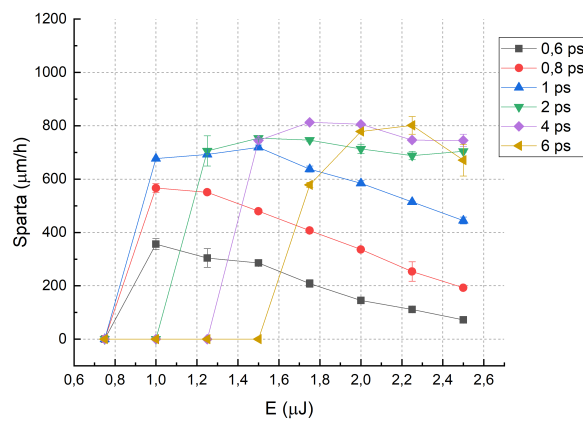
$v = 6 \text{ mm/s}$



$v = 7 \text{ mm/s}$



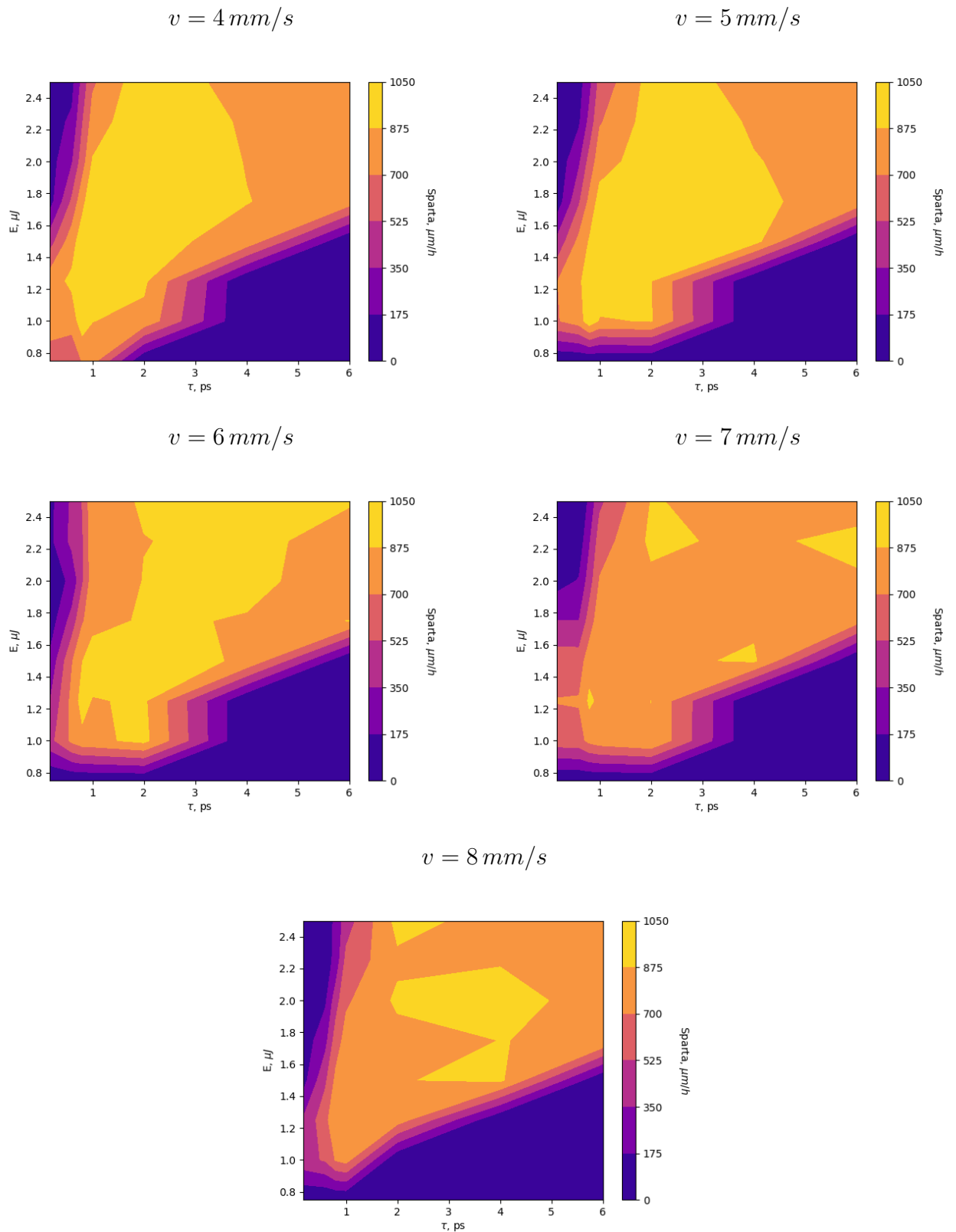
$v = 8 \text{ mm/s}$



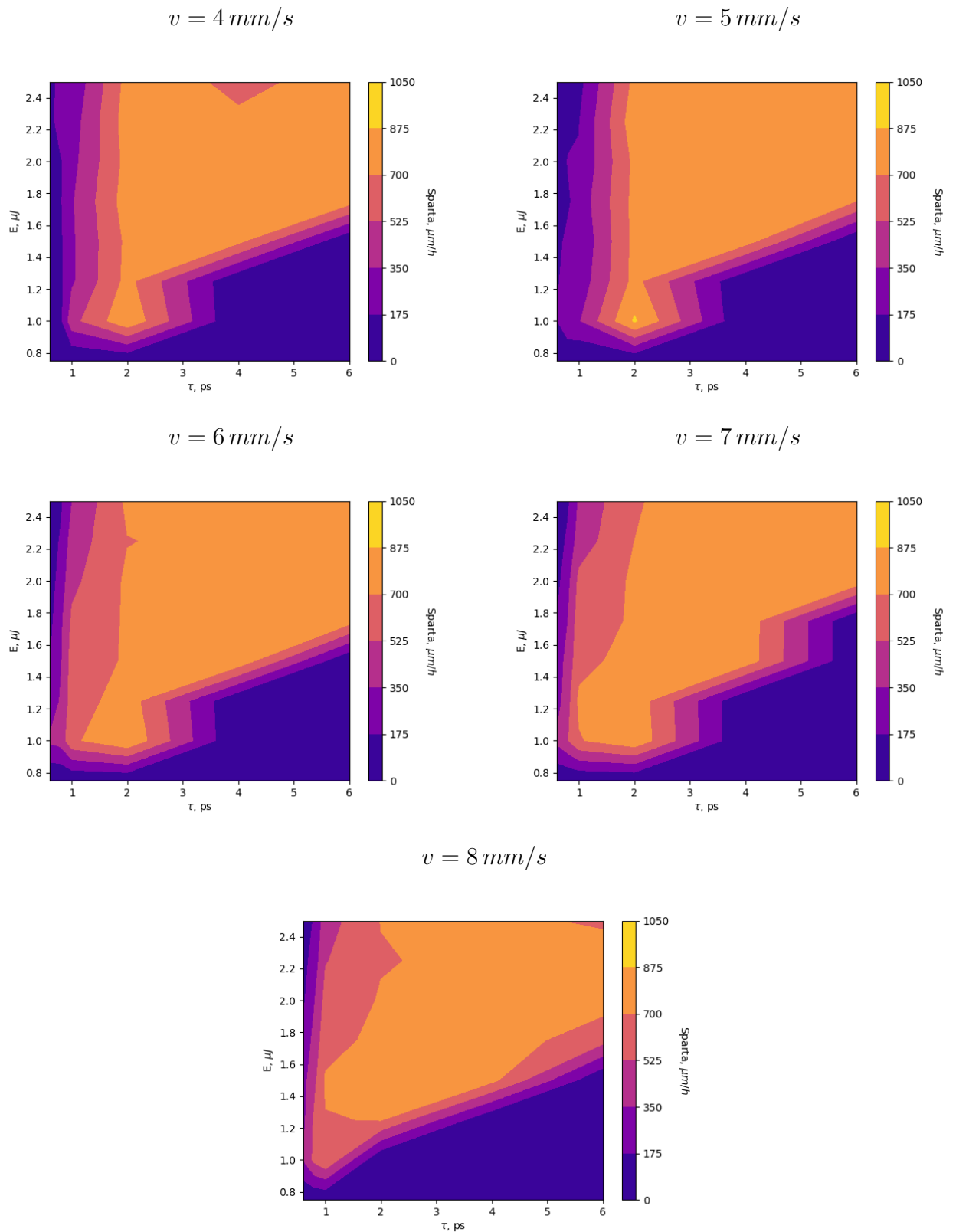
16 pav.: Kvarcinio stiklo ėsdinimo spartos priklausomybė nuo impulso energijos, naudojant azimutinės poliarizacijos pluoštą, kai lazerio skenavimo greitis $v = 4; 5; 6; 7; 8 \text{ mm/s}$.

Atvaizdavę tas pačias priklausomybes dvimačių spalvinių žemėlapių pavidalu (15 - 18 pav.), akivaizdžiai galime matyti kuriame lazerinių parametru ruože yra pasiekiamos aukščiausios ęsdinimo spartos. Radialinės poliarizacijos atveju, naudojant mažus įrašymo greičius, optimaliausi apdirbimo parametrai yra išsidėstę tarp $\tau = 1 - 3 ps$ trukmių, praktiškai visoms ištirtoms impulso energijų vertėms, o didėjant įrašymo greičiui, optimali parametru sritis pradeda judėti link ilgesnių impulsų ($\tau = 2 - 4 ps$), tačiau atitinkamai siaurėja galimų impulso energijų diapazonas ir pasiekus didžiausius greičius ($v = 7 - 8 mm/s$) lieka tik pavienės, optimalių parametru, sritys. Tuo tarpu, naudojant azimutinės poliarizacijos pluoštą atsiranda tik viena zona ($v = 5 mm/s$, $\tau = 2 ps$, $E = 1 \mu J$), kurioje ęsdinimo sparta pasiekia panašų maksimumą kaip ir radialinės poliarizacijos atveju ir bendru atveju, optimali lazerinių parametru visuma yra išsidėsčiusi už: $\tau > 1 ps$ ir $E > 1,5 \mu J$ ir didėjant įrašymo greičiui siaurėja tik optimalių impulso energijų diapazonas.

