

Vilniaus universitetas
Fizikos fakultetas
Kvantinės elektronikos katedra

Indrė Indilaitė

**PRECIZINIS STIKLO MIKROAPDIRBIMAS LAZERIU ASISTUOTU CHEMINIU
ĖSDINIMU**

Pagrindinių studijų baigiamasis darbas
Fizikos studijų programa

Studentas
Darbo vadovas
Recenzentas
Katedros vedėjas

Indrė Indilaitė
dr. Domas Paipulas
dr. Sima Rekšytė
prof. habil. dr. Valdas Sirutkaitis

Vilnius 2017

Turinys

Įvadas	3
Literatūros apžvalga	5
1. Lazerinis mikroapdirbimas ultratrumpųjų impulsų lazeriais	5
2. Spinduliuotės sąveika su lydytu kvarcu	5
2.1. Daugiafotonė sugertis ir tunelinė jonizacija	6
2.2. Griūtinė jonizacija	7
3. Modifikacijų tipai	8
Nanogardelės	9
4. Cheminis ėsdinimas	10
5. Mikrolaboratorijos lustuose – tikslaus stiklo mikroapdirbimo pritaikymas	13
Eksperimentas	14
6. Eksperimento schema	14
6.1. Bandinio mikroapdirbimo lazeriu schema	14
6.2. Cheminio ėsdinimo schema	14
7. Gamybos algoritmai	15
8. Modifikacijų analizavimas optiniu mikroskopu	16
9. Paviršiaus šiurkštumo matavimo metodika	17
10. Darbo rezultatai ir jų aptarimas	19
10.1. Figūrų matmenų priklausomybė nuo spinduliuotės impulsų energijos	19
10.2. Mažų matmenų figūros	21

10.3. Sudėtingos figūros formavimas	23
10.4. Cheminio ėsdinimo selektyvumo stikle niuansai	24
10.5. Figūrų matmenų priklausomybė nuo ėsdinimo trukmės	25
10.6. Dvejopas lūžis ir mažiausio atstumo tarp iškritusių elementų gavimas	26
10.7. Šiurkštumas	28
Pagrindiniai rezultatai ir išvados	37
Literatūra	38
Santrauka	40

Ivadas

Stiklas dėl savo optinių ir terminių savybių nuo seno plačiai naudojamas įvairiose srityse. Lęšiai, prizmės, veidrodžiai ir kiti optiniai komponentai, gaminami iš stiklo, buvo ir yra vieni pagrindinių optiniuose prietaisuose.

Lazerio sukūrimas leido išsamiau tirti elektromagnetinės spinduliuotės savybes ir jos sąveikas su įvairiomis medžiagomis, tame tarpe ir su skaidriomis. Tyrinėjus elektromagnetinės spinduliuotės sąveiką su skaidriomis terpėmis, išsivystė nauja mokslo kryptis – netiesinė optika. Šiai kryptiai besivystant, XX amžiaus pabaigoje sukūrus ultratrumpų impulsų lazerines sistemas, 1996 m. K. M. Davis su bendradarbiais parodė, kad skaidrios terpės, tokios kaip stiklas, gali būti modifikuotos su stipriai sufokusuotu šimtų nanodžiaulių eilės impulsų energijos femtosekundiniu lazeriu [1]. Ši savybė buvo pritaikyta trimačiams fotonikos objektams kurti, pavyzdžiui, optiniams bangolaidžiams, optiniams šakotuvams ir dalikliams, tūrinėms Brego gardelėms, Frenelio zoninėms plokštelėms stikle [2-4].

2001 m. A. Marcinkevičius ir S. Juodkasis su kolegomis pademonstravo, kad tūrinės modifikacijas stikle galima padaryti, panaudojant femtosekundinį lazerį ir paveiktas sritis chemiškai išėsdinant [5]. Tokiu būdu nuo 2003 m. yra tyrinėjama mikrofluidikos biomikroplokštelių, mikroreaktorių, mikrolaboratorijų lustuose (*lab-on-a-chip*), mikroanalizės sistemų (μ -TAS) ir optofluidikos prietaisų gamyba [6-8]. Femtosekundinis apdirbimas leidžia stikluose kurti trimates struktūras tiesiogiai, o ne sluoksniais. Didelis taip sukurtų biomikroplokštelių tikslumas ir efektyvumas kelia didelį susidomėjimą biocheminėje analizėje. Šioje srityje gali būti sumažinti atliekų mastai dėl nedidelio analizei reikiamų reagentų kiekio, tad tai gali prisidėti prie gamtos tausojimo.

Šio darbo tikslas – ištirti lydyto kvarco mikroapdirbimo lazeriu asistuoju cheminiu ėsdinimu galimybes, suformuoti sudėtingos geometrijos dvimates figūras ir atlikti parametrinę lydyto kvarco pjūvio sienelių šiurkštumo analizę.

Darbo uždutys:

1. Ištirti lazeriu asistuito cheminio ėsdinimo mikropjovimo technologij  ir nustatyti, kaip stikle suformuotos figūros matmenys priklauso nuo lazerio spinduliuotės impulsų energijos;
2. Ištirti, kaip gaunam  fig r  matmenys priklauso nuo ėsdinimo trukmės;
3. Lydytame kvarce suformuoti ma iausi  geometrinių matmenų figūras;
4. Ištirti lazeriu modifikuot  ir chemiškai i s dint  bandinių sienelių šiurkštumo priklausomyb  nuo bandiniui apdirbti naudojamos spinduliuotės poliarizacijos, impulsų energijos, bandinio transliavimo greičio ir žingsnio Δz .

Literatūros apžvalga

1. Lazerinis mikroapdirbimas ultratrumpųjų impulsų lazeriais

Mikroapdirbimas yra sparčiausiai besivystanti lazerinių technologijų sritis. Įvairiuose technologiniuose procesuose didėja mažų diametrų darinių poreikis. Taip pat norima, kad padarytieji mikrokomponentai būtų kuo tikslesni. Medžiagų apdirbimas femtosekundiniais lazeriais šiuo atveju turi daugybę pranašumų, lyginant su kitais impulsinės veikos lazeriais.

Laikas, per kurį elektronų sugerta energija yra perduodama gardelei, būna nuo 1 ps iki 100 ps [9]. Todėl, esant dešimčių ar šimtų nanosekundžių eilės lazerio impulsams, veikiama medžiaga yra šiluminėje pusiausvyroje ir joje stebima termalizacija viso impulso metu. Tuo tarpu, medžiagą veikiant femtosekundiniu lazeriu, vyksta efektyvus elektronų šildymas, elektronai nespėja perduoti energijos gardelei, susidaro karštos elektronų dujos. Ir tik labai maža impulso energijos dalis pavirsta šiluma, o tai ir lemia aukštą mikroapdirbumo kokybę.

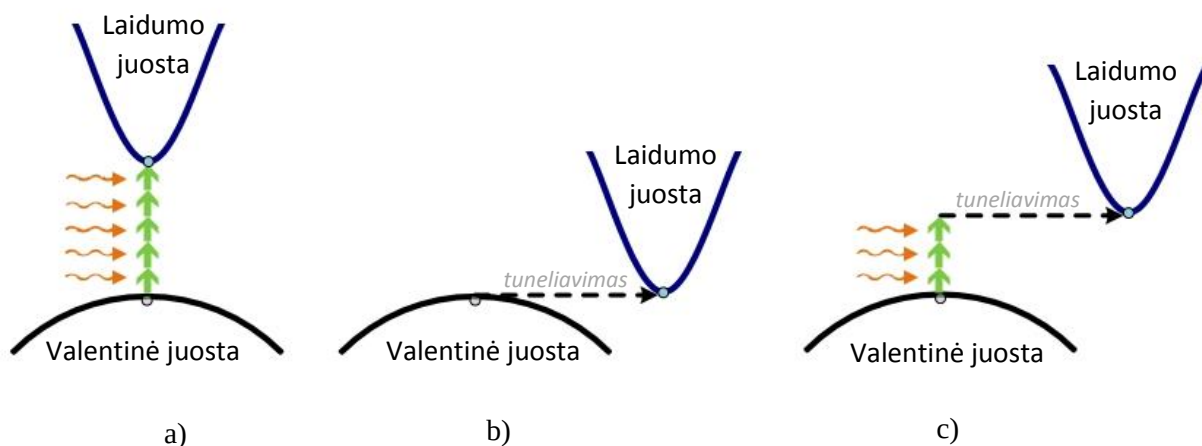
1987 m. R. Srinivansan su kolegomis ir S. Küper su M. Stutke pirmieji pademonstravo švarią polimetilmetakrilato (PMMA) abliaciją femtosekundiniu lazeriu su labai maža termiškai pažeista sritimi [10, 11]. Jie nustatė, kad femtosekundiniai lazeriai turi mažesnę abliacijos slenkstį nei nanosekundiniai lazeriai. Po poros metų, t.y. 1989 m., S. Küper ir M. Stutke pademonstravo, kad švari abliacija femtosekundiniais lazeriais gali būti atlikta net ir skaidrioje terpėje [12, 13]. Buvo nustatyta, kad dėl itin didelio lazerio spinduliuotės intensyvumo skaidrioje medžiagoje, tokiose kaip eksperimentuose naudotų natrio chlorido ir politetrasfloroetileno (PTFE), vyksta daugiafotonė sugertis.

2. Spinduliuotės sąveika su lydytu kvarcu

Lydytas kvarcas yra sudarytas vien tik iš silicio dioksido. Skirtingai nuo kitų stiklų, neturėdamas priemaišų, lydytas kvarcas turi labai aukštą lydymosi temperatūrą. Dėl savo savybių toks stiklas naudojamas laboratorinei įrangai, veidrodžių ir lęšių gamybai. Kadangi geriau nei kiti stiklai praleidžia ultravioletinę spinduliuotę, lydytas kvarcas tampa lęšių, skirtų ultravioletiniam spektrui, gamybos medžiaga. Taip pat jis naudojamas puslaidininkių gamyboje. Pažymėtina, kad lydytas kvarcas turi žemą šiluminio plėtimosi koeficientą [14].

2.1. Daugiafotonė sugertis ir tunelinė jonizacija

Skaidrių medžiagų, tokių kaip lydytas kvarcas, draustinės juostos plotis yra didelis. Tokių medžiagų femtosekundinis lazerinis apdirbimas tampa įmanomas dėl netiesinių procesų: daugiafotonės sugerties, tunelinės jonizacijos (**1 pav.**).



1 pav. Netiesinių procesų principinės schemos: a) daugiafotonės sugerties; b) tunelinės jonizacijos; c) daugiafotonės sugerties ir tunelinės jonizacijos kombinacijos.

Daugiafotonė sugertis (**1 pav.**, a) įvyksta tuomet, kai valentinėje juostoje esantis elektronas vienu metu sugeria tam tikrą fotonų kiekį ir taip patenka į laidumo juostą. Bendra sugertų fotonų energija turi viršyti draustinės energijos tarpą. Vadinasi spinduliuotės intensyvumas turi būti didelis, norint turėti daug fotonų erdvės vienetu.

Esant dideliame elektromagnetinės spinduliuotės laukui, gali pasireikšti tunelinė jonizacija (**1 pav.** b), nes medžiagos energetinių lygmenų sistema gali būti taip iškreipta, kad valentinėje juostoje esančiam elektronui būtų sudarytos sąlygos tuneliuoti į laidumo juostą.

Kuris procesas vyrauja nusako Keldyšo parametras [15]:

$$\gamma = \frac{\omega}{e} \sqrt{\frac{m_e c n \varepsilon_0 E_g}{I}}, \quad (1)$$

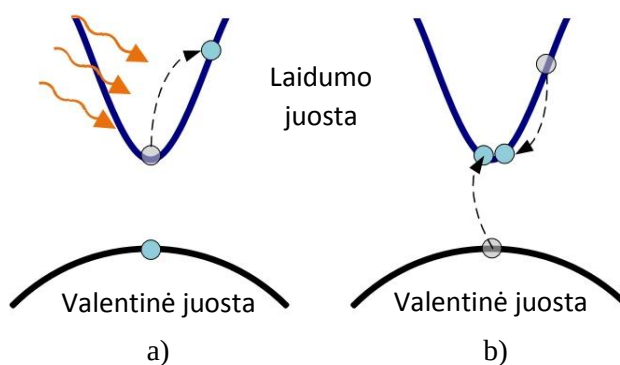
kur ω – lazerinės elektromagnetinės spinduliuotės dažnis, e – elementarusis elektros krūvis, m_e – efektinė elektrono masė, c – šviesos greitis, n – medžiagos lūžio rodiklis, ε_0 – vakuumo dielektrinė skvarba, E_g – medžiagos draustinės juostos plotis, I – lazerinės spinduliuotės intensyvumas. Esant mažam elektromagnetinės spinduliuotės dažniui, kai $\gamma \ll 1$, deformuota energijos lygmenų sandara išsilaiko užtektinai ilgai, kad elektronas galėtų tuneliuoti į laidumo sritį. Tokiu atveju vyraujantis netiesinės sugerties mechanizmas yra tunelinė jonizacija. Jei lazerio spinduliuotės dažnis yra didelis,

$\gamma \gg 1$, vyrauja daugiafotonė sugertis. Kai $\gamma \approx 1$, medžiagoje vyksta abiejų netiesinių procesų kombinacija.

Jei lydytą kvarcą, turintį didelį draustinės energijos juostos plotį (apie 9 eV), paveiktume 1030 nm bangos ilgio lazerine spinduliuote su 10^{14} W/cm^2 intensyvumu, kuris yra artimas lazerio pažeidimo slenksčiui, gautume Keldyšo parametą, artimą vienetui. Kadangi kitų medžiagų draustinės energijos juostos plotis paprastai būna mažesnis, o spinduliuotės intensyvumas taip pat dažnu atveju parenkamas mažesnis, galime teigti, kad medžiagose dominuojantis netiesinis procesas yra daugiafotonė sugertis. Visgi, apdirbant lydytą kvarcą, naudojami intensyvumai, artimi lazerio pažeidimo slenksčiui, ir medžiagoje vyksta tiek daugiafotonė sugertis, tiek tunelinė jonizacija.

2.2. Griūtinė jonizacija

Patekęs į laidumo juostą elektronas gali įgyti papildomos energijos, sugerdamas lazerio spinduliuotę [16] (**2 pav.**, a). Elektronui įgavus energijos, kurios vertė viršija draustinės juostos plotį, elektronas per sąveiką su kristaline gardele gali perduoti energiją valentinėje juostoje esančiam elektronui ir taip jį perkelti į laidumo juostą [17] (**2 pav.**, b). Toks procesas vadinamas smūgine jonizacija.



2 pav. Smūginės jonizacijos principinė schema

Kai medžiagą veikiančios lazerinės spinduliuotės intensyvumas yra pakankamai didelis ir lazeriu medžiaga veikiama yra ganėtinai ilgai, smūginės jonizacijos procesas gali kartotis - kiekvienam laidumo juostoje esančiam elektronui yra galimybė sukurti naują laisvą elektroną. Tokia

besikartojanti smūginė jonizacija, kurios metu laisvų elektronų skaičius auga eksponentiškai, yra vadinama griūtinė jonizacija. Elektronų skaičius nusakomas tokia formule:

$$n(t) = n_0 e^{\beta t}, \quad (2)$$

kur n_0 – pradinis elektronų tankis, t – laikas, β – koeficientas, nusakantis griūtinės jonizacijos spartą, tiesiškai priklausantis nuo spinduliuotės intensyvumo.

Nors griūtinė jonizacija yra procesas, kuris pasireiškia medžiagas apdirbant ir trumpų impulsų lazeriais, visgi impulsų trukmė turėtų viršyti 10 ps. Šiame darbe naudojamas 320 fs trukmės impulsų lazeris, todėl dominuojantys procesai bus daugiafotonė sugertis ir tunelinė jonizacija.

3. Modifikacijų tipai

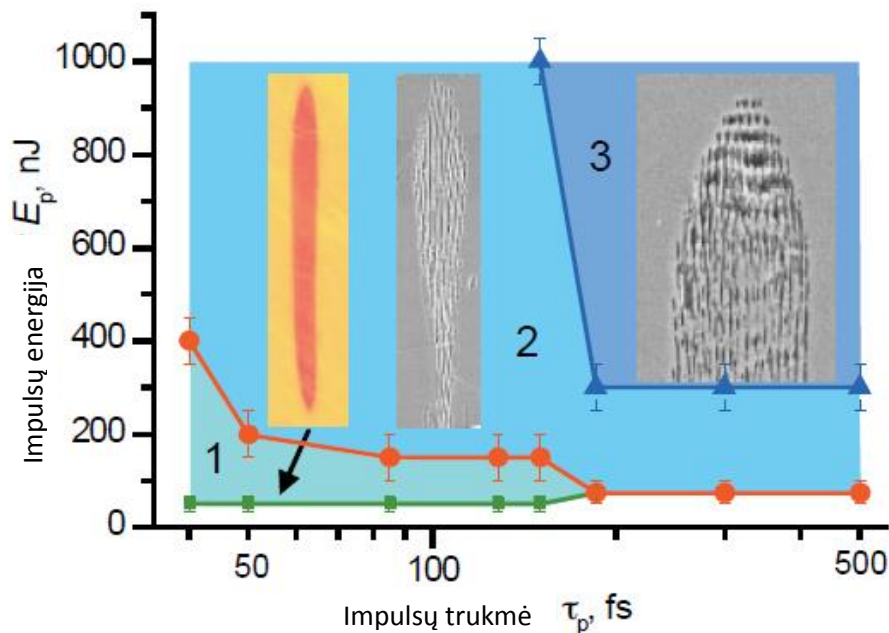
Skaidrioje medžiagoje lazerio spinduliuote galima sukurti kelių tipų modifikacijas. Tačiau paminėtina, kad paveikus medžiagą su intensyvumais, kurie neperlipa modifikacijos slenksčio, medžiagoje gali atsirasti laikini nestabilūs struktūriniai pokyčiai, pasižymintys pakitusia sugertimi ar lūžio rodikliu [18]. Kai spinduliuotės intensyvumas pakankamas, skaidrioje medžiagoje susiformuojančius stabilus pakitimus priimta skirstyti į tris tipus (**3 pav.**).

