

VILNIAUS UNIVERSITETAS
FIZIKOS FAKULTETAS
LAZERINIŲ TYRIMŲ CENTRAS

Tomas Baravykas

BANGOLAIDŽIŲ FORMAVIMAS FEMTOSEKUNDINIAIS IMPULSAIS IR
INTEGRAVIMAS Į SKIRTINGŲ MATMENŲ IŠĖSDINTAS KIAURYMES

Magistrantūros studijų baigiamasis darbas

Lazerinės technologijos
studijų programa

Studentas

Leista ginti

Darbo vadovas

Konsultantas

LTC direktorius

Tomas Baravykas

2018-05-28

Dr. Dalia Kaškelytė

dokt. Simas Butkus

Prof. Dr. Roaldas Gadonas

Vilnius 2018

Turinys

| | |
|---|-----------|
| Įvadas | 3 |
| 1 Literatūros apžvalga | 4 |
| 1.1 Šviesos sąveika su stiklais | 4 |
| 1.1.1 Optinio pažeidimo mechanizmai | 4 |
| 1.1.2 Stiklų tūrinio modifikavimo metodai | 6 |
| 1.1.3 Dviejų temperatūrų modelis | 8 |
| 1.2 Bangolaidžių formavimas stikle | 10 |
| 1.2.1 Bangolaidžio skerspjūvio priklausomybė | 10 |
| 1.3 Cheminis ėsdinimas | 11 |
| 1.3.1 Poliarizacijos įtaka ėsdinant | 13 |
| 2 Eksperimentinė metodika | 15 |
| 2.1 Tiesioginio lazerinio rašymo sistema | 15 |
| 2.2 Matavimo sistema | 16 |
| 2.3 Naudotos medžiagos | 17 |
| 2.4 Eksperimento sąlygų ir bandinių charakterizavimas | 19 |
| 3 Rezultatai ir jų aptarimas | 20 |
| 3.1 Bangolaidžių, tarpų įrašymas | 20 |
| 3.2 Pralaidumo matavimas | 22 |
| 3.3 Spektro matavimas | 23 |
| 4 Diskusija | 26 |
| Išvados | 27 |
| Literatūros sąrašas | 28 |
| Santrauka | 32 |
| Summary | 33 |

Įvadas

Mikro ir nano eilės apdirbimas naudojant ultratrumpus impulsus pastaraisiais metais gauna vis didesnę susidomėjimą. Lyginant su lydymu, garinimu naudojant nuolatinės veiklos arba atliekant abliacija nanosekundinės eilės impulsais, femtosekundinės eilės abliacijos mechanizmas leidžia paveikti mažą tūrio sritį beveik be jokio šiluminio išplitimo [1]. Tai suteikia galimybę formuoti darinius medžiagos paviršiuje ir tūryje su mikrometriniu tikslumu ir aukšta kokybe.

Naudojant sistemas galinčias generuoti ultratrumpus fs eilės impulsus tapo galima stiklinėse detalėse įrašyti trimates struktūras ir naudojant cheminį ėsdinimą šias struktūras išryškinti, kas leidžia sukurti prietaisus kaip: mikrokanalus skysčiams su reguliuojamais vožtuvais, dozimetrais, maišytuvais, transportavimo ir atskyrimo mechanizmais viename stikle [2]. Galima formuoti ir mikrooptinius prietaisus naudojant šį metodą, kas leidžia kurti tokius prietaisus kaip: bangolaidžius, gardeles, šakotuvus, Frenelio zonų plokšteles [3–5]. Patys įrašyti bangolaidžiai gali būti naudojami ne tik šviesai praleisti, bet ir lazeriniai spinduliuotei generuoti [6] arba kartu naudojant su mikrofluidikos sistemomis galima kurti prietaisus įvairioms ląstelėms tirti [7]. Šios struktūros gali būti panaudotos mažų skysčio kiekio manipuliavimui su dideliu tikslumu užimant labai mažai vietos ir gali būti naudojami biologiniams ir cheminiams analizėms [8, 9], įrašinėjami fotoniniai prietaisai su galimybe juos derinti ir konfigūruoti [10].

Cheminis ėsdinimas su lazerinės spinduliuotės pagalba pagrinde naudojamas su lydytu kvarcu [11] arba fotojautriiu stiklu [12], retesniais atvejais su safyru [13]. Naudojami ėsdinimui tirpalai pagrindine HF rūgštis arba KOH tirpalas [14].

Šiame darbe buvo atliekamas lydyto kvarco stiklo tūrinis modifikavimas naudojant ultratrumpus lazerio impulsus ir ėsdinant 5% koncentracijos KOH tirpale, prie 80°C. Pademonstruojame medžiagos tūryje suformuotų bangolaidžių šviesos perdavimą, pralaidumo priklausomybes nuo išėsdintų tarpų.

Šio darbo tikslas nustatyti optimalų išėsdintą tarpą šviesos perdavimui per suformuotą bangolaidį. Darbo uždaviniai:

1. Ištirti suformuotų bangolaidžių šviesos perdavimą, priklausomybes nuo kiaurymių pločio.
2. Naudojant žinomos medžiagos pralaidumo spektrą, ištirti suformuotų bangolaidžių spektrinį pralaidumą.

1 Literatūros apžvalga

1.1 Šviesos sąveika su stiklais

Koherentinės lazerinės spinduliuotės ir stiklo sąveikos mechanizmas pagrįste priklauso nuo lazerio parametrų ir stiklo cheminės sudėties. Lazerio parametrų kaip: galia, apdirbimo greičio, pluošto skersmens, bangos ilgio, impulso trukmės ir stiklo storio, sudėties.

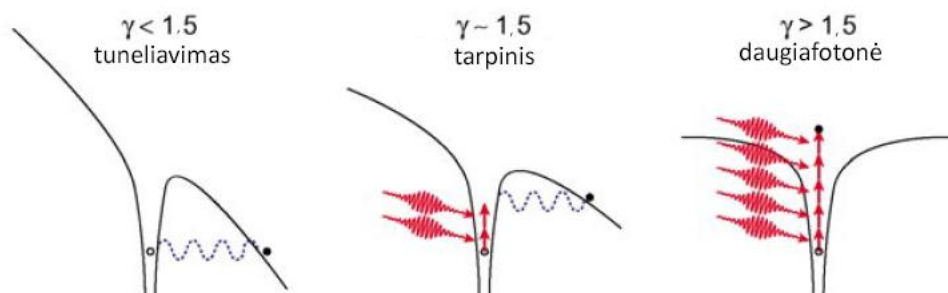
Skaidrūs stiklai pasižymi dideliu pralaidumu regimojoje srityje, tai riboja galimų lazerių pasirinkimo skaičių. Paprastai renkamasi UV arba IR bangų ilgių sistemos. UV srityje dominuojantis sugerties procesas - fotonų sugertis, IR srityje - vyksta dėl atominių ir molekulinų vibracijų stiklo gardelėje [15].

Impulsiniai lazeriai suteikia galimybę tiksliai valdyti kaip ir kiek energijos yra perduodama į medžiagą. Ultratrumpi impulsai leidžia pasiekti didelius intensyvumus. Didelis intensyvumas lokaliai sukelia optinę sugertį, kurios metu šiluminiai procesai medžiagoje nespėja išplisti. Stikle šie šiluminiai procesai pasireiškia terminiu šoku, kurio metu formuojasi mikrotuštos arba mažesnių impulso energijų atveju gaunamas medžiagos sutankėjimas, lūžio rodiklio kitimas arba nanogardelių formavimas [16].

1.1.1 Optinio pažeidimo mechanizmai

Skaidriose medžiagose išoriniai elektronai yra valentinėje juostoje užpildę visas galimas padėtis. Laidumo juosta yra tuščia arba dalinai užpildyta. Šias juostas skiria, priklausomai nuo medžiagos, tam tikro dydžio energijos tarpas - draustinės juostos tarpas, kuriame nėra elektronams galimų būsenų. Didelė sugertis, kuri gali pažeisti optinį elementą pasireiškia dėl netiesinės sugerties mechanizmo. Kai didelio intensyvumo lazerinė spinduliuotė paveikia dielektriką valentiniai elektronai yra sužadunami į laidumo juostą. Didelis išaugęs elektronų skaičius dėl grūtinės jonizacijos ir fotojonizacijos yra pagrindinė priežastis, dėl kurios optiniai elementai yra pažeidžiami. Priklausomai nuo lazerinės spinduliuotės intensyvumo ir bangos ilgio galimi du fotojonizacijos reiškiniai: daugiafotonė jonizacija ir tunelinė jonizacija.

Fotojonizacijos metu, dėl lazerinės spinduliuotės elektronas medžiagoje tiesiogiai yra sužadinas elektrinio lauko. Artimojo UV arba artimosios IR spinduliuotės fotonai neturi pakankamai energijos sužadinti elektroną, kad galėtų peršokti energijos tarpą. Todėl reikia kelių fotonų, pav. 1.



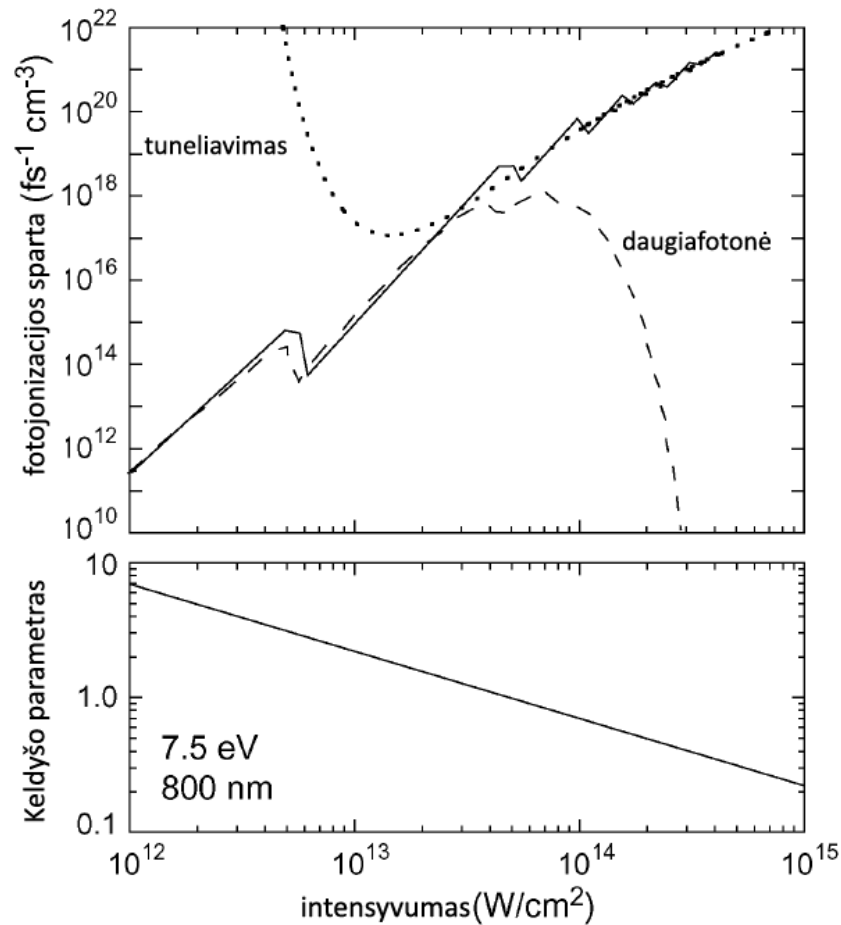
1 pav. Dominuojantis fotojonizacijos reiškinys priklausomai nuo Keldyšo parametro [17]

Tunelinės jonizacijos atveju lazerinės spinduliuotės elektrinis laukas silpnina Kulonų jėgą, kuri riša valentinį elektroną su atomu. Jei elektrinis laukas yra pakankamai didelio intensyvumo ($> 10^{12} \text{ W/cm}^2$), Kulono jėga nebe prilaiko elektrono ir jis tampa laisvas. Ši jonizacija gali pasireikšti dielektrinei medžiagai sąveikaujant su didelio intensyvumo impulsais.

Kai fotono energija mažesnė už vieno fotono sugerčią reikalingą energiją, netiesinė jonizacija vyksta dėl daugiafotonės sugerties. Kad elektronas peršoktų energijos tarpą ir būtų perkeltas į laidumo juostą dėl daugiafotonės sugerties jis turi sugerti pakankamą fotonų skaičių, kurių suminė energija viršytų ar būtų lygi šiam tarpui. Keldyšo parametras yra aprašomas funkcija:

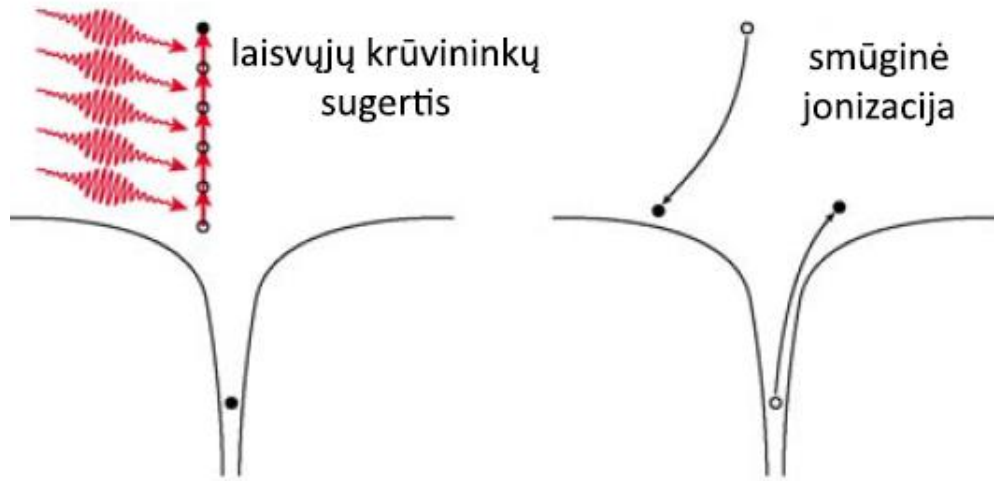
$$\gamma = \frac{\omega}{e} \left[\frac{mcn\epsilon_0 E_g}{I} \right]^{1/2}, \quad (1)$$

kur ω yra lazerinės spinduliuotės dažnis, I - lazerinės spinduliuotės intensyvumas fokuse, m ir e atitinkamai redukuota elektrono masė ir krūvis, c - šviesos greitis, n - terpės lūžio rodiklis, E_g medžiagos energijos tarpas ϵ_0 vakuomo dielektrinė skvarba. Kai šis parametras $> 1,5$ vyksta daugiafotonė jonizacija, kai $< 1,5$ vyksta tunelinė, o tarpiniu atveju vyksta abidvi kartu. Fotojonizacijos spartos priklausomybė nuo intensyvumo pateikta pav. 2.



2 pav. Fotojonizacijos spartos priklausomybė nuo Keldyšo parametro kaip funkcija nuo lazerinės spinduliuotės intensyvumo 800 nm šviesai lydytame kvarce ($E_g = 7.5 \text{ eV}$). Vientisa linija vaizduoja fotojonizacijos spartą, brūkšninė - daugiafotonės jonizacijos spartą, taškinė - tunelinės jonizacijos spartą [17]

Be jau minėtų jonizacijos mechanizmų galima ir griūtinė jonizacija. Griūtinis laidumo elektronų dauginimasis prasideda laisvajam krūvininkui sugėrus fotoną ir tuomet smūgiškai jonizuojant kitus elektronus. Yra tikimybė, kad laidumo juostoje esantys elektroni gali sugerti fotoną ir būti sužadinti į energijos lygmenį aukščiau laidumo juostos pav. 3 kairėje.



