

Vilniaus universiteto
Fizikos fakulteto
Lazerinių tyrimų centras

Jonas Karosas

LŪŽIO RODIKLIO POKYČIO OPTIMIZAVIMAS ĮRAŠANT I TIPO
MODIFIKACIJAS LYDYTO KVARCO TŪRYJE FAZINIŲ
KAUKIŲ FORMAVIMUI SU FEMTOSEKUNDINIU LAZERIU

Magistro studijų baigiamasis darbas

Lazerinės technologijos
studijų programa

Studentas

Jonas Karosas

Leista ginti

2021-05-11

Darbo vadovas

dr. Valdemar Stankevič

Centro direktorius

prof. Aidas Matijošius

Vilnius 2021

Turinys

Įvadas.....	4
1. Literatūros apžvalga	5
1.1 Fazinės kaukės	5
1.1.1 Frenelio lęšis.....	5
1.1.2 Frenelio eksikonas	7
1.2 Paviršiaus difrakcinių elementų gamybos technologijos.....	8
1.3 Tūrinis fazinių difrakcinių kaukių rašymas	9
1.3.1 Skaidrių terpių sugertis.....	9
1.3.2 Tūrinis modifikacijų slenkstis	10
1.3.3 Lūžio rodiklio modifikacijos	11
1.4 Lūžio rodiklio optimizavimas ir sferinių aberacijų įtaka.....	12
2. Eksperimento įranga ir metodika.....	15
2.1 Femtosekundinė lazerinio mikroapdribimo sistema	15
2.2 Tūrinio modifikacijos slenksčio matavimas su 0,5 NA objektyvu.....	16
2.3 I tipo modifikacijų įrašymas ir charakterizavimas.....	16
2.3.1 Modifikacijų rašymas, atpažinimas ir klasifikacija	17
2.3.2 Modifikacijų ašinio ilgio matavimas ir duomenų aproksimacija 2D polinomu	18
2.4 Lūžio rodiklio pokyčio matavimas interferometru	18
2.4.1 Stačiakampių gretasienių formavimas iš I tipo modifikacijų.....	19
2.4.2 Interferencinio vaizdo registravimas su CMOS kamera.....	20
2.4.3 Lūžio rodiklio pokyčio skaičiavimas iš nuotraukų su MATLAB	21
2.5 Fazinių kaukių įrašymas ir charakterizavimas.....	23
2.5.1 Pastovaus lūžio rodiklio stačiakampis gretasienis.....	23
2.5.2 Frenelio lęšis ir difrakcijos efektyvumo matavimas.....	24
2.5.3 Frenelio eksikonas ir difrakcijos efektyvumo matavimas	27
2.5.4 Difragavusio pluošto sklidimo pasiskirstymo registravimas.....	29

2.5.5	Fraksikono testavimas su lazerine sistema	31
3.	Tyrimo rezultatai	32
3.1	Lydyto kvarco pažeidimo slenkstis.....	32
3.2	Modifikacijų ašiniai ilgiai ir I tipo modifikacijų zonos	32
3.3	Ašinių ilgių aproksimavimas ir lūžio rodiklio pokyčio vertės.....	34
3.4	Pastovaus lūžio rodiklio vertė.....	37
3.5	Frenelio lęšio ir eksikono technologinės galimybės	39
3.6	Frenelio faziniai difrakciniai elementai ir jų efektyvumas	40
3.7	Frenelio eksikono testavimas lazerinėje sistemoje	42
	Pagrindiniai rezultatai ir išvados	43
	Literatūros sąrašas	44
	Konferencijos ir publikacijos.....	47
	Santrauka	48
	Santrauka angų kalba (Summary)	49

Įvadas

Pagrindiniai difrakcinių optinių elementų (DOE) principai jau žinomi ilgiau nei šimtmetį. Tokio tipo optika naudojama lazeriniame apdirbime, optiniame duomenų apdorojime, duomenų saugykloms, įvairiems jutikliams, pozicijos kodavimo įrenginiuose, ekranuose bei kituose įrenginiuose. Dažniausiai šie elementai gaminami fotolitografijos būdu [1], tačiau šiai technologijai reikalinga lazerio spinduliuotė, fotorezistorius bei cheminis ėsdinimas, o tūriniame lazeriniame apdirbime tik lazerio spinduliuotė. Įprastai ši spinduliuotė būna femtosekundinės trukmės, o aštrus pluošto fokusavimas sukuria pakankamą intensyvumą sukelti medžiagos tūrinį pažeidimą. Vienas iš pažeidimų lydyto kvarco tūryje yra lūžio rodiklio pokyčio modifikacija. Pasinaudojant tokiomis modifikacijomis lydyto kvarco tūryje galima įrašyti fazines kaukes arba kitaip tariant fazinius difrakcinius optinius elementus. Problema atsiranda tada, kai dėl mažo lūžio rodiklio pokyčio vertės tenka naudoti keletą tokių modifikacijų sluoksnių. Sferinė aberacija atsirandanti dėl lūžio rodiklio nesuderinamumo tarp dviejų skirtingų terpių lemia tai, kad skirtingame fokusavimo gylyje, modifikacijų ašiniai ilgiai yra nevienodi, o jų sukeltas lūžio rodiklio pokytis taip pat nevienodas. Visa tai lemia netolygų fazinės kaukės įrašymo procesą, kas gali nulemti prastą difrakcinio elemento efektyvumą.

Šiame darbe bus trumpai aptarti paviršinių difrakcinių optinių elementų gamybos technologijos. Didžiausias dėmesys bus skirtas tūriniam fazinių difrakcinių kaukių įrašymui lazeriu. Bus aptarti principai, dėl kurių galima apdirbti skaidrios terpės tūrį, kokią įtaką modifikacijų rašymui turi sferinės aberacijos ir kokia metodika remiantis galima kompensuoti šią įtaką bei kaip dar galima optimizuoti lūžio rodiklio pokyčio vertę, kad fazinės kaukės būtų įrašomos tolygiai su pastoviu lūžio rodikliu.

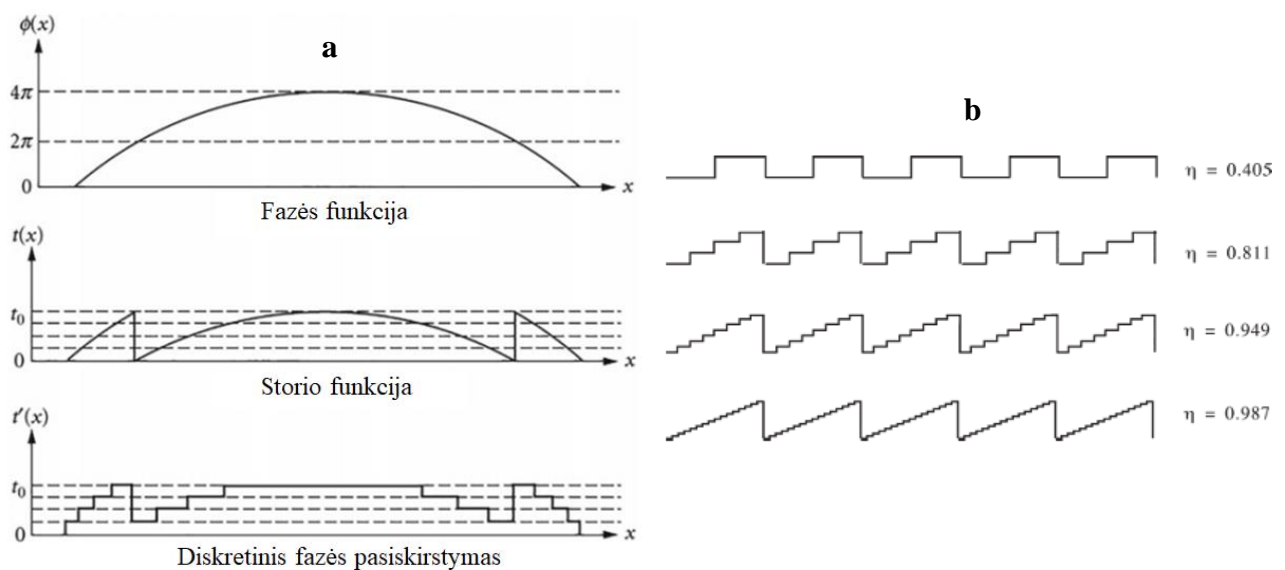
Šio darbo tikslas pasinaudojant femtosekundine lazerio spinduliuote lydytame kvarce įrašyti lūžio rodiklio modifikacijas, ištirti prie kokių parametrų gaunamas didžiausias pastovus lūžio rodiklio pokytis, o optimizuotus parametrus panaudoti fazinių kaukių įrašymui.

1. Literatūros apžvalga

1.1 Fazinės kaukės

Difrakciniai optiniai elementai (DOE), kartais dar vadinami skaitmeniniais difrakciniais elementais arba fazinėmis kaukėmis, yra elementai, kurie naudoja mikro struktūras, leidžiančias keisti krentančios šviesos fazę ir tokiu būdu konstruoti įvairias pluoštų formas, kurių neįmanoma padaryti naudojant įvairius refrakcinės optikos metodus arba kurie reikalauja labai sudėtingų, stambių ir brangių optinių komponentų ar sistemų. Jų veikimas paremtas difrakcijos ir interferencijos reiškiniais. Pagrindinis difrakcinių optinių elementų rašymo principas yra fazinio vėlinimo sukūrimas mikro struktūroje. Kaip matyti iš 1.1 pav. a) refrakcinis lęšis gali būti pakeistas diskretiniu difrakciniu fazės pasiskirstymu dalinant elemento storį į lygmenis, kurių bendras fazės vėlinimas neviršija 2π [2]. Nuo diskretizavimo lygmenų skaičiaus priklauso ir difrakcijos efektyvumas 1.1 pav. b).

DOE gali būti naudojami lazerinėse sistemose, nes jie konstruojami konkretaus bangos ilgio spinduliuotei, o lazerinė spinduliuotė turi siaurą juostos plotį aplink nominalų bangos ilgį.



1.1 pav. Refrakcinio ir difrakcinio lęšio schemas [2]. Difrakcijos efektyvumas prie skirtingo diskretizavimo lygmenų skaičiaus.

1.1.1 Frenelio lęšis

Įprastiniai refrakciniai lęšiai yra pagaminti iš vientiso stiklo gabalo, ribojamo sferiniais arba cilindriniais paviršiais, o Frenelio lęšis yra perdarytas įprastinis lęšis, kurį sudaro atskiri vienas prie kito prigludę koncentriniai nedidelio storio žiedai, o jų pjūviai yra tam tikro profilio prizmės. Jos gali būti sudaromos pagal vienodus atstumus 1.2 pav. a) [3] arba pagal vienodą fazę pasinaudojant Frenelio zonų plokštuma – FZP 1.2 pav. b) [4]. FZP turi radialinio simetriškumo žiedus, vadinamus

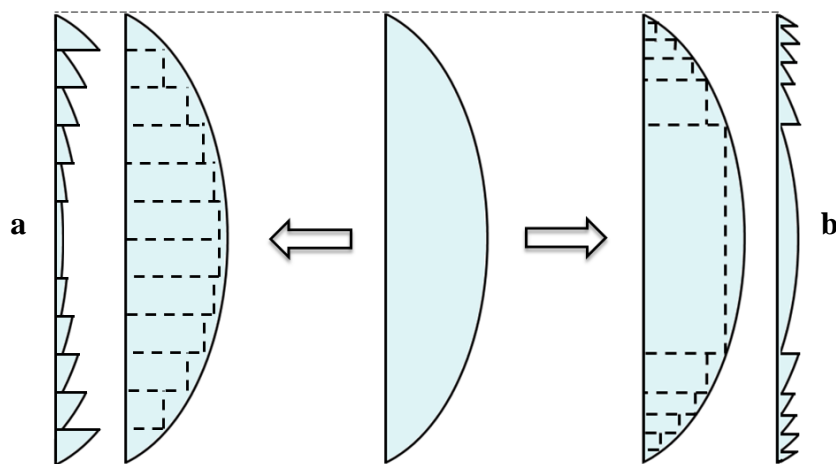
zonomis, kurie atitinka skirtingos eilės žiedus. Pro FZP praėjęs spindulys interferuoja su zonomis, o fazės vėlinimas, atsirandantis dėl spindulio lūžimo, randamas skaičiuojant fazės poslinkį Frenelio lėšiai [5]:

$$\Delta\phi = \frac{2\pi\Delta nt}{\lambda}, \quad (1.1)$$

kur Δn yra lūžio rodiklio pokytis, o t – elemento storis. Išorinis m -tosios eilės Frenelio zonos radiusas randamas pagal formulę [5]:

$$r_m = \sqrt{2mf\lambda + (m\lambda)^2}, \quad (1.2)$$

kur f yra lėšio židinio nuotolis. Einant nuo centro periodas tarp apskritimų su kiekvienu žiedu darosi mažesnis ir tokiu būdu gaunama apskritiminė difrakcinė gardelė.