Pirmas modifikacijos tipas pasiekiamas prie impulso trukmių, mažesnių už 200 fs, ir energijų, mažesnių už 400 nJ (daugeliu atveju energijos turi būti ne didesnės už 200 nJ), kai $NA = 0,65$. Medžiagoje susiformuoja vienalytė sritis, pasižyminti pakitusiu lūžio rodikliu.

Antras modifikacijos tipas pasiekiamas gana plačiame impulso trukmių ir energijų intervale, kaip galima pamatyti **3 pav.** Medžiagoje susiformuoja nanogardelės – tvarkingi periodiniai medžiagos tankio pokyčiai. Šiuo modifikacijos tipu paveiktos skaidrios terpės pasižymi dvejopu lūžiu.

Trečiasis modifikacijos tipas pasižymi sudėtingais netvarkingais struktūriniais pokyčiais medžiagoje. Formuojasi nanoįtrūkimai ar mikroertmės. **3 pav.** 3 zonoje esančioje nuotraukoje nanoįtrūkimai matomi viršutinėje modifikuotos srities dalyje. Toks modifikacijos tipas

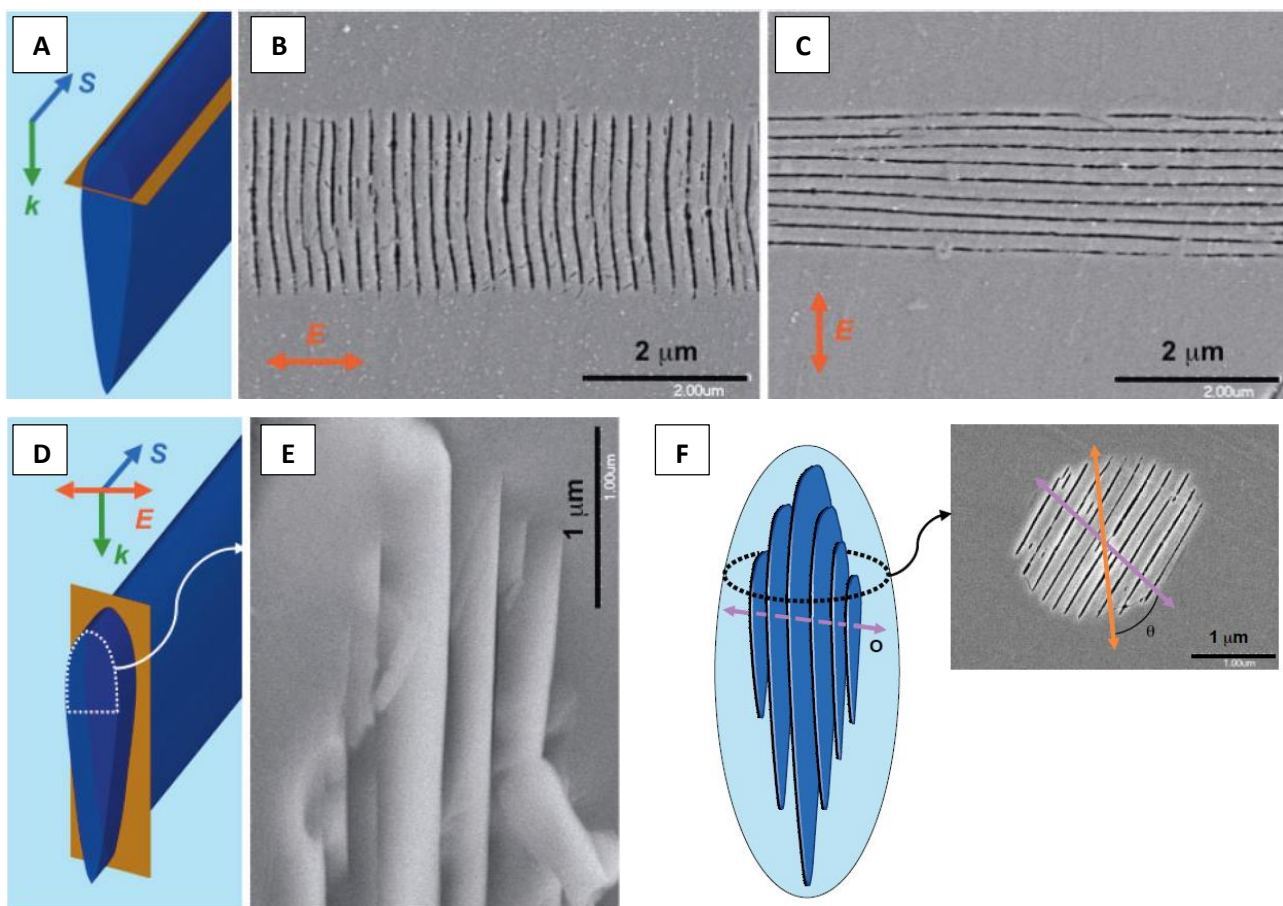
pasiekiamas tik prie santykinai didelių impulso trukmių ir energijų, nemažesnių už 300 nJ, kai skaitinė apertūra (NA) yra 0,65.



3 pav. Grafikas, vaizduojantis tris lydyto kvarco modifikacijų tipus, priklausančius nuo impulsų trukmės ir energijos, kai pluoštą fokusuojančio lęšio skaitinė apertūra $NA = 0,65$ [19].

Nanogardelės

Nanogardelės – tai periodiniai tankio pokyčiai skaidrioje terpėje. Jos gaunamos medžiagą paveikiant spinduliuotės parametrais, tenkinančiais antro tipo modifikaciją. Kaip nanogardelės atrodo bandinio tūryje, pavaizduota **4 pav.**. Matome, kad nanogardelės susiformuoja statmenai lazerio pluošto poliarizacijai. Tūrinis pažeidimas gaunamas ištįsęs į z ašį arba, kitaip sakant, pažeidimas gaunamas „morkos“ formos [19].



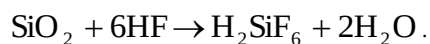
4 pav. Nanogardelių vaizdas lydyto kvarco tūryje. A ir D schemos rodo lazerinės spinduliuotės keliavimo kryptį (k), lazerinio rašymo kryptį (S) ir plokštumas, kuriose buvo darytos nuotraukos. B, C - xy plokštumos SEM nuotraukos (spinduliuotės poliarizacija pavaizduota raudonai), E – yz plokštumos SEM nuotrauka. F – schematinis tūrinis nanogardelių vaizdas medžiagoje su SEM nuotrauka. Bandiniai išdinti 2 min. 1 % HF rūgštyje [19].

Paveikus bandinį su vienos tiesinės poliarizacijos spinduliuote ir vėliau tą pačią bandinio vietą paveikus su kita poliarizacija, pirmojo poveikio padarytos nanogardelės persiformuos, kitaip tariant, išsitrins, ir galutiniame rezultate matysime nanogardeles, kurios bus statmenos antrojo poveikio spinduliuotės poliarizacijai [20].

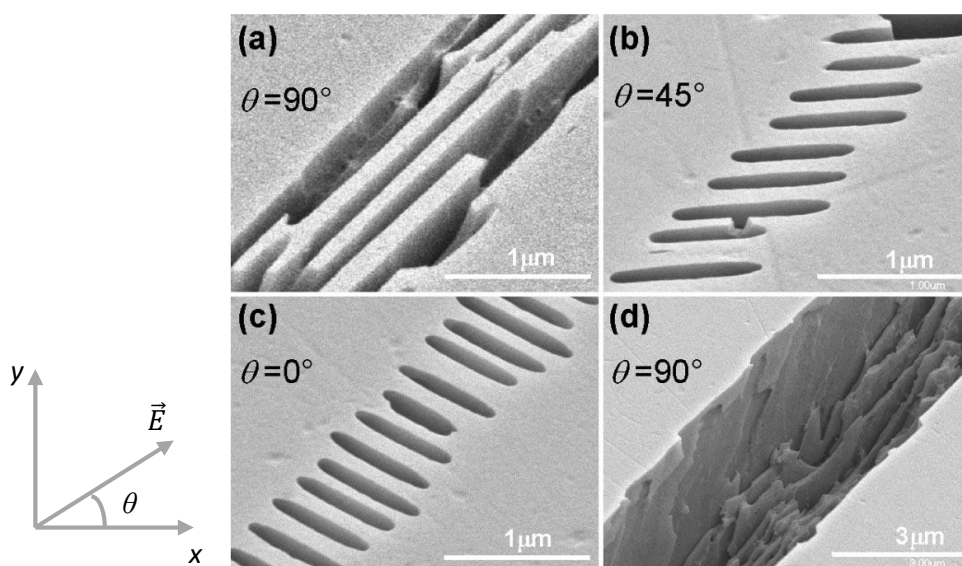
4. Cheminis ėsdinimas

Lydytas kvarcas yra chemiškai labai stabilus, net ir aukštose temperatūrose mažai su kuom reaguojantis. Jo neveikia beveik jokia rūgštis, išskyrus vandenilio fluorida (HF) rūgštį.

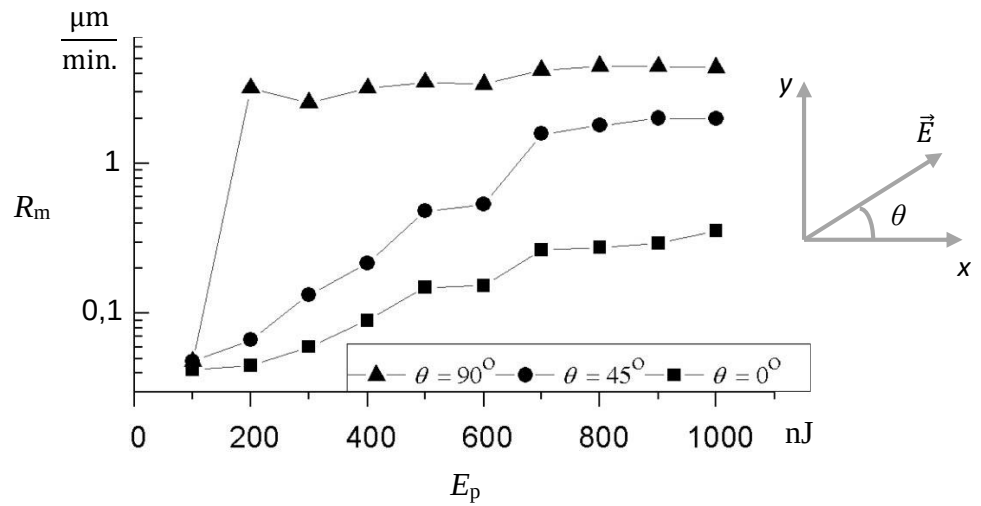
Panardinus stiklą į šią rūgštį, stiklas tirpsta fluoro anijonams jungiantis su silicio katijonais, vyksta cheminė reakcija:



Paveikus stiklą lazeriu, jame gali susiformuoti nanogardelės. Lydyto kvarco atveju, lazerio pažeistose srityse, kur stebimas praretėjęs medžiagos tankis, sumažėja deguonies atomų kiekis, tačiau silicio atomų kiekis lieka nepasikeitęs. Susiformavę nanogardelės režiai vandenilio fluorida rūgštyje išdiniasi iki kelių šimtų kartų efektyviau nei nepažeista medžiaga. Be to 2005 m. Hnatovskis su kolegomis pademonstravo, kad išdinimo sparta labai stipriai priklauso nuo lazerio poliarizacijos [21]. Išdinimo sparta pasiekama didžiausia, kai lazerio poliarizacija yra statmena lazerio pluošto judėjimo kryptiai. Taip yra dėl to, kad susidaranti nanostruktūra visada orientuojasi statmenai lazerio poliarizacijai [22, 23], o vandenilio fluorida rūgštis didžiausią lydyto kvarco plotą gali pasiekti tuomet, kai gardelės persikloja (**5 pav.**, a).

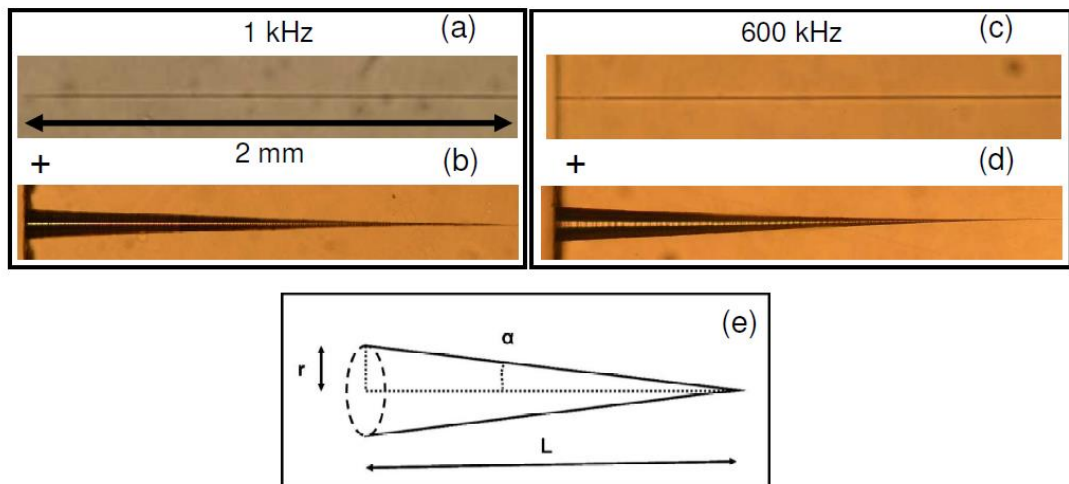


5 pav. Periodinių nanostruktūrų vaizdas iš viršaus (XY plokštumos), kai lazeris sklido X ašies kryptimi, skirtingoms poliarizacijoms. $E_p = 300 \text{ nJ}$ (a-c), $E_p = 900 \text{ nJ}$ (d). Bandinys 20 min. mirkytas 0,5 % HF tirpale. θ – kampas tarp tiesiškai poliarizuotos spinduliuotės elektrinio lauko vektoriaus ir lazerio pluošto judėjimo krypties [21].



6 pav. Femtosekundiniu lazeriu paveiktų zonų ėsdinimo spartos R_m priklausomybė nuo impulsų energijos E_p skirtingoms poliarizacijoms. θ – kampas tarp tiesiškai poliarizuotos spinduliuotės elektrinio lauko vektoriaus ir lazerio pluošto judėjimo krypties. Bandinys buvo ėsdinamas 2,5 % vandenilio fluorida rūgštyje [21].

Iš **6 pav.** galima pamatyti, kad esant poliarizacijai, statmenai pluošto judėjimo kryptčiai, ėsdinimo sparta labai silpnai priklauso nuo impulsų energijos. Tuo tarpu, esant lygiagrečiai poliarizacijai ar sudarančiai 45° kampą su lazerio pluošto judėjimo kryptimi, ėsdinimo sparta didėja, didėjant impulsų energijai.



7 pav. Titano safyro lazeriu su $4 \mu\text{J}$ impulsų energija, sufokusuotu $0,6 \text{ NA}$ lęšiu, paveikto stiklo nuotraukos, kai impulsų pasikartojimo dažnis 1 kHz (a) ir 600 kHz (b). Gauti mikrokanalai po 3 val. cheminio ėsdinimo 20 % HF rūgštyje (b, d). (e) – stikle išėsdinto kūgio schematinė diagrama [24].

Ėsdinimo procese, arčiau paviršiaus, pro kurį įeina rūgštis, esančios lazeriu padarytos modifikacijos išsiėsdina greičiau už tas, kurios yra bandinio gilumoje. Rūgščiai dar nepasiekus bandinio gilumos, pradeda ėsdintis šalimais modifikacijų buvęs spinduliuote nepaveiktas stiklas. Dėl to mikrokanalo įėjimo matmenys gaunami didesni už gilumoje esančius matmenis ir tai nulemia, kad išėsdinta sritis stikle būna kūgio formos (**7 pav.**). Be to, kuo rūgštis skverbiasi giliau į medžiagą, tuo sunkiau šviežiai, dar nesureagavusiai rūgščiai pasiekti stiklo gilumą, o jau sureagavusiai – pasišalinti. Tai lemia limituotą padaromo mikrokanalo ilgį [24].

5. Mikrolaboratorijos lustuose – tikslaus stiklo mikroapdirbimo pritaikymas

Mikrolaboratorija luste (*lab-on-a-chip*) yra mikrosistema, sukurta ant vieno nedidelio (centimetrų eilės) pagrindo, gebanti atlikti tiek funkcijų, kiek gebėtų atlikti ištisa biologinė laboratorija. Tokia mikrolaboratorija, naudodama mikrofluidinių kanalų tinklą, gali pergabenti, maišyti, atskirti ir analizuoti labai mažus biologinių medžiagų tūrius. Mikrofluidiniai kanalai stikluose, vienoje iš pagrindinių medžiagų, iš kurių kuriamos mikrolaboratorijos, gali būti kuriami femtosekundiniu lazeriu asistuoju cheminiu ėsdinimu. Pagrindiniai mikrolaboratorių lustuose privalumai yra analizės greitis, didelis jautrumas ir mažas naudojamų reagentų kiekis [7]. Genomika, proteomika, molekulinė ir ląstelės biologija – tai keli mokslo sričių pavyzdžiai, kur mikrolaboratorijos lustuose gali būti taikomos. Kiti taikymo pavyzdžiai galėtų būti: vaistų kūrimas ir cheminė sintezė, aplinkos stebėjimas ir cheminių bei biologinių grėsmių aptikimas.