3 pav. Netiesinė fotojonizacija: laisvojo krūvininko sugertis ir smūginė jonizacija [17]

Sužadintas elektronas tuomet gali smūgiškai jonizuoti valentinėje juostoje esanti elektroną, pats nepalikdamas laidumo juostos. Šie tarpusavyje sąveikaujantys procesai leidžia didinti sužadintų elektronų skaičių. Kadangi po proceso laidumo juostoje turime jau du elektronus, jie abu gali būti sužadinti į aukštesnę būseną ir po to vėl smūgiškai jonizuoti kitus elektronus. Šio proceso metu sužadintų elektronų skaičius sparčiai didėja, o medžiaga yra pamažu jonizuojama. Elektronų skaičius N didės tol, kol spinduliuotė paveiks medžiagą. Elektronų tankio augimas griūtinės jonizacijos metu išreiškiamas lygybe:

$$\frac{dN}{dT} = \eta N, \quad (2)$$

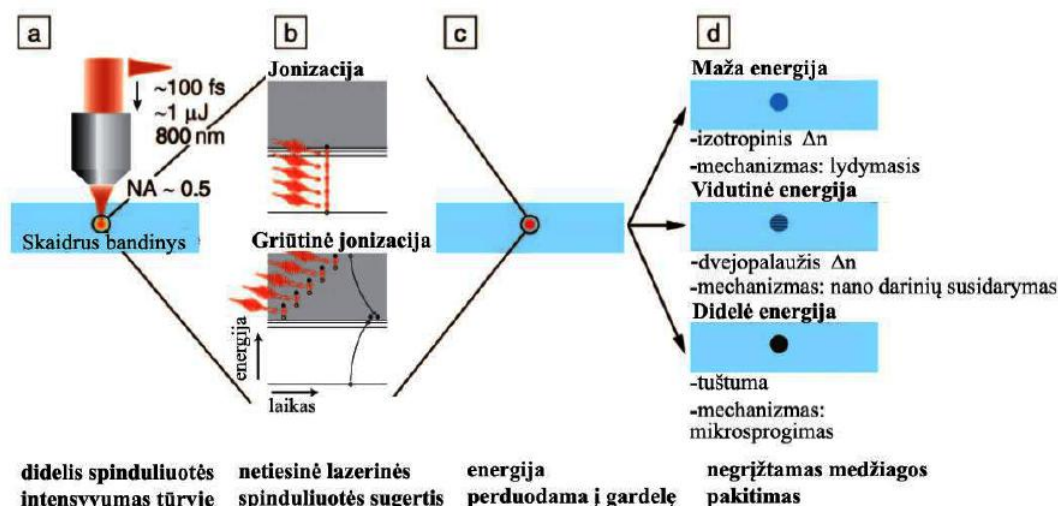
kur η yra griūtinės jonizacijos sparta. Kad šis procesas vyktų, reikia, kad laidumo juostoje būtų 10^{19} cm^{-3} elektronų. Dėl daugiafotonės jonizacijos ir šiluminio elektronų sužadavimo į įvairių priemaišinių lygmenų šis elektronų skaičius yra lengvai pasiekiamas. Smūginę jonizaciją sukelia tik tie elektroni, kurių energija viršija draustinės juostos tarpą du ar daugiau kartų.

1.1.2 Stiklų tūrinio modifikavimo metodai

Kaip buvo minėta praeitame skyrelyje, pagrindinis mechanizmas kurio metu fotonų energija perduodama elektronams yra netiesinė sugertis. Nepaisant to, kad skaidrijoje ir artimojoje IR srityje dielektrikai beveik pilnai praleidžia šviesą, tiesinės sugerties nepakanka sužadinti elektronus iš valentinės juostos į laidumo. Šios elektronus gali sužadinti didelius intensyvumus pasiekiantys ultratrumpieji impulsai daugiafotonės ar tunelinės jonizacijos metu. Prasidėjus griūtinei jonizacijai pasiekiamas kritinis elektronų tankis ir dielektrikai pradeda reaguoti į lazerinę spinduliuotę kaip metalai. Kritinis tankis aprašomas lygybe:

$$\rho_{krit} = \omega^2 \frac{m_e \epsilon_0}{e^2}, \quad (3)$$

kur ω yra lazerio dažnis, m ir e atitinkamai elektrono efektyvi masė ir krūvis, ϵ_0 - vakuumo dielektrinė skvarba [18]. Abliacijos kriterijumi dažniausiai yra laikomas kritinis elektronų tankis, virš kurio plazma pradeda stipriai atspindėti ir sugerti spinduliuotę.



4 pav. Iliustracija svarbiausių procesų apdirbant tūryje permatomas medžiagas ultratrumpais impulsais. a)-c) sudarom didelės energijos elektronų-jonų plazma medžiagos tūryje dėl didelės energijos impulsų netiesinės sugerties, d) priklausomai nuo energijos plazmoje galimi trys medžiagos struktūriniai pokyčiai: izotropinis lūžio rodiklio pokytis prie mažų energijų, dvejetainis lūžio rodiklio pokytis prie vidutinių energijų, tuštumos prie aukštų energijų [19]

Pateiktame paveikslėlyje 4, naudojama medžiaga buvo lydytas kvarcas ir gautos tūrinės dielektrikų modifikacijos, kurias galima suskirstyti į tris rūšis. Priklausomai nuo lazerio parametrų: impulso trukmės (100 fs), energijos, bangos ilgio (800 nm), pasikartojimo dažnio, poliarizacijos, bei medžiagos ir naudojamos optikos (objektyvo NA (0,65), pluošto diametro, bangos fronto iškraipymo) gaunamos skirtingos modifikacijos.

Pirmasis modifikacijos tipas gaunamas impulso energijoms esant arti pramušimo slenksčio (40 – 150 nJ). Lydytame kvarce spinduliuotės paveiktoje srityje medžiaga yra išlydoma ir vėsdama susitraukia, ir sutankėja dėl to gaunamas skirtingas lūžio rodiklis lyginant su nepaveikta spinduliuotės sritimi. Kiti stiklai dažniau demonstruoja priešingą atsaką - lūžio rodiklio sumažėjimą ir tankio praretėjimą. Antras tipas pasireiškia prie vidutinių energijų (150 – 500 nJ). Šios modifikacijos metu paveiktame medžiagos tūryje sudaromos periodinės, nanoeilės gardelės formos modifikacijos. Šios juostos išsidėsto statmenai pluošto poliarizacijai ir yra sudarytos iš 20 nm pločio sluoksnių, kuriose medžiaga sutankėja arba praretėja, dėl išstumto deguonies. Lyginant modifikuotas sritis su nemonifikuotomis, lazerinės spinduliuotės paveiktos sritys HF rūgštyje yra išsodinamos apie 300 kartų greičiau. Nanogardelių susidarymas aiškinamas per nanoplazmų susidarymą. Pradžioje esant mažam elektronų plazmos tankiui, nanoplazmos auga po kiekvieno impulso veikiant lazeriniai spinduliuotei. Lauko stiprėjimas, prie kraštų deformuoja pradinę sferos formos nanoplazmą į elipsoidinę ir galiausiai į diskinę

formą elektronų plazmos tankiui artėjant kritinę vertę. Rašymo metu susidariusi plazmą gali viršyti kritinį elektronų tankį ir tapti kvazi metališka ir tolimesnė lazerinė spinduliuotė yra iškraipoma ir formuoja periodines nanostruktūras ant paviršiaus. Tarpas tarp nanogardelių priklauso nuo lazerinės spinduliuotės bangos ilgio ir medžiagos lūžio rodiklio pagal priklausomybę $\lambda/2n$ [20]. Trečiasis tipas vyksta prie aukštų ($> 500 \text{ nJ}$) energijos impulsų. Paveiktose srityse per trumpą laiką sudaroma didelė temperatūra, dėl kurios paveikta sritis plečiasi ir įvyksta mikrosprogimas, po kurio lieka taškinė tuštuma, apsupta tankesnės medžiagos [19].

1.1.3 Dviejų temperatūrų modelis

Vykstant griūtinei jonizacijai stikluose susidaro didelis laisvųjų elektronų tankis (virš $10^{10} \text{ e}/\mu\text{m}^3$). Elektronai, veikiami lazerinės spinduliuotės, pasiekia sąlyginai didelę kinetinę energiją (didelį judėjimo greitį), tačiau, kad įvyktų medžiagos pašalinimas, medžiagos tūrio dalis, kurią veikia lazerinės spinduliuotės pluoštas, temperatūra turi labai pakilti, tuomet medžiaga išsilydo arba išgaruoja. Norint, kad medžiaga garuotų, reikia, kad gardelės temperatūra staigiai pakiltų ir būtų nutraukiami tarpusavio ryšiai. Būtent šis procesas ir vyksta lazerinės abliacijos metu. Taigi energiją kurią elektronai sugeria paveikti lazerinės spinduliuotės, yra perduodama gardelei. Šio proceso nagrinėjimui naudojamas dviejų temperatūrų modelis [21]. Šis modelis įskaito, kad iš pradžių vyksta elektronų energijos didėjimas (kyla jų temperatūra), o po to elektronai perduoda savo energiją gardelei. Šio modelio išraiška:

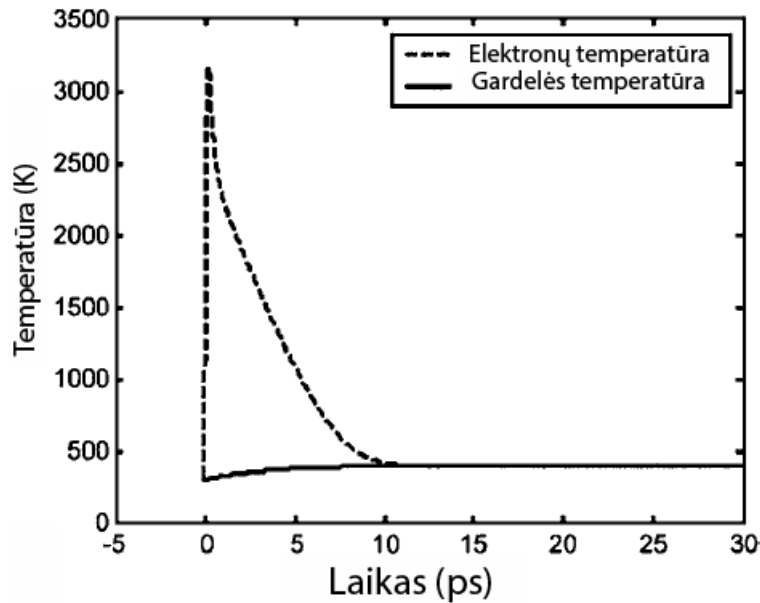
$$C_e \frac{\partial T_e}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial z} \left(k_e \frac{\partial T_e}{\partial z} \right) - \Gamma(T_e - T_i) + S(z, t), \quad (4)$$

$$C_i \frac{\partial T_i}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial z} \left(k_i \frac{\partial T_e}{\partial z} \right) + \Gamma(T_e - T_i), \quad (5)$$

$$S(z, t) = I(t)\alpha \exp(-\alpha z), \quad (6)$$

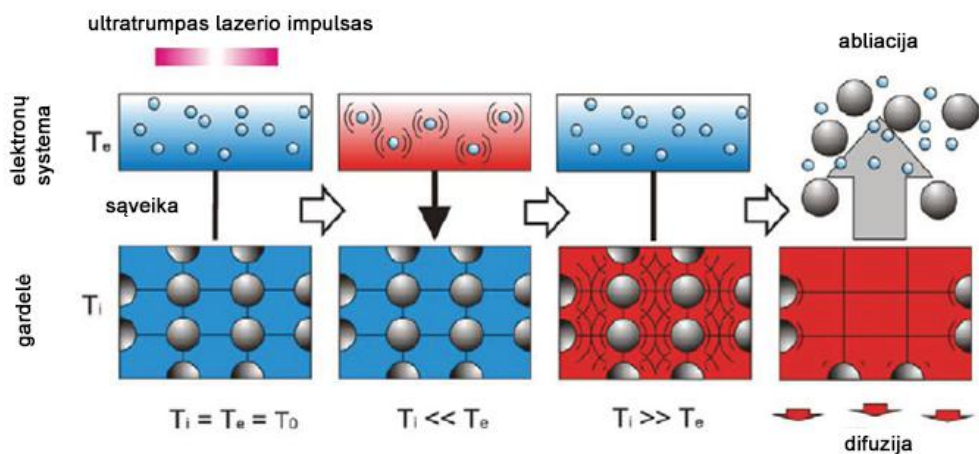
čia: T_e - elektronų temperatūra, T_i - gardelės temperatūra, k_e ir k_i - atitinkamai elektronų ir gardelės šiluminio laidumo koeficientai, C_e ir C_i - atitinkamai elektronų ir gardelės šiluminės talpos, Γ - vadinamasis gardelės ir elektronų sąryšio parametras, $S(z, t)$ - narys atspindintis spinduliuojanti šaltinį, α - sugerties koeficientas. (4) lygtis atspindi elektronų temperatūros kilimą, o (5) lygtis gardelės. Pirmasis dešinės pusės lygčių narys atspindi šiluminį laidumą savo sistemose. Kadangi šiluma sklinda daug sparčiau elektronų sistemoje dešinės pusės pirmasis narys (5) lygtyje daug mažesnis nei dešinės pusės antrasis narys (4) lygtyje. Taigi galima įžvelgti, kad pirmiausia dideles temperatūras pasiekia elektronai, o vėliau dėl sąryšio parametro tarp gardelės ir elektrono sistemų ši šiluma pereina į gardelės sistemą. Sąryšio parametras priklauso nuo elektrono-fonono relaksacijos trukmės. Ši trukmė atspindi vidutinį laiką per kurį didelės energijos elektronas, nuo sukūrimo, perduoda savo energiją gardelei. Kai yra vis didesnis skirtumas tarp elektronų ir gardelės temperatūrų šių lygčių antrieji dešinės pusės nariai turi vis didesnę reikšmę. Po tam tikro laiko elektronų ir gardelės sistemų temperatūros taps vienodos. 5 paveikslėlyje pateiktas laikinis elektronų ir gardelės temperatūros kitimas aukso folijoje.

Naudojant femtosekundinius impulsus, abliacijos srityse elektronai įgauna dideles tem-



5 pav. Elektronų ir gardelės temperatūros priklausomybė laikui bėgant 200 nm aukso folijoje apšvietus 140 fs trukmės, $1,053 \mu\text{m}$, $0,2 \text{ J/cm}^2$ impulsu [22]

peratūras, taigi energijos perdavimas yra greitas. Kitaip tariant, kol lazerio impulsas veikia medžiagą galima nepaisyti energijos kiekio kuris perėjo į gardelės sistemą, tai yra, tik elektronų energija padidėjo. Taigi po šio proceso yra kelių tūkstančių kelvinų skirtumas tarp elektronų ir gardelės sistemų, todėl prasidėjus energijos perdavimui iš elektronų į gardelę galima laikyti, kad sušils tik veikiama lazerinės spinduliuotės medžiagos sritis, t.y. elektronai daug greičiau perduoda šilumą nei šiluma pasiskirsto gardelės sistemoje. Dėl šios priežasties yra išgarinamos tik lazerio paveiktos sritys, todėl apdirbimas ultratrumpais impulsais yra ypač kokybiškas. Sritys nepaveiktos lazerinės spinduliuotės yra nepaveiktos šiluma. Ilgesnių impulsų atveju tokios sąlygos negaunamos, taigi ir apdirbimo rezultatai būna dažnai prastesni. 6 pav. pavaizduota modelio principinė schema. [23].



6 pav. Dviejų temperatūrų abliacijos modelis. Elektronams sugėrus lazerinę spinduliuotę jų energija padidėja, ši energija yra perduodama gardelei, gardelėje esantys atomai gavę pakankamai energijos išsilaisvina iš gardelės [24]

1.2 Bangolaidžių formavimas stikle

Pirmi bandymai stikle sukurti tūrinės modifikacijas (prie paviršiaus) buvo atlikti 1968m. W. Primak ir R. Kampwirth [25] naudojant didelės energijos daleles (neutronus, 40-600 keV elektronus, 140 keV protonus, D^+ , He^+ ir gama spinduliuotę). Jų darbe buvo pastebėta silicio pagrindo stikliuko paviršių bombarduojant energingomis dalelėmis, paveikta sritis traukiausi dėl deguonies persiskirstymo ar Si-O jonizacijos, kuri leidžia deguoniui persiskirstyti. Tuomet naudojant šios principus T. A. Dellin su kolegomis 1976m. pademonstravo lūžio rodiklio pokyčius kvarce naudojant 18 keV elektronus [26]. Keičiant dozę jie gavo lūžio rodiklio pokyčius nuo $2 * 10^{-4}$ iki $4 * 10^{-3}$. Šis metodas nebuvo itin geras, dėl sukkelto slėgio stikliukai paveiktoje srityje dažnai skildavo, susidarydavo įtempimai [27].