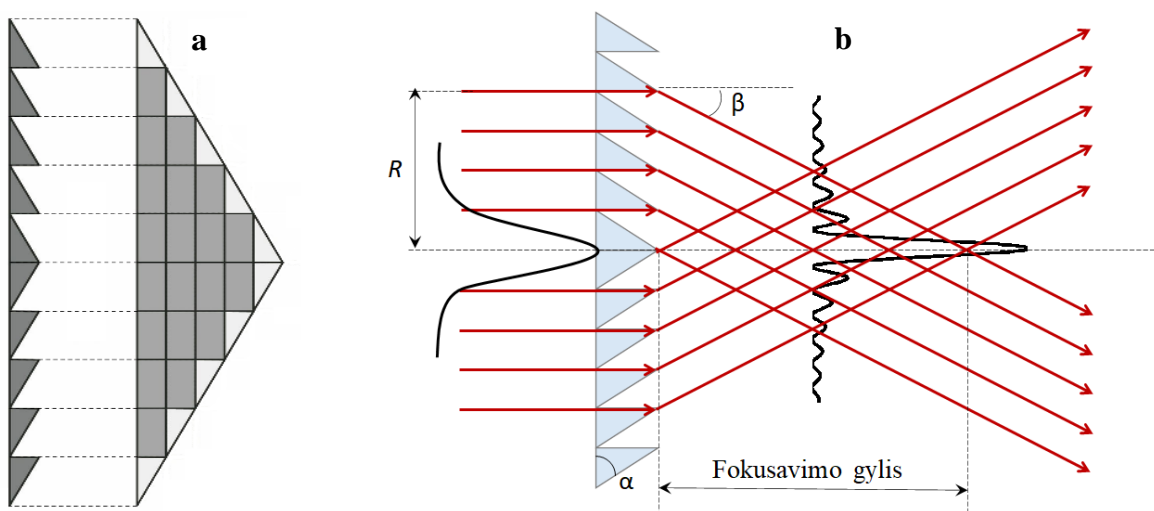


1.2 pav. Frenelio lėšio formavimas iš refrakcinio lėšio: a) su vienodo storio žiedais; b) su vienoda faze pagal Frenelio zonų plokštumas. Tokios konstrukcijos lėšis yra plonas ir lengvas.

Tokio elemento mikro fabrikavimas yra sudėtingas dėl to, kad jo storis yra labai nedidelis ir norint gauti geresnį elemento efektyvumą reikalingas jo diskretinis aprašymas (1.1 pav.). Įprastai tokie lėšiai būna sudaryti iš keleto Frenelio zonų plokštumų (*multilevel Fresnel zone plates*), kurios išsidėsto viena ant kitos pagal diskretinius lygmenis [5]. Kuo daugiau tokių lygmenų turi lėšis, tuo geresnis lėšio efektyvumas [6]. Frenelio lėšiai gali būti naudojami spektrinėse srityse, kur paprasti lėšiai yra nenaudingi dėl didelės spinduliuotės sugerties, pavyzdžiui ultravioletinėje srityje [7]. Taip pat šiems lėšiams būdingos mažesnės sferinės aberacijos. Frenelio lėšio difrakcijos efektyvumas matuojamas naudojant mažos galios detektorius ir apertūrą, kuri uždengia nepageidaujamą šviesą matuojant šviesos intensyvumą židinio taške [4].

1.1.2 Frenelio eksikonas

Frenelio eksikonas arba kitaip fraksikonas, tai panašus į Frenelio lęšį optinis elementas. Jis gaunamas eksikoną suskaidžius į daug atskirų statmenų prizmių (1.3 pav. a)), kurios sukamos aplink centrinį optinio elemento tašką. Tokia apskritiminė gardelė yra paprasčiausia Frenelio zonų plokštuma su pastoviu periodu, kuri naudojama difrakciją sukuria išplėsto fokuso liniją. Dažniausiai fraksikonas apibūdinamas dviem kampais α ir β , kur α yra eksikono pagrindo kampas, o β spindulių susikirtimo puskampis. Tokio tipo elementas transformuoja krentantį Gauso formos lazerio pluoštą į Beselio formos pluoštą [8] ir sudaro tam tikro pločio bei ilgio, dar kitaip vadinamo fokusavimo gylio, Beselio zoną (1.3 pav. b)). Fraksikono tolimajame lauke matomas intensyvus žiedas, kurio diametras didėja tostant nuo Beselio zonos pabaigos. Fraksikonai pasižymi mažesne kaina bei mažesnėmis chromatinėmis aberacijomis nei refrakciniai eksikonai [9]. Dėl plonumo fraksikonai sugeria mažiau spinduliuotės, todėl gali būti naudojami tokiose spektrinėse srityse, kur vyrauja didelė sugertis, pavyzdžiui UV spinduliuotei.



1.3 pav. a) Fraksikonas gavimas iš eksikono; b) Beselio pluošto gavimas iš Gauso pluošto panaudojant fraksikoną.

Priešingai nei Gausinis pluoštas, kuris visą laiką plečiasi erdvėje, Beselio pluoštas yra nedifrakcinis, išlaikantis nepakitęs skersinį pasiskirstymą kol sklinda. Nors tikram Beselio pluoštui sukurti reiktų begalinės energijos, eksikonas generuoja panašų Beselio pluoštą, kuris pasižymi nedifrakcinėmis savybėmis per eksikono fokusavimo gyli (depth of focus) – DOF. DOF tai krentančio pluošto radiuso R , eksikono lūžio rodiklio n ir pagrindo kampo α funkcija [10]:

$$\text{DOF} = \frac{R}{(n - 1)\tan\alpha} \quad (1.3)$$

1.2 Paviršiaus difrakcinių elementų gamybos technologijos

Paviršiaus difrakcinių elementų gamybos technologijos pasižymi reljefiniu skaidrios terpės apdirbimu. Populiariausios technologijos yra fotolitografija, tiesioginis lazerinis rašymas bei kopijavimas. Kiekviena jų turi savo privalumų bei trūkumų.

Fotolitografija paremta reljefiniu struktūros perkėlimu ant substrato. Iš pradžių ant substrato užgaminamas kelių mikronų fotorezistoriaus sluoksnis. Tai padaroma sukant padėklą ant kurio padėtas substratas, kad gaminamas sluoksnis būtų tolygus. Struktūros ant fotorezistoriaus padaromos panaudojant ultravioletinę lazerio spinduliuotę ir litografinę kaukę, kuri gali būti paprasčiausias stiklas padengtas chromo takeliais. Litografinė kaukė suprojektuojama ant bandinio paviršiaus su lęšiu sistema. Po ekspozicijos, substratas perkeliamas į išryškinimą, kur apšviesti fotorezistoriaus plotai nuplaunami. Tada vyksta cheminis ėsdinimas, kurio metu gauti grioveliai pagilunami iki reikiamo gylio. Difrakciniams elementams dažniausiai naudojami lydyti kvarco substratai, kurie yra šiurkštesni už fotorezistorius, todėl atsparesni įbrėžimams, chemikalams bei terminiams efektams. Ėsdinime fotorezistorius veikia kaip tinklelis apsaugantis po juo esantį plotą nuo ėsdinimo proceso. Galiausiai likęs fotorezistorius yra pašalinamas nuo substrato. Tokiu metodu pagaminti Frenelio lęšiai pasižymi dideliu, net 83 % difrakcijos efektyvumu [11]. Kita vertus, fotolitografija yra kelių stadijų procesas, kuris užima daug laiko, o norint gaminti diskretinius elementus dažnai teka naudoti skirtingas kaukes, kurias taip pat reikia paruošti.

Priešingai nei fotolitografijoje, tiesioginiame lazeriniame rašyme nereikalingos tarpinės stadijos. Struktūros sukuriamos tiesiogiai pašalinant optinę medžiagą. Pagrindiniai metodai yra mechaninis braukymas ir deimantinis tekinimas. Tokio tipo procesas užtikrina geros kokybės gardelių gamybą, tačiau yra santykinai lėtas.

Kadangi kartais tenka daryti daug tokio paties difrakcinio optinio elemento kopijų, o lazerinis mikroapdirbimas gali būti brangus bei užtrukti daug laiko, naudojama kopijavimo technika. Tai gali būti padaryta naudojant difrakcinės gardelės šabloną, kuris sukuriamas pasinaudojant paviršinio mikroapdirbimo technologija. Šabloninis elementas sudedamas kartu su plastiška medžiaga, pavyzdžiui polimeru arba termoplastiku, panaudojant liejimą. Kai plastikas tampa kietas, kopija atskiriama nuo liejimo formos. Vėliau ši kopija naudojama difrakcinių elementų liejimui, tačiau tai taip pat nėra pati patogiausia technologija.

Visi šie aptarti metodai apima tik paviršiaus struktūrizavimą, tačiau lazerio pagalba galima sukurti ir tokius elementus, kurie nepakeičia stiklo substrato paviršiaus, bet pakeičia jo tūrį

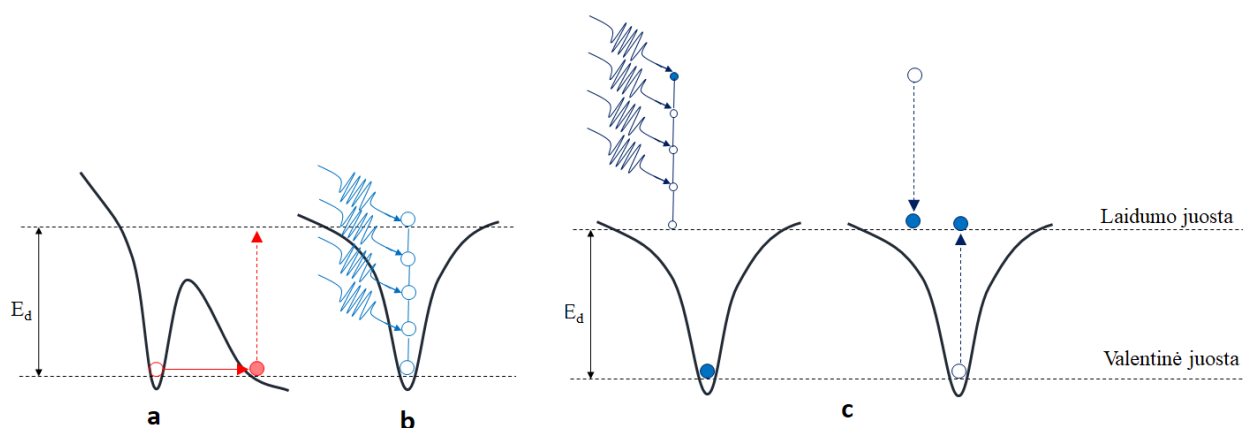
1.3 Tūrinis fazinių difrakcinių kaukių rašymas

Ši metodika paremta skaidrios terpės tūriniu modifikavimu arba kitaip tariant lūžio rodiklio pakeitimu stiklo tūryje. Tai patogi technologija dėl to, kad norint sukurti norimo reljefo fazinę difrakcinę kaukę nereikia papildomų chemikalų ar kaukių, tai pat nelieka apdirbimo produktų, o elemento paviršius išlieka lygus. Esminis šios technologijos principas yra skaidrios terpės tūrinis apdirbimas. Tokio tipo terpėse regimosios srities fotonai yra nesugeriami, todėl tokios medžiagos yra skaidrios. Taip yra todėl, kad jos pasižymi pakankamai dideliu draustinių energijų tarpu, o pavienių fotonų energija yra per maža, kad elektronas būtų perkeltas iš valentinės į laidumo juostą. Siekiant tai padaryti panaudojama intensyvi lazerio spinduliuotė, kuri sugeba sukelti netiesinius sugerties reiškinius skaidrioje medžiagoje [12].

1.3.1 Skaidrių terpių sugertis

Pagrindiniai netiesinės sugerties mechanizmai susideda iš tuneliavimo ir daugiafotonės sugerties. Kai fotono energija yra kur kas mažesnė už medžiagos draustinės energijos tarpą, fotonas nesugeriamas, tačiau su intensyvia lazerio spinduliuote medžiagos energinių lygmenų sistema taip deformuojama, kad išlaikomas pakankamas laiko tarpas elektronui tuneliuoti į laidumo juostą (1.1 pav. a). Kai fotono energija yra didelė, tuneliavimo tikimybė smarkiai sumažėja, todėl sugertis vyksta tik daugiafotonės jonizacijos būdu.

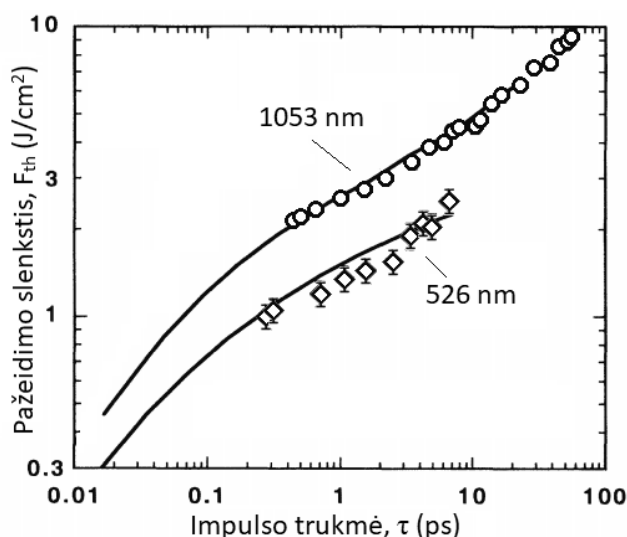
Daugiafotonės jonizacijos metu sugeriami keli fotonai, kurių bendra energija viršija draustinės energijos tarpą (1.1 pav. b). Šio proceso tikimybė itin smarkiai priklauso nuo spinduliuotės intensyvumo ir medžiagos draustinės energijos tarpo. Ji dominuoja esant žemiems intensyvumams ir aukštiems dažniams. Lydytame kvarce, kurio draustinės energijos tarpas yra vienas didžiausių: $E_g = 7,5$ V, pasireiškia abu aptarti sugerties mechanizmai.