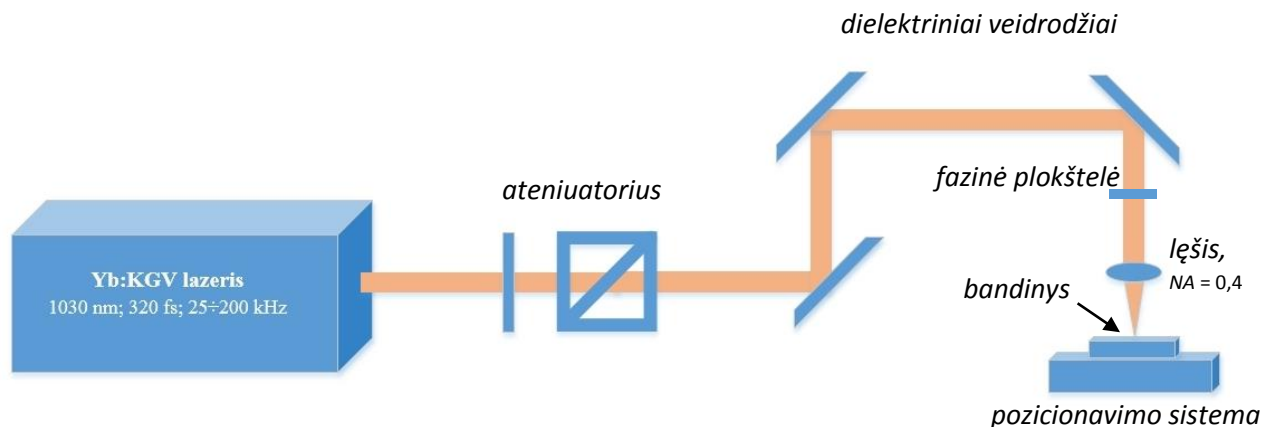
Mikrolaboratorijos lustuose gaminamos iš silicio, stiklų ir polimerų. Polimerų privalumai yra maža kaina ir mikrokanalų gamybos paprastumas. Visgi tam tikrais atvejais pasirenkamas stiklas dėl jo atsparumo įvairioms cheminėms medžiagoms, stabilumo laike [25]. Pažymėtina, kad stiklas negali sugerti skysčių ar dujų - yra neaktyvus. Stiklo apdirbimo lazeriu asistuoju cheminiu ėsdinimu vienas pagrindinių privalumų yra galimybė stikle sukurti trimačius objektus tiesiogiai, o ne sluoksniais – tai svarbu ir mikrolaboratorių lustuose gamyboje. Tačiau kol kas tokia technologija brangiai kainuoja.

Eksperimentas

6. Eksperimento schema

6.1. Bandinio mikroapdirbimo lazeriu schema

Stiklo mikroapdirbimo tyrimams atlikti buvo naudojamas Yb:KGV *Pharos* lazeris (gamintojas – *UAB Šviesos konversija*), spinduliuojantis 1030 nm bangos ilgio 320 fs trukmės spinduliuotę. Impulsų pasikartojimo dažnis naudotas eksperimentuose – 200 kHz. Lazerio pluoštas pirmiausiai keliavo į atenuatorių, kuriuo buvo parenkama norima spinduliuotės galia, tada dielektriniais veidrodžiais pluoštas buvo nukreipiamas į $\lambda/2$ arba $\lambda/4$ fazinę plokštelę ir galiausiai, praėjęs pro fazinę plokštelę, pluoštas asferiniu lęšiu sufokusuojamas į bandinį, pritvirtintą prie trimatės pozicionavimo sistemos (**8 pav.**). Eksperimentams buvo pasirinktas lęšis, kurio skaitinė apertūra (NA) yra 0,4. Pozicionavimo sistemą sudarė trys *Aerotech* transliaciniai stalai, kurių judėjimo amplitudė XY plokštumoje siekė 15 cm, Z plokštumoje – 4 cm. Bandinio padėtis buvo nustatoma kompiuterine valdymo sistema „SCA“ (*Workshop of Photonics*). Visi eksperimente naudoti bandiniai buvo 0,2 mm storio. Bandinių medžiaga - JGS2 markės lydytas kvarcas.

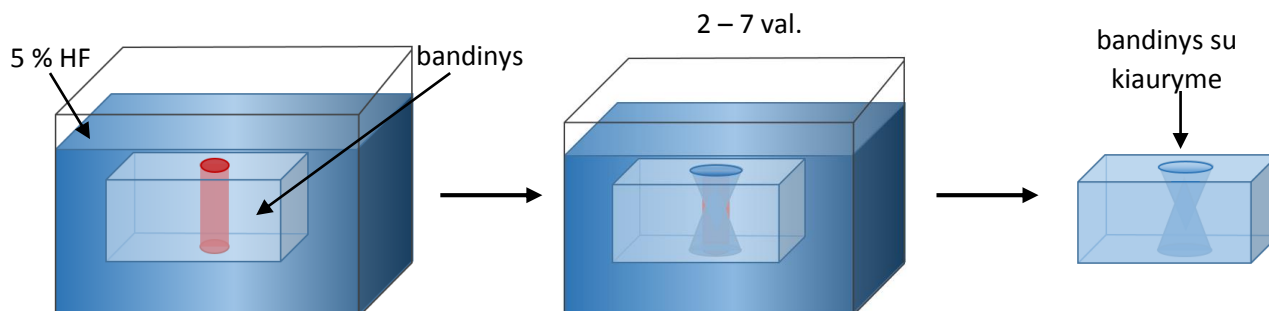


8 pav. Lazerinės sistemos, naudotos stiklo mikroapdirbimui, principinė schema.

6.2. Cheminio ėsdinimo schema

Cheminio ėsdinimo eiga pavaizduota **9 pav.** Iš pradžių lazerine spinduliuote paveiktas bandinys panardinamas į 5 % vandenilio fluorida rūgštį, tada pasirinktą laiko tarpą bandinys ėsdinamas (darytuose eksperimentuose ėsdinimo laikas svyravo nuo 2 val. iki 7 val.). Galiausiai

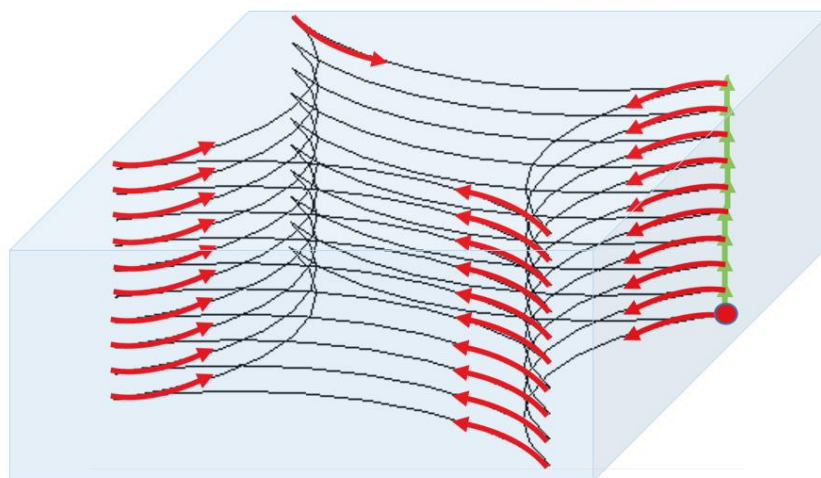
bandinys ištraukiamas iš rūgšties. Tada bandinys išskalaujamas vandenyje, nuvalomas su acetono ir spirito mišiniu ir yra paruoštas tyrimui.



9 pav. Cheminio ėsdinimo schema. Lazerine spinduliuote paveiktas bandinys ėsdinamas 5 % HF rūgštyje. Raudona spalva žymi spinduliuote paveiktą bandinio sritį.

7. Gamybos algoritmai

Norimos figūros stikle buvo išgaunamos tiesioginio lazerinio rašymo būdu. Trimatė pozicionavimo sistema, naudota eksperimente, buvo valdoma su „SCA“ kompiuterine programa. Lydytame kvarce, norint išgauti apskritimus, kvadratus, žvaigžduotes, figūras su arkomis, langelius ir kitas figūras buvo parenkamas reikiamas komandų rinkinys. Kiekvieną kartą pažeidus stiklą norimos figūros forma, Z ašimi judantis staliukas buvo pakeliamas 3 μm . Ciklai buvo kartojami tol, kol, lazeriu buvo paveikiamas stiklas per visą jo storį. Transliacinių stalų judėjimo greičiai - 0,1 mm/s, 1 mm/s ir 2 mm/s.



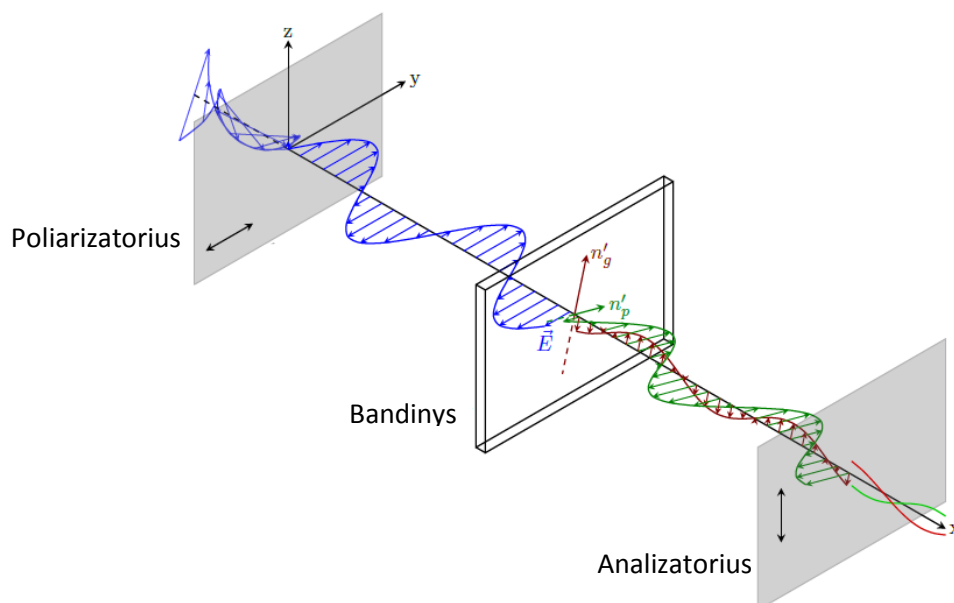
10 pav. Figūros su arkomis gamybos schema. Raudonos rodyklės rodo lazerinės spinduliuotės trajektoriją, žalios rodyklės – judėjimą, kuomet lazerinė spinduliuotė neveikia bandinio, raudonas taškas – trajektorijos pradžią.

8. Modifikacijų analizavimas optiniu mikroskopu

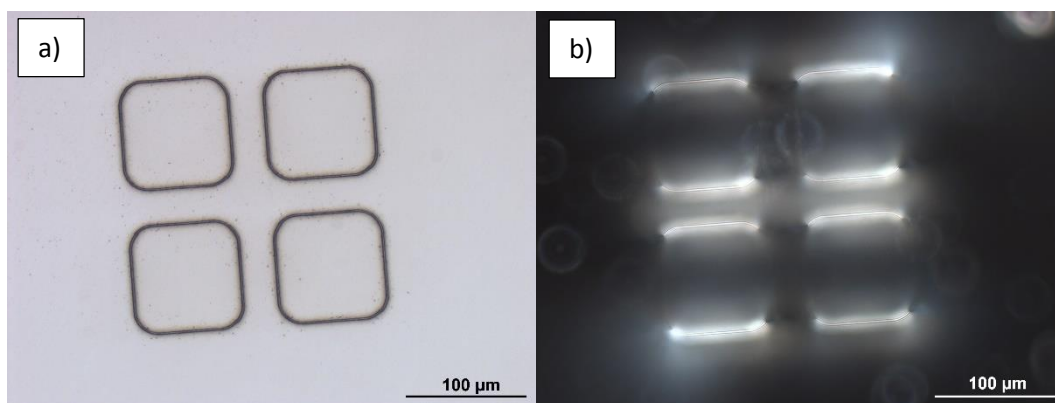
Šiame darbe bandiniai su įvairiomis figūromis buvo tirti *Olympus BX51* optiniu mikroskopu. Viena iš parinkčių šiame mikroskope yra galimybė pažiūrėti į bandinius, esant sukryžiuotiems poliarizatoriams.

Poliarizatoriai optiniame mikroskope yra naudojami bandiniams su dvejopu lūžiu tirti. Paprastai tokie bandiniai yra anizotropiniai kristalai, o lydytas kvarcas yra izotropinė medžiaga. Tačiau lydytą kvarcą paveikus intensyvia lazerine spinduliuote, bandinyje susidariusiose nanogardelėse, kas iš tiesų yra tankio pokyčiai medžiagoje, pasireiškia dvejopas šviesos lūžis.

11 pav. schematiškai pavaizduota, kaip kinta bangų poliarizacija einant per elementus. Pirma, nepoliarizuota šviesa pataiko į poliarizatorių, kur praleidžiamos tik vienos poliarizacijos komponentės, t.y. šviesa tiesiškai poliarizuojama. Jei nebūtų dvejopai laužiančio bandinio, analizatoriaus, kuris iš esmės yra toks pats poliarizatorius, kaip ir pirmasis, tiesiog pasuktas 90° kampu, visiškai nepraleistų jokios šviesos ir matytume tiesiog tamsų plotą. Kai bandinys padėtas tarp poliarizatorių, tiesiškai poliarizuota banga perėjusi dvejopai laužiantį bandinį, skils į dvi komponentes – paprastąją ir nepaprastąją bangas su pakitusiomis elektrinio lauko vektorių kryptimis ir fazių poslinkiu. Tuomet per analizatorių galės praeiti šviesos dedamosios komponentės, kurios atitiks analizatoriaus praleidžiamą poliarizaciją. Tokiu būdu matysime šviesą būtent tose vietose, kur bandinyje bus susiformavusios nanogardelės. **12 pav.** matome vaizdo pro optinį mikroskopą pavyzdį.



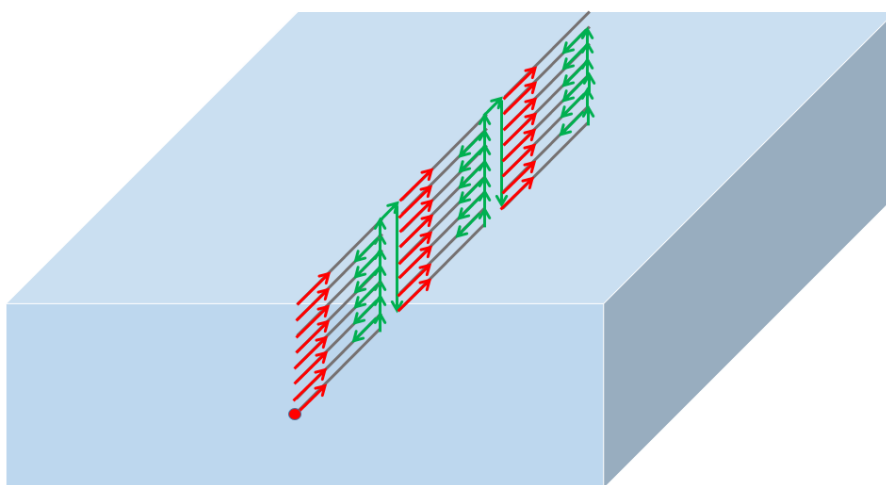
11 pav. Spinduliuotės elektrinio lauko vektoriaus kitimas, keliaujant per poliarizatorių ir dvejopai laužiantį bandinį.



12 pav. Vaizdas, žiūrint pro optinį mikroskopą be poliarizatorių (a) ir, kai poliarizatorius ir analizatorius statmeni vienas kitam (b).

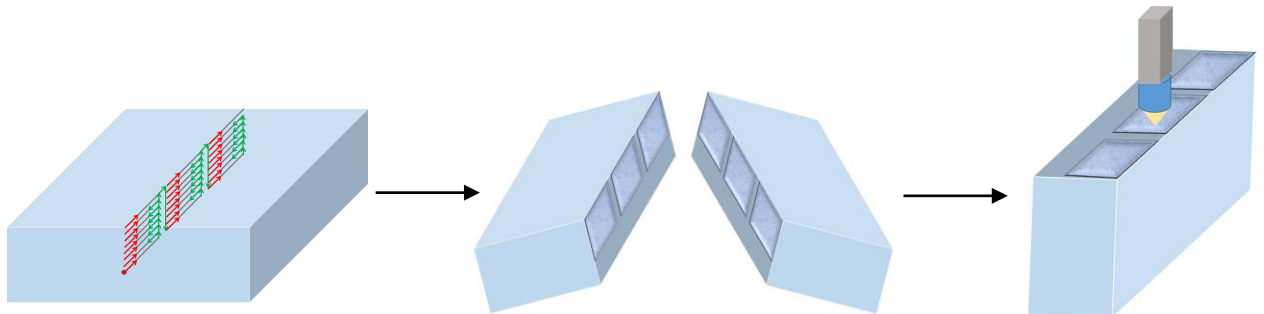
9. Paviršiaus šiurkštumo matavimo metodika

Lydyto kvarco sienelių šiurkštumo tyrimui bandinys buvo modifikuojamas, kaip parodyta **13 pav.**, norimu periodu. Eksperimentuose naudotas 0,2 mm storio lydytas kvarcas. Kiekvienam parametrų rinkiniui (impulsų energijai, transliavimo greičiui, poliarizacijai, žingsniui Δz) buvo skiriamas 1 mm ilgio ir maždaug 0,1 mm gylio pažeidimo plotas. Kadangi literatūroje yra pastebėjimų, kad pluoštui keliaujant į vieną pusę ir į kitą pusę yra padaromi skirtingi pažeidimai [26], norint išvengti netikslumų, pluoštas visą laiką buvo nukreiptas į vieną pusę. Kitaip sakant, lazerio spinduliuotė pasiekdavo bandinį tik, kai transliacinis stalas judėdavo vis į tą pačią pusę.



13 pav. Bandinio šiurkštumo tyrimui lazerinio apdirbimo schema. Raudonos rodyklės rodo lazerinės spinduliuotės trajektoriją, žalios rodyklės – judėjimą, kuomet lazerinė spinduliuotė neveikia bandinio, raudonas taškas – trajektorijos pradžia.

Spinduliuote paveiktas bandinys buvo 2 val. ėsdinamas, tuomet perlaužiamas, nuvalomas ir tiriamas su profilometru *Sensofar PLμ 2300*. Schematiškai tai pavaizduota **14 pav.**



14 pav. Lydyto kvarco sienelių šiurkštumo tyrimo schema. Spinduliuote modifikuotas bandinys po ėsdinimo perlaužiamas ir tiriamas su profilometru.