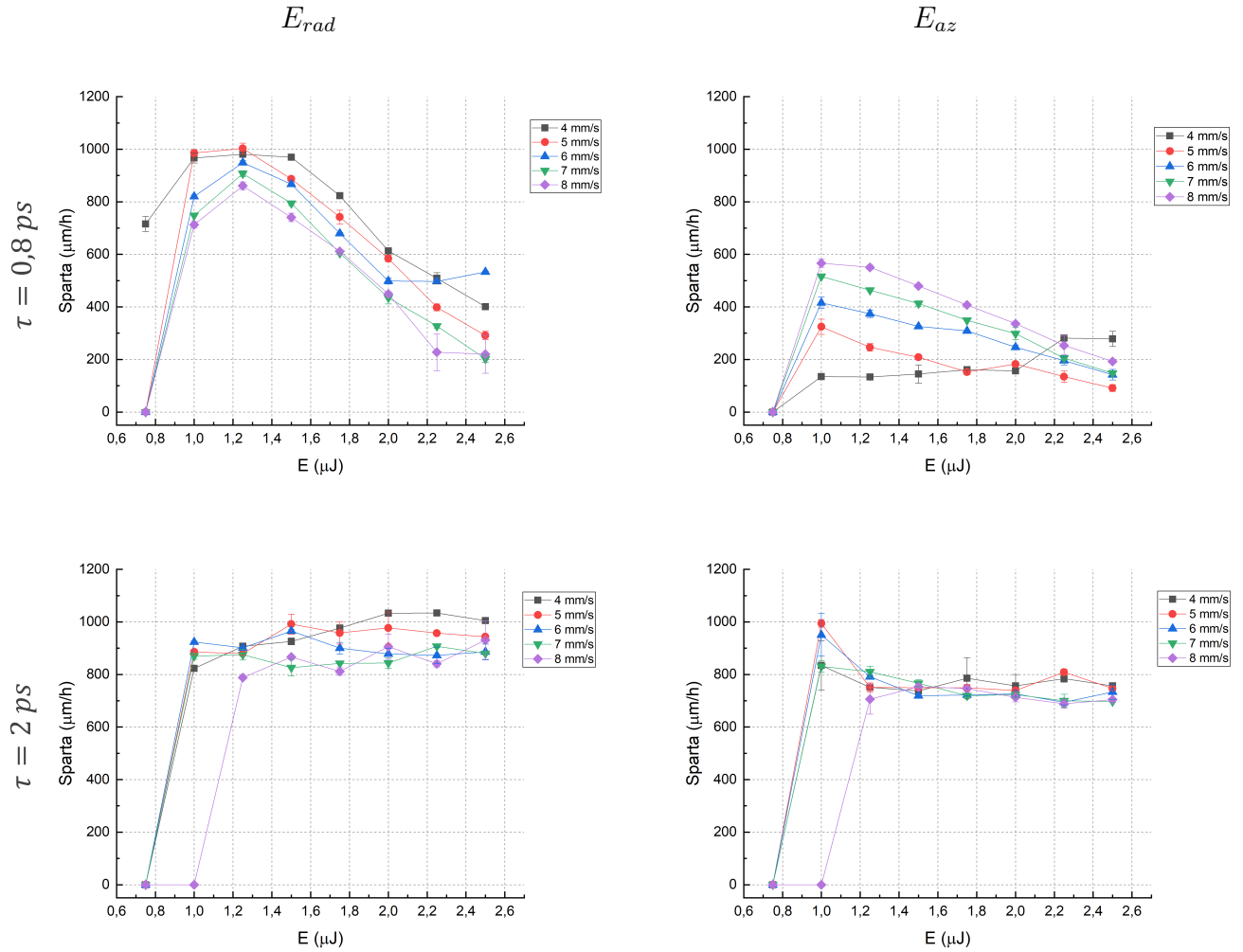
Kadangi buvo pastebėti du esminiai ęsdinimo spartos kitimo atvejai, todėl toliau impulso trukmė buvo fiksuota ties $\tau = 0,8$ ir $2 ps$, bei atvaizduota ęsdinimo spartos priklausomybė nuo impulso energijos modifikacijų formavimui naudojant skirtingus lazerio skenavimo greičius. 19 pav. atvaizduotose kreivėse galima įžvelgti dvi, gan akivaizdžias, tendencijas: prie mažesnių impulso trukmių dominuoja atvirkštinis proporcingumas tarp ęsdinimo spartos ir impulso energijos, o naudojant $2 ps$ trukmės impulsus stebimas tik minimalus ęsdinimo spartos augimas, todėl galima teigti, jog II režimas pasižymi platesniu lazerinio apdirbimo parametru diapazonu ir bendrai yra stabilesnis. Taip pat pastebėta, jog keičiant įrašymo greitį, beveik visais atvejais (išskyrus azimutinę poliarizaciją prie $0,8 ps$ trukmės) ęsdinimo spartos vertės ties atitinkamais lazerinio impulso parametrais skiriasi tik nežymiai ir priklausomybė nuo energijos išlieka daug maž vienoda. I režimo ęsdinimo spartos kritimą augant energijai galima paaiškinti tuo, kad dėl aukštesnės impulso energijos vis daugiau šilumos susikaupia lazerio poveikio zonoje ir įvyksta stiklo perlydimas, dėl to jame pradeda formotis mikroburbulai ir tuo pačiu yra suardoma nanogardelių struktūra, todėl ęsdinimo tirpalo difuzija yra sutrikdoma ir atitinkamai sumažėja ęsdinimo sparta. Taigi, matome, kad abiejų poliarizacijos atveju, selektyvaus lazerinio ęsdinimo spartai daugiausiai įtakos turi impulso trukmė ir energija (I režimo atveju). Taipogi, iš gautų priklausomybių, akivaizdžiai matome, jog abiejuose režimuose radialiai poliarizutoas pluoštas yra pranašesnis už azimutiškai poliarizuotą, nes juo pagalba galima pasiekti aukštesnes ęsdinimo spartos vertes platesniame lazerinio apdirbimo parametru ruože.



17 pav.: Kvarcinio stiklo ęsdinimo spartos priklausomybės nuo impulso energijos dvimatis spalvinis žemėlapis, naudojant radialinės poliarizacijos pluoštą, kai lazerio skenavimo greitis $v = 4; 5; 6; 7; 8 \text{ mm/s}$.



18 pav.: Kvarcinio stiklo ėsdinimo spartos priklausomybės nuo impulso energijos dvimatis spalvinis žemėlapis, naudojant azimutinės poliarizacijos pluoštą, kai lazerio skenavimo greitis $v = 4; 5; 6; 7; 8 \text{ mm/s}$.