Tolimesni eksperimentai atlikti N. F. Borrelli su kolegomis naudojant 193nm ArF ekimerinį lazerį sukūrė paviršines stiklo modifikacijas, kurios veikė kaip planiniai bangolaidžiai [28]. Bangolaidžių įrašymas naudojant UV spinduliuotę trūkumas yra, kad modifikacijos galimos tik paviršiuje, šis principas buvo naudojamas Brego gardelių įrašymui šviesolaidžiose, plonų plėvelių modifikacijai.

1996m. Hirao grupė pademonstravo tūrinės modifikacijas naudojant subpikosekundinius, 830 nm lazerio impulsus, taip sudarant lūžio rodiklio pokyčius stikle [3]. Šio metodu selektyviai judant XYZ ašyse galima formuoti trimačius pakitusio lūžio rodiklio takus.

1.2.1 Bangolaidžio skerspjūvio priklausomybė

Įrašyto bangolaidžio skerspjūvis priklauso pagrinde nuo kelių parametrų: fokusuojančios optikos, transliavimo krypties, lazerio pasikartojimo dažnio. Pavienių impulsų režime, prie mažų pasikartojimo dažniu ($< 100kHz$), medžiaga fokuso padėtyje spėja atvėsti iki kol pasiekia kitas impulsas. Erdvinis pasiskirstymas modifikuotoje srityje pagrinde priklauso nuo kiekvieno impulso sukeltos plazmos erdvinio pasiskirstymo, o šilumos difuzija beveik neturi įtakos. Tarp $100kHz$ ir $5MHz$ ar didesnių pasikartojimo dažnių, modifikuotos srities erdvinis pasiskirstymas stipriai priklauso sukauptos šilumos ir difuzijos [29, 30].

Priklausomai nuo įrašymo krypties, ar išilgai stikliuko ar skersai, gaunamas skirtingas bangolaidžio skerspjūvis, kaip principinė schema 7 paveikslėlyje. Įrašant bangolaidį išilgai mažo pasikartojimo dažnio režime su apskritiminiu Gauso pluoštu skerspjūvio dydis, modifikuotoje srityje, tiesiogiai priklauso nuo pluošto diametro:

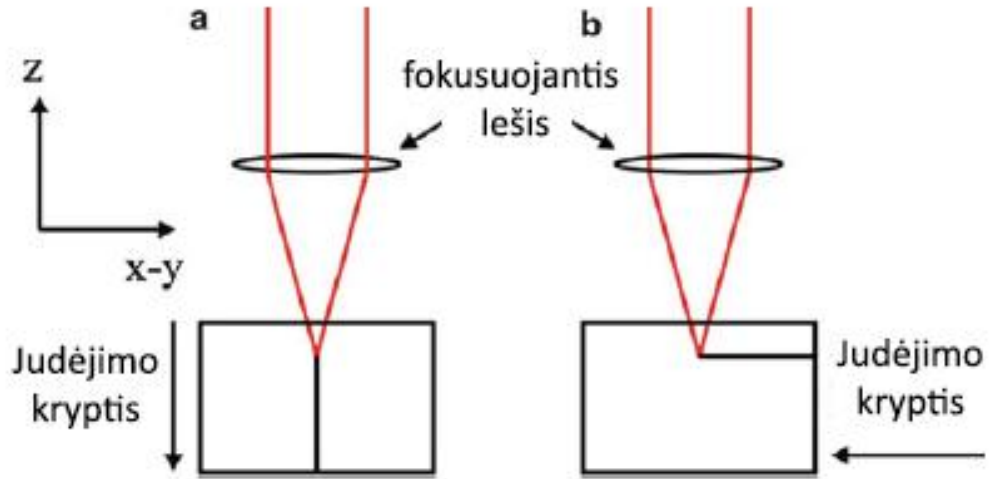
$$2w_0 = \frac{2f\lambda}{\pi w(f)} \approx \frac{2\lambda}{NA\pi}, \quad (7)$$

o įrašant skersai x ar y kryptimis

$$b = 2R = \frac{2\pi n w_0^2}{\lambda}, \quad (8)$$

čia w_0 pluošto spindulys sąsmaukoje, $w(f)$ pluošto radiusas prie lęšio, f lęšio židinio nuotolis, spinduliuotės bangos ilgis, n medžiagos lūžio rodiklis, NA lęšio skaitinė apertūra, b kolimavimo parametras, R Relėjaus ilgis fokusui.

Kaip ir galima buvo nuspėti bangolaidžiai įrašyti išilgai pasižymi apvaliu skerspjūviu, dėl lazerio pluošto simetrijos, bet bangolaidžio ilgis yra limituotas fokusuojančio lęšio darbinio atstumo, priedo susidaro sferinės aberacijos keičiantis fokusavimo gyliui bandinyje. Taip kinta bangolaidžio forma palei kanalą, tačiau yra metodų naudojant adaptyvę optiką šioms aberacijoms mažinti, bet tai daro apdirbimo schema tik sudėtingesnę ir dėl šių priežasčių skersinis įrašymas yra patrauklesnis ir dažniau naudojamas [31, 32].



7 pav. Schematinė diagrama rašant (a) išilgai ir (b) skersai

Bangolaidžiai įrašyti skersai yra labai asimetriški, išskyrus atvejus kai pluošto radiusas yra artimas $\lambda/n\pi$. Tokio dydžio modifikacijas galima sukurti naudojant objektyvus su skaitinę apertūrą artima lūžio rodikliui. Yra keletas būdų kaip galima kontroliuoti bangolaidžio skerspjūvio profilį kaip: astigmatinis pluošto formavimas [33], formavimas per plyšį [34, 35], naudojant aktyvią optiką [36], erdvinis ir laikinis pluošto fokusavimas [37].

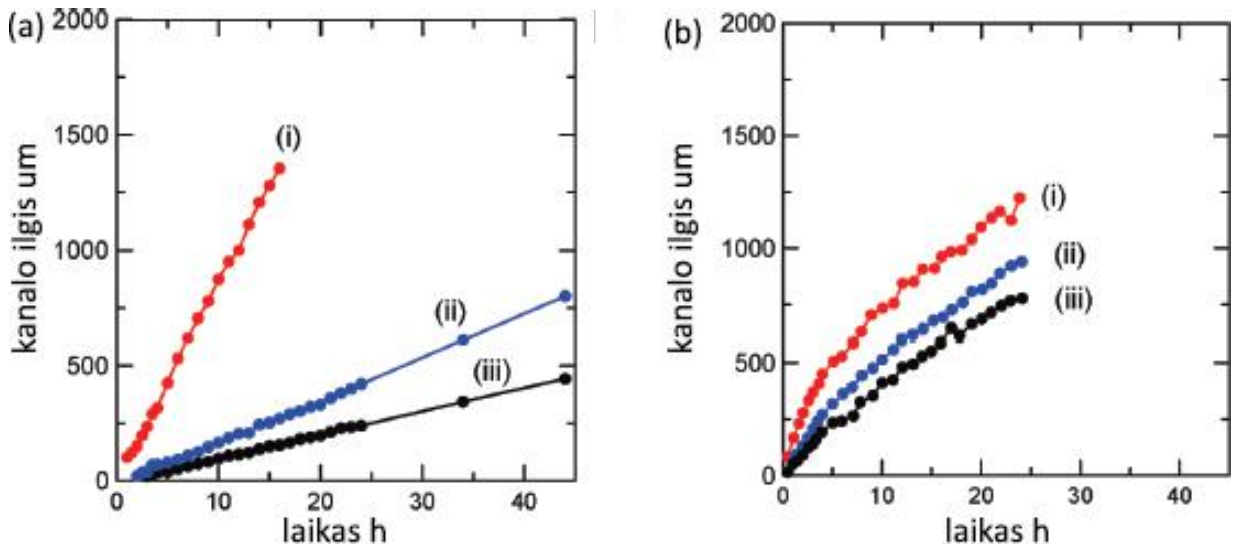
1.3 Cheminis ėsdinimas

Naudojant lazerį generuojanti femtosekundinį impulsą ir cheminį ėsdinimą, galima įvairiuose dielektrikuose suformuoti geros kokybės paviršines ar tūrines struktūras, kurios gali būti naudojamos mikrofluidikai ar integruotai mikrooptikai. Lazerinės spinduliuotės paveiktos medžiagos sritys turi didesni ėsdinimo greitį nei aplinkinė nepaveikta medžiagos dalis, dėl ko ir galima selektyviai ėsdinti paveiktas sritis.

Silikatinių stiklų skystas cheminis ėsdinimas naudojant HF rūgštį jau žinomas nuo 1771 metų [38]. Pirmuosius darbus mikrokanaalų gamyboje naudojant femtosekundinius impulsus ir cheminį ėsdinimą pristatė Y. Kondo su kolegomis [39], vėliau A. Marcinkevičius su kitais atliko tai lydytame kvarce [40]. Šie tyrimai pademonstravo šio metodo pritaikomumą, tačiau iki šiol mechanizmas lemiantis ėsdinimo spartą nėra pilnai suprastas.

Nors HF rūgštis yra geriausiai ištyrinėta, geresni rezultatai jau pasiekiami naudojant KOH šarmą. Paveikslėlyje 8 pateikti palyginimai ėsdinant HF rūgštyje kambario temperatūroje ir KOH šarme prie 80° , kaip matyti ėsdinimas KOH tirpale stipriai priklauso nuo poliarizacijos,

o HF tirpale nežymiai, ši priklausomybė pasimato prie mažesnių energijų, prie didesnių energijų skirtumas tarp kanalų gylių darosi nebeprisiklausomas nuo poliarizacijos.



8 pav. Išėsdintų kanalų ilgiai nuo laiko: (a) 10 M KOH šarme (20mL) prie 80% °C; (b) 2% HF tirpale prie kambario temperatūros. (i),(ii),(iii) atitinkamai poliarizacijos kryptis: statmena, apskritiminė, lygiagreči [41]

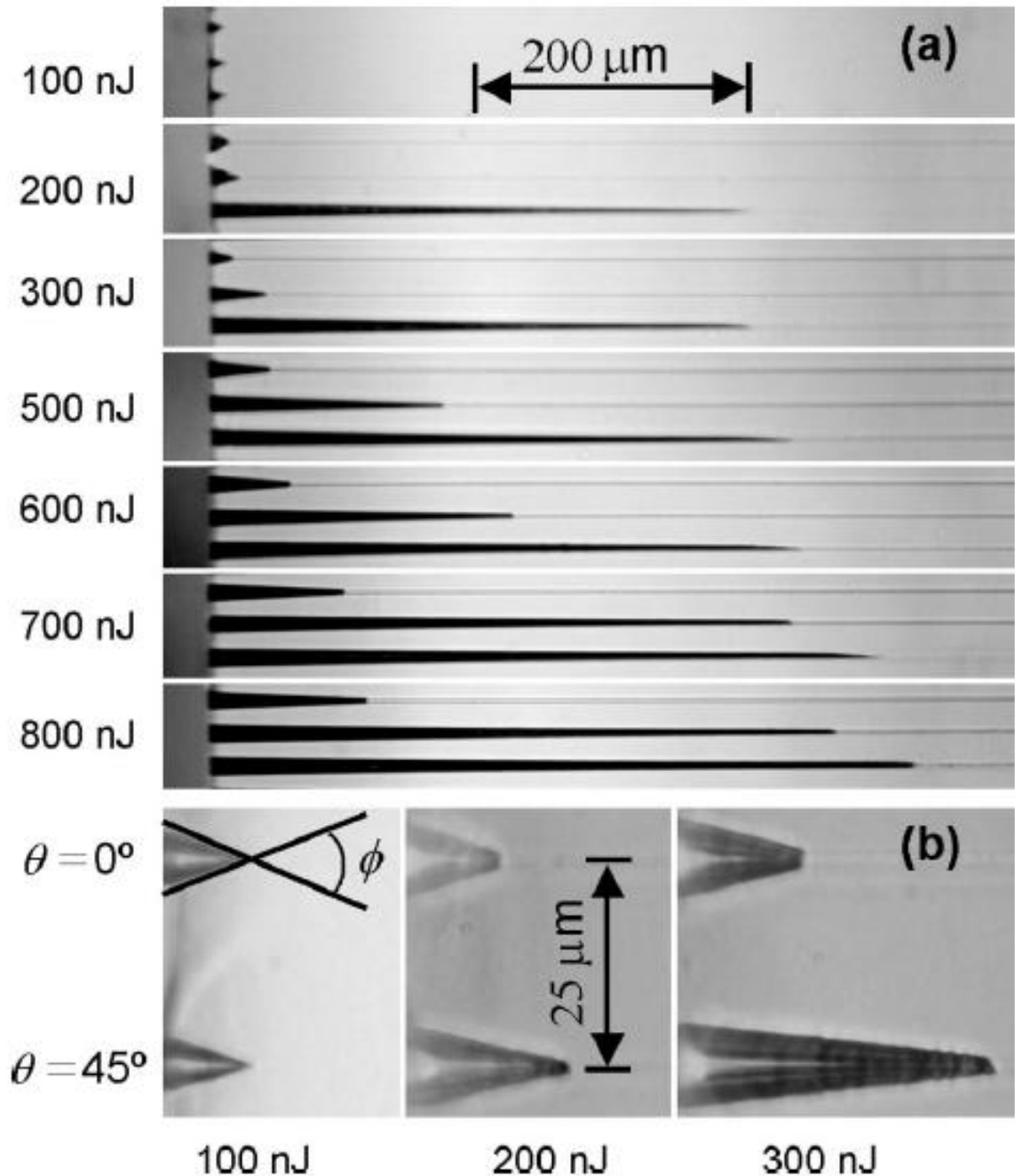
Pagrindinis medžiagos pašalinimo mechanizmas yra Si-O-Si struktūrų ardymas veikiant jas su OH⁻ ar F² jonais. Galimai ėsdinimo reaktyvumas padidėja lazerio paveiktoje srityje yra dėl sutankėjusios srities paviršinių Si-O-Si atitrūkimas dėl stipriai modifikuotos įprastos žiedinės struktūros. Kita galimybė, kad paveiktoje srityje SiO₂ modifikavimas ir SiO_x (x<2) struktūrų susidarymas, kas gali padidinti reaktyvumą su lazerinės spinduliuotės paveikta sritimi, ypatin-gai su OH⁻ jonais [42]. Murakamis su Miura parodė [43, 44], kad galimai susidaro gryno Si struktūra ar Si-Si jungtys yra sukuriamos fs lazerio paveiktose srityse silicio pagrindo stikluo-se. Miuros teigimu gryno silicio struktūros formuojasi dėl lokalizuotos aukštos temperatūros, slėgio, ir kuriamų slėginių bangų. Lazerio spinduliuotės apšviestas silicis pradeda generuoti E' centrus, kurie po laiko degraduoja į centrus su deguonies stoka prisijungiant elektronus. SiO₂ virtimas grynu Si gali būti ir sukuriamų lūžio rodiklio pokyčių stikle priežastis priedo medžia-gos sutankėjimo. Si-Si jungčių susidarymas leidžia OH⁻ jonams lengviau prisijungti. Silicio tirpimas KOH tirpale yra išreiškiamas per reakcijas:



Šios reakcijos rezultate susidaro maži vandenilio burbulai, kurie padeda pašalinti iš ka-nalų išėsdintą medžiagą ir šarmui prasiskverbti į gilesnius lygius [45].