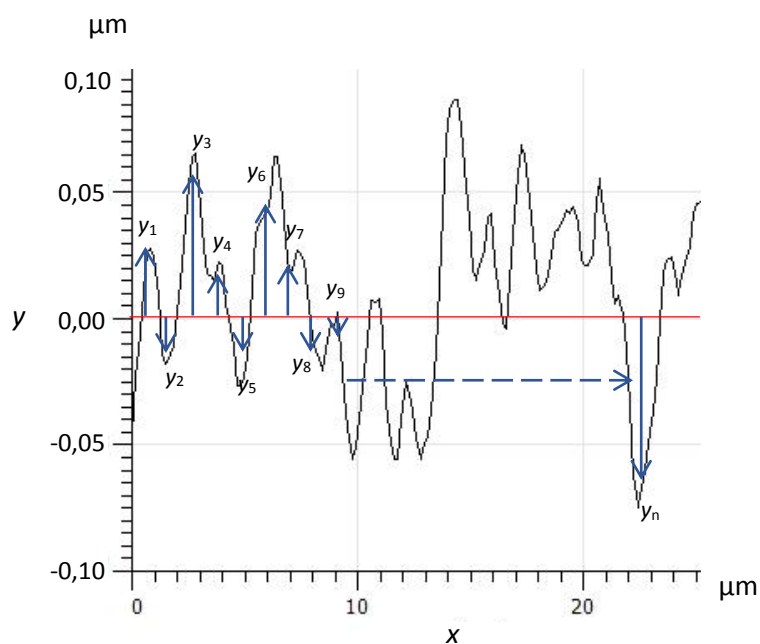
Yra keli paviršiaus šiurkštumo parametrai, bet pagrindiniai yra R_a ir RMS (*root mean square*). R_a yra profilio aukščių nuo pagrindinės linijos absoliučių verčių aritmetinis vidurkis (3), o RMS yra kvadratinė šaknis iš profilio aukščių nuo pagrindinės linijos kvadratų vidurkio (4). Nesunku pastebėti, kad keli didesni „kalnai“ profilyje pakels parametro RMS vertę labiau nei parametro R_a vertę. **15 pav.** pavaizduotas profilio pavyzdys.

Pagrindinės formulės:

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i|, \quad (3)$$

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2}. \quad (4)$$

Šiame darbe šiurkštumo tyrime naudotas parametras buvo RMS . Buvo imama apytiksliai po 4 vertes kiekvienam skirtingus parametrus turinčiam apdirbtam ir išėsdintam plotui. Didesniam tikslumui pasiekti buvo gaminama po du vienodus bandinius kiekvienai poliarizacijai. Vadinasi viena RMS vertė eksperimentiniuose rezultatuose išvesta kaip vidurkis iš bent 8 verčių.



15 pav. Profilio pavyzdys. Raudonai pažymėta pagrindinė linija, mėlynai – profilio aukščiai.

10. Darbo rezultatai ir jų aptarimas

Šiuo darbu buvo norima patyrinėti lydyto kvarco mikroapdirbimo lazeriu asistuoju cheminiu ėsdinimu galimybes. Todėl pirmiausia buvo susipažįstama su technologija. Žiūrėta, kokią įtaką turi skirtingų lazerio spinduliuotės energijos impulsų parinkimas ir kokią įtaką turi ėsdinimo trukmė. Pastebėti ėsdinimo selektyvumo niuansai. Atsižvelgiant į tyrimų pastebėjimus, buvo formuojamos kiek galima mažesnių geometrinių matmenų formos. Galiausiai buvo tyrinėta sienelių šiurkštumo priklausomybė nuo įvairių parametrų ir bandyta išsiaiškinti, kokiais parametrais reikėtų apdirbti lydytą kvarcą, norint gauti kuo mažesnę šiurkštumą.

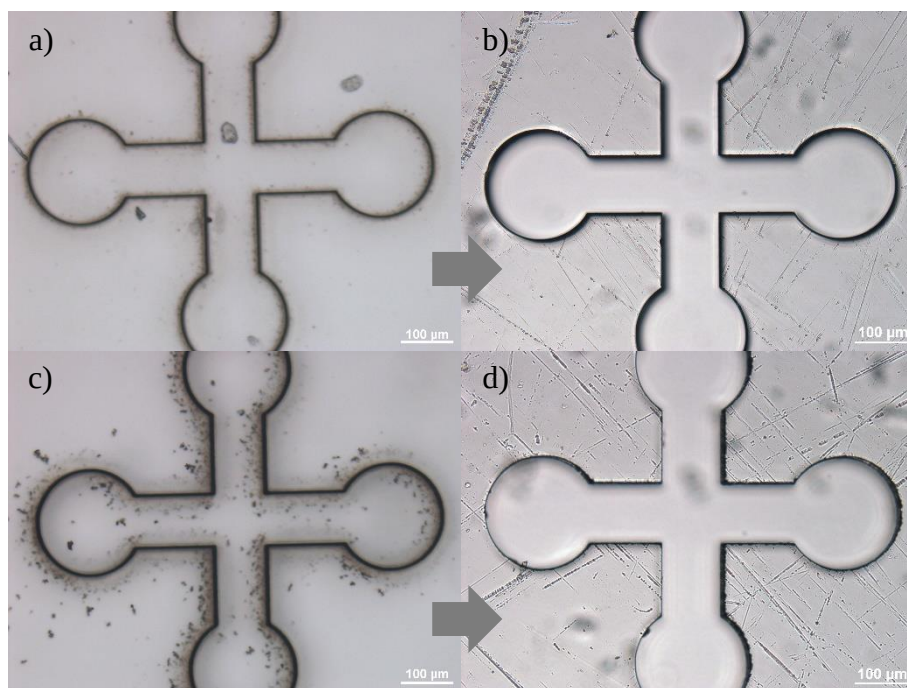
10.1. Figūrų matmenų priklausomybė nuo spinduliuotės impulsų energijos

Norint lydytame kvarce suformuoti mažų matmenų figūras, pirmiausia reikia pažiūrėti, kokią įtaką gali turėti spinduliuotės impulsų energija.

Iš mikroskopu padarytų nuotraukų po bandinio apdirbimo lazeriu **16 pav.** vizualiai pastebima storesnė figūros kontūro linija, kai impulsų energija buvo 1050 nJ, už šalimais esančią 350 nJ impulsais nubrėžtą liniją. **17 pav.** esantis grafikas patvirtina, kad didesnė impulsų energija lemia

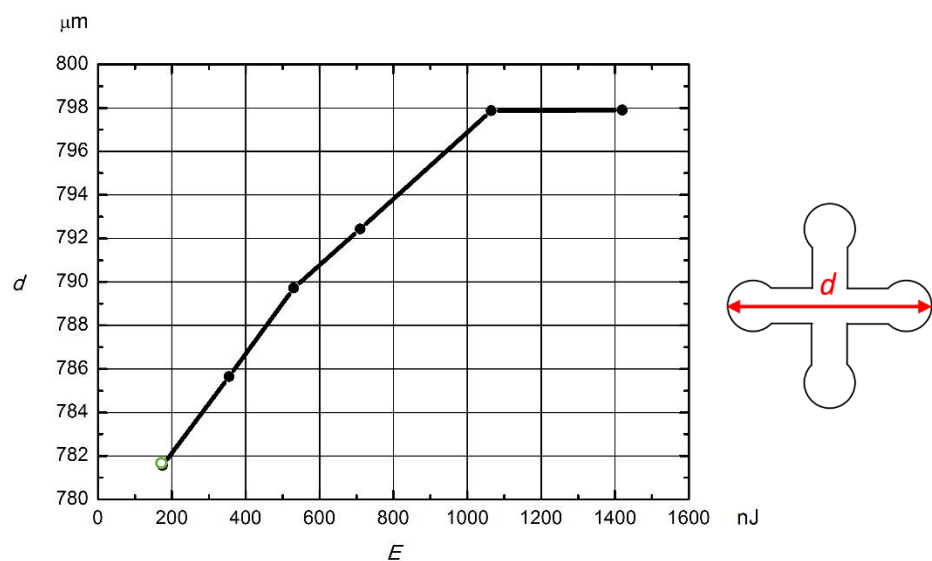
didesnius figūrų matmenis. Tai didžia dalimi priklauso nuo lazeriu paveikiamo ploto diametro, kuris yra didesnis prie didesnių energijų.

Tikslumo reikalaujančias figūras geriau braižyti mažesnės impulsų energijos spinduliuote. Tačiau tokias figūras reikia arba ilgiau ėsinti, kas gali padidinti matmenis, arba nustatyti, kad krintančios spinduliuotės poliarizacija būtų visą laiką statmena lazerio sklaidimo kryptčiai, kadangi prie mažų energijų (170 nJ – 300 nJ) labai stipriai pasireiškia ėsdinimo selektyvumas.



16 pav. Kairėje pusėje - lazerine spinduliuote paveikto stiklo nuotraukos: a) figūra buvo brėžiama 1 mm/s greičiu su 350 nJ energijos impulsais, jos kontūro diametras maždaug 4 μm, c) figūra buvo brėžiama 1 mm/s greičiu su 1050 nJ energijos impulsais, jos kontūro diametras virš 6 μm. Dešinėje pusėje – figūrų vaizdas po 4 val. ėsdinimo 5 % HF rūgštyje.

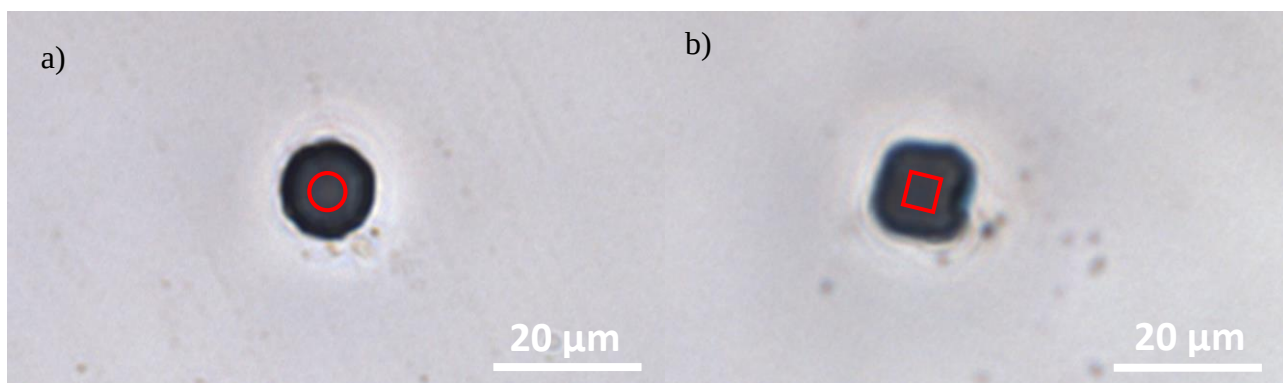
Prie santykinai didelių impulsų energijos verčių (didesnių už 900 nJ) medžiagoje nebesiformuoja nanogardelės, veikiau formuojasi išdaryti krateriai, todėl ėsdinimo selektyvumo praktiškai nebelieka. Tikslų, mažų matmenų figūrų su tokiomis impulsų energijomis sukurti nepavyktų.



17 pav. Pliuso formos figūrų diametro d , po 4 val. 5 % ėsdinimo HF rūgštyje, priklausomybės nuo impulsų energijos grafikas. Mažiausios energijos (170 nJ) impulsais brėžta figūra po ėsdinimo nepasišalino, todėl grafike vaizduojama tuščiaiduriu tašku.

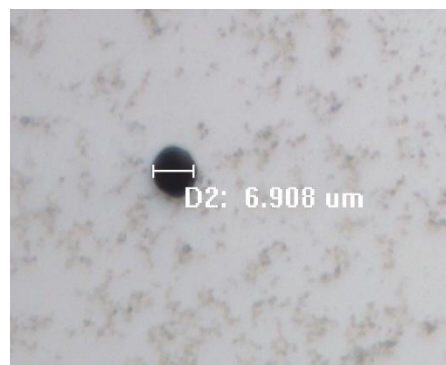
10.2. Mažų matmenų figūros

Šioje darbo dalyje pabandytos suformuoti paprastą geometriją turinčios figūros (apskritimai ir kvadratai) bei šiek tiek sudėtingesnės geometrijos figūros su aštresniais kampais (žvaigždutės ir figūros su keturiomis arkomis) ir žiūrėta, kaip kinta šių figūrų forma, mažinant jų diametrus.



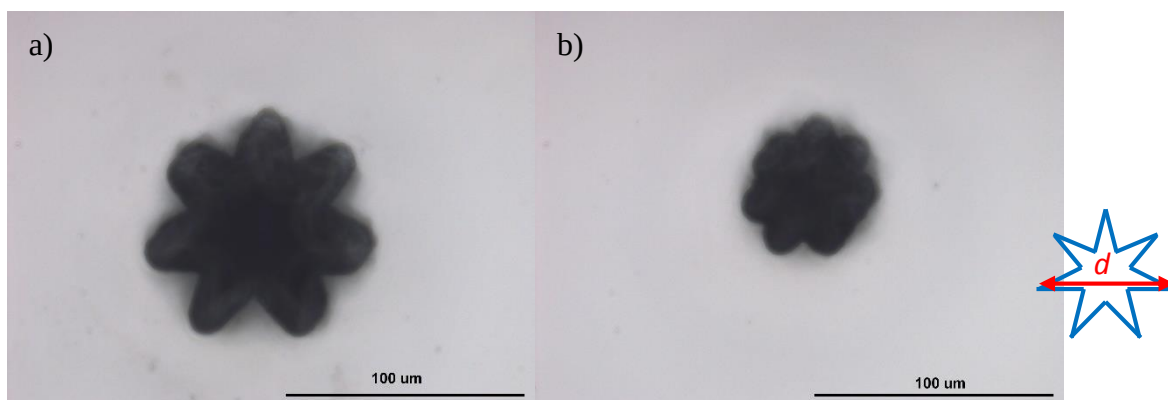
18 pav. Lazerių asistuoju cheminiu ėsdinimu gautų mažų figūrų, apskritimo (a) ir kvadrato (b), nuotraukos. Raudonos linijos parodo, kokio dydžio figūros buvo matomos kompiuterinėje valdymo sistemoje „SCA“. Abejoms figūroms gauti buvo naudojami 250 nJ impulsai, transliaciniai stalai judėjo 0,1 mm/s greičiu. Ėsdinta 2 val. 5 % HF rūgštyje.

Pirmiausiai buvo gautos pačios paprasčiausios geometrinės figūros – apskritimas ir kvadratas. Abi **18 pav.** esančios figūros turi maždaug 12 μm diametrus. Kiek mažą figūrą galima gauti didžia dalimi priklauso nuo į stiklą krentančios spinduliuotės diametro. 250 nJ energijos impulsai suformuoja maždaug 4 μm skersmens pažeidimus. **18 pav.** matome, kad kvadratas turi apvalius kampus. Taip yra dėl to, kad lazerio pluoštas yra Gauso formos. Toliau mažindami kvadratą, galiausiai visgi gautume apskritimą. Mažiausias įmanomas apskritimas būtų suformuojamas kaip taškas (**19 pav.**), o jo skersmenį didžia dalimi nusakytų impulsų padaryto pažeidimo skersmuo. Taip pat paminėtina, kad bandinio tūrio viduryje figūros diametras gaunamas mažesnis, nei jo kraštuose, nes ėdinimas vyksta kūgio forma, kaip tai aptarta ketvirtame skyriuje. **19 pav.** matoma skylė yra didesnių matmenų ties bandinio paviršiumi, nei impulsų padaryto pažeidimo skersmuo, nes norint, kad bandinys išsiėsdintų per visą storį, reikia išlaukti, kol rūgštis prasiskverbs ir į tolimiausias vietas (mūsų atveju – į bandinio vidurį). Rūgščiai dar nepasiekus giliausių vietų, arčiau paviršiaus buvę pažeidimai jau bus išsiėsdinę ir ėsdinsis spinduliuote nepaveiktas stiklas. Dėl to galiausiai, po ėsdinimosi procesų, gauta skylė yra didesnių matmenų, nei lazeriu padarytas pažeidimas.

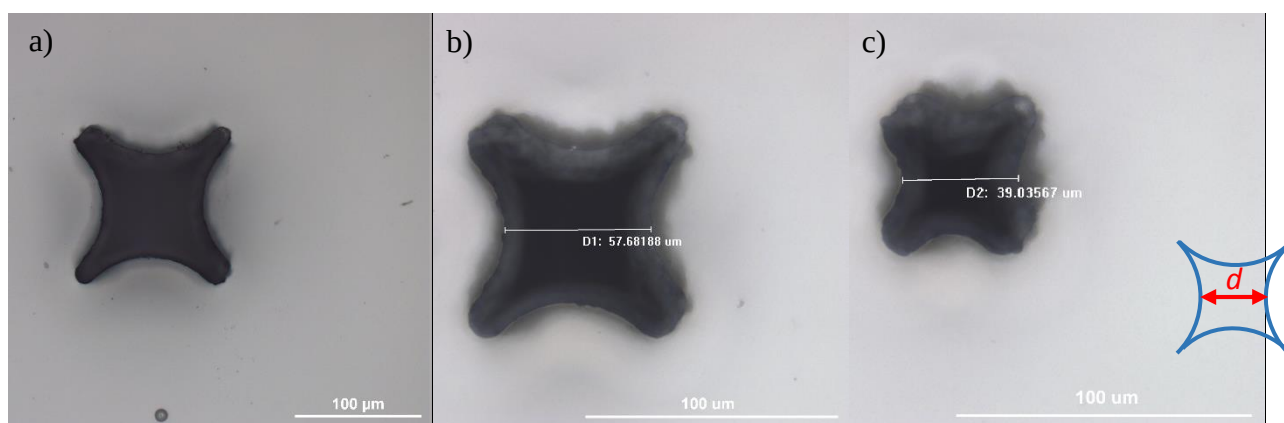


19 pav. 250 nJ energijos impulsais padaryta skylė stikle, pluoštui keliaujant nuo stiklo dugno link paviršiaus 1 mm/s greičiu. Ėsdinta 2 val. 5 % HF rūgštyje.