1.4 pav. Netiesinė skaidrių terpių sugertis: a) tuneliavimas; b) daugiafotonė jonizacija; c) smūginė jonizacija [12].

Skaidrios terpės laidumo juostoje dėl netiesinės sugerties, priemaišų arba defektų jau yra elektronų, kurie gali sugerti krintančius fotonus ir taip įgyti papildomos energijos. Kai ši energija viršija medžiagos draustinės juostos tarpą, elektronas susidurdamas su valentinėje juostoje esančiu elektronu gali jį perkelti į laidumo juostą [13]. Šis procesas vadinamas smūgine jonizacija (1.1 pav. c), o jai kartojantis vyksta elektromagnetinės spinduliuotės sužadinta griūtinė jonizacija.

1.3.2 Tūrinis modifikacijų slenkstis



1.5 pav. Lydyto kvarco pažeidimo slenkščio priklausomybė nuo impulso trukmės [15]. Pažeidimo slenkstis mažesnis naudojant 526 nm bangos ilgio spinduliuotę.

Kad pasireikštų aptarti netiesiniai reiškiniai reikia, kad spinduliuotės intensyvumas siektų $5 \times 10^{20} \text{ W m}^{-2}$ [14]. Intensyvumas yra tiesiogiai proporcingas impulso energijai, bet atvirkščiai proporcingas impulso trukmei bei sufokusuotos dėmės dydžiui, todėl siekiant didelės jo vertės naudojamas femtosekundinės trukmės impulsai bei didelės skaitinės apertūros objektyvai. 1995 metais Stuart ir kt. parodė, kad norint sukurti pažeidimą naudojant trumpesnius impulsus reikia mažesnio energijos tankio (1.5 pav.) [15]. Esant mažesniai energijos tankiui į lydyto kvarco tūrį sufokusuotas pluoštas nepažeidžia paviršiaus, tačiau sukuria pažeidimą jo tūryje. Tokiu būdu pažeidimas gali būti kontroliuojamas tūryje taip sukuriant norimas trajektorijas. Sąryšis tarp energijos tankio pluošto centre ir impulso energijos [16]:

$$F_0 = \frac{2E_p}{\pi\omega_0^2}, \quad (1.4)$$

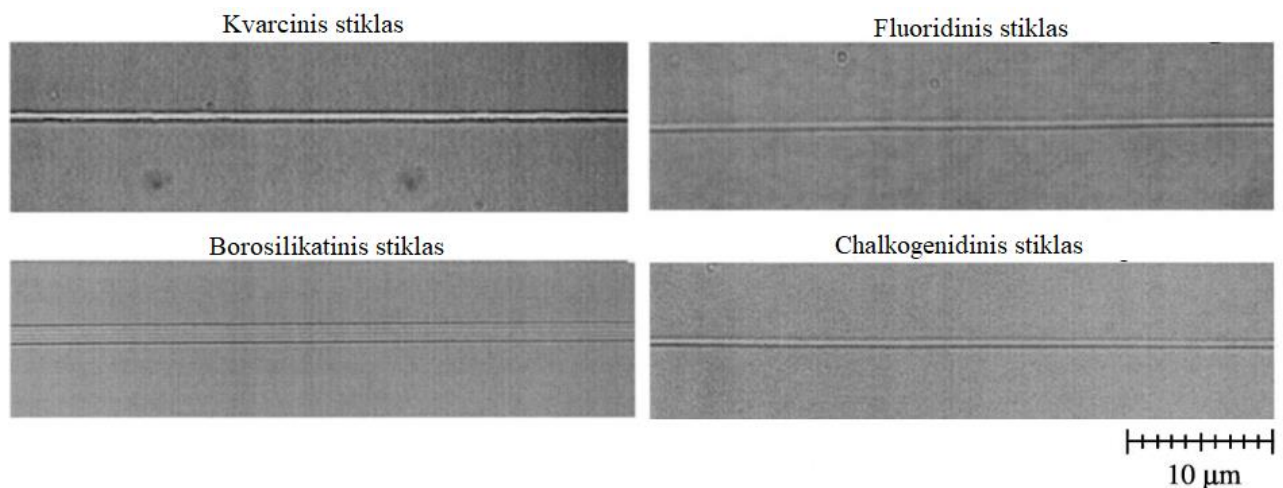
kur E_p – impulso energija. Iš to gaunama, kad esant tam tikram pažeidimo slenkščiui dėmės diametras D siejamas su energijos tankiu pluošto centre:

$$D = \sqrt{2 \ln \left(\frac{F_0}{F_{th}} \right)} \quad (1.5)$$

Apdirbimui dažnai naudojamas Gauso pluoštas, kuris pasižymi maža skėstimi, todėl gali sklisti didelius atstumus ir būti sufokusuotas į labai mažų matmenų dėmę, taip sukuriant didelį intensyvumą. Taip pat svarbu pabrėžti, kad norint gauti mažesnę dėmės dydį, reikalingas aštresnis pluošto fokusavimas, kuris pasiekiamas su didesnės skaitinės apertūros objektyvais [17].

Daugiau ar mažiau visose skaidriose medžiagose galima sukurti tris skirtingus struktūros pakitimus – modifikacijų tipus. Nepasiekus slenkstinio intensyvumo susidaro neilgai gyvuojančios nestabilios modifikacijos, kurios pasižymi padidėjusiu lūžio rodikliu ir sugertimi [18]. Peržengus modifikacijos slenkstį, kurio intensyvumas siekia apie $8,3 \cdot 10^{14} \frac{W}{m^2}$, formuojasi vizualiai po mikroskopu matomos sritys su pakitusiu lūžio rodikliu [19], dar vadinamos I tipo modifikacijomis. Iš jų gali būti formuojami bangolaidžiai [20] (1.6 pav.) arba anksčiau aptarti difrakciniai elementai [21]. Prie didesnio intensyvumo – $15 \cdot 10^{14} \frac{W}{m^2}$ – medžiagoje formuojasi dvejopo lūžio sritys ir nanogardelės [22] – II tipo modifikacijos, o prie dar didesnio intensyvumo – $30 \cdot 10^{14} \frac{W}{m^2}$ - formuojasi mikrosprogimai [23].

1.3.3 Lūžio rodiklio modifikacijos



1.6 pav. Bangolaidžiai suformuoti iš I tipo modifikacijų skirtinguose stikluose. [19].

I tipo modifikacijos turi izotropinį lūžio rodiklio pokytį, kuris gali siekti iki 10^{-2} lydytam kvarcui [24]. Ta pati mokslininkų grupė parodė, kad lūžio rodiklio pokytis gali būti tiek teigiamas, tiek neigiamas toje pačioje modifikacijoje [24]. Šio pokyčio susidarymą bandoma paaiškinti keliais modeliais. Terminis modelis teigia, kad apdirbamoje vietoje yra pasiekama didelė temperatūra, o kadangi dielektrikų šiluminis laidumas yra mažas, pasibaigus kaitimui dėl spartaus aušimo

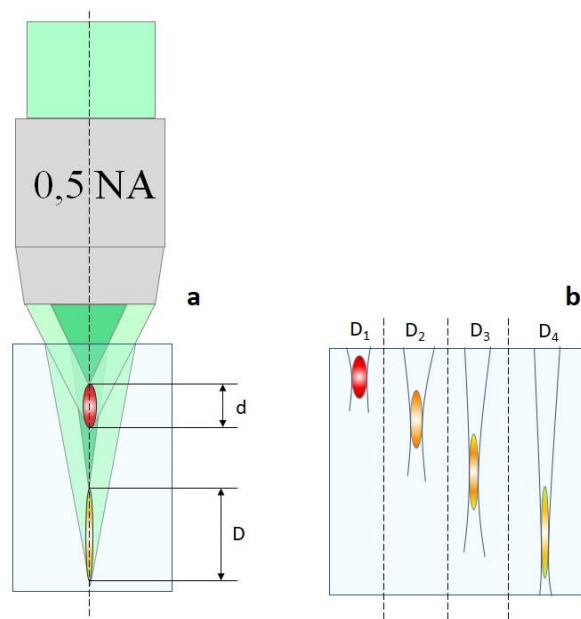
susiformuoja perlydyta medžiaga su padidėjusiu tankiu ir lūžio rodikliu. Dėl staigaus vėsimo lydyto kvarco gardelėje gali sumažėti penkių ir šešių žiedinių narių koncentracija ir padaugėti trijų ir keturių žiedinių narių koncentracija, kas paaiškina medžiagos sutankėjimą [25]. Deformacinis modelis teigia, kad dėl staigios laisvųjų elektronų relaksacijos susiformuoja termoelastinis įtempis, kuris relaksuodamas gali sukelti akustines bangas [26], o jos sąveikaudamos su įkaitusia gardele sukelia nevienalytes tankio variacijas, kurios turi įtakos lūžio rodiklio pokyčiui. Paskutinis – spalvinių centrų – modelis sako, kad dėl lazerio sąveikos su medžiaga atsiranda defektai [27], kurie keičia medžiagos pralaidumą sukurdami lūžio rodiklio pokytį, siekiantį iki 10^{-3} [28]

1.4 Lūžio rodiklio optimizavimas ir sferinių aberacijų įtaka

Pastebėta, kad naudojant femtosekundinius impulsus dėl didelio intensyvumo Kero terpėje gali pasireikšti tam tikri pluošto sklidimo efektai, tokie kaip fokusavimasis [15] arba šviesos gijos formavimasis [29]. Dinaminė pusiausvyra tarp fokusavimosi ir defokusavimosi dėl elektronų plazmos, sugeneruotos femtosekundine lazerio spinduliuote, gali sukelti kelių zonų modifikacijų formavimąsi išilgai lazerio spindulio krypties [30]. Be to, kai lazerio pluoštas fokusuojamas pro dviejų skirtingų lūžio rodiklių ribą, indukuojamos sferinės aberacijos [31]. Įprastai sferinės aberacijos atsiranda todėl, kad paraksialiniai spinduliai susirenka toliau nei spinduliai praėję pro periferine lęšio dalį, ir kuo mažesnis lęšio židinio nuotolis, tuo jos didesnės. Taip nutinka dėl netobulos lęšio formos. Galima būtų panaudoti asferinį lęšį, kuris suprojektuojamas taip, kad sferinės aberacijos tiesiog nepasireikštų, tačiau eksperimentuose dažniausiai naudojami kokybiški objektyvai, kuriuose šios aberacijos yra sukompensuotos panaudojant kelių lęšių sistemą. Vis dėl to aptartos sferinės aberacijos atsiranda dėl lūžio rodiklio skirtumų tarp dviejų terpių (1.4 pav. a). Sąryšis tarp fokusavimo ruožo D (atstumas tarp paraksialinių ir periferinių spindulių židinių) ir fokusavimo gylio išreiškiamas formule [31, 32]:

$$D = \frac{f_d}{n} \left(\sqrt{\frac{n^2 - NA^2}{1 - NA^2}} - n \right) \quad (1.6)$$

kur NA yra objektyvo skaitinė apertūra, o n – medžiagos lūžio rodiklis.

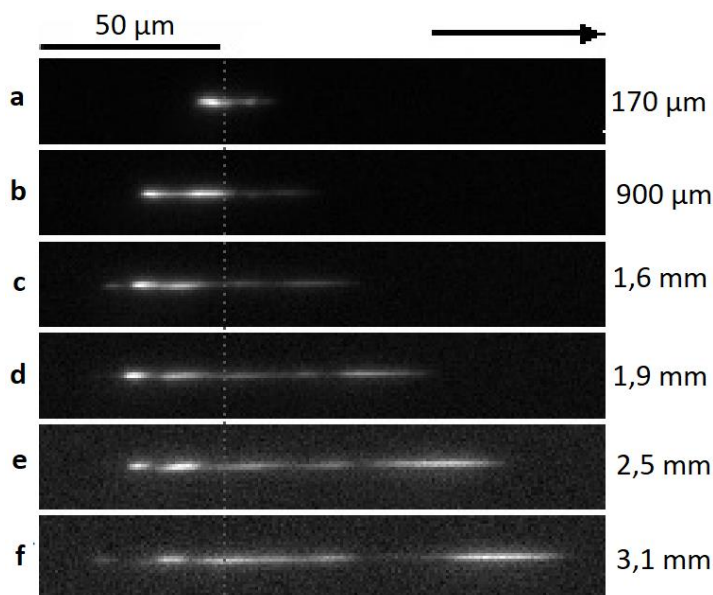


1.7 pav. Sferinių aberacijų (SA) pasireiškimas dėl lūžio rodiklio nesuderinamumo: a) d – modifikacijos ašinis ilgis neįskaitant SA, D – įskaitant SA; b) giliau formuojamų modifikacijų ašinis ilgis didėja, tačiau intensyvumas mažėja.