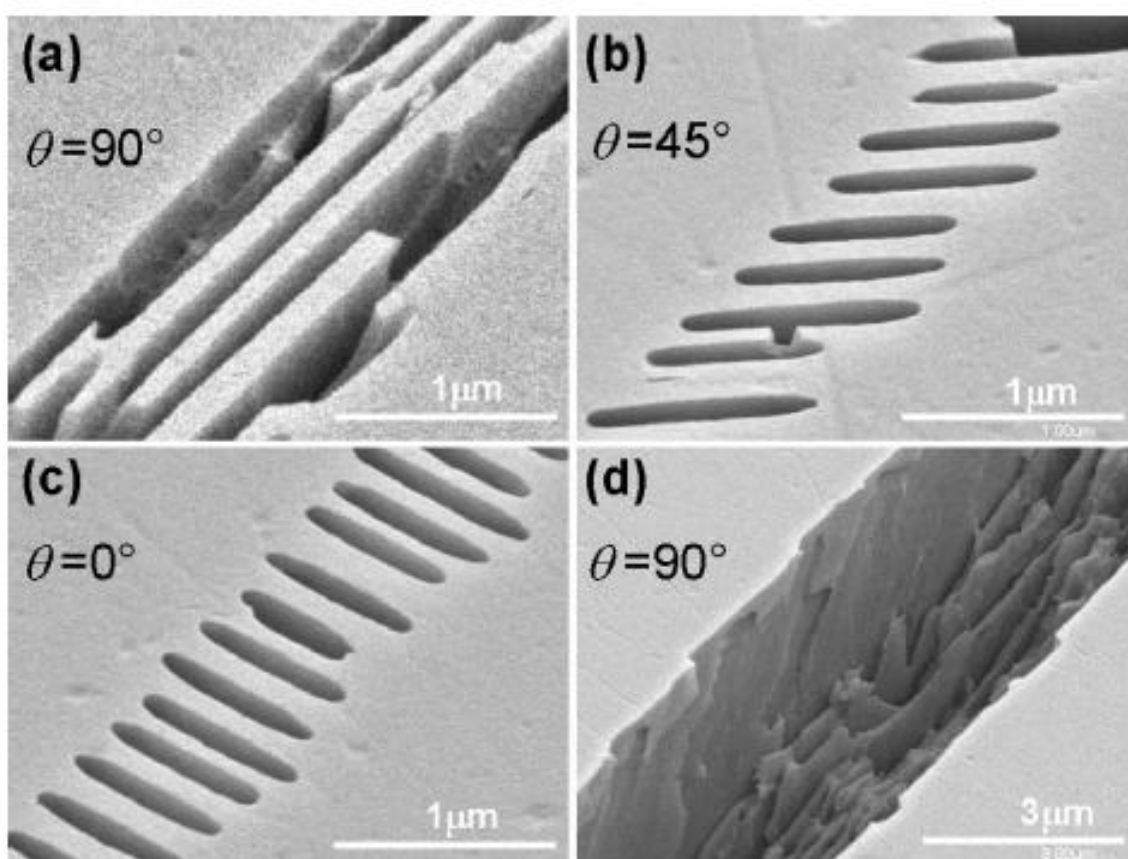
1.3.1 Poliarizacijos įtaka išdinant

Priklausomai nuo kampo θ tarp rašymo krypties ir tiesiškai poliarizuotos lazerinės spinduliuotės \mathbf{E} vektoriaus įrašytos struktūros skirtingai išdinasi. 9 paveikslėlyje pateikti išsėdinti kanalai lydytame kvarce su skirtinga impulsų energija ir kampo θ . Kanalų sienelės yra lygios su aštrių perėjimu nuo modifikuotos prie nemonifikuotos medžiagos. Prie mažos $E_p = 100\text{ nJ}$ impulsų energijos prie visų poliarizacijų modifikuotos sritys buvo nelabai veikiamos rūgštis. Prie didesnių impulso energijų išdinimo sparta didėja.



9 pav. Išsėdinti kanalai stikle po 8h 2.5% HF tirpale. Pateiktos išsėdintų kanalų priklausomybės (a) prie skirtingų impulso energijų ir kampo $\theta = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ laipsnių atitinkamai nuo viršutinio žemyn [46]

Šios skirtingus ėsdinimo selektyvumus galima paaiškinti išanalizavus SEM nuotraukas išėsdintų struktūrų. Prie mažos energijos $50nJ < E_p < 100nJ$ modifikacijos yra vienodos nepriklausomai nuo poliarizacijos. Prie didesnių energijų pasimato gardelinė nanostruktūra, kuri priklauso nuo poliarizacijos. Šios struktūros pateiktos 10 paveikslėlyje, kur matyti palei rašymo kryptį sudarytas kelių nm storio struktūras. Gardelės formos pasiskirstymas visada orientuotas statmenai lazerinės spinduliuotės elektriniam vektoriui ir gali būti sukamas. Šių struktūrų susiformavimo priežastis buvo paaiškinta 1.1.2 skyrelyje [20]. Gardelinėje struktūroje modifikacijos įrašytos statmenai rašymo kryptčiai 10 pav. (c), rūgštis pasiekia besikeičiančia lazerinės spinduliuotės modifikuotą ir nemonifikuotas sritis, kas sumažina bendrą ėsdinimo spartą ir rūgštis sunkiau pasiekia gilesnius sluoksnius. Gardelių orientuotų rašymo kryptimi 10 pav. (a) bendra ėsdinimo sparta yra didesnė ir rūgštis skverbėsi toli ir be stabdžių. Didinant impulsų energiją periodinės gardelinės struktūros yra sunaikinamos 10 (d) ir ėsdinimo spartos priklausomybė nuo poliarizacijos stipriai sumažėja [46].

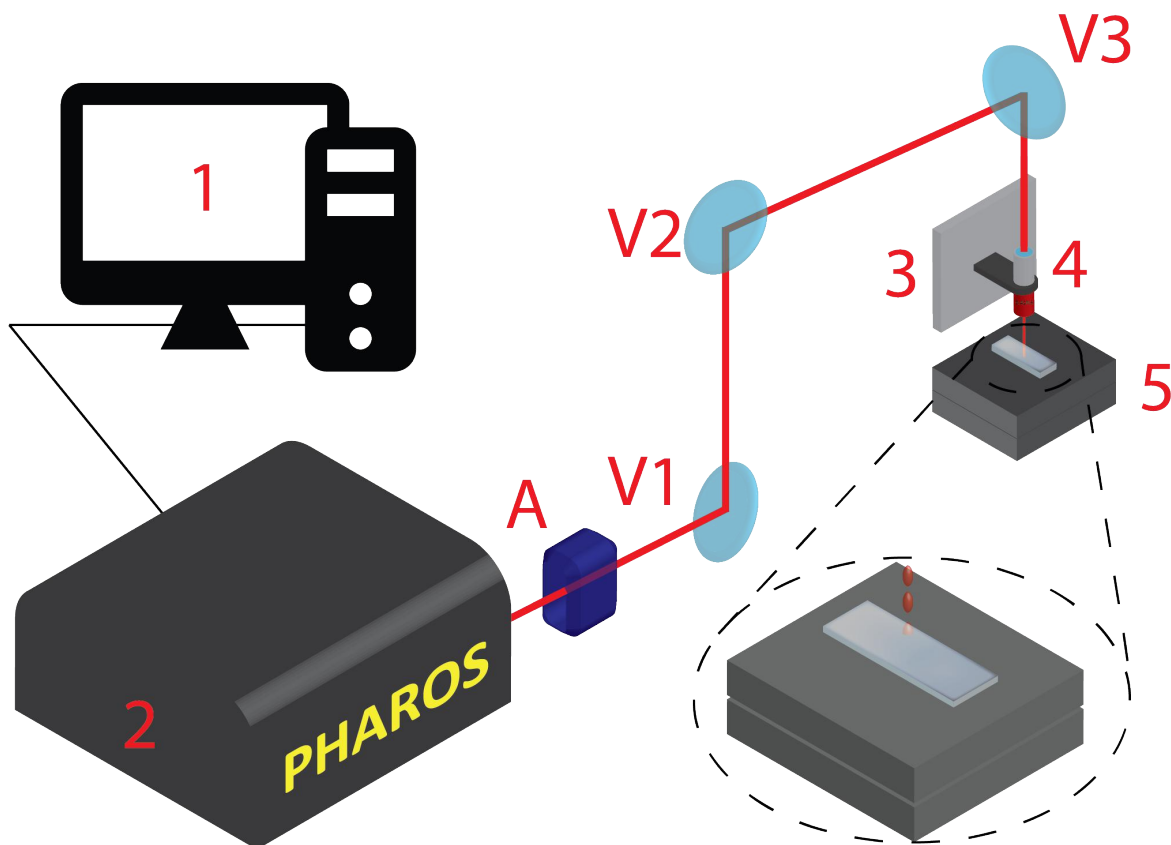


10 pav. (a)-(c) SEM nuotraukos nanostruktūrų suformuotų palei rašymo kryptį prie skirtingų poliarizacijų, impulso energija $E_p = 300nJ$, (d) $E_p = 900nJ$. Struktūros suformuotos po 20 min ėsdinimo 0,5% HF tirpale [46]

2 Eksperimentinė metodika

2.1 Tiesioginio lazerinio rašymo sistema

Šiame darbe pateikti darinių pavydžiai buvo įrašyti naudojant Vilniaus universiteto Lazerinių tyrimų centro Mikro ir makro apdirbimo laboratorijoje esančią mikroapdirbimo sistemą. Jos supaprastinta principinė schema pateikta pav.11.



11 pav. Principinė mikrokanaľų rašymo schema. 1- kompiuteri su programine valdymo įranga, 2- Pharos lazeris kuris generuoja 260 fs trukmės impulsus, 3- Z ašies pozicionavimo sistema, 4- 0,42NA fokusuojantis objektyvas, 5- X ir Y pozicionavimo sistemos su padėtu bandiniu, A- atenuatorius, V- veidrodžiai

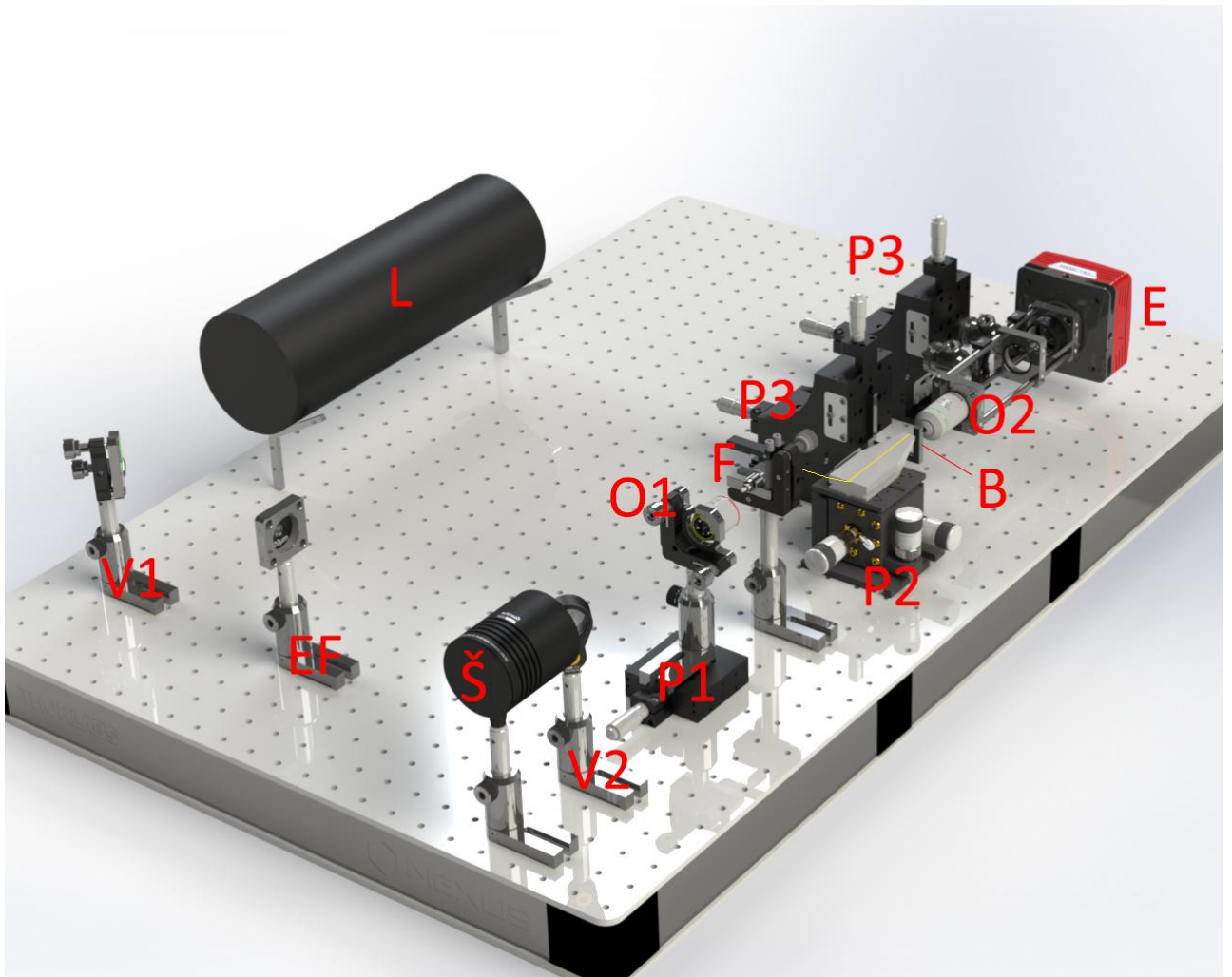
Pateiktos sistemos šviesos šaltinis yra femtosekundinis lazeris „Pharos“ (*Šviesos konversija*, Lietuva), generuojantis 260 fs trukmės impulsus 25 kHz - 610 kHz, 1030 nm bangos ilgio spinduliuotę iki 20 W. Spinduliuotės galia, yra reguliuojama galios keitikliu, sudarytu iš poliarizatoriaus ir $\lambda/2$ plokštelės, patalpintos kompiuterine įranga valdomame atenuatoriuje. Veidrodžiais pluoštas yra nuvedamas iki objektyvo. Pluoštas yra fokusuojamas 0,42NA objektyvu su $f = 200$ mm židinio nuotoliu (*50X Mitutoyo Plan Apo NIR Infinity Corrected Objective*, Japonija). Sistemos valdymas yra automatizuotas ir apdirbimui naudojama SCA (Workshop of Photonics) programinė įranga. Su šia programine įranga taip pat buvo aprašomos komandos, pagal kurias yra vykdoma bangolaidžių ir kiaurymių gamyba.

Bandinys naudojant ABL 1500WB pozicionavimo stalus yra judinamas X ir Y kryptimis ir objektyvas yra judinamas Z kryptimi (*Aerotech*, JAV). Nustačius objektyvo padėti taip, kad

židiny s būtų stiklo viduje, jo pozicija nebekeičiama rašant bangolaidžius, o apdirbant horizontalioje plokštumoje, translacijos stalai su bandiniu gali judėti iki 2000 mm/s , bet darbe buvo naudojami greičiai iki 100 mm/s .

2.2 Matavimo sistema

Pro bangolaidžius prarastos šviesos pralaidumo ir spektro matavimai buvo atlikti su schema pateikta 12 pav.



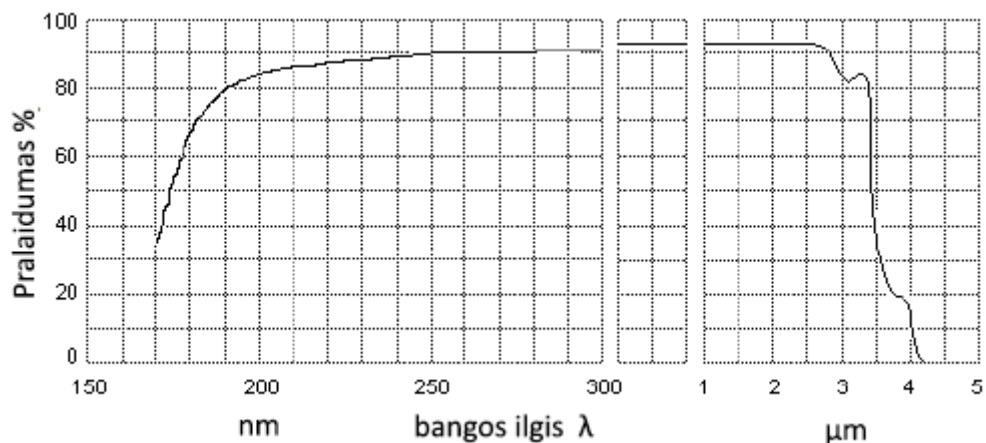
12 pav. Matavimų stendas. L- HeNe lazeris, V1, V2 veidrodžiai, EF- erdvinis filtras, Š- halogeno lempa, P1- linijinis pozicionavimo staliukas, P2- trijų judėjimo ašių pozicionavimo staliukas šviesolaidžiui, P3- trijų ašių pozicionavimo staliukai, bandiniui ir atvaizdavimui, O1- objektyvas fokusuojantis pluoštą į šviesolaidį, O2- atvaizdavimo objektyvas, E- CCD kamera arba spektrometras

Šviesos pralaidumas buvo matuojamas naudojant HeNe lazerį. Lazerio pluoštas yra nuvedamas veidrodžiais iki objektyvo O1, pluoštas pereina erdvinį filtrą. O1 objektyvas surenka pluoštą į šviesolaidį F, kuris nuveda šviesą iki bandinio, nustačius padėtį bandinio taip, kad šviesa eitų per jame suformuotą bangolaidį yra atvaizduojama objektyvmo O2 ant CCD kameros E mazge. Spektro matavimams veidrodis V2 nuimamas ir vietoj CCD kameros yra naudojamas spektrometras, į kurį šviesa yra nuvedama per šviesolaidį.