Kampuotos formos, tokios kaip žvaigždė ar figūra su arkomis, mažinant jų diametrus, tampa mažiau aiškios. Tai matome ir **20 pav.** bei **21 pav.** Visi mažų figūrų kampai užapvalėja dėl gausinės lazerio pluošto formos ir dėl ėdinimo netolygumo (figūrų kampus pasiekia mažesnis kiekis rūgšties nei figūrų kraštines) ir taip figūrų formos yra iškraipomos. Šiam darbui darytame eksperimente žvaigždė su 54 μm diametru gavosi panašesnė į gėlytę nei į žvaigždę. Be to **20 pav.** a) ir b) nuotraukose ir **21 pav.** b) ir c) nuotraukose palei figūrų kraštus matomi netolygūs papildėjimai. Tai, tikriausiai, matomas neišsiėsdinęs stiklas, esantis bandinio tūryje dėl kūginės ėsdinimosi formos rūgštyje.



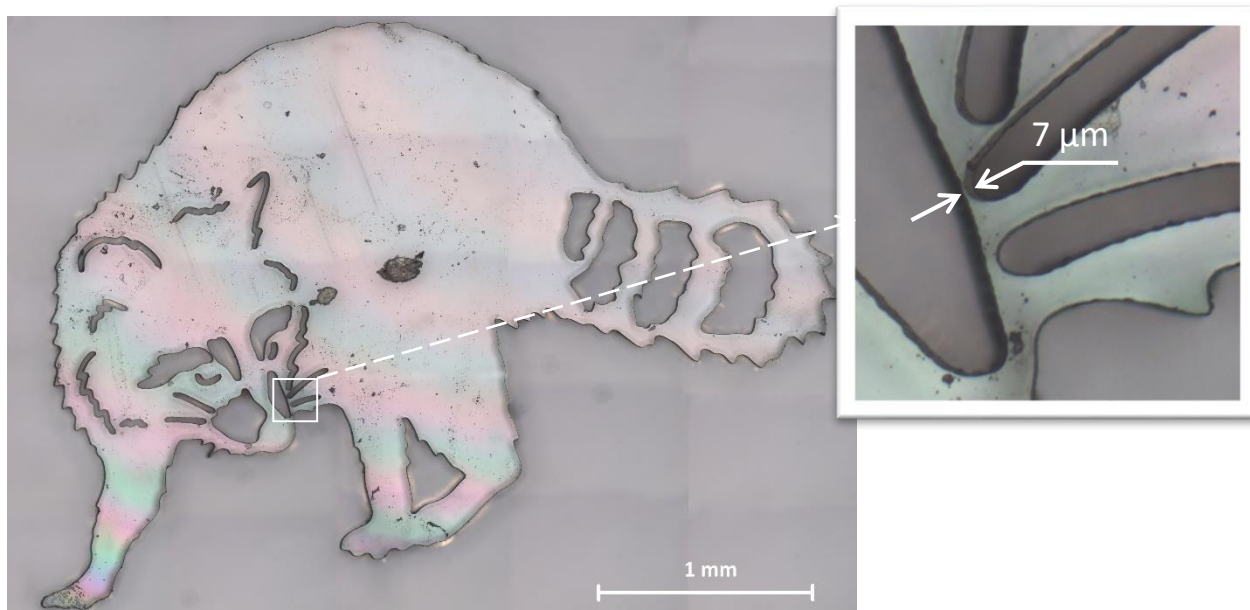
20 pav. Žvaigždės formos kitimas, mažinant jos matmenis. Pirmos (a) žvaigždės diametras d yra 93 μm, antros (b) – 54 μm. Pozicionavimo stalų judėjimo greitis buvo 0,1 mm/s, spinduliuotės impulsų energija 250 nJ. Bandinys su žvaigždėmis buvo ėsdintas 2 val. 5 % HF rūgštyje.



21 pav. Figūros su keturiomis arkomis kitimas, mažinant jos matmenis. Pirmos (a) figūros diametras d yra 80 μm, antros (b) – 58 μm, trečios (c) – 39 μm. Pozicionavimo sistemos stalų judėjimo greitis buvo 0,1 mm/s, spinduliuotės impulsų energija 250 nJ. Bandinys su šiomis figūromis buvo ėsdintas 2 val. 5 % HF rūgštyje.

10.3. Sudėtingos figūros formavimas

Į kompiuterinę valdymo programą „SCA“ įdėjus „dxf“ (*Drawing exchange format*) formato failą ir nustačius norimą gauti paveiksluko dydį, buvo gauta sudėtinga figūra, kuri buvo ėsdinama 6 val. 5 % vandenilio fluorida rūgštyje. Bendras figūros dydis šiek tiek viršija 3 mm (22 pav.).



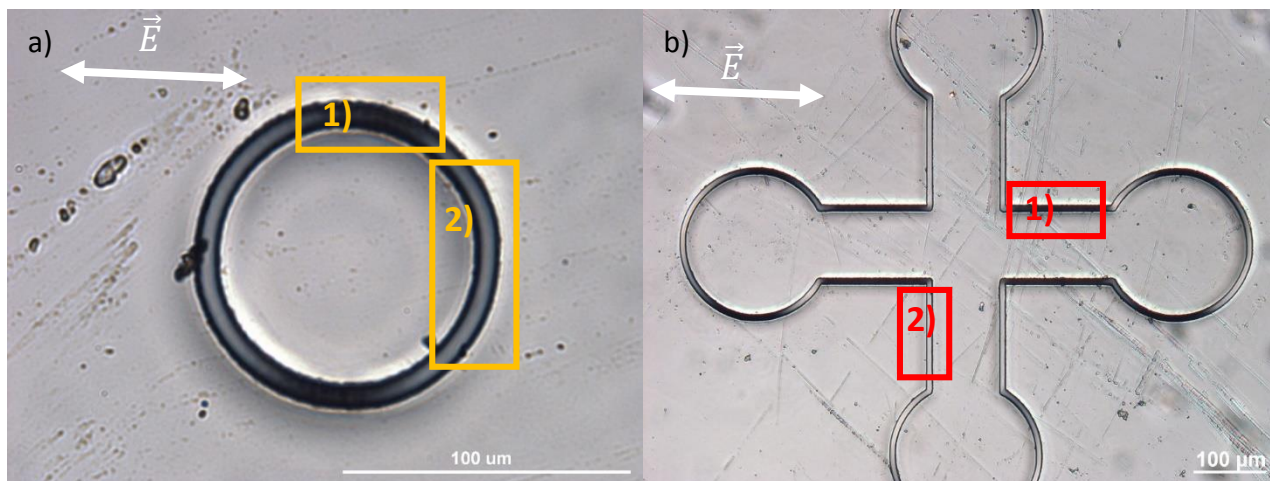
22 pav. 250 nJ impulsų energijos spinduliuote stikle suformuota figūra su vidine struktūra. Pozicionavimo sistemos stalų judėjimo greitis 2 mm/s. Ėsdinta 6 val. 5 % vandenilio fluorida rūgštyje.

Suformuotoje sudėtingos geometrijos figūroje trumpiausias atstumas tarp dviejų šalia esančių iškritusių elementų yra apie 7 μm .

10.4. Cheminio ėsdinimo selektyvumo stikle niuansai

Pamirkius 5 % vandenilio rūgšties tirpale lazeriu modifikuotą stiklą, buvo pastebėti stiklo ėsdinimosi netolygumai.

23 pav. esančios figūros buvo formuojamos su mažos energijos impulsais. Būtent prie tokių energijos verčių, kokios ir buvo naudojamos, stikle susiformavus nanogardelėms, labai stipriai pasireiškia ėsdinimo selektyvumas. Matome, kad ten, kur lazeris turėjo keliauti statmenai spinduliuotės poliarizacijai, stiklas jau yra išėsdintas, o ten, kur poliarizacija lygiagreti lazerio keliavimo kryptiai, yra likusios neišėsdintos zonos. Ėsdinimo sparta priklauso nuo stikle susidarančių nanogardelių ir yra didžiausia tuomet, kai nanogardelės, kurios formuojasi statmenai lazerio poliarizacijai, viena su kita persikloja.



23 pav. 250 nJ energijos impulsais stiklo suformuoto apskritimo, 2 val. 5 % HF rūgštyje, (a) ir 175 nJ energijos impulsais stiklo suformuotos pliuso formos, 4 val. 5 % HF rūgštyje, (b) nuotraukos. Pozicionavimo sistemos stalų judėjimo greitis – 1 mm/s. Pluošto poliarizacijos pavaizduotos kampuose. Pirmoje zonoje (1) matoma neišėsdinta sritis, antroje (2) – išėsdinta.

Eksperimente lydytame kvarce suformuotos figūros įrodo cheminio ėsdinimo selektyvumo egzistavimą. Į šį reiškinį atsižvelgiama tolimesnėje darbo dalyje, norint suformuoti mažus geometrinius atstumus turinčią figūrą.

10.5. Figūrų matmenų priklausomybė nuo ėsdinimo trukmės

Parinkus 200 kHz impulsų pasikartojimų dažnį ir nustačius 250 nJ impulsų energiją, lydytame kvarce buvo suformuoti apskritimo formos pažeidimai. Pradėjus nuo 0,2 mm apskritimo skersmens, su kiekvienu apskritimu skersmuo buvo mažinamas, kol gautas mažiausias apskritimas, turintis 2 μm teorinį (programiškai užduotą) skersmenį. Stalų judėjimo greitis buvo 1 mm/s didesniems apskritimams ir 0,1 mm/s mažesniems (iki 40 μm skersmens) apskritimams.

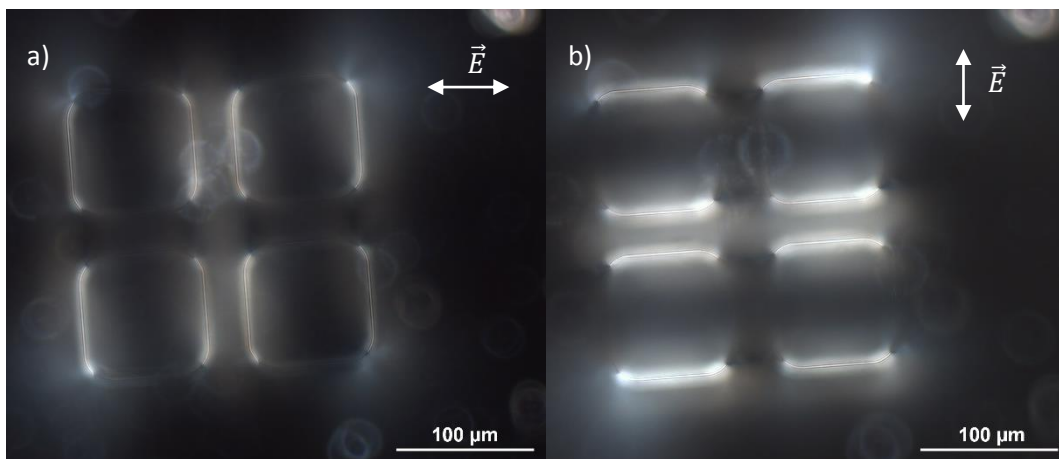
Gauta, kad bandinyje figūrų matmenys didėja, ilgėjant jų ėsdinimo trukmei. Tai ypač svarbu mažų matmenų figūroms. Uždavus lazeriu suformuoti 4 μm skersmens apskritimą, praktiškai jo dydis po 6 val. ėsdinimo tampa beveik penkis kartus didesnis už užduotąjį. Tačiau svarbu tai, kad po 2 val. dauguma apskritimų jau buvo iškritę iš bandinio. Vadinasi stiklas ėsdinasi ir toliau, nors ir nebebuvo lazeriu suformuotų pažeidimų. Kas 2 val. visų apskritimų skersmuo padidėdavo apie 3 μm, o tai reiškia po 1,5 μm sienelės.

Taigi, lydytas kvarcas, panardintas į 5 % vandenilio fluorida rūgštį, kas 1 val. iš visų pusių netenka po maždaug 0,75 μm medžiagos – į tai svarbu atsižvelgti, kai norima išgauti itin mažų matmenų figūras, t.y. tokiu atveju yra svarbu nepalikti bandinio rūgštyje per ilgai. Kitas svarbus

pastebėjimas: žinodami nepažeisto stiklo ėsdinimosi spartą, galime apytiksliai paskaičiuoti, kiek laiko reikia palikti bandinį rūgštyje, kad gautume norimą atstumą tarp iškritusių elementų.

10.6. Dvejopas lūžis ir mažiausio atstumo tarp iškritusių elementų gavimas

Norint gauti kuo mažesnę atstumą tarp iš bandinio ėsdinimo metu iškritusių elementų, buvo atsižvelgta į stiklo ėsdinimo selektyvumą. Lazerinio mikroapdirbimo metu buvo keičiama lazerinės spinduliuotės poliarizacija taip, kad ji būtų statmena lazerio pluošto judėjimo kryptčiai. Jei poliarizacija nebūtų buvusi keista ir būtų buvusi tokia, kaip pavaizduota **24 pav. a)**, tuomet **24 pav. a)** matomi pažeidimai būtų išsiėsdinę sparčiau, nei tie, kurie matomi **24 pav. b)**, ir tokiu būdu nebūtų galima gauti vienodų atstumų tarp kvadratų.

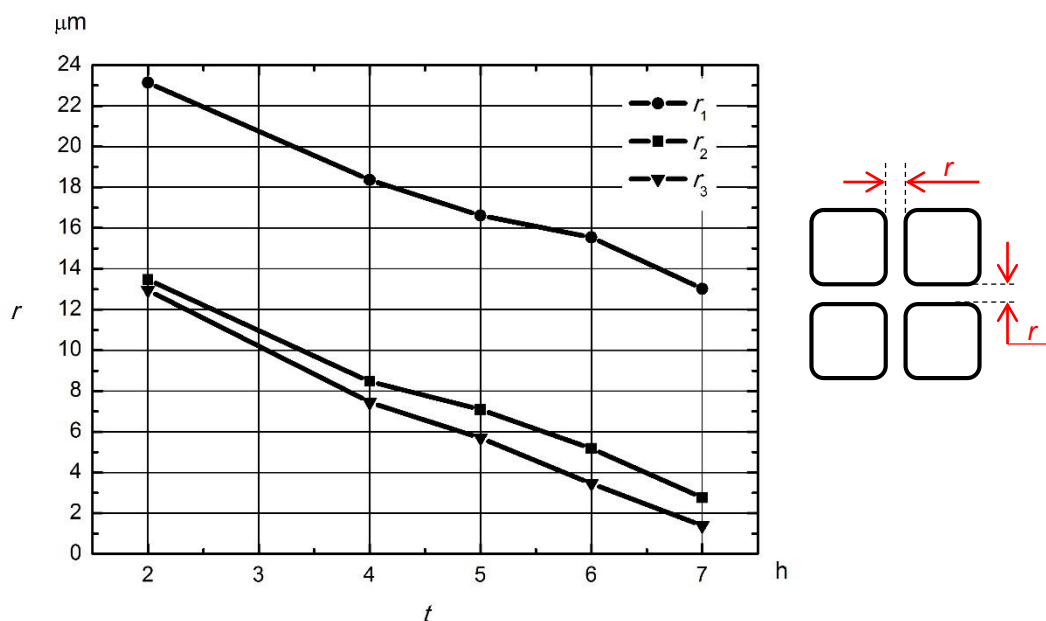


24 pav. Bandinio vaizdas prieš ėsdinimą pro optinį mikroskopą, kai poliarizatorius ir analizatorius statmeni vienas kitam. a) ir b) matomi pažeidimai stikle buvo daromi su kampuose pažymėtomis lazerio pluošto poliarizacijomis.

24 pav., nors poliarizatorius ir analizatorius statmeni vienas kitam, šviesos linijos matomos dėl to, kad bandinyje, paveikus jį su intensyvia lazerine spinduliuote, susidariusios nanogardelės pasižymi dvejopu lūžiu. Tiesiškai poliarizuotos spinduliuotės banga, pataikiusi į nanogardeles, pasidalija į paprastąją ir nepaprastąją bangas, kurios iš bandinio iškeliauja su fazės poslinkiu ir pasikeitusiomis poliarizacijos kryptimis. Krentančios šviesos poliarizacijos kryptčiai sutampant su nanogardelių išsidėstymo kryptimi, perėjusi šviesa per bandinį, savo poliarizacijos nepakeičia.

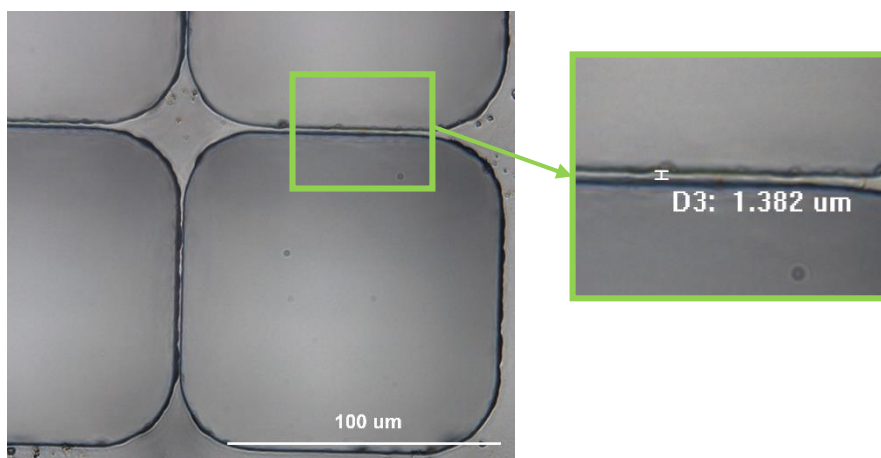
Trys bandiniai su skirtingais pradiniais atstumais tarp kvadratų buvo ėsdinami tol, kol iškrito visi elementai, ir tuomet ėsdinami toliau, žiūrint, kaip kito atstumas tarp iškritusių elementų,

laikui einant (**25 pav.**). Atstumo priklausomybė nuo ėsdinimo trukmės gauta tiesinė. Atstumas kas valandą sumažėdavo apie 2 μm . Tai reiškia, kad nepažeisto stiklo ėsdinimo sparta siekė 1 $\mu\text{m}/\text{val}$.