Vienas iš galimų būdų spręsti lūžio rodiklių nesuderinamumą yra fokusuoti pluoštą į tokį gylį, kuriame mikroskopinių objektyvų aberacijos yra sukoreguotos, vienodai užpildant visą objektyvo apertūrą [17], tačiau tokiu atveju maksimalus fokusavimo gylis siekia $170\ \mu\text{m}$. Sferines aberacijas galima koreguoti panaudojant imersinę alyvą tarp objektyvo ir bandinio [33], tačiau maksimalus fokusavimo gylis vis tiek mažas – $250\ \mu\text{m}$. Čia susiduriama su ta problema, kad siekiant pritaikyti lūžio rodiklio modifikacijas difrakcinių elementų įrašymui dėl itin mažos lūžio rodiklio moduliacijos tenka formuoti keletą modifikacijų sluoksnių, dėl ko išauga elemento storis ir atsiranda rizika dėl sferinių aberacijų pasireiškimo. Sferines aberacijas galima kompensuoti įvedant pirminę sferinę aberaciją [32]. Į objektyvą, kuris suprojektuotas taip, kad į jį patektų lygiagretus pluoštelis, paleidžiamas diverguojantis pluoštelis taip įvedant papildomą kompensuojančią sferinę aberaciją, tačiau rezultate skirtingame gylyje vis tiek išlieka sferinių aberacijų dėl skirtingų lūžio rodiklio terpių įtaka.

Intensyvumo pasiskirstymas išilgai pluošto sklidimo kryptimi su skirtingos skaitinės apertūros objektyvais rodo, kad intensyvumas staigiai mažėja didėjant fokusavimo gyliui ir persiskirsto išilgai spindulių sklidimo krypties (1.7 pav. b), o mažesnės skaitinės apertūros objektyvai gali veikti platesniame fokusavimo gylio ruože be intensyvumo sumažėjimo [34] (nepaisant to, kad naudojant mažos skaitinės apertūros objektyvus gali būti nepasiektas reikiamas intensyvumas netiesiniams reiškiniams sukelti). Intensyvumo sumažėjimas nulemia pažeidimo slenksčio kitimus [35], dėl ko reikia naudoti didesnę impulso energiją. Vienas iš sprendimų galėtų būti aplanoXX didelės skaitinės apertūros $0,8\ \text{NA}$ aplanatinis objektyvas su plačiu sukoreguotų aberacijų ruožu skaidrios terpės tūryje

[36]. Tokio tipo objektyvas gali sufokusuoti į apytiksliai 4 mm fokusavimo gylį, kuriame dar nepasireikštų sferinės aberacijos.



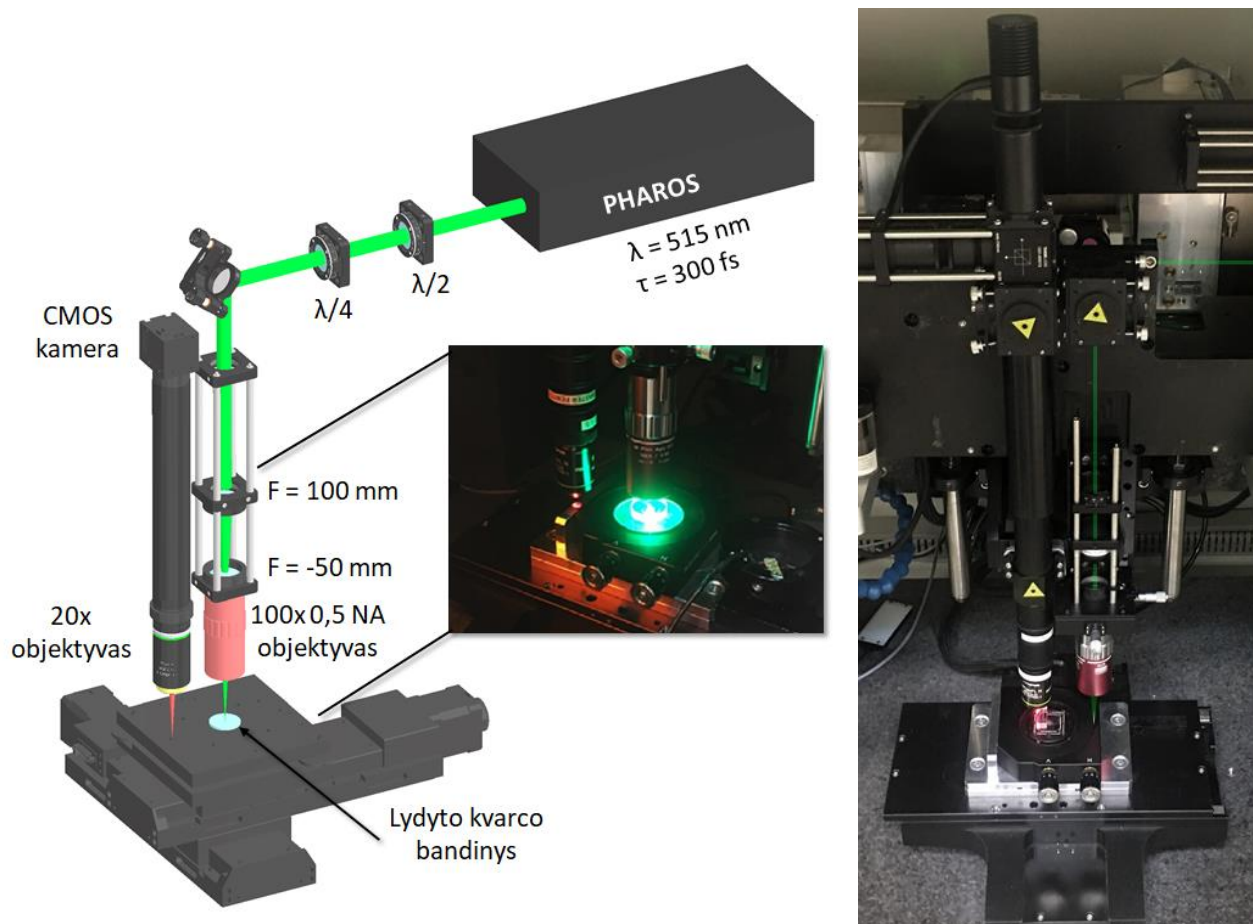
1.8 pav. Plazmos liuminescencija skirtinguose fokusavimo gyliuose. Dėl sferinių aberacijų plazmos liuminescencijos ilgis didėja pluoštą fokusuojant giliau [32].

Vienas sudėtingesnių metodų užtikrinančių lankstų fokusavimo gylių ruožą yra erdvinio šviesos modulatoriaus panaudojimas. Tai prietaisas galintis sugeneruoti fazinį frontą skystųjų kristalų ekranėlyje keičiant įtampą ekrano pikselių elektroduose. Šis metodas paremtas atvirkščio spindulio sekimu ir korekcinių fazinių frontų generavimu [38].

Norint užtikrinti tolygų elemento įrašymą, sferinių aberacijų reiškinys yra nepageidaujamas, tačiau kita vertus galima jomis pasinaudoti. Dėl sferinių aberacijų išsitempusi modifikacija turi savo ašinį ilgį. Kuo didesnis šis ilgis, tuo lengviau galima pasiekti reikiamą elemento storį, nes tada reikia mažiau sluoksnių. Šiuo atveju lazerio pluoštas fokusuojamas maždaug į 5 mm gylį su tikslu gauti kuo ilgesnę modifikaciją. Problema gali iškilti tada, kai elementas sudaromas iš keleto sluoksnių, o kiekvienas sluoksnis sudarytas iš modifikacijų, kurių ašiniai ilgiai skiriasi dėl skirtingos sferinių aberacijų įtakos. Norint užtikrinti, kad elementas įrašomas tolygiai, o lūžio rodiklis pastovus per visą elementą, būtina šiuos sluoksnius išdėstyti taip, kad kiekvienas modifikacijų sluoksnis būtų šalia vienas kito arba vienodai persiklotų. Tam tikslui atliekami modifikacijos ašinio ilgio ir lūžio rodiklio suvienodinimo per visą elemento storį eksperimentai.

2. Eksperimento įranga ir metodika

2.1 Femtosekundinė lazerinio mikroapdirbimo sistema



2.1 pav. Femtosekundinė lazerinio mikroapdirbimo sistema naudota įrašyti modifikacijas bei elementus su 515 nm bangos ilgio spinduliuote. Kairėje pusėje pavaizduota principinė sistemos schema, o dešinėje realus sistemos vaizdas, matomas pro atidarytas apsauginio sistemos skydo dureles (žaliai užbrėžta linija vaizduoja lazerio kelią per objektyvą).

Eksperimentui naudojamas antros harmonikos (515 nm) diodinio kaupinimo kieto kūno (DPSS – *Diode-Pumped Solid-State*) femtosekundinis lazeris Yb:KGW (PHAROS), pagamintas įmonėje „Light Conversion“. Impulso trukmė sureguliuota ties 300 fs (leidžiama nuo 300 fs iki 20 ps). Lazeris kartu su pozicionavimo stalais ir optiniais elementais sumontuoti lazerinėje sistemoje, kuri pagaminta įmonėje „ELAS“. Sistema valdoma DMC (*Direct Machining Control*, MB, Cognitio) programa.

Sistemoje naudojamas automatizuotas Briusterio kampo atenuatorius, kuris keisdamas kampą, keičia praleidžiamos spinduliuotės galią. Spinduliuotė sufokusuojama 100x didinimo mikroskopiniu objektyvu Mitutoyo M Plan Apo NIR, 0,5 NA, kuris sufokusuoja lazerio pluoštą į skaidrios terpės tūrį. Objektyvas tinkamas naudoti nuo 480 nm iki 1800 nm bangos ilgio spinduliuotei. Poliarizacija kontroliuojama su automatizuota $\lambda/2$ fazine plokštele ir rankiniu būdu reguliuojama $\lambda/4$ fazine plokštele. Apdirbamos srities stebėjimui prieš apdirbimą naudojamas bendraašis apšvietimas ir

CMOS (*Complementary Metal Oxide Semiconductor*) Basler A2500 14gc kamera (5 Mpx). Viso eksperimento metu naudojamas 500 kHz impulso pasikartojimo dažnis.

2.1 lentelė. Pastovūs viso tyrimo metu naudoti lazerinės sistemos parametrai.

Parametras	Vertė
Spinduliuotės bangos ilgis (nm)	515 (III)
Objektyvas, NA	100x/0,5 NA
Impulso trukmė (fs)	300
Impulso pasikartojimo dažnis (kHz)	500

2.2 Tūrinio modifikacijos slenksčio matavimas su 0,5 NA objektyvu

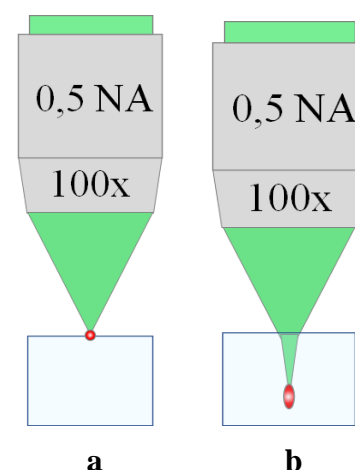
2.2 lentelė. Modifikacijos slenksčiui nustatyti naudoti parametrai.

Parametras	Vertė
Impulso energija (nJ)	100 - 850
Gauso pluošto fokusavimo gylis (mm)	0 (paviršius); 0,2

Siekiant nustatyti modifikacijos slenksčių ant paviršiaus ir tūryje su minėtu Mitutoyo M Plan Apo NIR 100x, 0,5 NA objektyvu atliekami du trumpi eksperimentai. Pirmuoju atveju lazeriu šaudoma ant paviršiaus, antruoju šaudoma į tūrį. Abiejuose eksperimentuose lazeris šauda po 10 impulsų į vieną vietą, tada pasislenka x ašimi per 5 μm ir šauda vėl. Tai pakartojama 10 kartų, tada grįžtama į linijos pradžią, pasislenkama y ašimi per 5 μm, padidinama impulso energija ir kartojama prieš tai aprašyta linija. Toks procesas pakartojamas su 10 skirtingų energijos verčių.

Sukurtų pažeidimų diametrai matuojami po optiniu mikroskopu. Antruoju atveju dėmės dydis matuojamas iš bandinio šono, kadangi

tokiu būdu geriausiai matomi dėmės kraštai, tačiau pati dėmė labiau panaši į išstemptą darinį, kuris atsiranda dėl lūžio rodiklių nesuderinamumo tarp dviejų skirtingo lūžio rodiklio terpių. Nubraižoma dėmės diametro kvadrato priklausomybės nuo impulso energijos logaritmo grafikas. Ekstrapoliuojant $D^2 = 0$, randamas paviršinis ir tūrinis pažeidimo slenkstis $F_{th.}$. Gautos vertės palyginamos.



2.2 pav. Lazerio spindulio fokusavimas a) paviršiuje; b) tūryje.