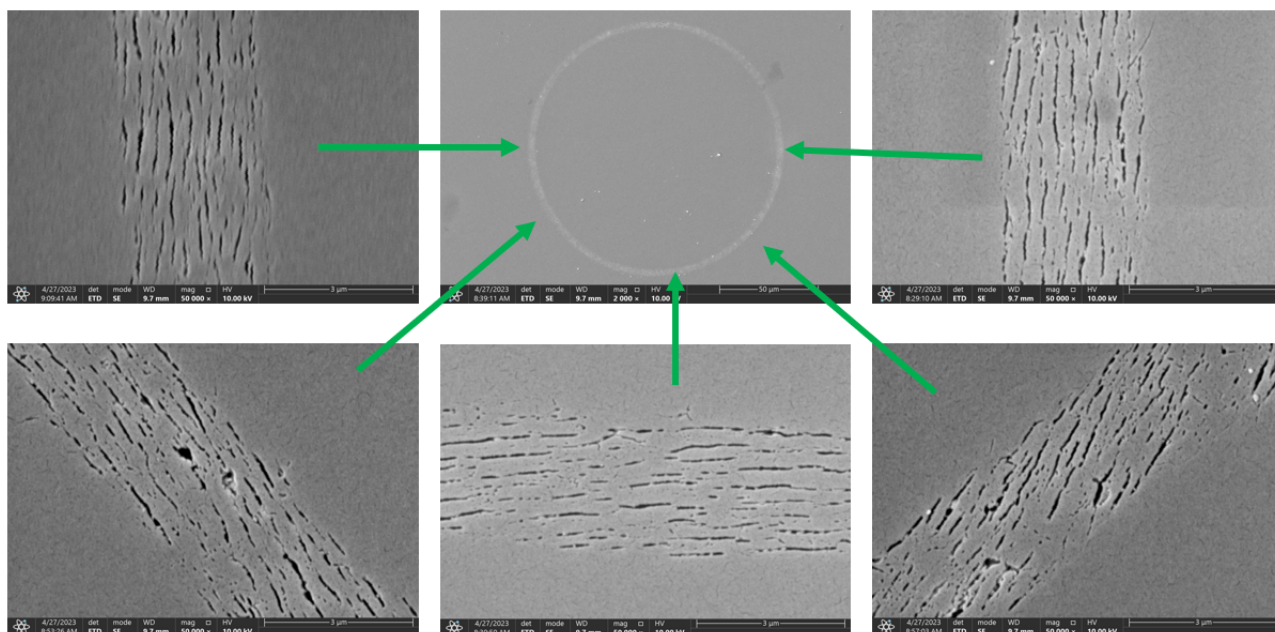


19 pav.: Kvarcinio stiklo ėsdinimo spartos priklausomybė nuo impulso energijos, naudojant radialinę ir azimutinę poliarizaciją, kai lazerio impulso trukmė $\tau = 0,8$ ir 2 ps .

3.2 Modifikacijų analizė

Iš literatūros, žinome, jog viena iš pagrindinių selektyvaus lazerinio ėsdinimo priežasčių lydymame kvarce yra jame įrašytos nanostruktūros (nanogardelės), kurios kryptingai išdėsčiusios suformuoja vienalytį difuzijos kanalą. Viena pagrindinių šių struktūrų savybių yra ta, kad nanogardelės visada formuojasi statmenai lazerio poliarizacijos kryptčiai, todėl yra pakankamai nesudėtinga įsivaizduoti kokia trajektorija turi būti suformuotos nanogardelės, įrašymui naudojant tiesinę poliarizacijos pluoštą (20 pav.), tačiau nėra visai intuityvu kaip išsidėsto šios nanostruktūros, jų įrašymui naudojant kompleksiškesnį poliarizacinį lauką turinčius pluoštus (radialinė ir azimutinė poliarizacijos). Norint tai ištirti, lydymo kvarco stikle buvo suformuotos analogiškos modifikacijos anksčiau aprašytu principu. Toliau stiklo paviršius buvo nupoliruojamas (norint pamatyti kas vyksta jo tūryje) ir trumpai paėsdinimas ($\sim 5 \text{ min}$) KOH šarmo

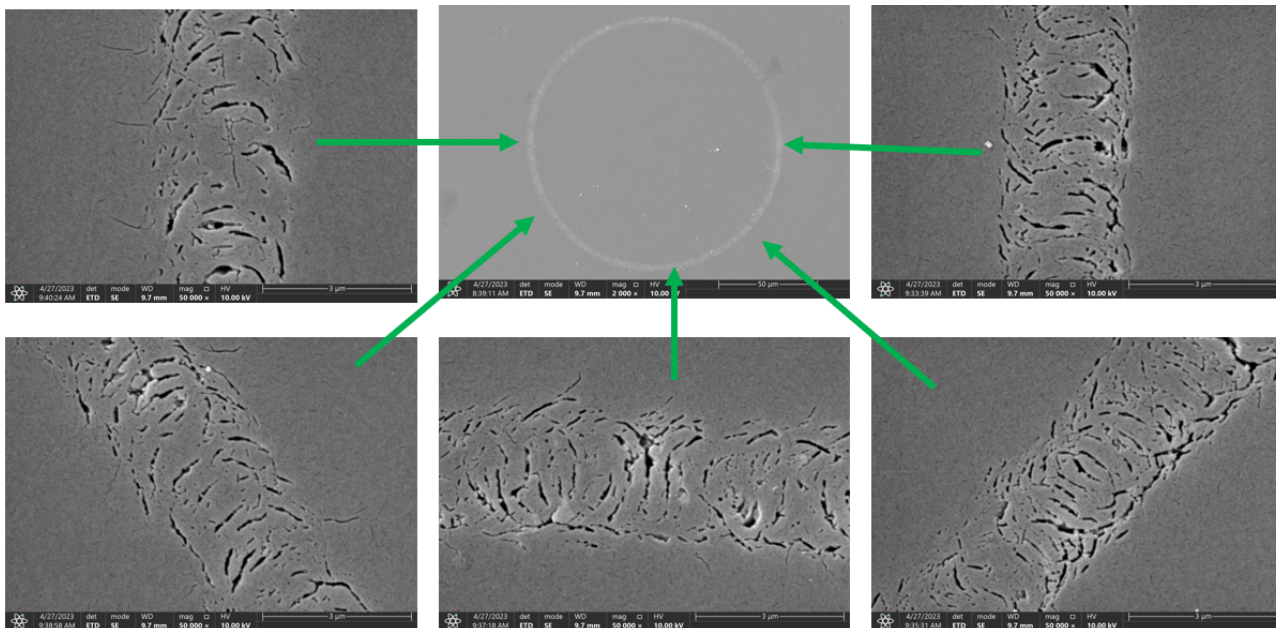
tirpale, tam kad "atsivertų" lydyto kvarco tūryje suformuotos nanostruktūros. Metalizavus stiklo paviršių, skenuojančio elektroninio mikroskopo pagalba (angl. SEM) buvo ištirtos bandinyje indukuotos modifikacijos abiejų poliarizacijų atveju.