25 pav. Atstumo tarp iš bandinio iškritusių elementų priklausomybė nuo ėsdinimo trukmės trims bandiniams su skirtingais pradiniais matmenimis ir impulsų energijomis: $r_1 = 30 \mu\text{m}$, $E_1 = 250 \text{ nJ}$, $r_2 = 20 \mu\text{m}$, $E_2 = 250 \text{ nJ}$, $r_3 = 20 \mu\text{m}$, $E_3 = 350 \text{ nJ}$.

Mažiausias atstumas tarp iš bandinio iškritusių elementų po 7 val. ėsdinimo buvo gautas trečiam bandiniui, t.y. maždaug 1 μm (**26 pav.**). Tokį atstumą būtų galima gauti ir pirmam bei antram bandiniui, juos paėsdinus dar maždaug 5,5 val. ir kiek mažiau nei 1 val. atitinkamai.



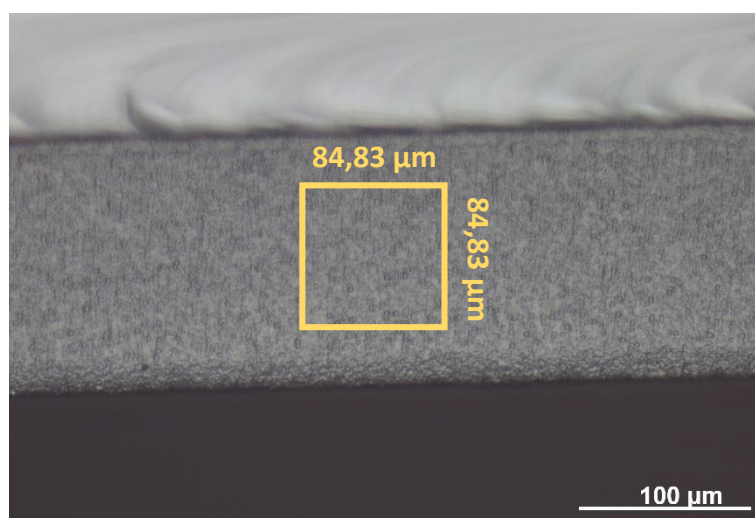
26 pav. Mažiausias gautas atstumas tarp iš bandinio iškritusių elementų. Figūra formuota 350 nJ energijos impulsais, transliavimo greitis 0,1 mm/s. Bandinys ėsdintas 7 val. 5 % HF rūgštyje.

10.7. Šiurkštumas

Buvo atlikta lydyto kvarco sienelių šiurkštumo parametrinė analizė. Stiklas buvo modifikuotas su įvairiomis spinduliuotės poliarizacijomis ir impulsų energijomis, buvo keičiamas bandinio transliacijos greitis ir žingsnis Δz . Kas buvo keičiama, apibendrintai surašyta 1-oje lentelėje. Visa tai buvo daroma, norint atrasti optimalius apdirbimo parametrus. Bandiniai išdinti 2 val. 5 % vandenilio fluorida rūgštyje. Tada bandiniai buvo perlaužiami ties išsiėsdinusiiais pažeidimais ir žiūrimi gauti profiliai, jų šiurkštumas. Profilometras matavo $(84,83 \cdot 84,83) \mu\text{m}^2$ ploto šiurkštumą. Plotas buvo parenkamas ties sienelės paviršiaus ir dugno viduriu (**27 pav.**). Šiurkštumo tyrimo rezultatai vaizduojami **28 pav.**

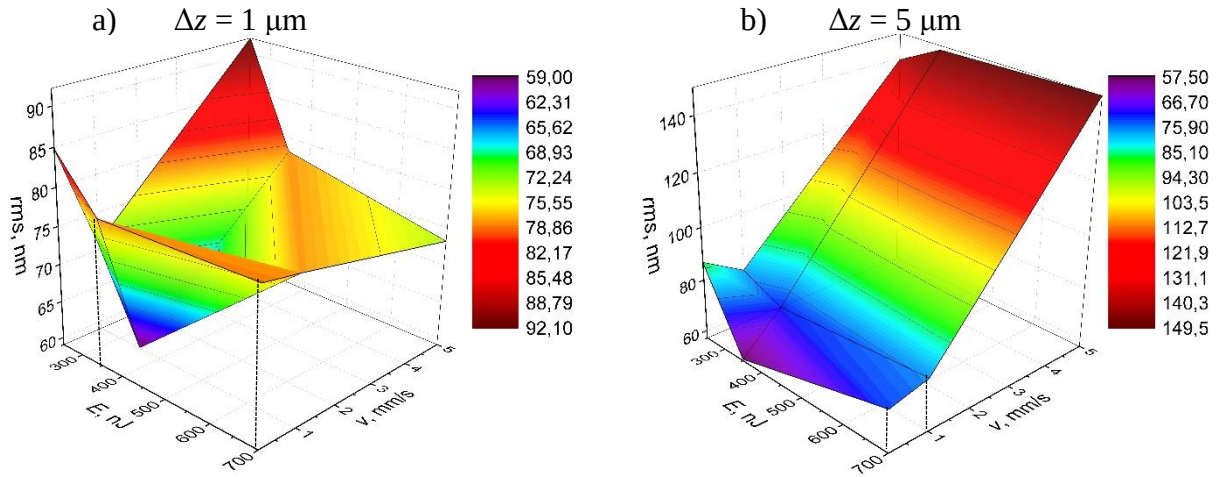
1 lentelė. Šiurkštumo parametrinės analizės kintamieji ir jų reikšmės

Kintamieji	Reikšmės		
Impulsų energija E , nJ	250	350	700
Bandinio transliavimo greitis v , mm/s	0,1	1	5
Žingsnis Δz , μm	1		5
Spinduliuotės poliarizacija	statmena	lygiagreti	apskritiminė

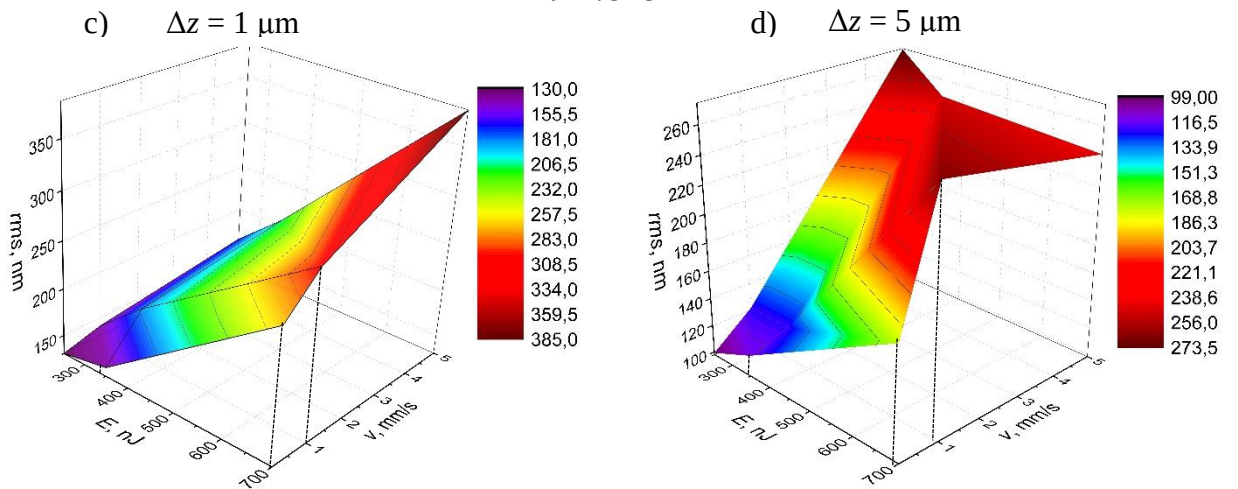


27 pav. Lazerių modifikuotos ir išėsdintos sienelės nuotrauka. Geltonas kvadratas schematiškai vaizduoja sritį, kurios šiurkštumas buvo matuojamas profilometru.

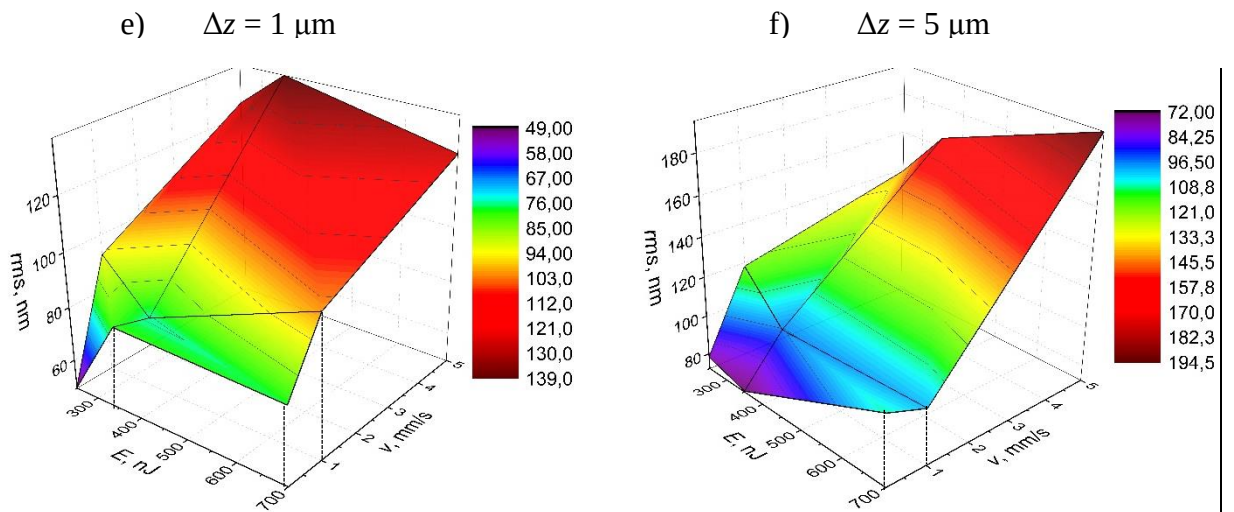
Polarizacija: statmena



Polarizacija: lygiagreti



Polarizacija: apskritiminė

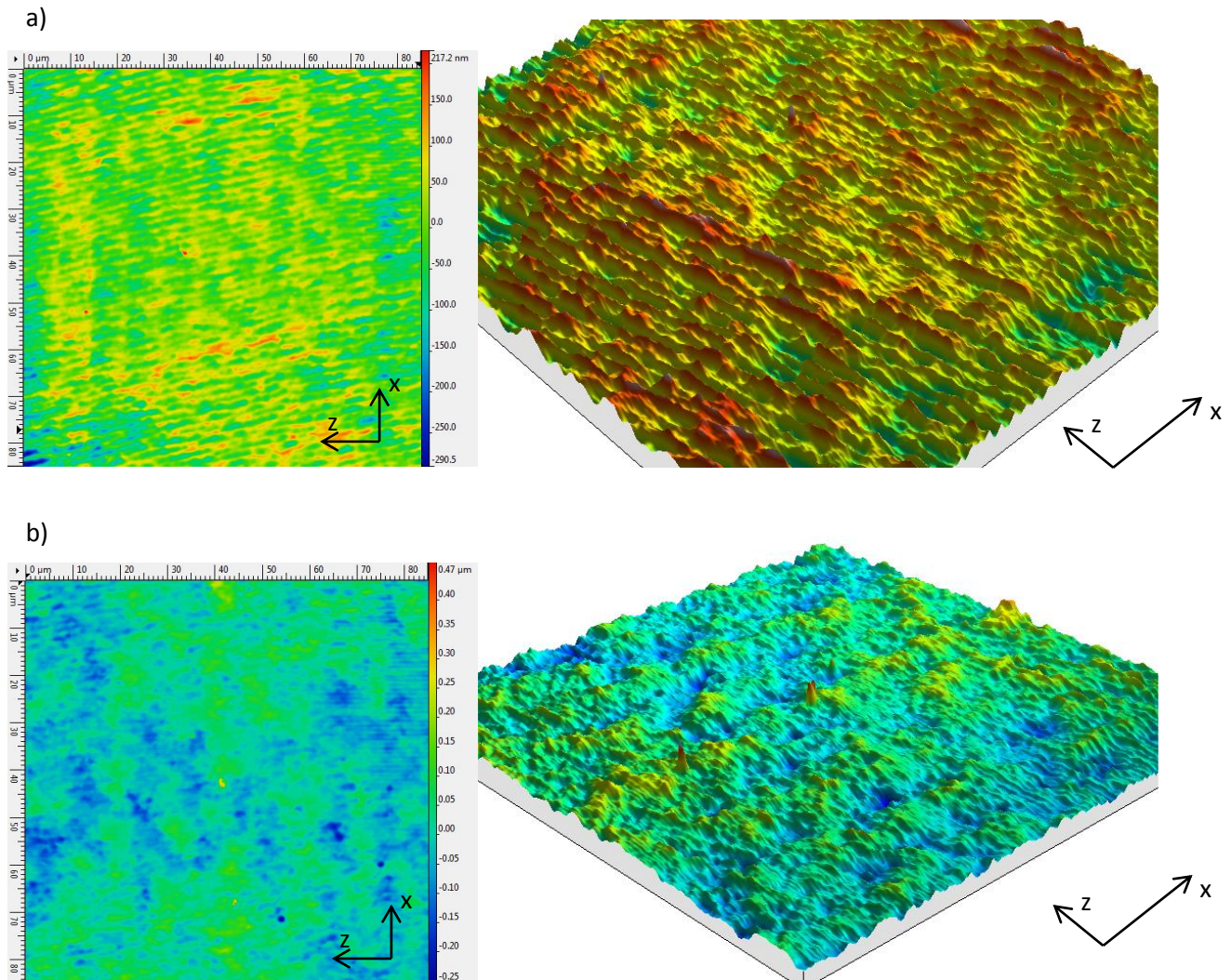


28 pav. Bandinių šiurkštumų priklausomybės nuo impulsų energijų ir pozicionavimo sistemos stalų judėjimo greičių, kai lazerinio mikroapdirbimo metu pluošto poliarizacija buvo statmena bandinio transliavimo kryptiai (a, b), lygiagreti bandinio transliavimo kryptiai (c, d), apskritiminė (e, f), o žingsnis Δz buvo $1 \mu\text{m}$ (a, c, e) arba $5 \mu\text{m}$ (b, d, f). Bandiniai išdinti 2 val. 5 % HF rūgštyje.

Aiškiausia smailė matoma **28 pav. a)**, kuomet spinduliuotės poliarizacija buvo statmena bandinio transliavimo kryptčiai ir žingsnis Δz buvo nustatytas 1 μm . Tiesa, tikrasis žingsnis bandinyje, dėl spinduliuotės fazinio greičio pokyčio patenkant iš oro į stiklą, buvo 1,5 μm . Statmenai poliarizacijai ir mažam Δz žingsniui gauta, kad mažiausias šiurkštumas pasiekiamas prie 350 nJ impulsų energijos ir 1 mm/s bandinio transliavimo greičio (**29 pav. a)**. Šiuo atveju šiurkštumo vertė svyruoja apie (59 ± 10) nm. Tiek padidinus, tiek pamažinus bandinio transliavimo greitį arba impulsų energiją, šiurkštumo vertės tik kyla.

Visgi, pastebėtina, kad net ir aukščiausia **28 pav. a)** grafike matoma šiurkštumo vertė, esanti prie 250 nJ impulsų energijos ir 5 mm/s transliavimo greičio, yra santykinai nedidelė ((92 ± 10) nm). Šią vertę viršija ir pati mažiausia vertė, gauta, kai poliarizacija buvo lygiagreti bandinio transliavimo kryptčiai (**28 pav. c, d)**. Taip yra todėl, kad bandinyje susidaro nanogardelės, t.y. struktūriniai medžiagos pokyčiai, lemiantys ėsdinimo selektyvumą. Esant poliarizacijai, statmenai bandinio transliavimo kryptčiai, nanogardelės susidaro lygiagrečiai transliavimo kryptties, tarpusavyje persikloja ir bendrai užima didesnę plotą, nei tokios gardelės, kurios susidaro, esant lygiagrečiai spinduliuotės poliarizacijai bandinio transliavimo kryptčiai. Todėl rūgštis nuosekliau, tolygiau ir greičiau ėsdina būtent su statmena poliarizacija paveiktas sritis. Paminėtina, kad spinduliuote nepaveikto lydyto kvarco paviršiaus šiurkštumas mažesnis nei 20 nm.

Esant poliarizacijai, statmenai bandinio transliavimo kryptčiai ir didesniai žingsniui Δz (**28 pav. b)**, tokios aiškios smailės kaip **28 pav. a)** išskirti nebegalime. Mažiausia šiurkštumo vertė apie (58 ± 16) nm pasiekama prie 350 nJ impulsų energijos ir 0,1 mm/s bandinio transliavimo greičio (**29 pav. b)**. Nors šiurkštumo vertė praktiškai sutampa su šiurkštumo verte, kai žingsnis Δz buvo mažesnis (**29 pav. a)**, tačiau šie bandinio pažeidimo parametrai yra mažiau patrauklūs, nes su mažu bandinio transliavimo greičiu lazerinis mikroapdirbimas užtrunka labai ilgai. Apdirbti 1 mm ilgio ir 0,1 mm gylio plotą užtruktų 200 s, tuo tarpu tokį patį plotą, kai $\Delta z = 1 \mu\text{m}$ ir greitis 1 mm/s, užtruktų 100 s, neatsižvelgiant į trukmes, kai transliacinis stalas keliauja, neveikiant spinduliuotei.