2.3 I tipo modifikacijų įrašymas ir charakterizavimas

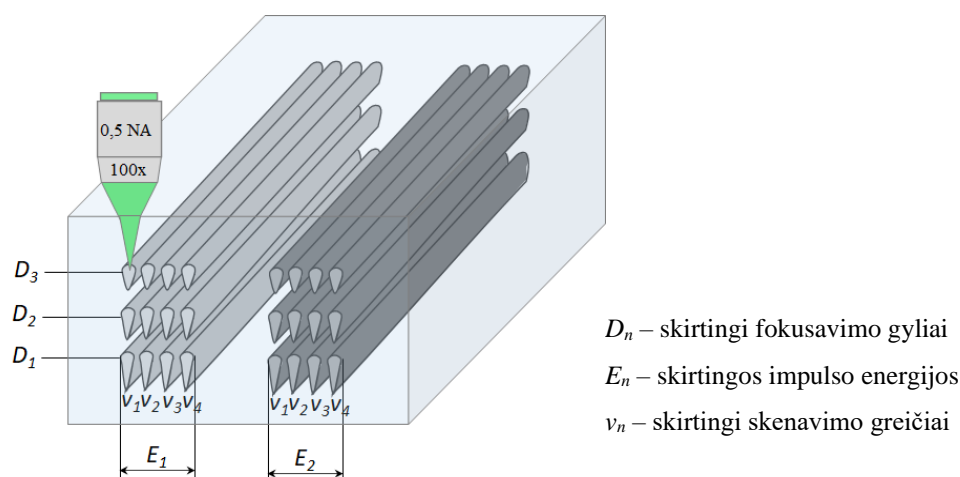
Norint įsitikinti prie kokių lazerio parametrų formuojasi lūžio rodiklio modifikacijos ir kaip kinta jų ašinis ilgis dėl sferinių aberacijų įtakos, reikalingas eksperimentas, kuris apimtų platų

parametrų, turinčių įtakos sferinėms aberacijoms, intervalą. Įrašytos modifikacijos stebimos po optiniu mikroskopu, klasifikuojamos į nematomas, lūžio rodiklio pokyčio ir turinčias nanogardelių. Rezultatai aproksimuojami polinomu, kad būtų sukurta galimybė kompensuoti sferinių aberacijų įtaką elementų rašyme kvarco tūryje.

2.3.1 Modifikacijų rašymas, atpažinimas ir klasifikacija

2.3 lentelė. Pavienių modifikacijų įrašymui naudoti parametrai.

Parametras	Vertė
Impulso energija (nJ)	100 - 850
Gauso pluošto fokusavimo gylis (mm)	2,0 - 5,6
Linijos skenavimo greitis (mm/s)	1; 5
Polarizacija	Tiesinė; apskritiminė



2.3 pav. Pavienių modifikacijų matrica lydyto kvarco tūryje. D raide žymimi skirtingi fokusavimo gyliai sunumeruoti pagal įrašymo eiliškumą. Schemoje gilesnės modifikacijos pavaizduotos ilgesnės dėl didesnės sferinių aberacijų įtakos.

DMC programa sukuriama algoritmas, kuris su lazeriu gali įrašyti pavienes modifikacijas giliai lydyto kvarco tūryje. Šiuo atveju algoritmas šaudo ne į tą pačią vietą, tačiau braižo linijas su nurodytu greičiu. Impulso energija keičiama nuo 100 nJ iki 850 nJ, o fokusavimo gylis nuo 5,6 mm iki 2,0 mm. Medžiagos lūžio rodiklis priklauso nuo į ją krentančios spinduliuotės bangos ilgio, todėl programoje nurodant fokusavimo gylį, jis gaunamas didesnis. Tam, kad to išvengti kiekvienas gylis yra padalinamas iš lydyto kvarco lūžio rodiklio 515 nm bangos ilgio spinduliuotei $n = 1,461$. Kiekviename gylyje linija įrašoma keturis kartus keičiant skenavimo greitį – 1 mm/s, 5 mm/s. Į vieną bandinį įrašoma didelė matrica su aprašytais skirtingais parametrais naudojant tiesinę poliarizaciją. Kitame bandinyje įrašoma lygiai tokia pati matrica tik šį kartą su apskritimine poliarizacija. Linijos rašomos nuo apačios į viršų tam, kad jau įrašytos linijos neuždengtų naujų linijų, ir arti bandinio krašto taip, kad nupoliravus bandinio kraštą, modifikacijų šoninius profilius galima būtų stebėti po optiniu mikroskopu, sufokusavus vaizdą ant šoninio bandinio paviršiaus. Matomos modifikacijos

suskirstomos į nestabilias arba nepastebimas, lūžio rodiklio pokyčio ir nanogerdeles, tokiu būdu įvertinant I tipo modifikacijų susidarymo zoną.

2.3.2 Modifikacijų ašinio ilgio matavimas ir duomenų aproksimacija 2D polinomu

Įrašant difrakcinius elementus reikia kelių sluoksnių sudarytų iš lūžio rodiklio pokyčio modifikacijų. Šie sluoksniai turi sudaryti vienalytę didesnio lūžio rodiklio sritį. Dėl sferinių aberacijų modifikacijų ašiniai ilgiai skiriasi prie skirtingo fokusavimo gylio bei impulso energijos verčių. Siekiant išdėstyti atskirus sluoksnius vienas po kito arba išlaikyti vienodą vertikalų jų persiklojimą, reikalinga modifikacijos ašinio ilgio formulė, galinti apjungti minėtus parametrus. Tam tikslui po optiniu mikroskopu išmatuojami modifikacijų ašiniai ilgiai, o gauti rezultatai aproksimuojami dviejų dimensijų polinomu MATLAB programoje su įrankiu „Curve Fitting“. Aproksimavimui naudojamas antros eilės polinomas:

$$f(x, y) = c_0 + c_1x + c_2y + c_3xy + c_4x^2 + c_5y^2 + c_6x^2y^2. \quad (2.1)$$

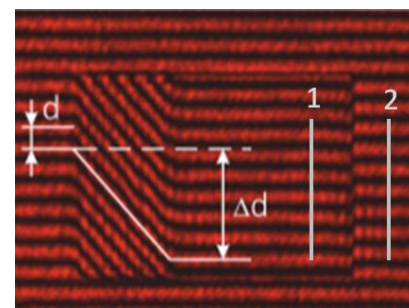
kur x yra impulso energija, o y – fokusavimo gylis. Pati funkcija nurodo modifikacijos ašinį ilgį arba sluoksnio storį.

2.4 Lūžio rodiklio pokyčio matavimas interferometru

Lūžio rodiklio pokyčio matavimui naudojamas Maikelsono interferometras [39] ir HeNe lazeris, kurio bangos ilgis 633 nm. Kadangi lazerio pluošto intensyvumas yra susijęs su jo faze, lūžio rodiklio pokytį galima užrašyti:

$$\Delta n = \frac{\Delta\varphi\lambda}{2\pi h}, \quad (2.2)$$

kur h yra struktūros aukštis, o fazės pokytis $\Delta\varphi = \frac{\Delta d}{d} \cdot 2\pi$ (Δd – interferencinių linijų santykinis poslinkis, o d – interferencinių linijų periodas), atskiri dydžiai gerai matomi 2.4 pav. Iš (2.2) lygties galima pastebėti, kad lūžio rodiklio pokytis tiesiogiai proporcingas fazės poslinkiui normuotam į 2π ir atvirkščiai proporcingas storiui. Žinant šiuos parametrus galima apskaičiuoti lūžio rodiklio pokytį.



2.4 Interferencinių linijų poslinkis [39].

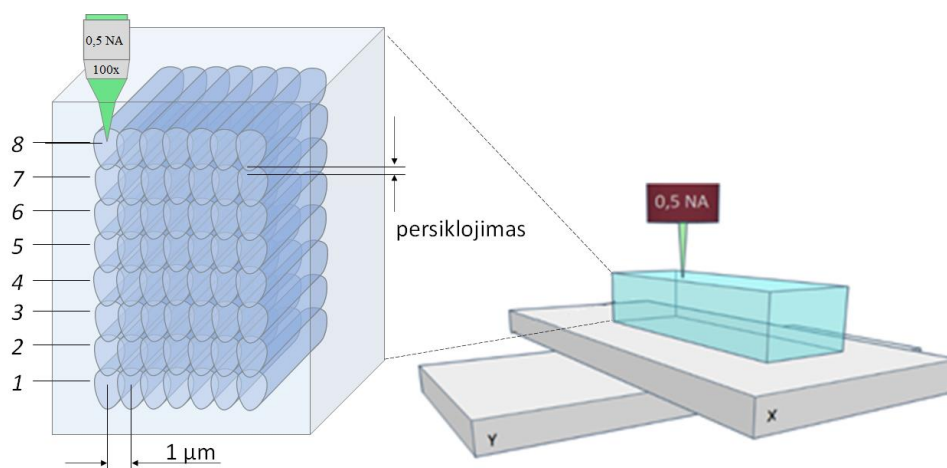
2.4.1 Stačiakampių gretasienių formavimas iš I tipo modifikacijų

Vienas struktūros sluoksnis sudaromas iš I tipo modifikacijų linijų atskirtų per $1\ \mu\text{m}$ periodą tam, kad modifikacijų linijos persiklotų, o visa struktūra sudaroma iš 8 tokių sluoksnių. Toks sluoksnių skaičius pasirinktas todėl, kad esant per mažam sluoksnių skaičiui gali būti sunku įvertinti fazinį poslinkį interferenciniame atvaizde (2.4 pav.), o pasirinkus per didelį - gali susidaryti sritys su nanogerdelėmis. Esant per dideliame sluoksnių skaičiui taip pat atsiranda rizika, kad lūžio rodiklio pokytis struktūros apačioje ir viršuje bus nevienodas dėl skirtingo fokusavimo gylio. Rasti polinomo (2.1) koeficientai panaudojami sluoksnių storio skaičiavimams (pagal tą patį polinomą) tam, kad jie būtų išdėstyti tolygiai vienas po kito (žiūrėti 2.3.2 skyrelį). Taip pat įvedamas vertikalaus persiklojimo parametras, užtikrinantis, kad modifikacijų sluoksniai persikloja taip, kad lūžio rodiklis išliktų pastovus per visą sluoksnį.

2.4 lentelė. Stačiakampių gretasienių, sudarytų iš lūžio rodiklio pokyčio modifikacijų, parametrai naudojant apskritiminę poliarizaciją.

Parametras	Vertė
Impulso energija (nJ)	250 - 550
Pradinis Gauso pluošto fokusavimo gylis (mm)	2,5 - 5,5
Linijos skenavimo greitis (mm/s)	5
Modifikacijų linijų periodas (μm)	1
Vertikalus sluoksnių persiklojimas (%)	0 - 10

Viename bandinyje įrašoma matrica su fokusavimo gyliais nuo 2,5 mm iki 5,5 mm ir impulso energijomis nuo 250 nJ iki 550 nJ ir su 0 % vertikaliu sluoksnių persiklojimu. Kituose bandiniuose įrašoma ta pati matrica, bet su kitu vertikaliu persiklojimu: 5 %; 10 % (2.5 pav.). Skenavimo greitis visais atvejais 5 mm/s.

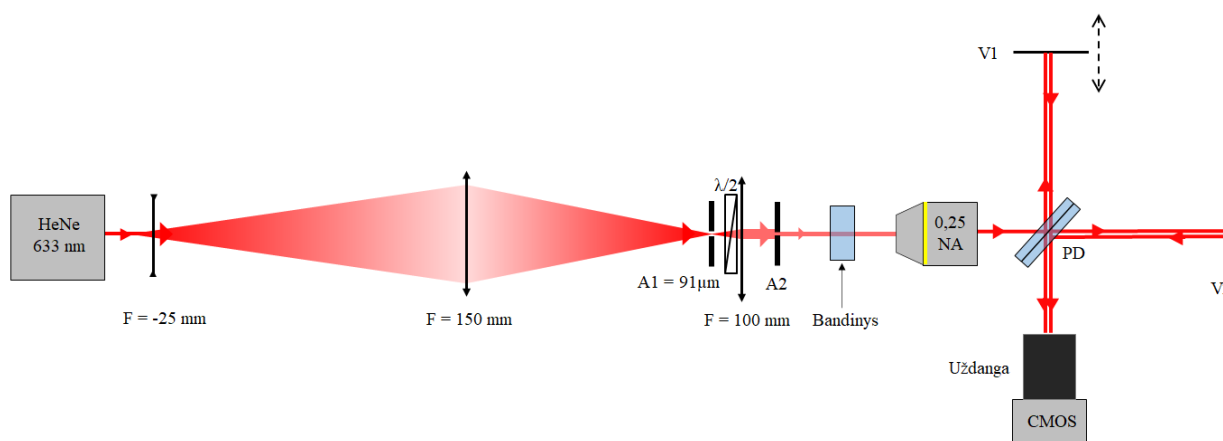


2.5 pav. Struktūros rašymas iš 8 lūžio rodiklio pokyčio modifikacijų sluoksnių su $1\ \mu\text{m}$ periodu y kryptimi ir vertikaliu persiklojimo parametru.

Įprastai pozicionavimo stalai įsibėgėja nuo tos vietos, kur prasideda struktūra, dėl ko reikiamas skenavimo greitis pasiekiamas tik po kurio laiko, todėl būtina naudoti papildomą atstumą, per kurį pozicionavimo stalai įsibėgėja iki nurodyto greičio. Siekiant parodyti įsibėgėjimo ir įtaką eksperimentas su 0 % vertikaliu persiklojimu pakartojamas du kartus: vieną kartą be įsigreitėjimo, kitą – su.