2.3 Naudotos medžiagos

Šiame darbe bangolaidžiai ir kiaurymės buvo įrašytos lydytame kvarce. Silicio oksidas arba kvarcas (SiO_2) turi daugybę įmanomų formų, iš kurių trys pagrindinės kristalinės yra: kvarcas, tridimitas, kristobalitas. Silicio oksidas gali egzistuoti ir nekristalinėje būsenoje, kaip kvarco stiklas ar stikliškasis silicio oksidas, taip pat vadinamas amorfiniu kvarcu. SiO_2 skirstomas į keturis pagrindinius komerciškai parduodamo tipo stiklus: 1 tipas yra išgaunamas vakuume arba inertinėse dujose elektriškai lydant natūralų kvarcą, 2 tipas yra gaunamas liepsna lydant kristalinio kvarco miltelius, 3 tipas yra sintetinis ir gaminamas hidrolizuojant SiCl_4 jį purškiant į OH liepsną, 4 tipas yra gaunamas panašiu būdu - iš SiCl_4 plazmos liepsna, kurioje nėra vandens garų [48].

Dėl gerų lydyto kvarco fizikinių, cheminių ir optinių savybių lydytas kvarcas yra plačiai naudojamas. Iš jo gaminami laboratoriniai stiklo prietaisai, lęšiai, veidrodžių padėklai, šviesolaidžiai, mikro ir optoelektronikoje naudojamas kaip dielektrinis izoliatorius, bangolaidis, kaukė litografijai ir terminio apsaugojimo sistemos.

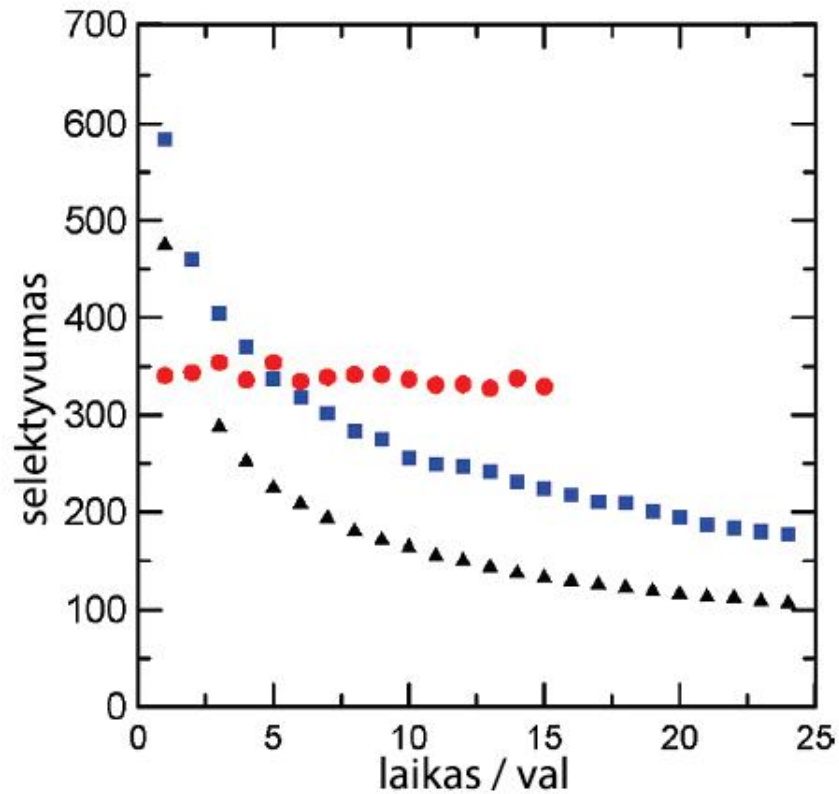


13 pav. Lydyto kvarco pralaidumo spektras [48]

1 lentelė: Lydyto kvarco parametrai [49]

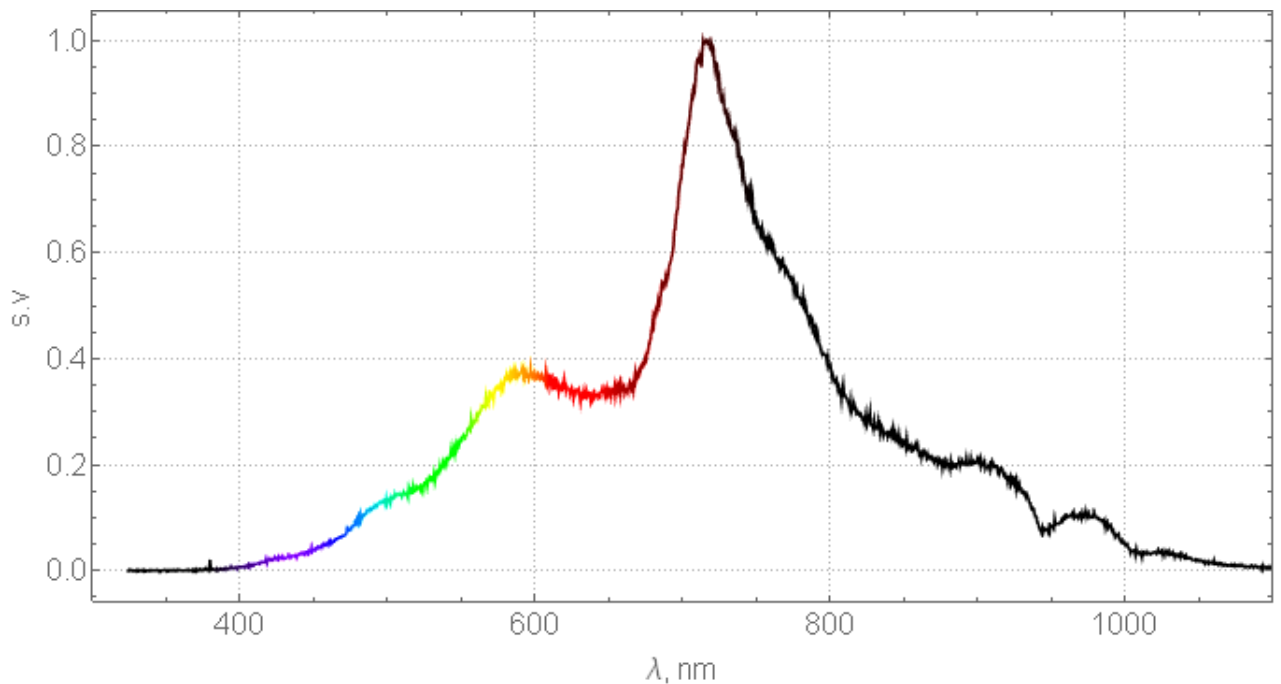
| Savybė | Reikšmė |
|----------------------------------|---|
| Tankis | 2203 kg/m^3 |
| Lūžio rodiklis | 1,4585 (587,6 nm) |
| Šiluminis laidumas | $1,3 \text{ W/mK}$ |
| Stiklo minkštėjimo temperatūra | $1665 \text{ }^\circ\text{C}$ |
| Jungo modulis | 71,7 GPa |
| Kietumas | 5,3 |
| Pramušimo slenkstis (paviršiuje) | $3,6 \text{ J/cm}^2, \text{ prie } 1030\text{nm}, 500\text{fs}$ |

Šiame darbe cheminiam išsodinimui buvo naudotas 5% koncentracijos KOH tirpalas. 2009 metais S. Kiyama su bendraautoriais pademonstravo, kad įkaitintas KOH tirpalas turi gerą selektyvumą išsodinant porėtą kvarcą, kuris išsilaiko gan pastovus po keletos valandų, kaip matyti pav. 14.



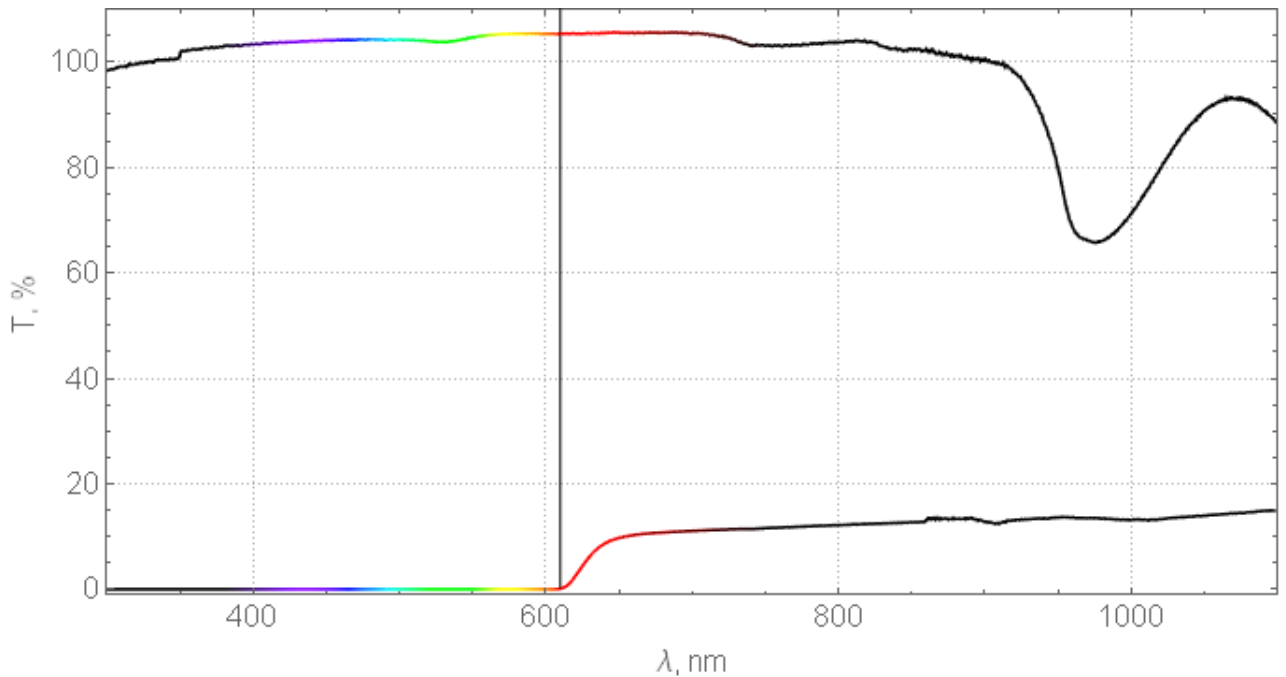
14 pav. Ėsdinimo selektyvumas kaip funkcija nuo ėsdinimo laiko su 10 M KOH tirpalu prie 80 °C (skrituliai), 2,0% HF tirpalas kambario temperatūroje (kvadratai), 0,5% HF tirpalas kambario temperatūroje (trikampiai). Selektivityumas apibrėžiamas kaip ėsdinimo greitis lyginant spinduliuote paveikta sritį su nepaveikta sritimi [41]

Matuojant spektro pralaidumą naudojamas šviesos šaltinis buvo halogeno lempa, jos spinduliavimo spektras pateiktas 15 pav., spektras išmatuotas naudojant tą patį spektrometrą.



15 pav. Halogeno lempos spinduliuojamas spektras

Spektrai buvo matuojami kai išsėdintose kiaurymėse nėra nieko įlašinta, kai jose yra vandens ir rodamino 6G. 16 pav. pateikti vandens ir 3,3% koncentracijos rodamino 6G pralaidumo spektrai išmatuoti lydyto kvarco kiūvetėje naudojant Shimadzu 230V CE (*Japonija*) spektrofotometrą.



16 pav. Vandens (*viršutinis*) ir 3,3% koncentracijos rodamino 6G (*apatinis*) pralaidumo spektrai

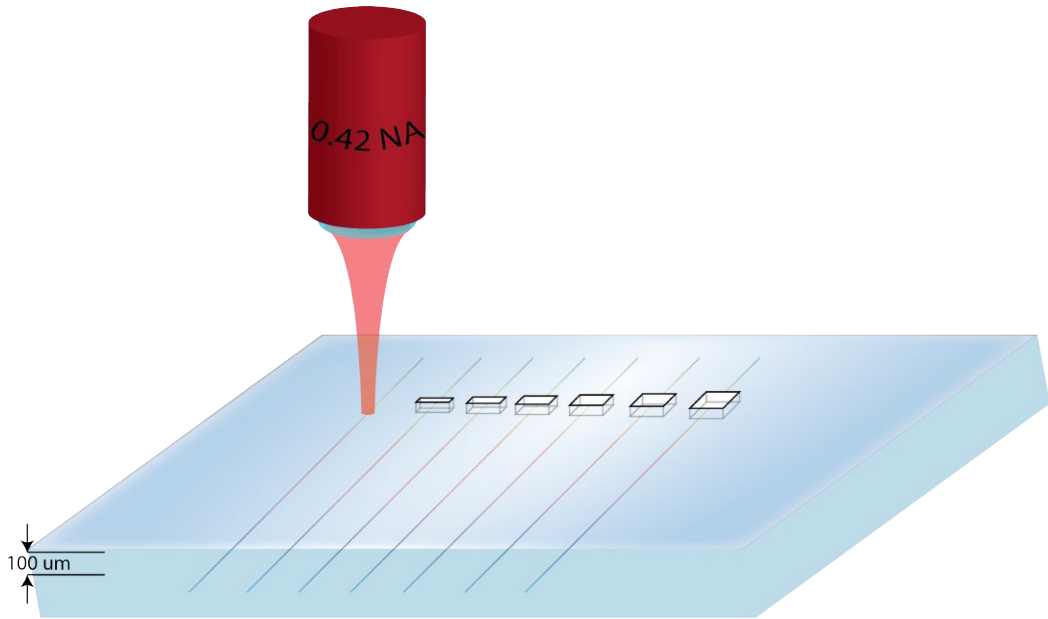
2.4 Eksperimento sąlygų ir bandinių charakterizavimas

Eksperimentų metu bandinys buvo apžiūrimas po bangolaidžių įrašymo, tarpų įrašymo ir išsėdinimo, po poliravimo. Ėsdinimas buvo atliktas palaikius 5h bandinį 5% KOH tirpale prie 80 °C, bandinys buvo dedamas į ultragarsinę vonelę, kad šios išsėdintos struktūros iškristu, po to bandinio kraštai buvo nupoliruoti.

Stikluose apie 100 μm gylyje buvo formuojami tiesūs, per visą jo plotį, antra harmoniką įrašyti bangolaidžiai. Naudojant pirma harmoniką įrašyti skirtingų pločių kiaurymės, kurios vėliau yra išsėdinamos KOH šarme. Įrašymo supaprastinta schema pateikta pav. 17. Naudotas objektyvas sufokusuoja pluoštą iki apie 1,5 μm. Stikle įrašytos skirtingo storio kiaurymės, kurių pločiai po ėsdinimo yra: 16,31; 24,5; 44,85; 65,24; 104,7; 200 mikrometrų.

Bandinys su įrašytais bangolaidžiais naudojant optinį mikroskopą (*Olympus BX51*) apžiūrimas po kiekvienos stadijos.