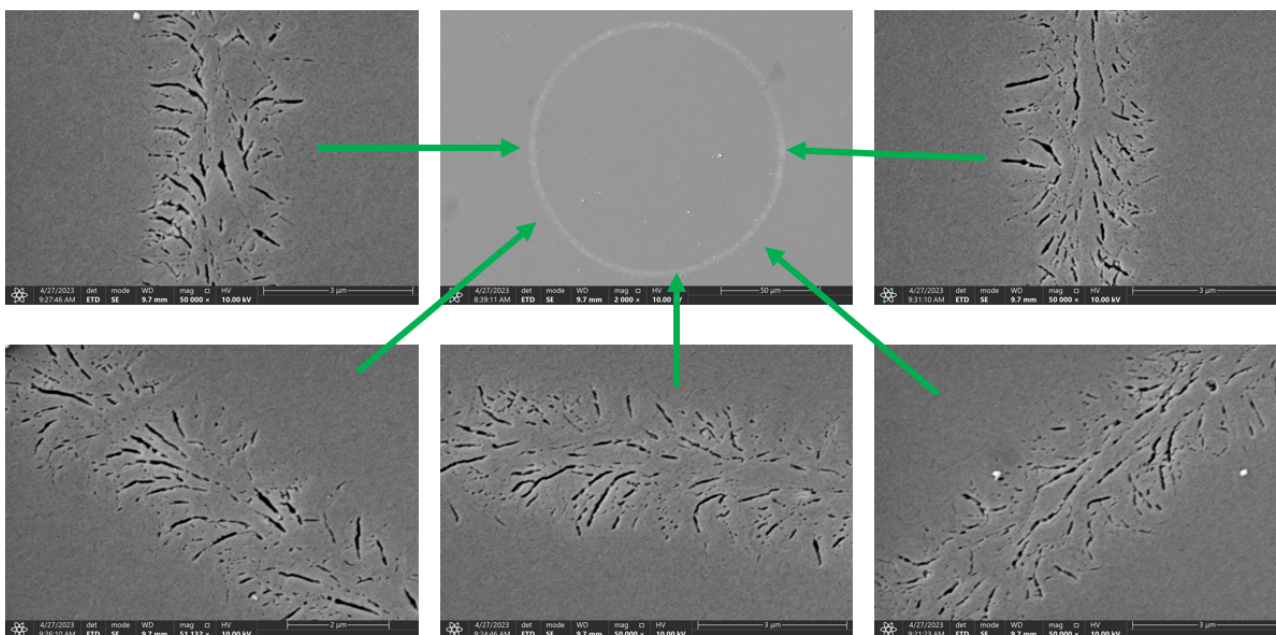
20 pav.: Nanogardelės įrašytos tiesiškai poliarizuotu lazerio pluoštu. Modifikacijos formuotos naudojant 1 ps trukmės, $1,5\ \mu\text{J}$ energijos impulsus. Strėlytės nurodo nanogardelių padėtį cilindrinio pažeidimo atžvilgiu.

Iš gautų SEM nuotraukų, akivaizdžiai matome, jog suformuotos nanogardelės puikiai atitinka jas kuriančio poliarizacinio lauko struktūrą (21 - 22 pav.). Kadangi nanogardelės formuojasi statmenai poliarizacijos komponentių kryptims, tai radialinės poliarizacijos atveju stebime apskritimo formos nanogardeles, o naudojant azimutinę poliarizaciją - nanogardelės išsidėssto radialiai. Taipogi, galima spėti, kad naudojant radialiai poliarizuotą pluoštą, ėsdinimo spartos buvo aukštesnės, nes nors nanogardelės yra apskritimo formos, bet jos gan tankiai išsidėssto ir susijungia ne tik skersine, bet ir išilgine kryptimi. Tuo tarpu, azimutinės poliarizacijos atveju, už difuzijos kanalo formavimą yra atsakinga centrinė (tiesioji) nanogardelių struktūros dalis, kuri nėra labai stipriai išreiškiama, o labiau dominuoja radialiai išsidėsstę kanaliukai - "uodegėlės", todėl tai galėtų apriboti ėsdinimo tirpalo tekėjimą drėkinimo kanalu. Taipogi, yra žinoma, jog nanogardelės gali būti perrašomos, todėl būtent tik centrinė pluošto dalis yra atsakinga už gardelių formavimą aplink įrašomą struktūrą ir tai akivaizdžiai galima stebėti azimutinės poliarizacijos atveju: modifikacijos buvo įrašomos prieš laikrodžio rodyklę, todėl yra pastebimas tam tikras nesimetriškumas nanogardelių struktūroje, nes "uodegėlės" yra nukreiptos priešingai įrašymo kryptims. Būtent dėl šio nesimetriškumo atsiranda ėsdinimo netolygumas

ir tai galėjo turėti įtakos ėsdinimo spartos rezultatams.



21 pav.: Nanogardelės įrašytos radialiai poliarizuotu lazerio pluoštu. Modifikacijos formuotos naudojant 1 ps trukmės, $1,5 \mu J$ energijos impulsus. Strėlytės nurodo nanogardelių padėtį cilindrinio pažeidimo atžvilgiu.

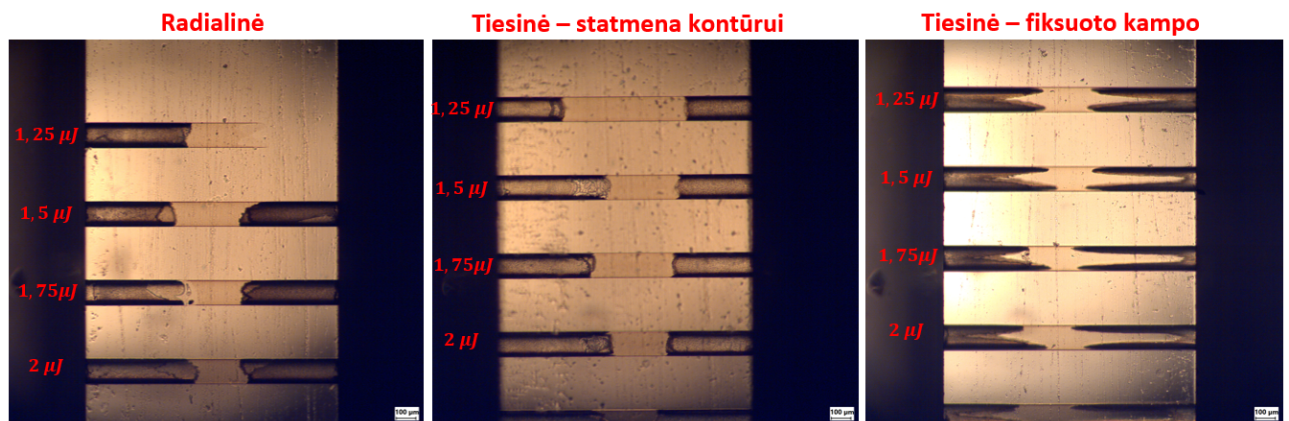


22 pav.: Nanogardelės įrašytos azimutiškai poliarizuotu lazerio pluoštu. Modifikacijos formuotos naudojant 1 ps trukmės, $1,5 \mu J$ energijos impulsus. Strėlytės nurodo nanogardelių padėtį cilindrinio pažeidimo atžvilgiu.