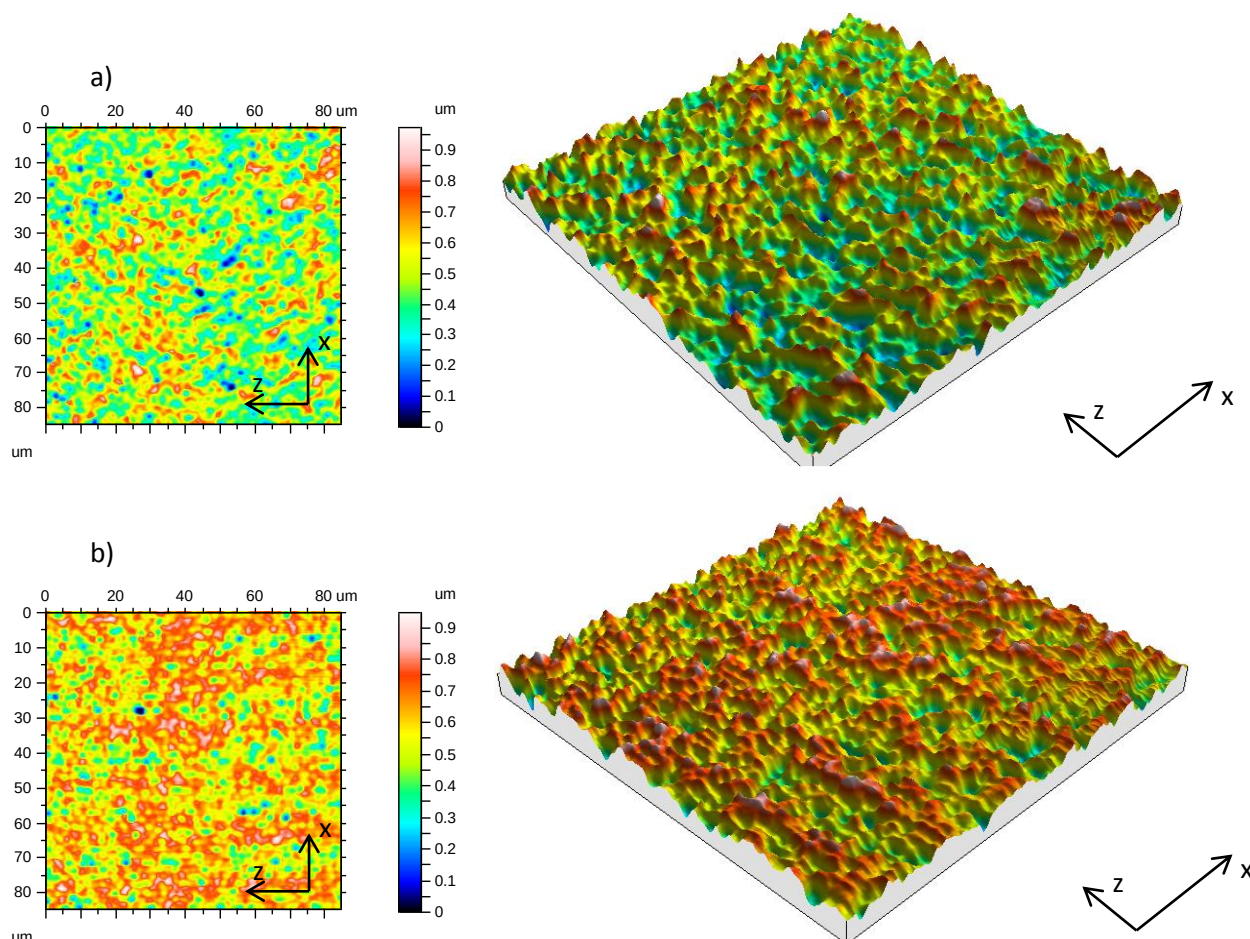


29 pav. 350 nJ energijos impulsais modifikuotų ir 2 val. 5 % HF rūgštyje ėsintų paviršių topografiniai vaizdai. Bandinius veikusios spinduliuotės poliarizacija buvo statmena bandinių transliavimo kryptčiai. Bandinio a) transliavimo greitis 1 mm/s, žingsnis $\Delta z = 1 \mu\text{m}$, paviršiaus šiurkštumas svyruoja apie 59 nm. Bandinio b) transliavimo greitis 0,1 mm/s, žingsnis $\Delta z = 5 \mu\text{m}$, Paviršiaus šiurkštumas mažesnis nei 58 nm.

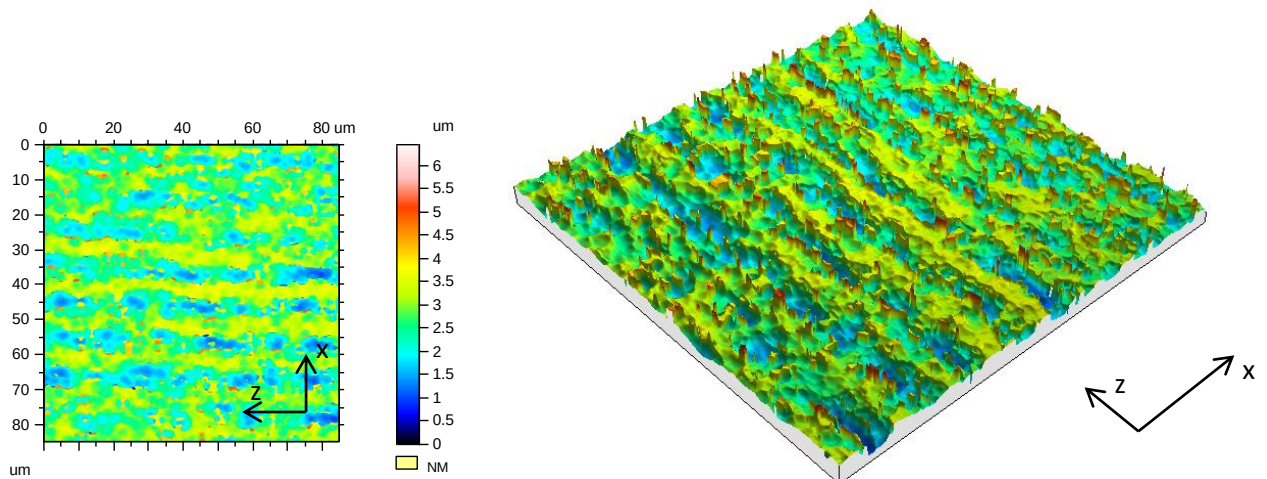
Renkantis tarp vienodus transliavimo greičius ir energijas, tačiau skirtingus žingsnius Δz turinčių variantų, kai poliarizacija statmena, reikėtų paminėti, kad, nors prie 350 nJ ir 1 mm/s šiurkštumas prie $\Delta z = 5 \mu\text{m}$ yra apie 10 nm didesnis už šiurkštumą, esantį prie $\Delta z = 1 \mu\text{m}$, tačiau su didesniu žingsniu bandinys būtų kur kas greičiau apdirbtas.

Lygiagrečiai bandinio transliavimo kryptčiai poliarizacijai visos gautos šiurkštumų vertės prie įvairių parametrų smarkiai viršijo statmeną transliacijos kryptčiai poliarizaciją turėjusių paviršių vertes prie atitinkamų parametrų (**28 pav.**). Pvz., prie 250 nJ impulsų energijos, 1 mm/s transliavimo greičio ir žingsnio $\Delta z = 1 \mu\text{m}$, naudojus statmenos poliarizacijos spinduliuotę, gautas šiurkštumas apie $(71 \pm 10) \text{ nm}$, tuo tarpu prie lygiagrečios poliarizacijos – $(141 \pm 17) \text{ nm}$, t.y. net du

kartus didesnis šiurkštumas. Tai vaizdžiai parodo, kokią didelę įtaką paviršiaus šiurkštumui turi poliarizacijos parinkimas. Bandinių sienelių, gautų naudojus lygiagrečią bandinio transliavimo kryptiais poliarizaciją, topografinių vaizdų pavyzdžiai matomi **30 pav.**



30 pav. Lazeriu modifikuotų ir ėsintų 2 val. 5 % HF rūgštyje paviršių topografiniai vaizdai. Srities a) šiurkštumas yra 139 nm, b) – 183 nm. Abu paviršiai gauti lydytą kvarcą apdirbant su 350 nJ impulsų energijos spinduliuote, kurios poliarizacija lygiagreti bandinio transliavimo kryptiai, žingsniu $\Delta z = 1 \mu\text{m}$, tačiau a) sritis buvo gauta su 0,1 mm/s transliavimo greičiu, b) – su 1 mm/s.

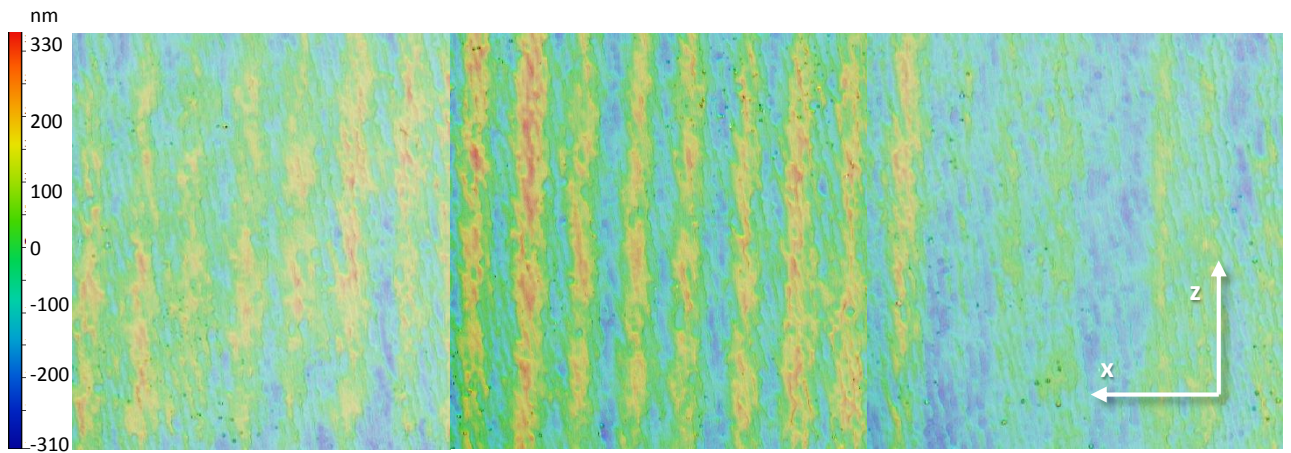


31 pav. 700 nJ energijos impulsais modifikuoto ir 2 val. 5 % HF rūgštyje ėsdinto paviršiaus topografinis vaizdas. Stiklą veikusios spinduliuotės poliarizacija buvo lygiagreti bandinio transliavimo kryptčiai, transliavimo greitis 5 mm/s, žingsnis $\Delta z = 1 \mu\text{m}$. Sienelės paviršiaus šiurkštumas svyruoja apie 384 nm.

Bandinį veikiant didelės energijos impulsais, tvarkinga periodinė nanogardelių struktūra apyra, pradeda formotis nanoįtrūkimai, mikroertmės. Mikrosprogimų metu galimi stiprūs medžiagos struktūriniai pokyčiai. Intensyvi lazerinė spinduliuotė nuplėšia gardelę rišančius kovalentinius elektronus, o teigiami jonai išsisklaido į gretimas zonas, veikiami kuloninių jėgų [27]. Taip medžiagoje susiformuoja arba tuščios, arba gerokai praretėjusios ertmės. Tuomet bandinio struktūriniai pokyčiai tampa labiau chaotiški, taip pat ir bandinio ėsdinimasis tampa netolydus. Didžia dalimi dėl to **31 pav.** matomo paviršiaus šiurkštumas yra labai didelis.

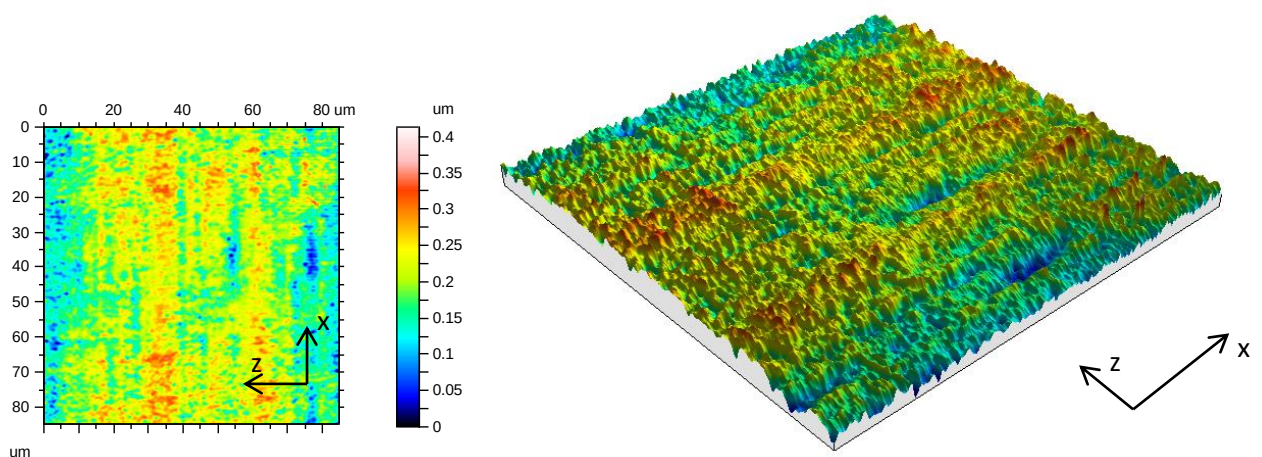
Be to, **31 pav.** matomi vinguriavimai x kryptimi. Jie galėjo susidaryti dėl didelio bandinio transliavimo greičio. Galimai skyrėsi impulsų kiekis tenkantis ploto vienetui. Tokie vinguriavimai x kryptimi prie 5 mm/s transliavimo greičio pastebimi ir kitoms poliarizacijoms, impulsų energijoms bei kitam žingsniui Δz . Visgi, neišėina sakyti, kad jie turi tvarkingą periodą, kadangi skirtingose bandinio vietose periodas skiriasi arba visai išnyksta. Tam įtakos galėjo turėti ir pozicionavimo stalo įsibėgėjimas bei sulėtėjimas, kadangi greitis nustatytas 5 mm/s, o pažeidimo plotis tik 1 mm. **32 pav.** parodo, kaip skiriasi topografinis vaizdas, keliaujant per bandinį x ašimi.

Visoms tirtoms spinduliuotės poliarizacijoms šiurkštumas stipriai priklausė nuo bandinio transliavimo greičio. Išskyrus bandinį su transliavimo kryptčiai statmena poliarizacija ir žingsniu $\Delta z = 1 \mu\text{m}$, visiems kitiems atvejams šiurkštumas prie 5 mm/s greičio žymiai viršijo vidutinę šiurkštumo vertę atitinkamos poliarizacijos. Tai parodo, kad didelis transliavimo greitis kenkia bandinio paviršiaus lygumui.



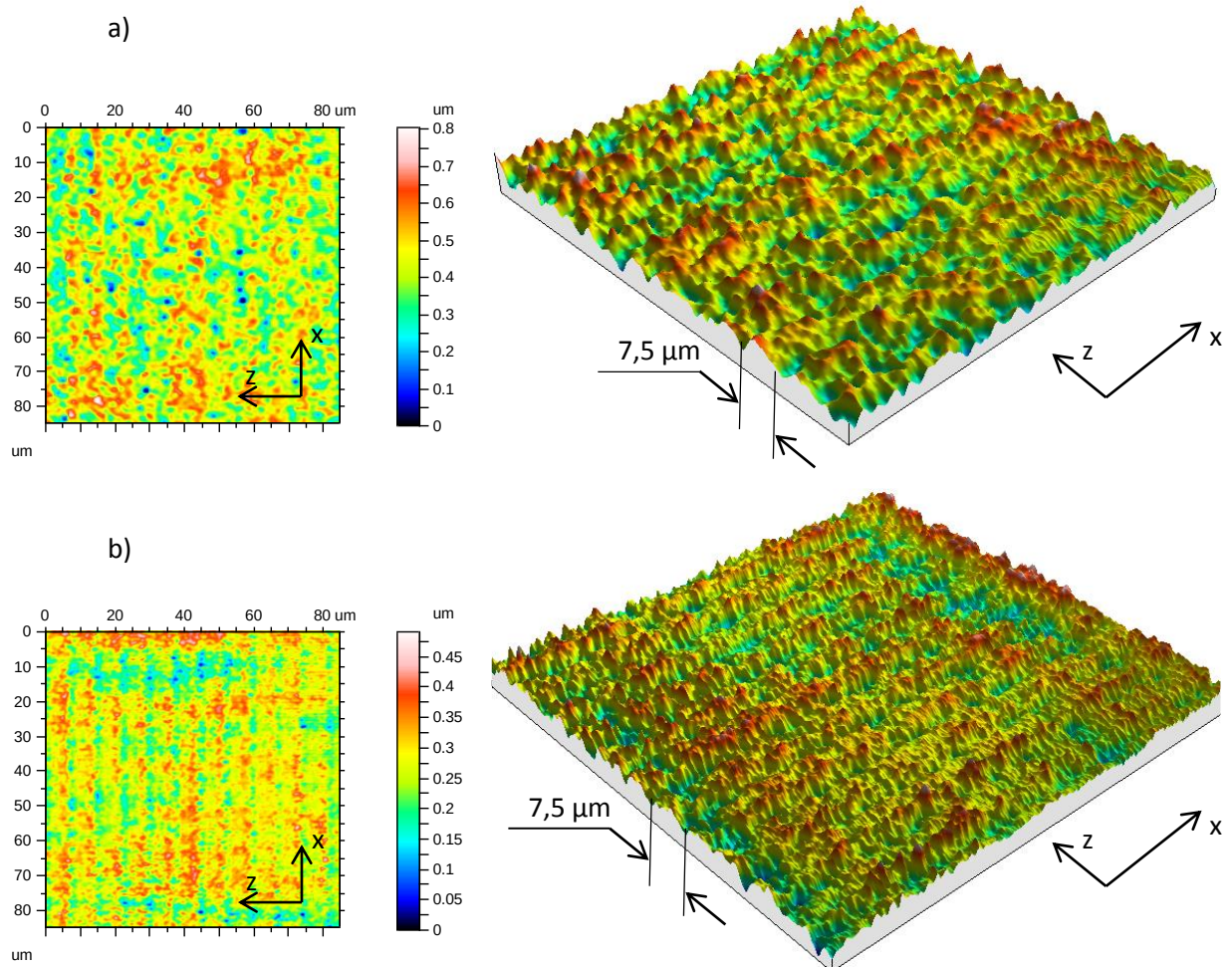
32 pav. 250 nJ energijos impulsais modifikuoto ir 2 val. 5 % HF rūgštyje ėsdinto paviršiaus topografiniai vaizdai. Bandinį veikusios spinduliuotės poliarizacija buvo statmena bandinio transliavimo kryptčiai, transliavimo greitis 5 mm/s, žingsnis $\Delta z = 1 \mu\text{m}$. Paviršiaus šiurkštumas viršija 92 nm. Spinduliuotė sklido x kryptimi, žingsnis, spinduliuotei neveikiant bandinio, buvo žengiamas z kryptimi.