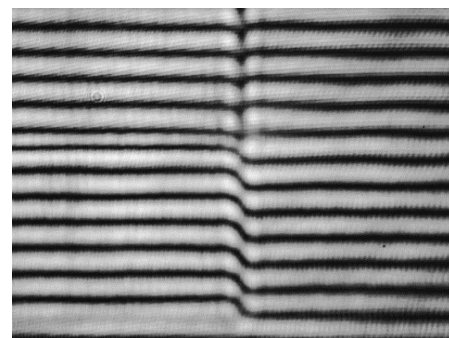
2.4.2 Interferencinio vaizdo registravimas su CMOS kamera

Lūžio rodiklio matavimo schema pavaizduota 2.6 pav. Siekiant gauti geresnę interferencijos kokybę HeNe lazerio spinduliui atliekamas erdvinis filtravimas. Su -25 mm židinio nuotolio lęšiu lazerio pluoštas yra išplečiamas, vėliau sufokusuojamas su 150 mm lęšiu taip, kad pataikytų į fiksuoto 91 μm diametro apertūros A1 centrą. Sutvarkytas pluoštas praeina pro fazinę plokštelę, kuri atitinka tiesinę horizontalią poliarizaciją ir pataiko į 100 mm lęšį, kuris pluoštą sukolinuoja. Siekiant gauti dar geresnę kameroje registruojamo vaizdo kokybę, tik nedidelė dalis praleidžiama per reguliuojamo diametro apertūros A2 centrą. Spindulys toliau patenka į bandinį su struktūromis, o už jo yra 0.25 NA objektyvas, su kuriuo gautas atvaizdas padidinamas 5,55 karto. Patekęs į pluošto daliklį PD atvaizdas suskaidomas į du, iš kurių vienas atsispindi nuo veidrodžio V1, kuris gali būti stumdomas išilgai spindulio sklidimo krypties (siekiant suvienodinti atstumus nuo PD iki veidrodžių) ir nuo veidrodžio V2. Interferavęs vaizdas yra registruojamas su CMOS kamera.



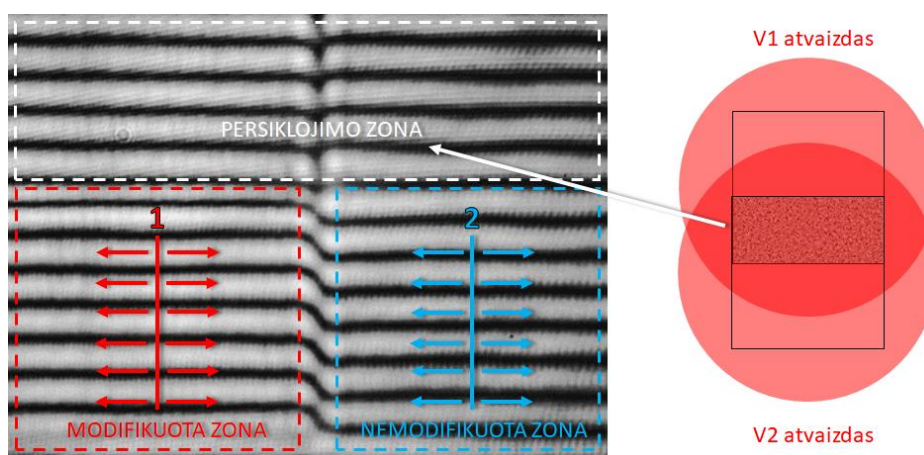
2.6 pav. Lūžio rodiklio pokyčio matavimo schema panaudojant Maikelsono interferometrą ir 633 nm bangos ilgio spinduliuotę. Tamsia spalva pažymėta uždanga naudojama tam, kad į kamerą nepatektų šviesa iš aplinkos, taip gaunant geresnę atvaizdo kokybę. A1 - fiksuota 91 μm apertūra, A2 – keičiamo diametro apertūra, V1 ir V2 – reguliuojamo kampo veidrodžiai, kur V1 gali keisti atstumą iki pluošto daliklio PD. Schemoje taip pat naudojama $\lambda/2$ fazinė plokštelė, atitinkanti horizontalią poliarizaciją.

Prieš pradėdant matavimus Maikelsono interferometras suderinamas: veidrodžiai V1 ir V2 pastatomi statmenai spindulio kritimo kryptims su apytiksliai vienodais atstumais iki PD. Tada pasinaudojant mechaninėmis veidrodžių kampo reguliavimo rankenėlėmis ir stumdому veidrodžiu V1 sistema derinama laike ir erdvėje tol, kol ant ekrano arba detektoriaus gaunama kuo mažiau koncentrinų apskritimų. Tai padarius, vienas iš veidrodžių, šiuo atveju V2, yra išreguliuojamas iš statmenos krypties taip, kad detektoriuje matytųsi tiesios interferencinės linijos (2.7 pav.). Registruojant nuotraukas svarbiausia pasirinkti tokią poziciją, kad būtų aiškiai matomas fazinis poslinkis, nes kai dviejų veidrodžių atvaizdai persikloja, nebelieka ir fazinio pokyčio (viršutinė 2.7 pav. dalis).



2.7 pav. Interferencinės linijos po interferometro suderinimo.

2.4.3 Lūžio rodiklio pokyčio skaičiavimas iš nuotraukų su MATLAB

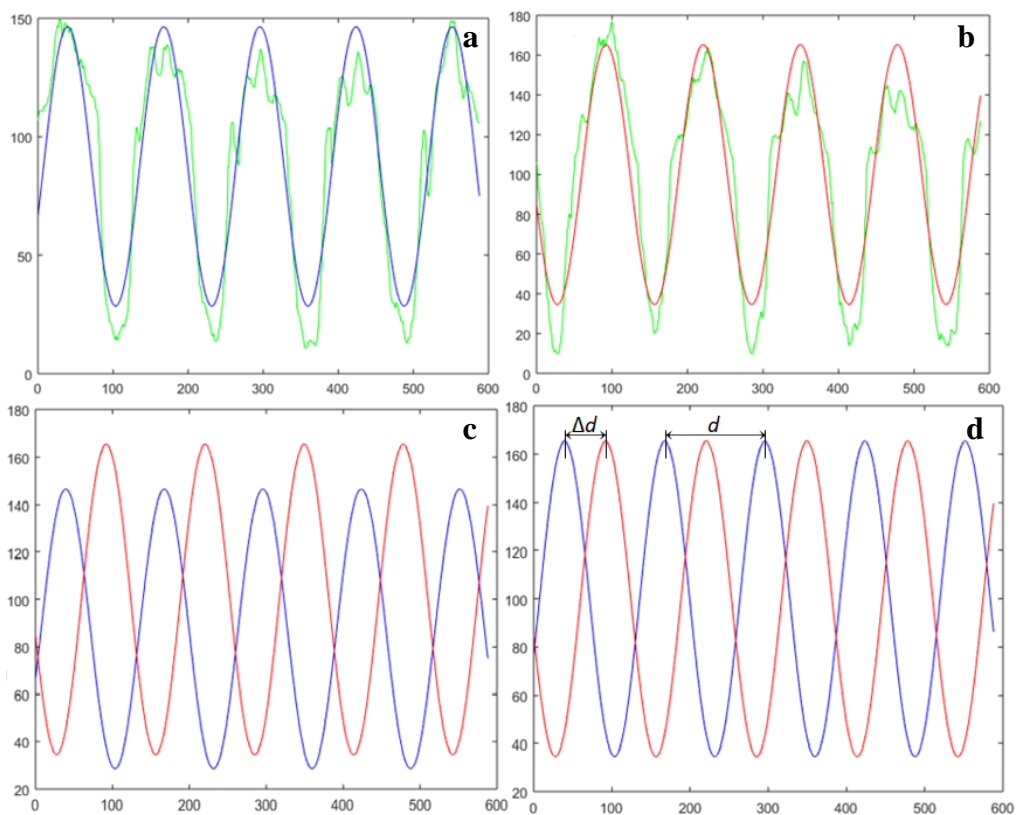


2.8 pav. Interferencinio vaizdo nuotraukos analizavimas su MATLAB brėžiant dvi linijas atitinkančias modifikuotą ir nemodifikuotą zonas. Persiklojimo zonoje fazinio poslinkio nėra.

Užregistruotos nuotraukos analizuojamos su MATLAB programa. Ant nuotraukos brėžiamos dvi linijos išilgai y ašies taip, kad kirstų interferencines linijas (2.8 pav.), kurios priklausomai nuo tamsių ir šviesių vietų duoda sinusoidinį intensyvumo pasiskirstymą. Šis pasiskirstymas aprosimuojamas sinuso funkcija. Pirma linija atitinka struktūrą arba modifikuotą zoną, antra nemodifikuotą. Siekiant išvengti netikslumų 1-a ir 2-a linijos brėžiamos daug kartų (rodyklės linijose šonuose rodo, kad brėžiamos dar kelios linijos iš abiejų šonų) ir vėliau jų rezultatai suvidurkinami. Minėtos linijos neturėtų būti brėžiamos persiklojimo zonoje, kadangi čia nebematomas fazinis pokytis.

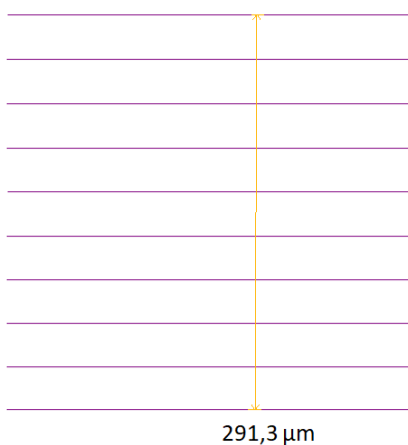
Du svarbiausi parametrai - periodas ir fazės pokytis - yra randami iš kreivių (nubrėžtų linijų intensyvumai aprosimuoti sinuso funkcija) parametrų (2.9 pav.). Stačiakampių gretasienių storiai

išmatuojami su DMC programa pridant apatinio sluoksnio storį arba modifikacijos ašinį ilgį randamą iš (2.1) formulės (2.10 pav.). Žinant šiuos parametrus galima įvertinti fazės pokytį ir tada pasinaudojant (2.2) formule - lūžio rodiklį.



2.9 pav. a) 1-os ir b) 2-os linijų intensyvumo pasiskirstymai aproksimuoti sinuso funkcija, kur žalia spalva vaizduoja realų 1-os ir 2-os linijų intensyvumo pasiskirstymą; abiejų linijų c) aproksimacijos; d) aproksimacijos su vienodu periodu ir amplitude, kur d – žymi periodą, o Δd – linijų poslinkį. Grafikų spalvos atitinką linijų spalvas 2.8 pav.

$$291,3 + f(x,y) = 291,3 + 29,8 = 321,1 (\mu\text{m})$$



2.10 pav. Struktūros storis matuojamas su DMC programa pridant paskutinio sluoksnio modifikacijos ašinį ilgį pagal polinomo (2.1) formulę.

2.5 Fazinių kaukių įrašymas ir charakterizavimas

Fazinių difracinių optinių elementų kokybė priklauso nuo to, ar šie elementai sudaryti iš I tipo modifikacijų sluoksnių, kuriuose sukuriamas vienodas lūžio rodiklio pokytis. Tam tikslui lydyto kvarco bandinyje atliekamas pastovaus lūžio rodiklio pokyčio visai struktūrai eksperimentas. Šiuo eksperimentu siekiama, kad kiekvienas struktūros sluoksnis turėtų tą pačią lūžio rodiklio pokyčio vertę. Taip pat šie sluoksniai turi būti išdėstyti vertikalia kryptimi taip, kad pereinant iš vieno sluoksnio į kitą, lūžo rodiklio pokytis būtų taip pat pastovus, todėl tam naudojamas vertikalaus persiklojimo parametras.

2.5.1 Pastovaus lūžio rodiklio stačiakampis gretasienis

2.5 lentelė. Stačiakampių gretasienių parametrai naudojant apskritiminę poliarizaciją.

Parametras	Vertė
Impulso energija (nJ)	320 - 264
Pradinis Gauso pluošto fokusavimo gylis (mm)	4
Skenavimo greitis (mm/s)	5
Sluoksnių skaičius (storis)	6 - 28
Modifikacijų linijų periodas (μm)	1
Vertikalus sluoksnių persiklojimas (%)	10; 15; 20

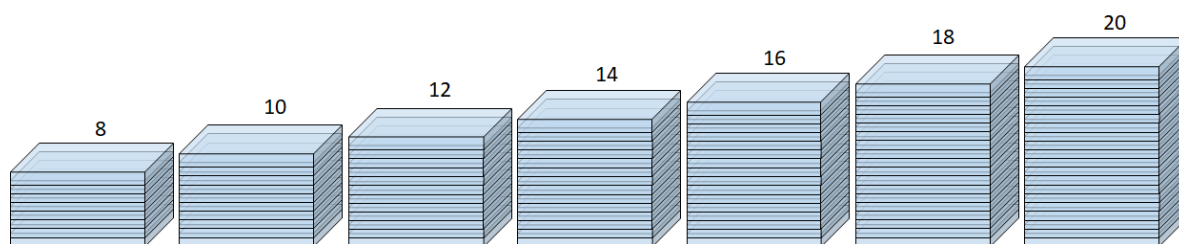
Įvertinus lūžio rodiklio vertes prie skirtingų fokusavimo gylių, impulso energijos verčių bei vertikalių sluoksnių persiklojimų, surandama formulė pagal kurią įrašant modifikacijų sluoksnius kiekvienas būtų įrašytas taip, kad lūžio rodiklio pokytis kiekviename sluoksnyje būtų vienodas. Formulei gauti panaudojama paprasčiausia tiesės lygtis:

$$D = Ek + b, \quad (2.3)$$

kur D yra fokusavimo gylis, o E – impulso energija. Ši formulė kartu turi apjungti anksčiau gautą polinomą (2.1). Tai reiškia, kad keičiantis impulso energijai, keisis ir atstumas tarp sluoksnių, nes polinomo formulėje kintamasis x atitinka impulso energija.