Galiausiai, norint patikrinti ar radialiai poliarizuotas pluoštas turi pranašumų prieš tiesiškai poliarizuotą, buvo atliktas analogiškas eksperimentas, naudojant radialinę ir tiesinę poliariza-

cija, kuri vienu atveju buvo kontroliuojama, taip, kad "greitoji" ašis visada būtų statmena apdirbimo kontūrai (20 pav.), kitu - fiksuota ties vienu kampu (nebuvo kontroliuojama). Impulso trukmė buvo fiksuota ties $\tau = 1 ps$, greitis $v = 4 mm/s$ ir naudotos kelios impulso energijos vertės. Chemiškai išdintų bandinių nupoliruoti skerspjūviai visais trejais atvejais yra atvaizduoti 23 pav. Visų pirma, matome, kad naudojant radialinės poliarizacijos pluoštą, kartais impulso energijos gali nepakakti suformuoti modifikacijai per visą bandinio tūrį (priklausomai nuo bandinio storio), todėl parametru apdirbimo langas kažkiek susiaurėja. Šis parametru lango susiaurėjimas galėjo atsirasti, dėl to, kad vektorinių cilindrinų pluoštų intensyvumo skirstinys yra žiedo formos, todėl, nepaisant aštraus fokusavimo sąlygų, energijos tankis gali skirtis. Tačiau, nepaisant to, naudojant radialinę poliarizaciją yra ne tik pasiekama išdininimo sparta palyginama su tiesine poliarizacija, bet net ir nekontroliuojant poliarizacijos orientacijos išsilaiško išdininimo tolygumas, ko negalima pasakyti apie kanaliukus suformuotus fiksuojant tiesinės poliarizacijos kampą (23 pav. dešinė).

Taigi, naudojant vektorinius cilindrinus pluoštus selektyviam lazeriniam išdininimui, ne tik galime pasiekti aukštas išdininimo spartas kaip ir tiesinės poliarizacijos atveju, bet ir yra pašalinama būtinybė kontroliuoti poliarizaciją, lazerinio apdirbimo metu, kas potencialiai gali pagreitinti patį įrašymo procesą, nes jo neberibos kiti mechaniniai komponentai (pvz. banginės plokštelės rotacinė sukimo ašis).



23 pav.: Išdintų bandinių skerspjūviai radialinės ir tiesinės poliarizacijos atveju, kai: poliarizacija yra orientuota statmenai lazerio skenavimo kryptiai (antras stulpelis) ir poliarizacija yra fiksuota ties vienu kampu (trečias stulpelis).

Pagrindiniai rezultatai ir išvados

1. Tyrimo metu buvo ištirtos selektyvaus lazerinio ėsdinimo spartos priklausomybės nuo skirtingų lazerinio impulso parametrų. Iš gautų rezultatų galima teigti, jog radialiai ir azimutiškai poliarizuotus pluoštus galima nesunkiai pritaikyti selektyviam lazeriniam ėsdinimui, o didžiausią įtaką ėsdinimo spartai turi impulso trukmė.
2. Parodyta, jog naudojant radialiai poliarizuotą pluoštą yra pasiekiamos aukštesnės ėsdinimo spartos, platesniame parametrų diapazone, lyginant su azimutiškai poliarizuotu pluoštu. Tam įtakos galėjo turėti nesimetrinė nanogardelių struktūra, formuojama azimutinės poliarizacijos pluoštu.
3. Pademonstruota, kad SLE procesui naudojant radialinės poliarizacijos pluoštą yra pasiekiamos ėsdinimo spartos palyginamos su tiesinės poliarizacijos pluoštu, tačiau radialinės poliarizacijos atveju yra eliminuojama būtinybė kontroliuoti poliarizaciją, todėl lazerinio apdirbimo procesas gali pagreitinėti, nes jo neberiboja mechaniniai komponentai (rotacinė ašis).

Literatūros sąrašas

- [1] J. Wilson ir J.F.B. Hawkes. *Lasers, Principles and Applications*. Prentice-Hall international series in optoelectronics. Prentice Hall, 1987 m.
- [2] A. Champion. “Local effective volume changes in fused silica induced by femtosecond laser irradiation”. Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven, 2015 m., p. 4–14.
- [3] Jia Qi, Zhenhua Wang, Jian Xu, Zijie Lin, Xiaolong Li, Wei Chu ir Ya Cheng. “Femtosecond laser induced selective etching in fused silica: Optimization of the inscription conditions with a high-repetition-rate laser source”. In: *Optics Express* 26.23 (2018 m.), p. 29669. DOI: 10.1364/oe.26.029669.
- [4] Yasuhiko Shimotsuma, Peter G. Kazansky, Jiarong Qiu ir Kazuoki Hirao. “Self-Organized Nanogratings in Glass Irradiated by Ultrashort Light Pulses”. In: *Phys. Rev. Lett.* 91 (24 2003 m. gruod. mėn.), p. 247405. DOI: 10.1103/PhysRevLett.91.247405.
- [5] *All-fiber laser generates cylindrical vector beams*. URL: <https://spie.org/news/3512-all-fiber-laser-generates-cylindrical-vector-beams?SS0=1>.
- [6] Yasuhiko Shimotsuma, Masaaki Sakakura, Peter G Kazansky, Martynas Beresna, Jianrong Qiu, Kiyotaka Miura ir Kazuyuki Hirao. “Ultrafast manipulation of self-assembled form birefringence in glass”. In: *Advanced materials (Deerfield Beach, Fla.)* 22.36 (2010 m. rugs. r. p. 4039–4043. ISSN: 0935-9648. DOI: 10.1002/adma.201000921.
- [7] Qiwen Zhan. “Cylindrical vector beams: From mathematical concepts to applications”. In: *Advances in Optics and Photonics* 1.1 (2009 m.), p. 1. DOI: 10.1364/aop.1.000001.
- [8] L. Rapp, R. Meyer, L. Furfaro, C. Billet, R. Giust ir F. Courvoisier. “High speed cleaving of crystals with ultrafast bessel beams”. In: *Optics Express* 25.8 (2017 m.), p. 9312. DOI: 10.1364/oe.25.009312.
- [9] Justas Baltrukonis, Orestas Ulčinas, Sergej Orlov ir Vytautas Jukna. “High-order Vector Bessel-Gauss beams for laser micromachining of transparent materials”. In: *Physical Review Applied* 16.3 (2021 m.). DOI: 10.1103/physrevapplied.16.034001.
- [10] Bing Hao ir James Leger. “Experimental measurement of longitudinal component in the vicinity of focused radially polarized beam”. In: *Optics Express* 15.6 (2007 m.), p. 3550. DOI: 10.1364/oe.15.003550.