Įrašytų bangolaidžių sudarytas lūžio rodiklio pokytis nebuvo išmatuotas, bet pagal teoriją jis yra apie $\Delta n \approx 0.001$ eilės [50]

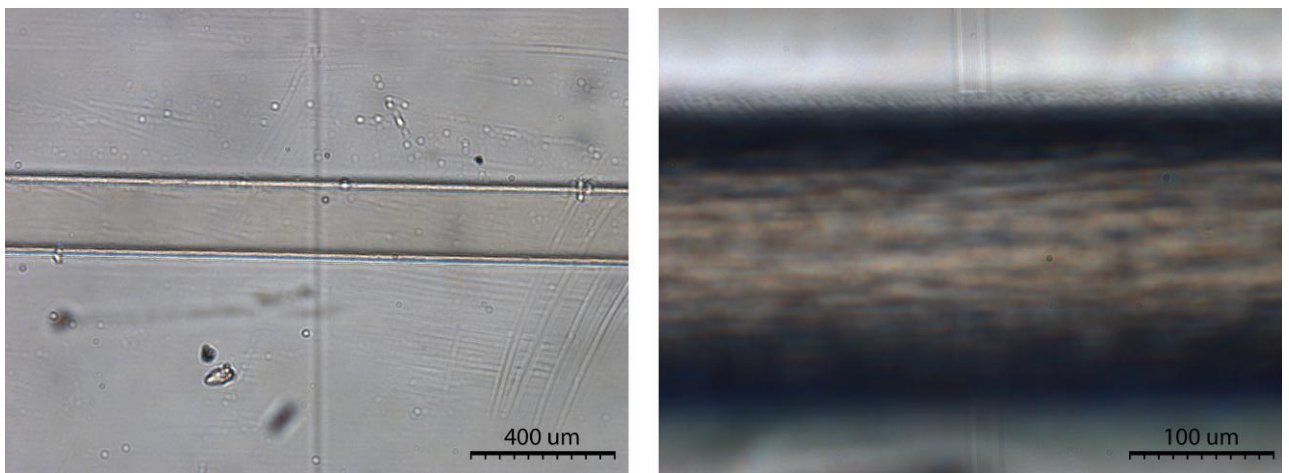


17 pav. Bangolaidžių ir tarpų rašymo stikle supaprastinta schema

3 Rezultatai ir jų aptarimas

3.1 Bangolaidžių, tarpų įrašymas

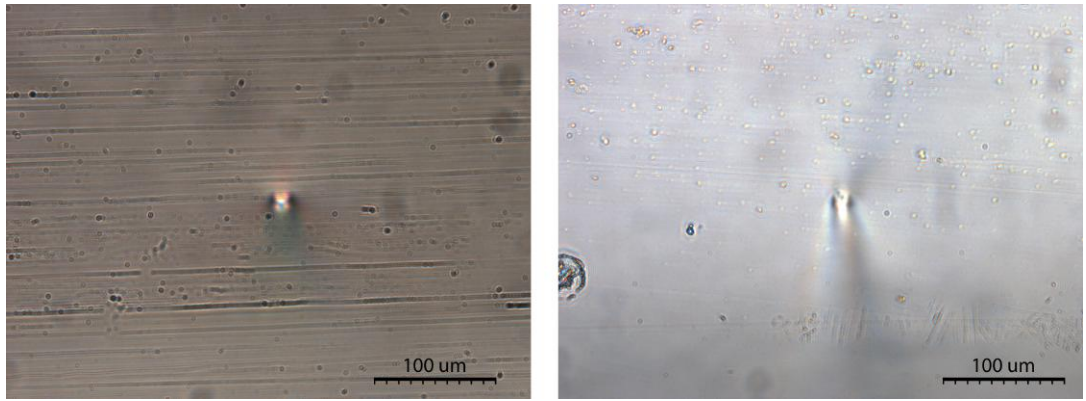
Bangolaidžiai naudojant įrašymo schema 11 pav. buvo įrašyti apie 100 μm naudojant lazerio antrą harmoniką su impulsų energija $E_p = 100\text{nJ}$ ir pasikartojimo dažniu $f = 600\text{kHz}$. Impulsų energijos pakanka tik sukelti lūžio rodiklio pokytį. Naudojant lazerio pirmą harmoniką ir $E_p = 200\text{nJ}$, $f = 100\text{kHz}$ lazerio parametrus buvo įrašyti skirtingų pločių kiaurymės, suformuotų bangolaidžių takeliuose.



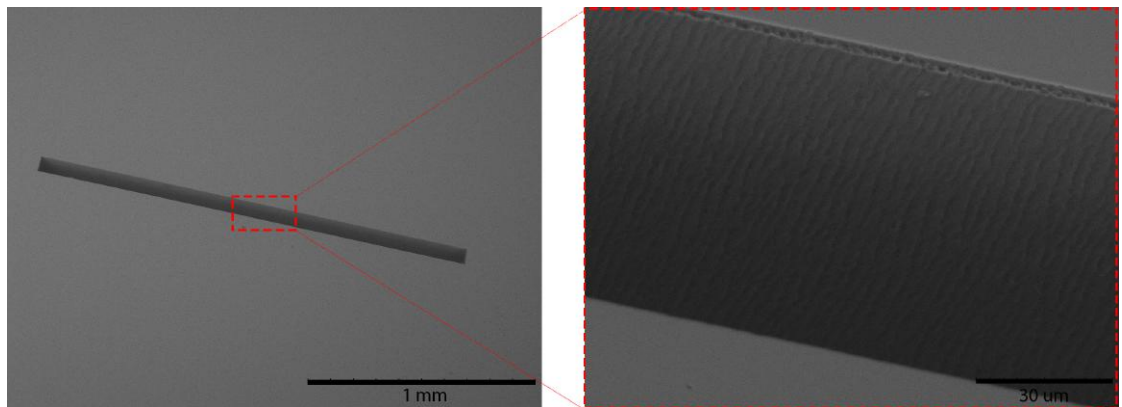
18 pav. 200 μm storio kanalas prieš išdininimą (kairėje) ir po (dešinėje)

Paveikslėliuose 18 - 20 pateiktos suformuoto 200 μm pločio kiaurymės su bangolaidžiu, išėjimo, skenuojančio elektronų mikroskopo nuotraukos.

Iš 20 pav. matyti, kad išdintų kanalų kraštai taip pat sudaro tam tikra paviršiaus šiurkštumą, kas prisideda prie bendrų nuostolių. Įrašytų bangolaidžių forma yra maždaug 10 μm X 10 μm stačiakampis, jie įrašyti keliomis lygiagrečiomis linijomis.

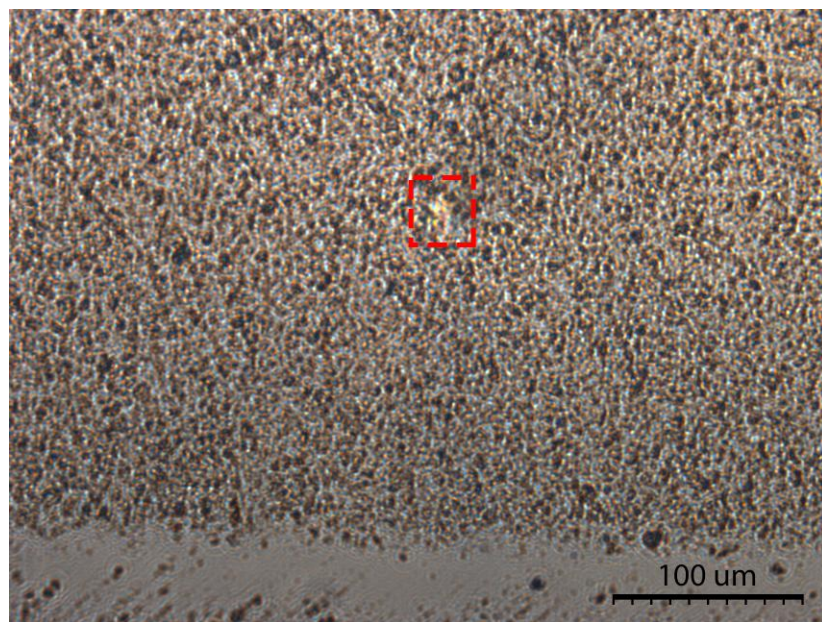


19 pav. Bangolaidžio išėjimas su 200 μm storio kiauryme prieš ėsdinimą (kairėje) ir po su poliravimu (dešinėje)



20 pav. 200 μm storio kiaurymės SEM nuotraukos

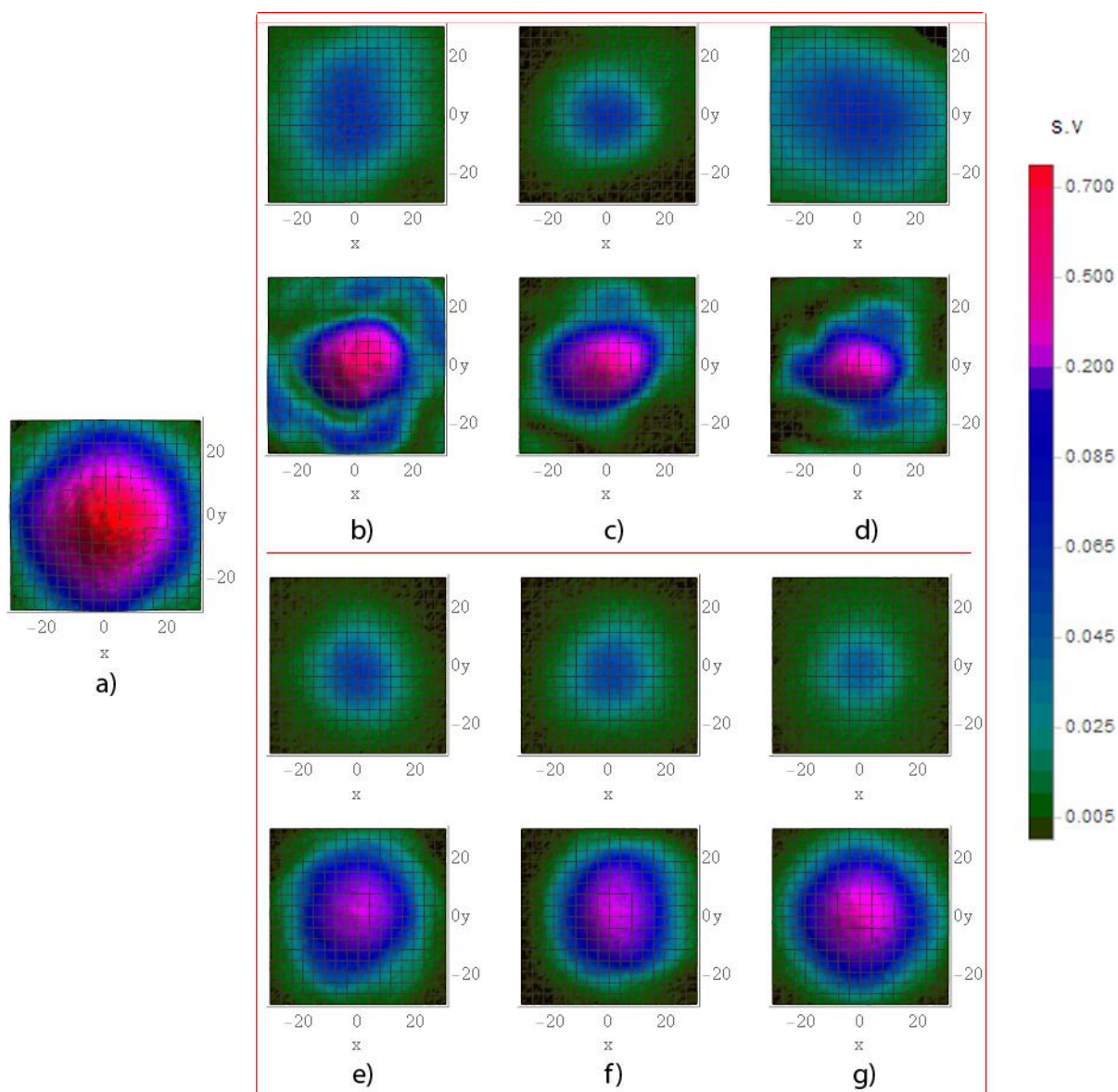
Kaip galima matyti 21 pav. po poliravimo trumpesnių kiaurymių kraštai buvo šiurkštus, su pažeidimais, kas galėjo turėti įtakos tolimesniems matavimams. Einant link platesnių kiaurymių kraštai buvo nupoliruoti tolygiau, kaip ?? pav. dešinėje.



21 pav. Bangolaidžio su 16,31 μm storio kiauryme išėjimas

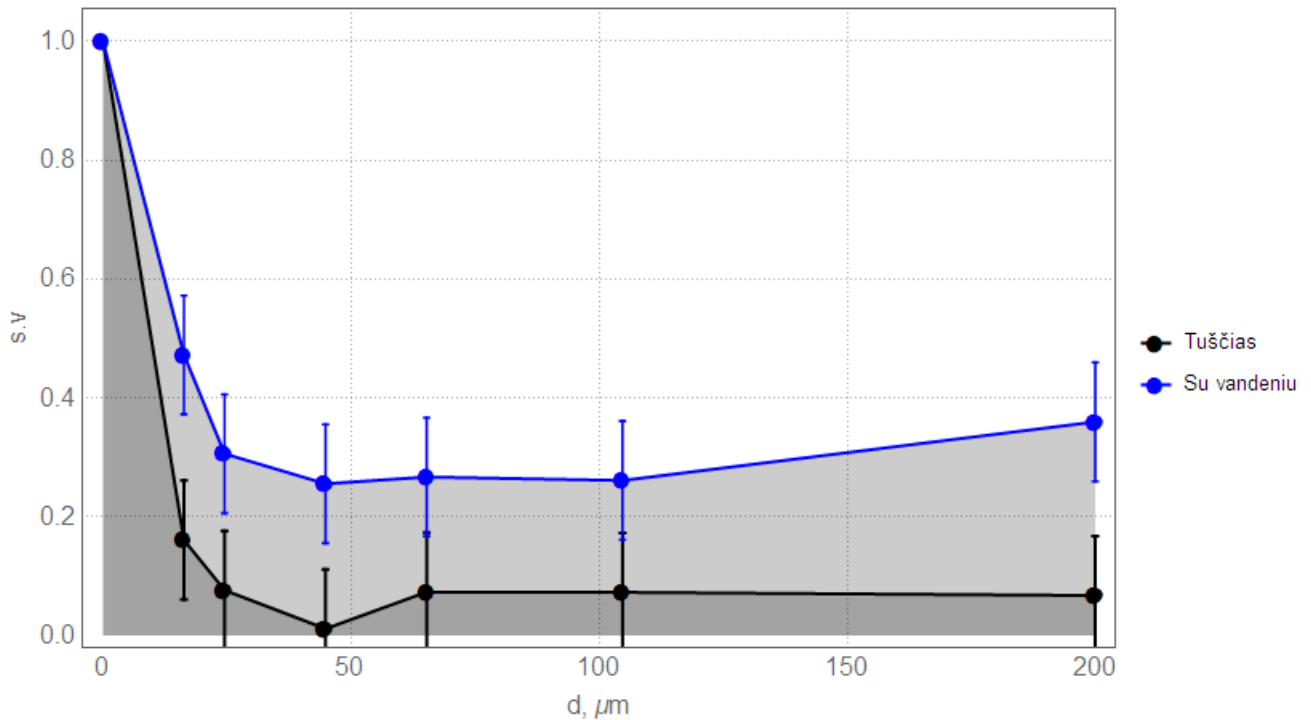
3.2 Pralaidumo matavimas

Pralaidumui matuoti buvo naudojama 12 pav. esanti schema (be halogeno lempos) atvaizduojant HeNe generuojama spinduliuotę bangolaidyje pluošto profilį ant CCD kameros. Matavimai atlikti kai kiaurymės yra tuščios ir pripildytos vandens. Išmatuoti profiliai pateikti 22 paveikslėlyje. Lyginant praleistą šviesą pro bangolaidį be kiaurymės su kiaurymėmis pripildytomis vandens, intensyvumų santykis yra apie 2-3 kartus, lyginant kiaurymių su vandeniu ir be vandens intensyvumų santykis yra apie 3-6 kartus. Kadangi vandens lūžio rodiklis yra artimesnis lydytam kvarcui nei oras, bangolaidžiai su kiaurymėmis užpildytomis skysčio gali praleisti daugiau šviesos. Ant CCD kameros surinktos šviesos profilis, primena Gauso pasiskirstymą, bet tas labiau tiesa prie storesnių kiaurumių, trumpesnių kiaurymių atveju profiliai yra labiau išdarkyti, taip galėjo nutikti dėl šiurkščių kraštų kaip 21 pav. ir priedo išėsdinto kanalo kraštų netolygumo.