Siekiant įsitikinti, kad formulė veikia gerai atliekamas skirtingo struktūrų storio eksperimentas, kuriame įrašoma stačiakampių gretasienių matrica. Kiekviena nauja struktūra daroma su daugiau sluoksnių, tokiu būdu sukuriant vis didesnę struktūros storį. Sluoksnių skaičius keičiamas nuo 6 iki 28 arba nuo 6 iki 26. Taip pat patikrinamos kelios vertikalaus persiklojimo vertės: 10 %; 15 %; 20 %. Vėliau eksperimentai pakartojami su 20 % vertikaliu persiklojimu koreguojant k ir b koeficientus arba kitaip tariant paliekant tą pačią pirmo sluoksnio įrašymo impulso energiją ir keičiant paskutinio sluoksnio įrašymo energiją. Šio eksperimento tikslas įsitikinti ar matuojama vidutinio lūžio rodiklio

pokyčio vertė išlieka pastovi didėjant struktūros storiui. Jei ne, tiesės koeficientai koreguojami taip, kad būtų gauta pastovaus lūžio rodiklio pokyčio struktūra. Pastovaus lūžio rodiklio moduliacijos savybė svarbi diskretiniams elementams, t. y. tokiems elementams, kurių kiekvienas sluoksnis yra užpildytas skirtingu kiekiu modifikacijų. Taip pat šis eksperimentas parodo, kiek reikia sluoksnių norint pasiekti fazės vėlinimą per 2π 633 nm bangos ilgio spinduliuotei, kuri yra naudojama charakterizavimo stende.



2.11 pav. Pastovaus lūžio rodiklio eksperimentas. Matuojamas skirtingo storio stačiakampių gretasienių lūžio rodiklio pokytis, kai kiekvieno sluoksnio įrašymo energija mažinama tiesiškai. Skaičius viršuje žymi bendrą sluoksnių skaičių.

2.5.2 Frenelio lęšis ir difrakcijos efektyvumo matavimas

2.6 lentelė. Frenelio lęšio parametrai naudojant apskritiminę poliarizaciją.

Parametras	Vertė
Impulso energija (nJ)	320 - 300
Pradinis Gauso pluošto fokusavimo gylis (mm)	4
Skenavimo greitis (mm/s)	5
Sluoksnių skaičius (storis)	21
Fazės vėlinimas	2π
Modifikacijų linijų periodas (μm)	1
Modifikacijų pločio kompensavimo parametras (μm)	1
Vertikalus sluoksnių persiklojimas (%)	20
Įprastinio lęšio židinio nuotolis* (mm)	20
Frenelio lęšio diametras (μm)	645
Lygių skaičius elemente (diskretizavimas)	2; 21

* Įprastinio lęšio židinio nuotolis, kuris pagal skaičiavimus turi atitikti išmatuotą tūrinio Frenelio lęšio židinio nuotolį.

Frenelio lęšio įrašyto lydyto kvarco tūryje veikimas iš esmės skiriasi nuo paprasto kvarcinio lęšio. Kadangi lūžio rodiklio modifikacijos turi nedidelę lūžio rodiklio moduliaciją, tai skirtumas tarp lęšio ir aplinkos lūžio rodiklių lygus šių modifikacijų sukuriama pokyčiui, dėl ko norint pagaminti tam tikro židinio nuotolio lęšį smarkiai sumažėja lęšio paviršiaus kreivumo radiusas (viena lęšio pusė plokščia):

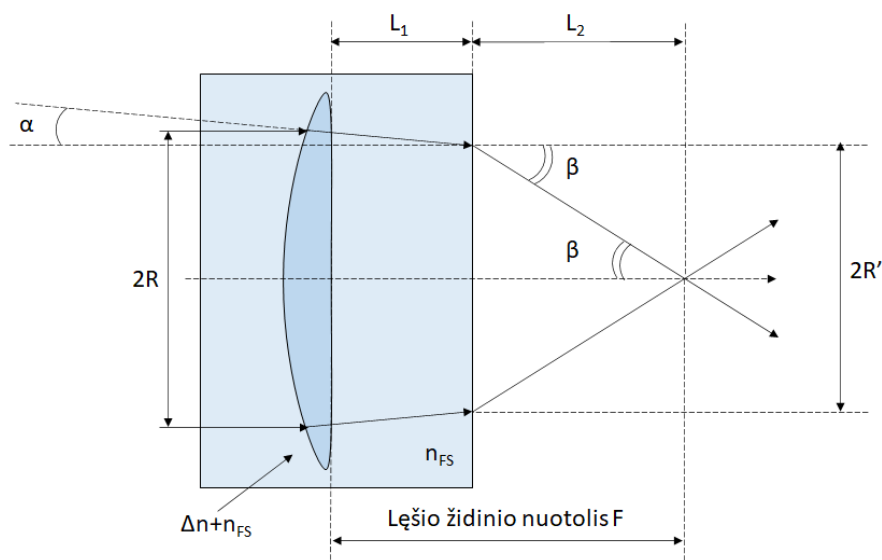
$$R_1 = f \Delta n. \quad (2.4)$$

Kita vertus, lęšio židinytis yra už lydyto kvarco, o tai reiškia, kad spinduliai einantys už lęšio patiria dar vieną lūžį tarp skirtingo lūžio rodiklių ribų pagal Snelijaus dėsnį (2.12 pav.):

$$n_{FS} \sin \alpha = \sin \beta, \quad (2.5)$$

todėl spinduliai susifokusuoja arčiau nei nurodyto židinio nuotolio taške. Siekiant įvertinti šį neatitikimą pagal 2.12 pav. atliekami skaičiavimai parodantys šį neatitikimą ir tokios įrašymo technologijos galimybes. Realus lęšio židinio nuotolis skaičiuojamas pagal formulę:

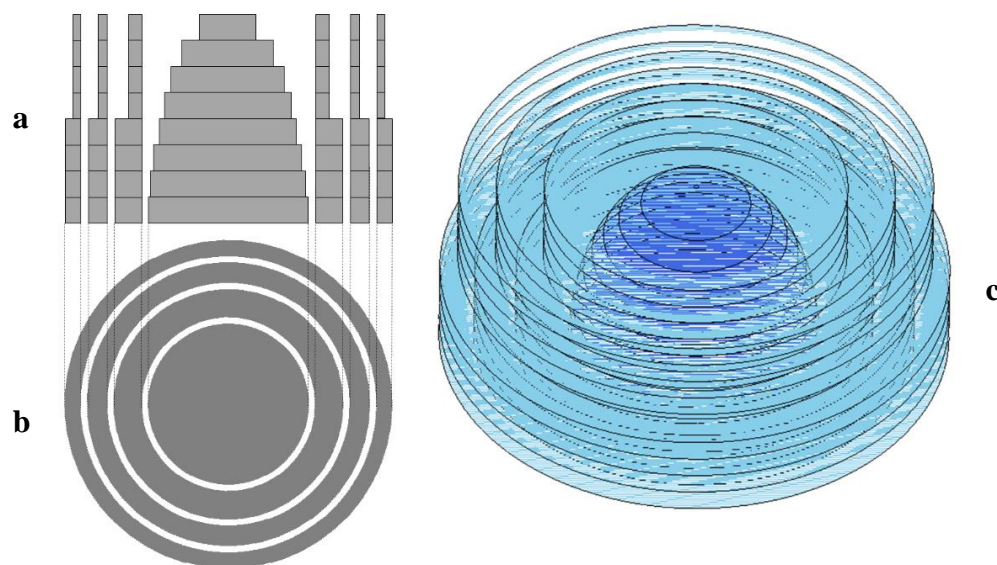
$$F_{realus} = L_1 + L_2. \quad (2.6)$$



2.12 pav. Lęšio veikimas lydyto kvarco tūryje. Iš brėžinio matyti, kad lęšio židinio nuotolis gaunamas mažesnis dėl spindulių lūžimo tarp dviejų skirtingo lūžio rodiklių terpių. n_{FS} – lydyto kvarco lūžio rodiklis.

Įrašomo Frenelio lęšio modelis pavaizduotas 2.13 pav. Jo įrašymui lydyto kvarco tūryje naudojama 21 modifikacijų sluoksnis, kad susidarytų fazės vėlinimas per 2π . 1.1.1 skyrelyje aprašytoje formulėje (1.2) matyti, kad lęšio centrinės dalies ir aplink esančių žiedų diametrai priklauso nuo to, koks yra užduotas lęšio židinio nuotolis. Literatūroje yra teigiama, kad esant didesniam lęšio aukščio diskretizavimui, gaunamas geresnis difrakcijos efektyvumas [6]. Kadangi centrinė lęšio dalis yra pakankamai plati, su kiekvienu sluoksniu į viršų apskritimo spindulys gali būti mažinamas pagal tai, kaip šis dydis turėtų mažėti nagrinėjant paprastą lęšį. Diskretizavimo problema atsiranda tada, kai dėl mažo lęšio židinio nuotolio arba didelės lęšio apertūros tolimesnėje periferinėje lęšio dalyje gaunamas mažas skirtumas tarp išorinio ir vidinio žiedo radiuso. Dėl šio mažo skirtumo

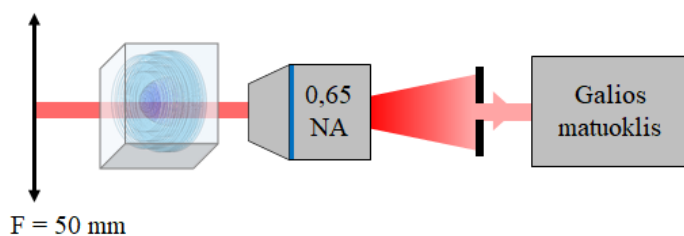
nepakanka įrašymo rezoliucijos sudaryti daug diskretinių lygmenų ir dėl to nukenčia elemento difrakcijos efektyvumas. Todėl šie žiedai sudaromi iš dviejų lygmenų: pilno ir pusės pločio žiedų.



2.13 pav. Įrašomo Frenelio lęšio modelis: a) iš šono; b) iš viršaus; c) trimatėje erdveje. Šviesesnė mėlyna spalva pažymėta periferinė lęšio dalis sudaryta iš dviejų lygmenų – platesnio ir siauresnio spindulio žiedų.

Centrinė dalis įrašoma linijomis, o periferinė – spiralinėmis trajektorijomis, tarp kurių yra $1 \mu\text{m}$ tarpas. Naudojant spiralines trajektorijas ženkliai pagreitinamas rašymo procesas, tačiau dėl mažo spindulio centrinė dalis negali būti įrašoma spiralinėmis trajektorijomis todėl, kad pozicionavimo stalai negali taip greitai keisti pozicijos.

Kadangi modifikacijos turi savo plotį, tikėtina, kad centrinės dalies ir žiedų radiusai bus platesni, o tai gali pakenkti difrakcijos efektyvumui, todėl DMC programoje parašytame recepte įvedamas kompensavimo parametras, kuris sumažina kiekvieno žiedo vidinį ir išorinį, o centrinės dalies tik išorinį, spindulį per $1 \mu\text{m}$.



2.14 pav. Frenelio lęšio difrakcijos efektyvumo matavimo schema.

Frenelio lęšio difrakcijos efektyvumas matuojamas pagal schemą pavaizduotą 2.14 pav. HeNe lazerio spinduliui atliekamas tas pats anksčiau aprašytas erdvinis filtravimas (žiūrėti 2.4.2 skyrių). Šioje schemoje nufiltruotas spindulys surenkamas su 50 mm židinio nuotolio lęšiu taip, kad pluoštas būtų kolimuotas. Kolimuotas 0,5 mm diametro spindulys praeina pro Frenelio lęšį, o už bandinio

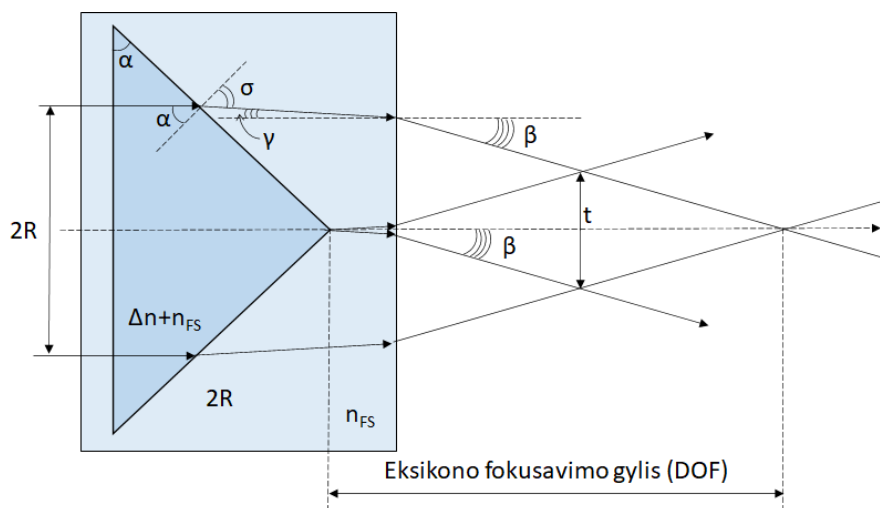
stovi 0,65 NA objektyvas, kuris smarkiai išplečia atvaizdą. Periferinė difragavusio pluošto dalis uždengiama apertūra, o likusio centrinio taškelių galia matuojama su galios matuokliu. Išmatuota galia palyginama su atramine galia, kuri išmatuojama spindulį paleidus per nemodifikuotą bandinio vietą, ir tokiu būdu įvertinamas difrakcijos efektyvumas. Matavimo metu atsižvelgiama į 0,65 NA objektyvo sugertį. Tai pat palyginamas išmatuotas lęšio židinio nuotolis su apskaičiuotu.