- [11] Martynas Beresna, Mindaugas Gecevičius, Peter G. Kazansky ir Titas Gertus. “Radially Polarized Optical Vortex converter created by femtosecond laser nanostructuring of Glass”. In: *Applied Physics Letters* 98.20 (2011 m.), p. 201101. DOI: 10.1063/1.3590716.
- [12] Erminas Kozlovskis. “Beselio sūkurinių pluoštų superpozicijų kūrimas geometrinės fazės elementais ir pritaikymas skaidrių terpių lazeriniam mikroapdirbimui”. Vilnius University, 2021 m., p. 16–20.
- [13] V. Stankevič. “Formation and characterization of micro-opto-mechanical 3D devices for sensor applications in transparent materials”. Vilnius University, Center for physical sciences ir technology, 2017 m., p. 19–26.
- [14] Chris B Schaffer, André Brodeur ir Eric Mazur. “Laser-induced breakdown and damage in bulk transparent materials induced by tightly focused femtosecond laser pulses”. In: *Measurement Science and Technology* 12.11 (2001 m. spal. mėn.), p. 1784–1794. DOI: 10.1088/0957-0233/12/11/305.
- [15] Rafael R. Gattass ir Eric Mazur. “Femtosecond laser micromachining in transparent materials”. In: *Nature Photonics* 2.4 (2008 m. bal. mėn.), p. 219–225. DOI: 10.1038/nphoton.2008.47.
- [16] L. V. Keldysh. “Ionization in the field of a strong electromagnetic wave”. In: Vol: 47 (1964 m. lapkr. mėn.).
- [17] B. C. Stuart, M. D. Feit, S. Herman, A. M. Rubenchik, B. W. Shore ir M. D. Perry. “Nanosecond-to-femtosecond laser-induced breakdown in dielectrics”. In: *Phys. Rev. B* 53 (4 1996 m. saus. mėn.), p. 1749–1761. DOI: 10.1103/PhysRevB.53.1749.
- [18] Kazuyoshi Itoh, Wataru Watanabe, Stefan Nolte ir Chris B. Schaffer. “Ultrafast Processes for Bulk Modification of Transparent Materials”. In: *MRS Bulletin* 31.8 (2006 m.), p. 620–625. DOI: 10.1557/mrs2006.159.
- [19] Martynas Beresna, Mindaugas Gecevicius ir Peter G. Kazansky. “Polarization sensitive elements fabricated by femtosecond laser nanostructuring of glass”. In: *Opt. Mater. Express* 1.4 (2011 m. rugpj. mėn.), p. 783–795. DOI: 10.1364/OME.1.000783.
- [20] Weijia Yang, Peter G. Kazansky, Yasuhiko Shimotsuma, Masaaki Sakakura, Kiyotaka Miura ir Kazuyuki Hirao. “Ultrashort-pulse laser calligraphy”. In: *Applied Physics Letters* 93.17 (2008 m.), p. 171109. DOI: 10.1063/1.3010375.

- [21] Arnaud Couairon ir André Mysyrowicz. “Femtosecond filamentation in transparent media”. In: *Physics Reports* 441.2-4 (2007 m. vas. mėn.), p. 47–189. DOI: 10.1016/j.physrep.2006.12.005.
- [22] C. Hnatovsky, R. S. Taylor, P. P. Rajeev, E. Simova, V. R. Bhardwaj, D. M. Rayner ir P. B. Corkum. “Pulse duration dependence of femtosecond-laser-fabricated nanogratings in fused silica”. In: *Applied Physics Letters* 87.1 (2005 m.), p. 014104. DOI: 10.1063/1.1991991.
- [23] V. A. Šalna. *Optika*. Enciklopedija, 2000 m.
- [24] L. Skuja, K. Kajihara, M. Hirano ir H. Hosono. “Oxygen-excess-related point defects in glassy/amorphous SiO₂ and related materials”. In: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* 286 (2012 m.), p. 159–168. DOI: 10.1016/j.nimb.2012.02.038.
- [25] N M Bulgakova, Razvan Stoian ir A Rosenfeld. “Laser-induced modification of transparent crystals and glasses”. In: *Quantum Electronics* 40.11 (2010 m. gruod. mėn.), p. 966–985. DOI: 10.1070/qe2010v040n11abeh014445.
- [26] David Bischof, Michael Kahl ir Markus Michler. “Laser-assisted etching of borosilicate glass in potassium hydroxide”. In: *Optical Materials Express* 11.4 (2021 m.), p. 1185. DOI: 10.1364/ome.417871.
- [27] Dezhi Tan, Kaniyarakkal Sharafudeen, Yuanzheng Yue ir Jianrong Qiu. “Femtosecond Laser Induced Phenomena in Transparent Solid Materials: Fundamentals and Applications”. In: *Progress in Materials Science* 76 (2015 m. rugs. mėn.). DOI: 10.1016/j.pmatsci.2015.09.002.
- [28] Nan Xie, Defeng Zhu, Qifeng Xu ir Qiao Tan. “Linear Phase delay detection method for optical voltage transformer based on S-Wave Plate”. In: *Measurement Science and Technology* 32.8 (2021 m.), p. 085107. DOI: 10.1088/1361-6501/abf8ee.
- [29] Justas Baltrukonis. “Aukštesnės eilės vektorinių beselio-gauso pluoštų realizavimas ir panaudojimas skaidrių terpių mikroapdirbimui”. 2020 m.
- [30] Satoshi Kiyama, Shigeki Matsuo, Shuichi Hashimoto ir Yasushi Morihira. “Examination of etching agent and etching mechanism on Femtosecond laser microfabrication of channels inside vitreous silica substrates”. In: *The Journal of Physical Chemistry C* 113.27 (2009 m.), p. 11560–11566. DOI: 10.1021/jp900915r.