22 pav. Pluošto profiliai ant CCD kameros, kai šviesa surenkama iš bangolaidžių: a)- be tarpo, b) $24,50 \mu\text{m}$ tarpo, c)- $44,85 \mu\text{m}$ tarpo, d)- $65,42 \mu\text{m}$ tarpo, e)- $104,7 \mu\text{m}$ tarpo, f) - $200 \mu\text{m}$ tarpo. b)-f) viršutiniai profiliai yra kai kiaurymės tuščios, apatiniai kai pripildytos vandens

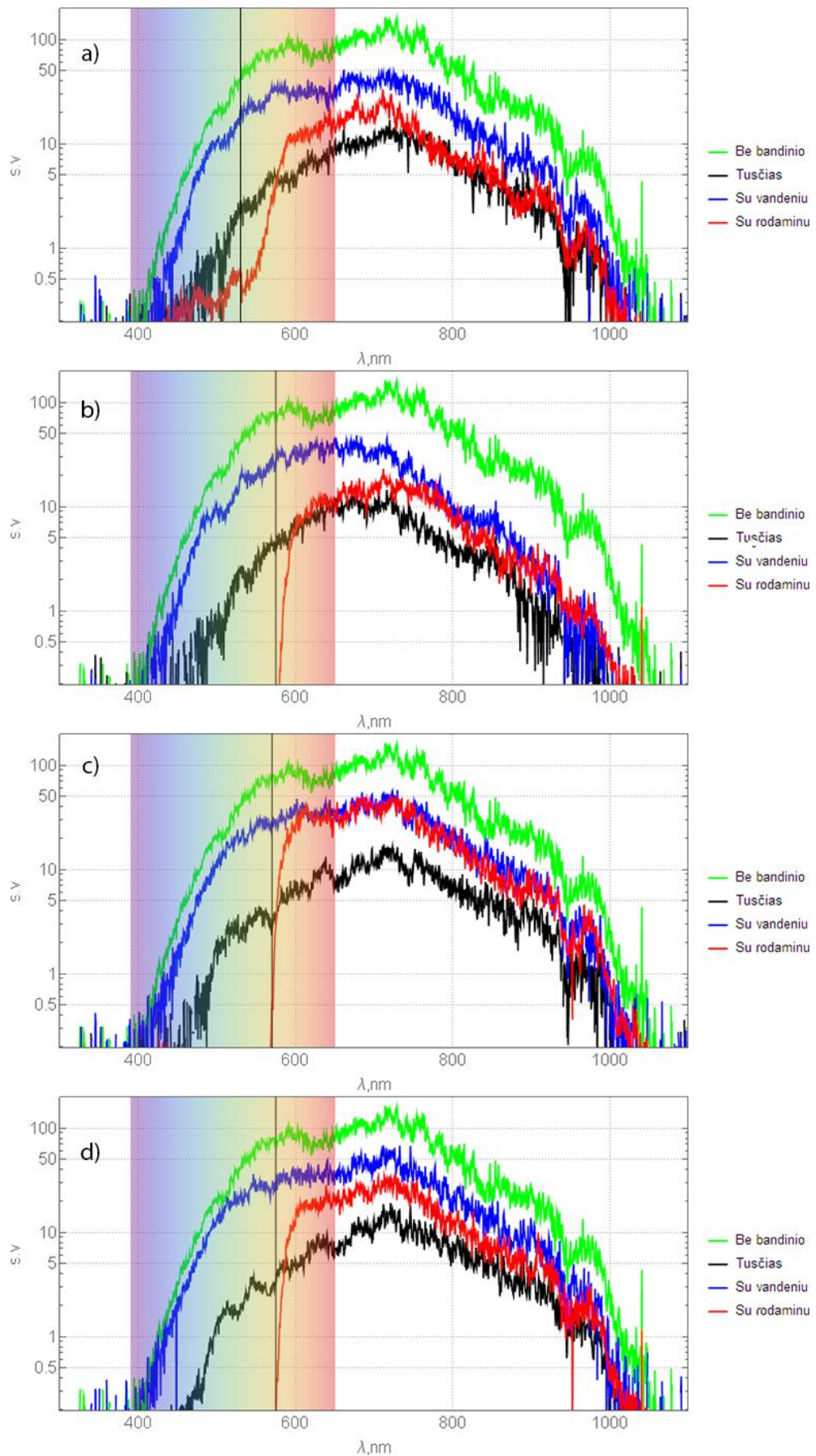
23 grafike pateikta sunormuota CCD kameros registruojamų fotonų skaičiaus ploto vienetui priklausomybė nuo kiaurymių pločio su vandeniu ir be. Galima pastebėti, kad didinant tarpą, praleistos šviesos kiekis yra ganėtinai pastovus, o siauresnių tarpų atveju staigiai kyla mažėjant kiaurymės pločiui.



23 pav. Energijos tankio priklausomybė nuo kiaurymių pločio su vandeniu ir be

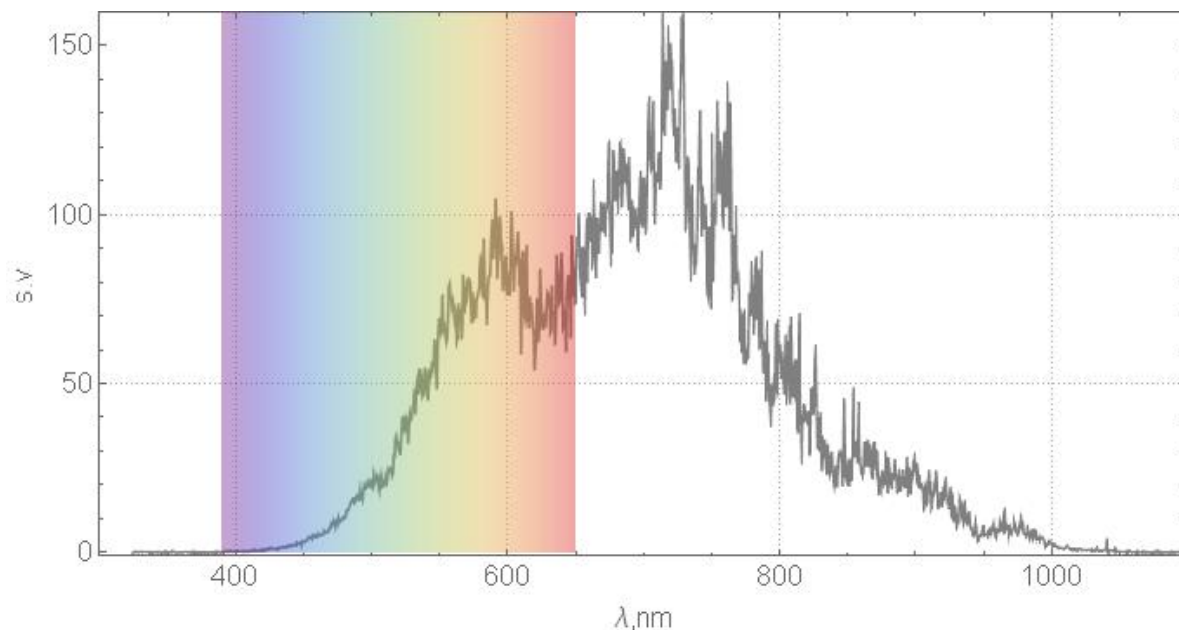
3.3 Spektro matavimas

Spektrui matuoti buvo naudojama ta pati matavimo schema tiktais be HeNe lazerio ir buvo pastatyta halogeno lempa, nuimtas veidrodis V2, vietoje CCD kameros buvo pastatytas šviesolaidis, kuris surenka šviesą į spektrometrą. 24 pav pateikti išmatuoti spektrai kai tarpuose yra vandens, rodamino 6G, oras. Rodamino tirpalas sudarytas jo miltelius sumaišius su etanoliu 1:30 santykiu. Išmatuotame rodamino 6G pralaidumo spektre 16 pav. matyti, kad jis sugeria iki 610 nm, o išmatuotose spektruose sugeria iki 550-575 nm. Viena iš galimų priežasčių kodėl spektrometeras užregistravo šviesą yra tai, kad kiaurymėse šviesa praeina trumpesnę kelią rodamine, nei matuojant pralaidumą spektrofotometre, bet tai nepaaiškina kodėl šios šviesos yra tiek daug, panašiai kai yra kiaurymėje vandens. Ktias galimas aiškinimas yra tai, kad į bandinį įeinanti šviesa iš šviesolaidžio gali atsispindėdama nuo bandinio viršutinio ir apatinio paviršiaus išeiti pro jo kraštą ir būti surinkta objektyvo į spektrometro šviesolaidį ir taip yra užregistruojama kaip signalas, šie atspindžiai gali paaiškinti ir priežastį kodėl išmatuotų spektrų pikų padėtys taip kinta - skirtingi bangos ilgiai yra daugiau ar mažiau surenkami. Papildomą sklaidą sudaro ir nelygiai nupoliruoti kraštai ir išsėdintų kiaurymių sienelės. Visiško vidaus atspindžio priedelis labai tikėtinas, nes E padėtyje 12 pav. žiūrint į bandinį statmenai matomas jo difrakcinis vaizdas.



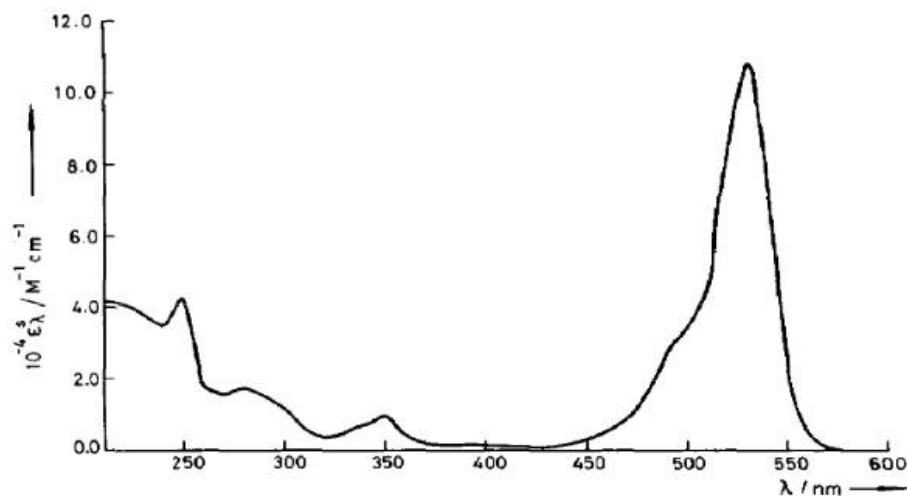
24 pav. Išmatuoti spektrai praleidus šviesą pro šviesolaidį be bandinio, bangolaidžius bandinyje, kai tarpuose yra vandens, rodamino 6G, tuštuma. Spektrai kai tarpų pločiai: a)- 24,5 μm , b)- 44,85 μm , c)- 65,24 μm , d)- 104 μm

Priežastis kodėl signalas toks triukšmingas yra turbūt dėl vienamodžio šviesolaidžio F 12 pav., pralaidumo spektras iš jo pateiktas 25 pav. priedo didelia dalis šviesos išeidavo pro šviesolaidžio kraštus (netenkinama visiško vidaus atspindžio sąlyga), bet iki galo priežastis, kodėl signalas toksai triukšmingas, nėra aiški. Taip pat pikų padėtys labai priklauso nuo įvedamos šviesos padėties, kampo į bangolaidį.



25 pav. Išmatuotas spektras vienamodžio šviesolaidžio (12 pav. F) išėjime

Mūsų spektrofotometru išmatuotas rodamino 6G pralaidumo spektras skiriasi nuo verčių, kurias galima rasti literatūroje, kitų straipsniuose. 26 pav. pateikta kitų mokslininkų išmatuotas rodamino 6G sugerties spektras, matyti, kad jis pagrįdė sugeria ties 530 nm (priklauso nuo koncentracijos) ir didžiąją dalį praleidžia, kas labiau atitinka mūsų spektrometru išmatuotus spektrus.



26 pav. Rodamino 6G pagrindinės būsenos sugerties spektras [51]

4 Diskusija

Šio darbo rezultatai rodo, jog lydytame kvarce nesunkiai galima sukurti optofluidines struktūras, varijuojant tarpų pločius, galima gauti ganėtinai panašius pralaidumus, kas labai tinka tyrinėjant įvairaus dydžio ląsteles.

Tiesiogiai lyginti pralaidumo matavimus, gan sunku, nes plonesnių išėsdintų tarpų kraštai buvo šiurkštūs po poliravimo, bet per ploniausią nepaisant 10% didesnių nuostolių vis tiek surenkama daugiausiai šviesos. Profiliai gaunasi ganėtinai Gauso formos ypatingai platesnių tarpų atveju. Didesni tarpai praleidžia mažiau šviesos, apie 1,3-2 kartus, lyginant su plonesniais tarpais. Tarpuose, 25-200 μm platumo, praleidžiamos šviesos kiekis yra beveik konstanta, kas irgi yra gerai norint tirti skirtingo dydžio ląsteles.

Spektro matavimuose išeinanti šviesa yra gan triukšminga dėl vienamodžio šviesolaidžio, bet priežastis nėra iki galo aiški kodėl. Spektrofotometru išmatuotas rodamino 6G pralaidumo spektras rodo kad jis pilnai sugeria nuo UV iki 610 μm , bet gautuose spektruose pravedus šviesa pro bangolaidį kai jame yra rodamino 6G šviesa pilnai yra sugeriamas iki 550-575 μm , kas geriau atitinka literatūroje aptinkamas vertes. Spektro pikai labai priklauso nuo įvedamos šviesos kampo, pozicijos ir galimas paaiškinamas tai, kad dalis šviesos įeina į bandinio stikliuką pro kraštą ir išeina pro kitą per visišką vidaus atspindį nuo viršutinio ir apatinio stikliuko paviršiaus po to yra sufokusuojama atvaizduojančio objektyvo į šviesolaidį taip tam tikros spektrinės komponentės išauga. Taip pat padidinus kiaurymių tarpą 2 kartus galima tikėtis, kad sugertos šviesos kiekis padidės e^2 karto, bet išmatuotose spektruose šios priklausomybės nesimato, lyginant su tuščiu tarpu, nes vėlgi pagal literatūroje pateikta rodamino 6G sugerties spektrą, jis pagrinde sugeria ties 530 nm, tai šioje srityje -90 iki $+20$ nm praėjusi šviesa yra beveik 100% sugeriamas su rodaminu 6G kelių mikrometrų ilgyje. Praeitios šviesos kiekis rodamino 6G ir etanolio tirpale padidėja, nes lūžio rodiklis yra didesnis (artimesnis lydyto kvarco lūžio rodikliui $n=1,4585$) už oro tai šviesa išėjusi į kiaurymę išsisklaido mažesniu kampu ir didesnis šviesos kiekis patenka į bangolaidį kitoje kiaurymės pusėje. Papildomi nuostoliai galėjo atsirasti dėl neteisingai įvestos šviesos į bangolaidį, šviesa iš šviesolaidžio yra įvedama kampu, ne per bangolaidžio centrą, taip pat ateina papildomi nuostoliai nuo poliruoto krašto, kuris prie mažesnio pločio kiaurymių yra šiurkštesnis lyginant su didesnio pločio kiaurymių kraštu.

Išvados

1. Lydytame kvarce įrašytos ir išėsdintos struktūros gali būti naudojamos optofludikoje tiriant įvairias ląsteles, mišinius. Plonesnės kiaurymės praleidžia daugiau šviesos, dėl mažesnio kelio iki kito bangolaidžio, bet juose negalima tirti didesnių ląstelių lyginant su didesnio pločio kiaurymėmis, kurių pralaidumas išlieka ganėtinai pastovus didinant tarpą.
2. Spektrai nelabai priklauso nuo kiaurymių pločio ir atstumo nueito sugeriamoje medžiagoje, nes ties, 530 nm rodaminas 6G pilnai sugeria šviesą per kelis mikrometrus.
3. Išmatuoti spektrai labai priklauso nuo įvedamos šviesos pozicijos ir kampo, kas turi įtakos praleistos šviesos kiekiui ir pikų padėtimis. Pikai atsiranda dėl papildomų spindulių įleistų į stikliuką per kraštą iš šviesolaidžio. Šie spinduliai visiško vidaus atspindžio būdu išeina pro kitą stikliuko kraštą ir yra surenkami spektrometro, jie ir sudaro papildomus, kintančius pikus.