Vieną mažiausių šiurkštumų pavyko pasiekti su apskritimiškai poliarizuota spinduliuote. Bandinį veikusių impulsų energija buvo 250 nJ, bandinio transliavimo greitis 0,1 mm/s, o žingsnis $\Delta z = 1 \mu\text{m}$. Po 2 val. ėsdinimo 5 % vandenilio fluorida rūgštyje išryškėjusio šiurkštumo vertė buvo $(49 \pm 10) \text{ nm}$ (**33 pav.**). Tačiau, nors šis gautas šiurkštumas yra vienas mažiausių, lazerinio apdirbimo trukmė yra viena ilgiausių. 1 mm ilgio ir 0,1 mm ploto apdirbimui reikalinga beveik 17 min., neatsižvelgiant į bandinio transliavimo laiką, kai spinduliuotė neveikia bandinio.



33 pav. 250 nJ energijos impulsais modifikuoto ir 2 val. 5 % HF rūgštyje ėsdinto paviršiaus topografinis vaizdas. Stiklą veikusi spinduliuotė buvo poliarizuota apskritimiškai, bandinio transliavimo greitis 0,1 mm/s, žingsnis $\Delta z = 1 \mu\text{m}$. Paviršiaus šiurkštumas apie 49 nm.

Iš **33 pav.** topografinio vaizdo galime pastebėti, kad paviršiaus pakilimai ir nusileidimai yra labai nedideli savo vertėmis. Aukščiausių ir žemiausių taškų skirtumai neviršija nei 400 nm. Dar reiktų paminėti, kad, nors paveiksliukyje pavaizduota topografinė skalė prasideda nuo žemiausio taško, šiuurkštumo *RMS* vertei gauti nulinė vertė yra parenkama ties pakilimų ir nusileidimų viduriu.



34 pav. Pažeidimų, darytų su 350 nJ energijos impulsais 0,1mm/s translacijos greičiu x kryptimi, ėsdintų 2 val. 5 % HF rūgštyje, topografinis vaizdas. Pluošto poliarizacija buvo lygiagreti bandinio translacinei kryptčiai (a), apskritiminė (b). Kompiuterinėje valdymo sistemoje „SCA“ užduotas žingsnis buvo $\Delta z = 5 \mu\text{m}$, tačiau matoma periodinė struktūra z ašyje atsikartoja kas 7,5 μm .

34 pav. matomos struktūros periodas z ašyje yra 7,5 μm (tai ypač gerai matosi **34 pav.** b) topografiniame vaizde) ir skiriasi nuo kompiuterine valdymo sistema užduoto $\Delta z = 5 \mu\text{m}$ žingsnio. Taip yra todėl, kad nestatmenai į bandinį krentanti spinduliuotė, pereidamas iš vienos terpės į kitą, pakeičia savo sklaidimo kampą. Šiuo atveju spinduliuotė iš optiškai retesnės medžiagos, oro, patenka į optiškai tankesnę medžiagą, stiklą, ir susifokusuoja giliau, nei užduota. Kur susifokusuos, galima paskaičiuoti iš formulės:

$$z_t = z_u \cdot n, \quad (3)$$

kur z_u – užduota pluošto židinio taško pozicija bandinyje, n – santykinis lūžio rodiklis (antrosios aplinkos, t.y., bandinio, lūžio rodiklis pirmosios aplinkos atžvilgiu), z_u – tikroji pluošto fokuso taško pozicija bandinyje. Vadinasi, jeigu pluošto sąsmauka yra ant bandinio paviršiaus ir su transliaciniu stalu pavažiuosime 5 μm link bandinio, pluošto sąsmauka bus 7,5 μm atstumu nuo bandinio paviršiaus, kai $n = 1,5$. Tai atitinka eksperimente gautus atstumus.

Pagrindiniai rezultatai ir išvados

1. Tiksliausias, mažiausių matmenų figūras galima suformuoti su mažos energijos impulsais (170 nJ – 300 nJ), kur labiausiai pasireiškia ėsdinimo selektyvumas. Mažiausią galimą gauti stiklo formuojamos figūros diametrą riboja spinduliuotės impulsų padarytų modifikacijų matmenys, taip pat bandinio storis, nes ėsdinantis arčiau bandinio paviršiaus esančioms lazeriu paveiktoms zonoms, didėja plotas besiėsdinančio stiklo, nepaveikto spinduliuote. Eksperimente 0,2 mm storio lydytame kvarce mažiausios suformuotos figūros skersmuo buvo apie 7 μm .
2. Lazeriu asistuito cheminio ėsdinimo metodas leidžia išpjauti iš stiklo figūras, kurių detalės siekia 1 μm . Toks atstumas tarp iš bandinio iškritusių elementų buvo gautas, nes buvo atsižvelgta į spinduliuote nepaveikto lydyto kvarco 5 % ėsdinimo spartą vandenilio fluorida rūgštyje, kuri buvo eksperimentais nustatyta ir svyravo nuo 0,75 $\mu\text{m/val.}$ iki 1 $\mu\text{m/val.}$
3. Nustatyta, kad lydyto kvarco pjūvio sienelių šiurkštumas stipriai priklauso nuo lazerinės spinduliuotės, kuria apdirbamas bandinys, poliarizacijos. Mažas šiurkštumo vertes galima gauti bandinį paveikiant statmenai bandinio transliavimo kryptčiai poliarizuota arba apskritimiškai poliarizuota spinduliuote, tačiau ne lygiagrečiai poliarizuota spinduliuote, nes pastaroji paveikia bandinį taip, kad HF rūgštis paviršių ėsdina selektyviai vinguriuotai dėl susidariusių viena su kita nepersiklojančių nanogardelių.
4. Ištirtas lydyto kvarco pjūvio sienelių šiurkštumas parodė didelę priklausomybę nuo bandinio transliavimo greičio, naudojamo apdirbant bandinį. Nustatyta, kad mažesnis transliavimo greitis duoda geresnius šiurkštumo rezultatus, nes bandinys paveikiamas didesniu šūvių skaičiumi ir susiformuoja homogeniškos gardelės, kurios ir nulemia gerą šiurkštumą. Esant didesnei greičio vertei, t.y. 5 mm/s, šiurkštumas beveik visur buvo gautas didelis (*RMS* didesnis už 125 nm).
5. Mažiausi šiurkštumai (50 nm – 60 nm) buvo pasiekti, naudojant statmeną bandinio transliavimo kryptčiai ir apskritiminę poliarizaciją. Tačiau nustatyta, kad naudingiau naudoti statmeną poliarizaciją, nes bandinio lazerinio apdirbimo trukmė su apskritimine poliarizacija, norint gauti geras šiurkštumo vertes, yra kur kas ilgesnė už trukmės, reikalingas apdirbti bandinį su statmenos bandinio transliavimo kryptčiai poliarizacijos spinduliuote.

Literatūra

- [1] K. M. Davis, K. Miura, N. Sugimoto, K. Hirao, Writing waveguides in glass with a femtosecond laser, *Opt. Lett.*, **21**(21), 1729–1731 (1996).
- [2] K. Miura, J. Qiu, H. Inouye et al, Photowritten optical waveguides in various glasses with ultrashort pulse laser, *Appl. Phys. Lett.*, **71**, 3329-3331 (1997).
- [3] A. M. Streltsov, F. Borrelli, Fabrication and analysis of directional coupler written in glass by nanojoule femtosecond laser pulses, *Opt. Lett.*, **26**, 42-44 (2001).
- [4] W. Watanabe, D. Kuroda et al, Fabrication of Fresnel zone plate embedded in silica glass by femtosecond laser pulses, *Opt. Express*, **10**(19), 978-983 (2002).
- [5] A. Marcinkevičius, S. Juodkasis, M. Watanabe et al, Femtosecond laser-assisted three-dimensional microfabrication in silica, *Opt. Lett.*, **26**, 277-279 (2001).
- [6] M. Masuda, K. Sugioka, Y. Cheng et al, 3-D microstructuring inside photosensitive glass by femtosecond laser excitation, *Appl. Phys. A.*, **76**, 857-860 (2003).
- [7] K. Sugioka, Y. Cheng, K. Midorikawa, Three-dimensional micromachining of glass using femtosecond laser for lab-on-a-chip device manufacture, *Appl. Phys. A.*, **81**, 1-10 (2005).
- [8] Y. Hanada, K. Sugioka et al, 3D microfluidic chips with integrated functional microelements fabricated by a femtosecond laser for studying the gliding mechanism of cyanobacteria, *Lab Chip*, **11**, 2109-2115 (2008).
- [9] J. Hohlfeld, S. S. Wellershoff, J. Güdde et al, Electron and lattice dynamics following optical excitation of metals, *Chem. Phys.* **251**, 237-258 (2000).
- [10] R. Srinivasan, E. Sutcliffe, B. Braren, Ablation and etching of polymethylmethacrylate by very short (160 fs) ultraviolet (308 nm) laser pulses, *Appl. Phys. Lett.*, **51**, 1285-1287 (1987).
- [11] S. Küper, M. Stutke, Femtosecond uv excimer laser ablation, *Appl. Phys. B.*, **44**, 99-204 (1987).
- [12] S. Küper, M. Stutke, Ablation of polytetrafluoroethylene (Teflon) with femtosecond UV excimer laser pulses, *Appl. Phys. Lett.*, **54**, 4-6 (1989).
- [13] S. Küper, M. Stutke, Ablation of uv-transparent materials with femtosecond UV excimer laser pulses, *Microelectron Eng.*, **9**, 475-480 (1989).
- [14] R. Roy, D. K. Agrawal et al, Very low thermal expansion coefficient materials, *Annual Review of Materials Science*, **19**, 59-81 (1989).
- [15] L. Keldysh, Ionization in the field of a strong electromagnetic wave, *Sov. Phys. JEPT*, **20**, 1307–1314 (1965).

- [16] P. Yu. M. Cardona, *Fundamentals of Semiconductors: Physics and Materials Properties* (Graduate Texts in Physics) (Springer, 2010).
- [17] A. Molchanov, Development of avalanche ionization in transparent dielectrics under the action of light pulse, *Sov. Phys. Solid State*, **12**, 749–750 (1970).
- [18] V. V. Kononenko, V. P. Pashinin, M. S. Komlenok, and V. I. Konov, Laser-induced modification of bulk fused silica by femtosecond pulses, *Laser Phys.*, **19**(6), 1294–1299 (2009).
- [19] R. Taylor, C. Hnatovsky, E. Simova, Applications of femtosecond laser induced self-organized planar nanocracks inside fused silica glass, *Laser & Photon. Rev.*, **1-2**, 26-46 (2008).
- [20] Y. Shimotsuma, M. Sakakura, P. G. Kazansky, M. Beresna et al, Ultrafast Manipulation of Self-Assembled Form Birefringence in Glass, *Adv. Mater.*, **22**, 4039-4043 (2010).
- [21] C. Hnatovsky, R. S. Taylor, E. Simova et al, Polarization-selective etching in femtosecond laser-assisted microfluidic channel fabrication in fused silica, *Opt. Lett.*, **30**, 1867-1869 (2005).
- [22] Y. Shimotsuma, P. G. Kazansky, J. Qiu et al, Self-organized nanogratings in glass irradiated by ultrashort light pulses, *Phys. Rev. Lett.*, **91**, 247405(4) (2003).
- [23] V. R. Bhardwaj, E. Simova, Rajeev P. P. et al, Optically produced arrays of nano-planes inside fused silica, *Phys. Rev. Lett.*, **96**, 057404(4) (2006).
- [24] K. C. Vishnubhatla, N. Bellini, R. Ramponi et al, Shape control of microchannels fabricated in fused silica by femtosecond laser irradiation and chemical etching, *Optics Express*, **17**, 8685-8695 (2009).
- [25] H. Schloze, Chemical durability of glasses, *Journal of Non-Crystalline Solids*, **53**(1-3), 91-103 (1982).
- [26] P. G. Kazansky, W. Yang, E. Bricchi et al, “Quill” writing with ultrashort light pulses in transparent materials, *Appl. Phys. Lett.*, **90**, 151120 (2007).
- [27] D. Paipulas, Lūžio rodiklio modifikavimas stikluose ir kristaluose veikiant ultratrumpaisiais lazerio impulsais, Vilniaus universitetas, (2011).

Santrauka

Stiklo apdirbimas lazeriu asistuito cheminio ėsdinimo metodu pirmą kartą pademonstruotas 2001 m. A. Marcinkevičiaus ir S. Juodkazio. Nuo to laiko, pradėti šio metodo pritaikymo mikrofluidikos biomikroplokštelių, mikrolaboratorių lustuose, mikroanalizės sistemų (μ -TAS), optofluidikos prietaisų gamybai tyrimai. Pagrindiniai šio metodo privalumas - tiesioginis trimatis lazerinis rašymas chemiškai stabiluose stikluose.

Šio darbo tikslas buvo ištirti lazeriu asistuito cheminio ėsdinimo galimybes, suformuoti sudėtingos geometrijos dvimates figūras ir atlikti parametrinę lydyto kvarco pjūvio sienelių šiurkštumo analizę.

Stiklo mikroapdirbimo tyrimams atlikti buvo naudojamas Yb:KGV *Pharos* lazeris (gamintojas – *UAB Šviesos konversija*), spinduliuojantis 1030 nm bangos ilgio 320 fs impulsų trukmės spinduliuotę. Eksperimentams buvo pasirinktas lęšis, kurio skaitinė apertūra (NA) yra 0,4. Pozicionavimo sistemą sudarė trys *Aerotech* transliaciniai stalai. Lydytas kvarcas buvo modifikuojamas tiesioginio lazerinio rašymo būdu ir ėsdinamas 5 % vandenilio fluorida rūgštyje.

Nustatyta, kad tiksliausias, mažiausių matmenų figūras galima suformuoti su mažos energijos impulsais (170 nJ – 300 nJ), kur labiausiai pasireiškia ėsdinimo selektyvumas. Mažiausią galimą gauti stikle formuojamos figūros diametrą riboja spinduliuotės impulsų padarytų modifikacijų matmenys, taip pat bandinio storis, nes ėsdinantis arčiau bandinio paviršiaus esančioms lazeriu paveiktoms zonoms, didėja plotas besiėsdinančio stiklo, nepaveikto spinduliuote. Lazeriu asistuito cheminio ėsdinimo metodas leidžia išpjauti iš stiklo figūras, kurios detalės siekia 1 μ m. Tai galima pasiekti, atsižvelgus į spinduliuote nepaveikto lydyto kvarco 5 % ėsdinimo spartą vandenilio fluorida rūgštyje, kuri buvo eksperimentais nustatyta ir svyravo nuo 0,75 μ m/h iki 1 μ m/h.

Ištirta, kad lydyto kvarco pjūvio sienelių šiurkštumas stipriai priklauso nuo lazerinės spinduliuotės, kuria apdirbamas bandinys, poliarizacijos ir bandinio transliavimo greičio. Mažas šiurkštumo vertes galima gauti bandinį transliuojant mažu greičiu ir paveikiant jį statmenai jo transliavimo kryptčiai poliarizuota arba apskritimiškai poliarizuota spinduliuote. Tačiau bandinio lazerinio apdirbimo trukmė su apskritimine poliarizacija, norint gauti geras šiurkštumo vertes, yra kur kas ilgesnė už trukmės, reikalingas apdirbti bandinį su statmenos bandinio transliavimo kryptčiai poliarizacijos spinduliuote. Lygiagrečiai bandinio transliavimo kryptčiai poliarizuota spinduliuote mažų šiurkštumo verčių gauti neišeina, nes pastaroji paveikia bandinį taip, kad HF rūgštis paviršių ėsdina selektyviai vinguriuotai dėl susidariusių viena su kita nepersiklojančių nanogardelių.

Indrè Indilaîtè
PRECISION MICROFABRICATION OF GLASSES USING LASER ASSISTED
CHEMICAL ETCHING

Summary

Microfabrication of glasses using laser assisted chemical etching was first demonstrated in 2001 by A. Marcinkevicius and S. Juodkazis. Since then this method has found applications in areas such as biomicrochips fabrication. The main advantage of this method is that 3D structures can be formed into chemically stable glasses by femtosecond laser direct writing.

The purpose of this work was to investigate microfabrication using laser assisted chemical etching method by forming complex shapes in fused silica and analyzing surface roughness.

Experiments were conducted using 1030 nm 320 fs Yb:KGW *Pharos* laser. The laser beam was focused with a NA = 0.4 lens. Samples (JGS2 fused silica) were moved with *Aerotech* positioning system. After irradiation samples were etched in 5 % hydrofluoric acid (HF) solution.

Results showed that smallest shapes can be formed by small pulse energies (170 nJ – 300 nJ), where selectivity of etching is most noticeable. Diameters of shapes corresponded not only to the magnitude of modifications made by irradiation but also to the thickness of sample because the surface of not irradiated fused silica that touches HF acid increases while HF acid travels to the depth of the sample.

Experiments showed that not irradiated fused silica etching rate in 5 % HF varies from 0,75 $\mu\text{m/h}$ to 1 $\mu\text{m/h}$. Taking into consideration this etching rate, shapes with 1 μm parts were made.

Also this work shows how surface roughness depends on polarization of irradiation, pulse energies, sample translating speed. It was observed that the best roughness (50 nm – 60 nm) can be achieved by using small translating speed and polarization that is perpendicular to the translation of the sample or circular polarization. It was determined that it is more efficient to use polarization that is perpendicular to the translation of samples because it takes less time to process the samples.

All of samples had worse roughness when polarization of irradiation was parallel to the translation of samples because of nanogratings that did not overlap.