- [31] R. Osellame, H.J.W.M. Hoekstra, G. Cerullo ir M. Pollnau. “Femtosecond laser microstructuring: An enabling tool for optofluidic lab-on-chips”. In: *Laser amp; Photonics Reviews* 5.3 (2011 m.), p. 442–463. DOI: 10.1002/lpor.201000031.
- [32] Yves Bellouard, Ali Said, Mark Dugan ir Philippe Bado. “Fabrication of high-aspect ratio, micro-fluidic channels and tunnels using femtosecond laser pulses and chemical etching”. In: *Optics Express* 12.10 (2004 m.), p. 2120. DOI: 10.1364/opex.12.002120.
- [33] R. A. Devine, R. Dupree, I. Farnan ir J. J. Capponi. “Pressure-induced bond-angle variation in amorphous SiO₂”. In: *Physical Review B* 35.5 (1987 m.), p. 2560–2562. DOI: 10.1103/physrevb.35.2560.
- [34] *Polarization converter S-waveplate: Special optics*. 2022 m. birž. mēn. URL: <https://wophotonics.com/products/s-waveplate/>.

VEKTORINIŲ CILINDRINIŲ PLUOŠTŲ PANAUDOJIMAS SELEKTYVIAM
LAZERINIAM ĖSDINIMUI

Santrauka

Selektyvus lazerinis ėsdinimas (SLE) - tai universali gamybos technologija, leidžianti formuoti sudėtingus mikrokanalus, skaidrių medžiagų pjūvius, bei įvairius 3D komponentus iš stiklo arba safyro. Aštriai sufokusuota femtosekundinė lazerio spinduliuotė sukelia lokalizuotus skaidrių terpių fizikinių ir cheminių savybių pokyčius. Priklausomai nuo apdirbimo sąlygų, lazeriu modifikuotos stiklo srities ėsdinimo sparta žymiai išauga lyginant su nemodifikuoto stiklo, tačiau vienas iš pagrindinių šio proceso sunkumų yra stipri ėsdinimo spartos priklausomybė nuo pluošto poliarizacijos orientacijos. Potencialus šios problemos sprendimas yra naudoti radialiai ar azimutiškai poliarizuotus lazerio pluoštus, kurių poliarizacijos laukas padėtų suformuoti simetriškus difuzijos kanalus lydyto kvarco stikle, tokiu būdu efektyviai eliminuojant poreikį kontroliuoti poliarizaciją, bei paspartinant modifikacijų formavimo procesą, nes proceso greičio neberiboja mechaniniai komponentai.

Šio darbo tikslas yra ištirti įvairių lazerio parametrų įtaką selektyvaus lazerinio ėsdinimo spartai lydyto kvarco stikle, naudojant vektorinius cilindrinis lazerinius pluoštus. Pagrindiniai darbo rezultatai ir išvados yra tokie:

1. Tyrimo metu buvo ištirtos selektyvaus lazerinio ėsdinimo spartos priklausomybės nuo skirtingų lazerinio impulso parametrų. Iš gautų rezultatų galima teigti, jog radialiai ir azimutiškai poliarizuotus pluoštus galima nesunkiai pritaikyti selektyviam lazeriniam ėsdinimui, o didžiausią įtaką ėsdinimo spartai turi impulso trukmė.
2. Parodyta, jog naudojant radialiai poliarizuotą pluoštą yra pasiekiamos aukštesnės ėsdinimo spartos, platesniame parametrų diapazone, lyginant su azimutiškai poliarizuotu pluoštu. Tam įtakos galėjo turėti nesimetrinė nanogardelių struktūra, formuojama azimutinės poliarizacijos pluoštu.
3. Pademonstruota, kad SLE procesui naudojant radialinės poliarizacijos pluoštą yra pasiekiamos ėsdinimo spartos palyginamos su tiesinės poliarizacijos pluoštu, tačiau radialinės poliarizacijos atveju yra eliminuojama būtinybė kontroliuoti poliarizaciją, todėl lazerinio apdirbimo procesas gali pagreitinėti, nes jo neberiboja mechaniniai komponentai (rotacinė ašis).

CYLINDRICAL VECTOR BEAMS FOR SELECTIVE LASER ETCHING APPLICATIONS

Summary

Selective laser etching (SLE) is a universal manufacturing technology that allows the formation of complex microchannels, cuts in transparent materials, and various 3D components from glass or sapphire. Sharply focused femtosecond laser irradiation induces localized changes in the physical and chemical properties of transparent materials. Depending on the processing conditions, the etching rate of laser-modified glass areas become significantly higher than that of unmodified glass. However, one of the main challenges of this process is the strong dependence of the etching rate on the polarization orientation. A potential solution to this problem is to use radially or azimuthally polarized laser beams, whose polarization fields would help form symmetric channel structures inside the glass, effectively eliminating the need to control the polarization and at the same time speeding up the laser machining process, as the speed is no longer limited by mechanical components.

The purpose of this work is to investigate the influence of various laser parameters on the selective laser etching rate in fused silica glass, using cylindrical vector laser beams. The main results and conclusions of this work are as follows:

1. During the study, the dependences of the selective laser etching rate on various laser pulse parameters were investigated. From the obtained results, it can be concluded that radially and azimuthally polarized beams can be easily adapted for selective laser etching. Moreover, pulse duration seems to have the highest influence on the etching rate.
2. It has been shown that using a radially polarized beam allows to achieve higher etching rates in a wider range of parameters compared to an azimuthally polarized beam. This could have been influenced by the asymmetric nanograting structure formed by the azimuthal polarization beam.
3. It has been demonstrated that for the SLE process, using a radially polarized beam achieves etching rates comparable to a linearly polarized beam, but in the case of radially polarized, the need to control the polarization is eliminated, so the laser machining process can be accelerated, as it is no longer limited by mechanical components (rotational axis).