Literatūros sąrašas

- [1] M. Hörstmann-Jungemann, J. Gottmann, M. Keggenhoff, 3D-microstructuring of sapphire using fs-laser irradiation and selective etching, *JLMN* **5**(2), 145-149 (2010)
- [2] R. Osellame, G. Cerullo, R. Ramponi, *Femtosecond laser micromachining: photonic and microfluidic devices in transparent materials* (Springer Science & Business Media, Berlin, 2012)
- [3] K.M. Davis, K. Miura, N. Sugimoto, K. Hirao, Writing waveguides in glass with a femtosecond laser, *Opt. Lett.* **21**(21), 1729-1731 (1996)
- [4] K.I. Kawamura, M. Hirano, T. Kamiya, H. Hosono, Holographic writing of volume-type microgratings in silica glass by a single chirped laser pulse, *Appl. Phys. Lett.* **81**(6), 1137-1139 (2002)
- [5] W. Watanabe, D. Kuroda, K. Itoh, J. Nishii, Fabrication of Fresnel zone plate embedded in silica glass by femtosecond laser pulses, *Opt. Express* **10**(19) 978-983 (2002)
- [6] S. Taccheo, G. Della Valle, R. Osellame, G. Cerullo, N. Chiodo, P. Laporta, O. Svelto, A. Killi, U. Morgner, M. Lederer, D. Kopf, Er: Yb-doped waveguide laser fabricated by femtosecond laser pulses, *Opt. Lett.* **29**(22), 2626-2628 (2004)
- [7] R. Osellame, V. Maselli, R. M. Vazquez, R. Ramponi, G. Cerullo, Integration of optical waveguides and microfluidic channels both fabricated by femtosecond laser irradiation, *Appl. Phys. Lett.* **90**(23), 231118 (2007)
- [8] A. Manz, N. Graber, H.Á Widmer, Miniaturized total chemical analysis systems: a novel concept for chemical sensing, *Sens. Actuat. B Chem.* **1**(1-6), 244-248 (1990)
- [9] G.M. Whitesides, The origins and the future of microfluidics, *Nat.* **442**(7101), 368-373 (2006)
- [10] C. Monat, P. Domachuk, B.J. Eggleton, Integrated optofluidics: A new river of light, *Nat. photonics* **1**(2), 106-114 (2007)
- [11] N. Bloembergen, A brief history of light breakdown, *J. Nonlin. Optic. Phys. Mat.* **6**(04), 377-385 (1997)
- [12] Y. Kondo, J. Qiu, T. Mitsuyu, K. Hirao, T. Yoko, Three-dimensional microdrilling of glass by multiphoton process and chemical etching, *Jpn. J. Appl. Phys.* **38**(10A), L1146 (1999)
- [13] D. Wortmann, J. Gottmann, N. Brandt, H. Horn-Solle, Micro-and nanostructures inside sapphire by fs-laser irradiation and selective etching, *Opt. Express* **16**(3), 1517-1522 (2008)
- [14] T. I. Suratwala, P. E. Miller, J. D. Bude, W. A. Steele, N. Shen, M. V. Monticelli, M. D. Feit, HF-based etching processes for improving laser damage resistance of fused silica optical surfaces, *J. Amer. Cer. Soc.* **94**(2), 416-428 (2011)
- [15] A. Ozkan, L. R. Migliore, C. M. Dunskey, M. W. Phaneuf, Glass processing using microsecond, nanosecond and femtosecond pulsed lasers, *Proc. SPIE* **5063**, pp. 108-113 (2010)
- [16] N. M. Bulgakova, R. Stoian, A. Rosenfeld, Laser-induced modification of transparent crystals and glasses, *Quant. Electr.* **40**(11), 966-985 (2010)

- [17] C. B. Schaffer, A. Brodeur, E. Mazur, Laser-induced breakdown and damage in bulk transparent materials induced by tightly focused femtosecond laser pulses, *Meas. Sci. Technol.* **12**(11), 1784-1794 (2001)
- [18] U. Eppelt, S. Russ, C. Hartmann, M. Sun, C. Siebert, W. Schulz, Diagnostic and simulation of ps-laser glass cutting, in: *Proc. 31 Int. Congress on Applications of Lasers & Electro Optics (ICALEO)*, Cong. Proc., Vol. 105, (LIA, Anaheim, 2012) pp. M504
- [19] K. Itoh, W. Watanabe, S. Nolte, C. B. Schaffer, Ultrafast processes for bulk modification of transparent materials, *MRS Bullet.* **31**(8), 620-625 (2006)
- [20] R. Taylor, C. Hnatovsky, E. Simova, Applications of femtosecond laser induced self-organized planar nanocracks inside fused silica glass, *Las. Photon. Rev.* **2**(1-2), 26-46 (2008)
- [21] S. I. Anisimov, B. Rethfeld, Theory of ultrashort laser pulse interaction with a metal, *Proc. SPIE* **3093**, pp. 192-204 (1997)
- [22] L. Jiang, H. L. Tsai, Improved two-temperature model and its application in ultrashort laser heating of metal films, *J. Heat Trans.* **127**(10), 1167-1173 (2005)
- [23] K. Watson, Two-temperature method for measuring emissivity, *Remote Sens. Environ.* **42**(2), 117-121 (1992)
- [24] K.H. Leitz, B. Redlingshöfer, Y. Reg, A. Otto, M. Schmidt, Metal ablation with short and ultrashort laser pulses, *Phys. Proc.* **12**, 230-238 (2011)
- [25] W. Primak, R. Kampwirth, The radiation compaction of vitreous silica, *J. Appl. Phys.* **39**(12), 5651-5658 (1968)
- [26] T. A. Dellin, D. A. Tichenor E. H. Barsis, Volume, index-of-refraction, and stress changes in electron-irradiated vitreous silica, *J. Appl. Phys.* **48**(3), 1131-1138 (1977)
- [27] R. Osellame, G. Cerullo, R. Ramponi, *Femtosecond laser micromachining: photonic and microfluidic devices in transparent materials* (Springer Science & Business Media, Berlin, 2012)
- [28] N.F. Borrelli, C. Smith, D.C. Allan, T.P. Seward, Densification of fused silica under 193-nm excitation, *JOSA B* **14**(7), 1606-1615 (1997)
- [29] S.M. Eaton, H. Zhang, M.L. Ng, J. Li, W.J. Chen, S. Ho, P.R. Herman, Transition from thermal diffusion to heat accumulation in high repetition rate femtosecond laser writing of buried optical waveguides, *Opt. Express* **16**(13), 9443-9458 (2008)
- [30] S.M. Eaton, H. Zhang, P.R. Herman, F. Yoshino, L. Shah, J. Bovatsek, A.Y. Arai, Heat accumulation effects in femtosecond laser-written waveguides with variable repetition rate, *Opt. Express* **13**(12), 4708-4716 (2005)
- [31] C. Maclair, A. Mermillod-Blondin, N. Huot, E. Audouard, R. Stoian, Ultrafast laser writing of homogeneous longitudinal waveguides in glasses using dynamic wavefront correction, *Opt. Express* **16**(8), 5481-5492 (2008)
- [32] A. Mermillod-Blondin, C. Maclair, A. Rosenfeld, J. Bonse, I.V. Hertel, E. Audouard, R. Stoian, Size correction in ultrafast laser processing of fused silica by temporal pulse shaping, *Appl. Phys. Lett.* **93**(2), 021921 (2008)

- [33] G. Cerullo, R. Osellame, S. Taccheo, M. Marangoni, D. Polli, R. Ramponi, P. Laporta, S. De Silvestri, Femtosecond micromachining of symmetric waveguides at 1.5 μm by astigmatic beam focusing, *Opt. Lett.* **27**(21), 1938-1940 (2002)
- [34] M. Ams, G.D. Marshall, D.J. Spence, M.J. Withford, Slit beam shaping method for femtosecond laser direct-write fabrication of symmetric waveguides in bulk glasses, *Opt. Express* **13**(15), 5676-5681 (2005)
- [35] S. Ho, Y. Cheng, P.R. Herman, K. Sugioka, and K. Midorikawa, Direct ultrafast laser writing of buried waveguides in Foturan glass, In *Conference on Lasers and Electro-Optics*, Techn. Dig. (OSA, San Francisco, 2004) pp. CThD6
- [36] R.R. Thomson, A.S. Bockelt, E. Ramsay, S. Beecher, A.H. Greenaway, A.K. Kar, D.T. Reid, Shaping ultrafast laser inscribed optical waveguides using a deformable mirror, *Opt. Express* **16**(17), 12786-12793 (2008)
- [37] F. He, H. Xu, Y. Cheng, J. Ni, H. Xiong, Z. Xu, K. Sugioka, K. Midorikawa, Fabrication of microfluidic channels with a circular cross section using spatiotemporally focused femtosecond laser pulses, *Opt. Lett.* **35**(7), 1106-1108 (2010)
- [38] A. B. Burg, J. H. Simons, Fluorine Chemistry, (Academic Press, New York, 1950)
- [39] Y. Kondo, T. Suzuki, H. Inouye, K. Miura, T. Mitsuyu, K. Hirao, Three-dimensional microscopic crystallization in photosensitive glass by femtosecond laser pulses at nonresonant wavelength, *Jpn. J. Appl. Phys.* **37**(1A), L94 (1998)
- [40] A. Marcinkevičius, S. Juodkazis, M. Watanabe, M. Miwa, S. Matsuo, H. Misawa, J. Nishii, Femtosecond laser-assisted three-dimensional microfabrication in silica, *Opt. Lett.* **26**(5), 277-279 (2001)
- [41] S. Kiyama, S. Matsuo, S Hashimoto, Y. Morihira, Examination of etching agent and etching mechanism on femtosecond laser microfabrication of channels inside vitreous silica substrates, *J. Phys. Chem. C* **113**(27), 11560-11566 (2009)
- [42] E. D. Palik, V. M. Bermudez, O. J. Glembocki, Ellipsometric Study of Orientation-Dependent Etching of Silicon in Aqueous KOH, *J. Electrochem. Soc.* **132**(4), 871-884 (1985)
- [43] N. Fukata, Y. Yamamoto, K. Murakami, M. Hase, M. Kitajima, In situ spectroscopic measurement of transmitted light related to defect formation in SiO₂ during femtosecond laser irradiation, *Appl. Phys. Lett.* **83**(17), 3495-3497 (2003)
- [44] K. Miura, Y. Shimotsuma, M. Sakakura, S. Kanehira, M. Hamabe, K. Hirao, Three-dimensional deposition of silicon from silicate glass with dispersed metallic aluminum by a femtosecond laser, *Proc. SPIE* **6413**, 64130K (2006)
- [45] H. Seidel, L. Csepregi, A. Heuberger, H. Baumgärtel, Anisotropic etching of crystalline silicon in alkaline solutions I. Orientation dependence and behavior of passivation layers, *J. Electrochem. Soc.* **137**(11), 3612-3626 (1990)
- [46] C. Hnatovsky, R. S. Taylor, E. Simova, V. R. Bhardwaj, D. M. Rayner, P. B. Corkum, Polarization-selective etching in femtosecond laser-assisted microfluidic channel fabrication in fused silica, *Opt. Lett.* **30**(14), 1867-1869 (2005)
- [47] Y. Shimotsuma, P. G. Kazansky, J. Qiu, K. Hirao, Self-organized nanogratings in glass irradiated by ultrashort light pulses, *Phys. Rev. Lett.* **91**(24), 247405 (2003)

- [48] R. Kitamura, L. Pilon, M. Jonasz, Optical constants of silica glass from extreme ultraviolet to far infrared at near room temperature, *Appl. Opt.* **46**33, 8118-8133 (2007)
- [49] B. H. W. S. De Jong, R. G. C. Beerkens, P. A. van Nijnatten, *Glass in Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry* (Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2000)
- [50] S. M. Eaton, H. Zhang, P. R. Herman, F. Yoshino, L. Shah, J. Bovatsek, A. Y. Arai, Heat accumulation effects in femtosecond laser-written waveguides with variable repetition rate, *Opt. Express* **13**(12), 4708-4716 (2005)
- [51] D.N Dempster, T. Morrow, M. F. Quinn, The photochemical characteristics of rhodamine 6G-ethanol solutions, *J. Photochem.* **2**(5), 343-359 (1973)

Santrauka

Tomas Baravykas

„BANGOLAIDŽIŲ FORMAVIMAS FEMTOSEKUNDINIAIS IMPULSAIS IR INTEGRAVIMAS Į SKIRTINGŲ MATMENŲ IŠĖSDINTAS KIAURYMES”

Ultratrumpųjų impulsų lazerinės sistemos plačiai taikomos daugelyje sričių: medžiagotyroje, metrologijoje, medicinoje, telekomunikacijoje, energetikoje bei kitose srityse. Dėl atsiradusio poreikio greitai išmatuoti įvairius mišinius mikrofluidikoje sukurtas optofluidikai skirtas prietaisas, kuris lengvai gali būti integruotas į įvairius kanalus šiems mišiniams tirti. Lydytame kvarce suformuotas struktūras galima panaudoti mikrofluidikos, mikrooptikos įrenginių gamybai. Šiame darbe buvo atliekamas lydyto kvarco tūrinis modifikavimas naudojant ultratrumpus lazerio impulsus ir 5% koncentracijos KOH tirpale, prie 80°C, iširtas stiklo tūryje suformuotu bangolaidžiu šviesos perdavimas, pralaidumu priklausomybės nuo išėsdintu tarpų.

Eksperimentams naudotas įmonės „Šviesos Konversija“ femtosekundinė lazerinė sistema, bandinio transliavimas atliekamas „Aerotech“ pozicionavimo stalais, pluoštas fokusuojamas 0,42 NA objektyvu. Atlikti šviesos pralaidumo ir spektro matavimai su nuo 5 μm iki 200 μm pločių kiaurymėmis. Gauti rezultatai: įrašyti bangolaidžiai praleidžia Gauso formos pluoštą ypatingai platesnių kiaurymių (200 μm) atveju. Lyginant su betarpiu bangolaidžių, praleidžiamos šviesos kiekis sumažėja 10 kartų kai yra tuščias tarpas, 2-3 kartus kai kiaurymė pripildyta vandens. 25 μm iki 250 μm pločio kiaurymes praleidžiamos šviesos kiekis yra beveik pastovus. Rodamino 6G spektro pralaidumo matavimai rodo, kad jis sugeria iki 610 nm bangos ilgus, bet gautuose spektruose bangos ilgiai yra sugeriami iki 550-575 nm, taip yra galimai dėl papildomai surenkamų komponentų, kurie ateina dėl visiško vidaus atspindžio tarp stikliuko viršutinio ir apatinio paviršiaus, dėl šios priežasties keičiant vienamodžio šviesolaidžio padėti pikai yra linkę važinėti link skirtingų bangos ilgių. Spektrų intensyvumas nepriklausė nuo kiaurymių pločio, dėl rodamino 6G sugerties 450-550 nm srityje kelių mikrometrų ilgyje.

Summary

Tomas Baravykas

„DIRECT WRITING OF OPTICAL WAVEGUIDES WITH FEMTOSECOND PULSES AND INTEGRATION INTO MICROFLUIDIC STRUCTURES”

Ultrashort pulse laser systems are widely used in material science, metrology, medicine, telecommunication, energetics, and so forth. Due to the demand of a fast easy solution to measure solutions in microfluidics a optofluidic structure was developed, which can easily be integrated into microchannels to measure these fluids. Fused silica is very suitable for applications in microfluidic, microoptics since the components can be written in this glass using a femtosecond laser. In this study using a femtosecond laser and direct writing technologies in fused silica we formed waveguides with different sized wells.

The experiments were carried out using a femtosecond "Pharos" laser manufactured by Light Conversion. A objective with 0.42 NA was used to focus the beam onto the sample glass, translation of the sample was done with Aerotech translation tables. Measurements of light transmission through formed waveguides were done, and spectrums were analyzed when light traveled across air, water and rhodamine 6G gaps.

The formed waveguides output a Gaussian profile beam, which is especially true for wider gap wells. When comparing the amount of light that is transmitted through the waveguide when there are no wells, to when there are air gaps there is about 10 times less light transmitted, when there is water in the gaps, the difference is about 2-3 times. 25 to 200 μm wide gaps transmit about the same amount of light. Rhodamine 6G exhibits absorption up to 610 nm, but our measured spectrums show total absorption up to 550-575 nm, this can be attributed to the collection of additional components that come due to the total internal refraction from the samples upper and lower surfaces, in addition slightly tweaking the position of the optical fiber makes the peaks move towards different wavelengths. Measured spectrum intensity does not relate to the wideness of the gaps, a reduced intensity of e^2 is expected if you increase the width of the gap by two, but this was not the case, the reason for this is because rhodamine 6G absorbs most of the light in the 450-550 nm range after a few micrometers of material.