2.5.3 Frenelio eksikonas ir difrakcijos efektyvumo matavimas

2.7 lentelė. Frenelio eksikono parametrai naudojant apskritiminę poliarizaciją.

Parametras	Vertė
Impulso energija (nJ)	320 - 300
Pradinis Gauso pluošto fokusavimo gylis (mm)	4
Skenavimo greitis (mm/s)	5
Sluoksnių skaičius (storis)	21
Fazės vėlinimas	2π
Lygių skaičius elemente (diskretizavimas)	21
Modifikacijų linijų periodas (μm)	1
Modifikacijų pločio kompensavimo parametras (μm)	1
Vertikalus sluoksnių persiklojimas (%)	20
Įprastinio eksikono kampas* ($^\circ$)	1
Frenelio eksikono diametras (μm)	603

* Įprastinio eksikono kampas, kuris pagal skaičiavimus turi atitikti išmatuotą tūrinio fraksikono kampą.



2.15 pav. Eksikono veikimas lydyto kvarco tūryje. n_{FS} – lydyto kvarco lūžio rodiklis.

Frenelio eksikono veikimas taip pat skiriasi nuo tokio paties eksikono veikimo ore. Skirtumai nėra taip lengvai pastebimi kaip Frenelio lęšio atveju, todėl nusibraižius brėžinį (2.15 pav.) atliekami spindulių optinio kelio skaičiavimai. R pločio spindulys nelūždamas patenka į eksikono vidų, ir praeidamas per eksikono šoną lūžta pagal Snelijaus dėsnį:

$$n \sin \alpha = n_{FS} \sin \sigma, \quad (2.7)$$

kur α yra eksikono pagrindo kampas. Tada lūžta dar kartą lydyto kvarco ir oro riboje:

$$n_{FS} \sin \gamma = \sin \beta, \quad (2.8)$$

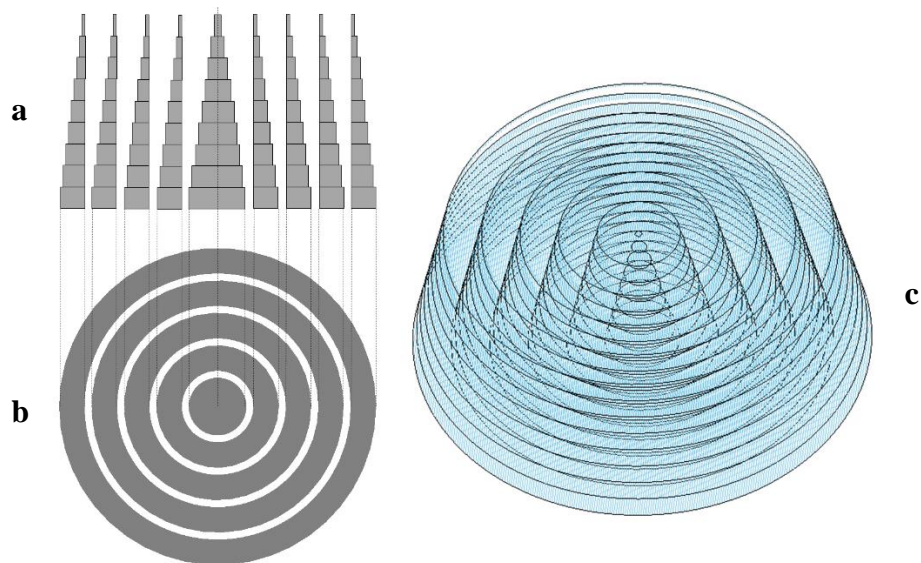
kur $\gamma = \sigma - \alpha$. Žinant eksikono spindulių susikirtimo puskampį β galima apskaičiuoti eksikono fokusavimo gylį DOF (*depth-of-focus*) [10]:

$$\text{DOF} \approx \frac{R}{\text{tg } \beta}. \quad (2.9)$$

Žinant DOF galima paskaičiuoti įprastinio eksikono, oro aplinkoje, pagrindo kampą:

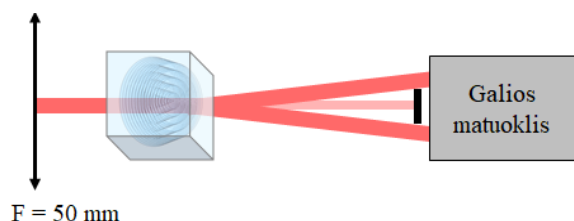
$$\alpha_{\text{realus}} \approx \frac{R}{(n_{FS} - 1)\text{DOF}}. \quad (2.10)$$

Remiantis aprašytomis formulės atliekami skaičiavimai leidžiantys nustatyti tokio elemento rašymo technologines galimybes.



2.16 pav. Įrašomo Frenelio eksikono modelis: a) iš šono; b) iš viršaus; c) trimatėje erdvėje.

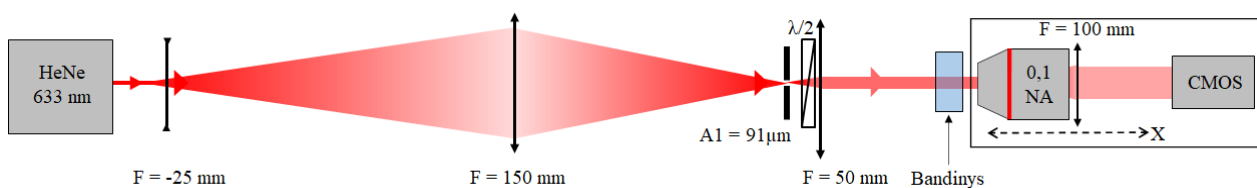
Frenelio eksikono modelis pavaizduotas 2.16 pav. Jo įrašymui kaip ir Frenelio lęšiui kvarco tūryje naudojamas 21 modifikacijų sluoksnis. Kadangi fraksikono žiedai yra pakankamai platūs, jų nebūtina diskretizuoti į mažiau lygmenų negu yra sluoksnių. Šiuo atveju kiekvieno žiedo ir centrinės dalies spinduliai mažinami tuo pačiu dydžiu su kiekvienu sluoksniu į viršų. Kaip ir Frenelio lęšio atveju centrinė dalis rašoma linijomis, o žiedai spiralinėmis trajektorijomis abiem atvejais pritaikant kompensavimo parametą.



2.17 pav. Frenelio lęšio difrakcijos efektyvumo matavimo schema.

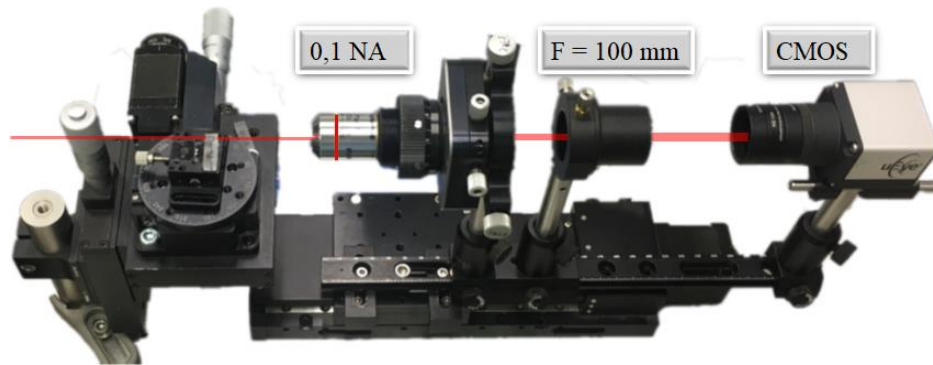
Frenelio eksikono difrakcijos efektyvumo matavimas šiek tiek skiriasi nuo Frenelio lęšio (2.17 pav.). Fraksikono difrakcijos efektyvumas matuojamas tolimajame lauke. Į susidariusį žiedą susirenka didžioji dalis difragavusios spinduliuotės, todėl galia pamatuojama apertūra uždengus periferinius žiedus. Tada pamatuojama centrinio taško galia. Ji atimama iš anksčiau išmatuotos galios ir palyginama su galia, gauta matuojant spindulį, einantį per lydyto kvarco bandinį be struktūros. Išmatuotas ir apskaičiuotas fraksikono pagrindo kampas remiantis (2.10) formule palyginamas su teoriniu eksikono kampu.

2.5.4 Difragavusio pluošto sklidimo pasiskirstymo registravimas



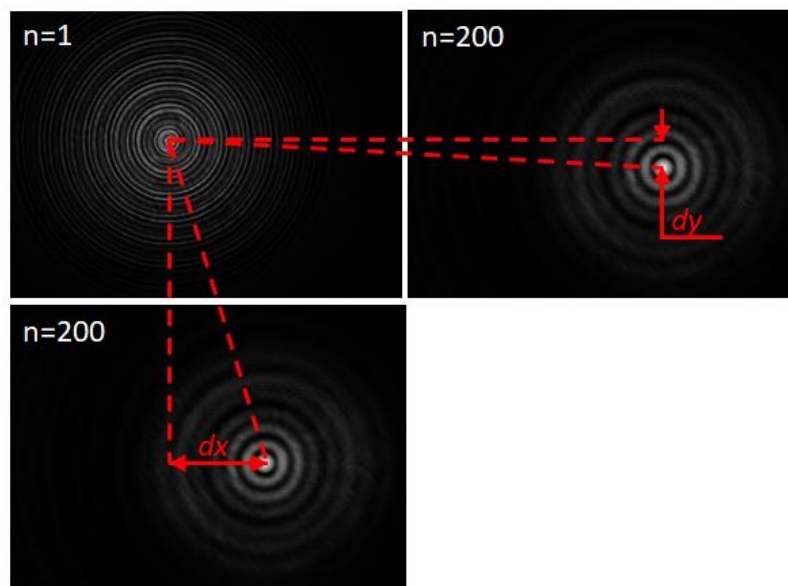
2.18 pav. Difragavusio pluošto sklidimo pasiskirstymo registravimo standas. A1 – fiksuota 91 μm apertūra.

Čia panaudojamas 2.5.2 skyriuje Frenelio lęšio difrakcijos efektyvumui naudotas charakterizavimo standas, tik vietoj 0,65 NA naudojamas 0,1 NA objektyvas, o vietoj apertūros – 100 mm lęšis bei CMOS kamera. Objektyvas, 100 mm lęšis ir kamera yra sumontuoti ant pozicionavimo stalo, kuris gali judėti X ašimi arba išilgai pluošto sklidimo krypties. Kiekvienas bandinys su įrašytu elementu padedamas ant reguliuojamo aukščio, kampo ir horizontalumo padėties reguliavimo staliuko taip, kad pluoštas kristų statmenai į bandinio paviršių. Susiformavęs atvaizdas patenka į objektyvą, ten padidinamas ir lęšiu sukolimuojamas į kamerą, taip sukuriant 2,22 kartus padidintą atvaizdą. Pagal parašytą algoritmą DMC programoje X pozicionavimo stalas nuvažiuoja apie 5 – 10 cm atstumą padarydamas apie 100 – 200 nuotraukų. Vėliau nuotraukos apdorojamos MATLAB programos pagalba.



2.19 pav. Pluošto sklaidimo matavimo stendas. Automatizuota pozicionavimo ašis leidžia registruoti nuotraukas skirtingose x ašies padėtyse taip sugeneruojant sklindančio pluošto pasiskirstymą šioje ašyje.

Kadangi labai sudėtinga sureguliuoti pozicionavimo ašies judėjimo trajektoriją idealiai pluošto lygiagrečiai sklaidimo ašiai, tai pirmoje ir paskutinėje nuotraukoje matomo elemento centras nėra toje pačioje vietoje 2.20 pav. MATLAB parašytame kode, prieš pradėdant nuotraukų skenavimą rankiniu būdu yra parenkamas centrinis pirmos ir paskutinės nuotraukos elemento taškas. Tada kiekviena nuotrauka yra skenuojama per elemento centrą ir gaunamas kiekvieno tokio pjūvio intensyvumo pasiskirstymas. Visi šie intensyvumai sudedami į matricą, pagal kurią nubraižomas intensyvumo pasiskirstymo grafikas atitinkantis difragavusio pluošto sklaidimą erdvėje.



2.20 pav. Pirmos ir paskutinės nuotraukos centrinio elemento taško parinkimas tam, kad nuotraukų skenavimas visą laiką išliktų per elemento centrą.

2.5.5 Fraksikono testavimas su lazerine sistema

2.8 lentelė. Didelės apertūros Frenelio eksikono parametrai.

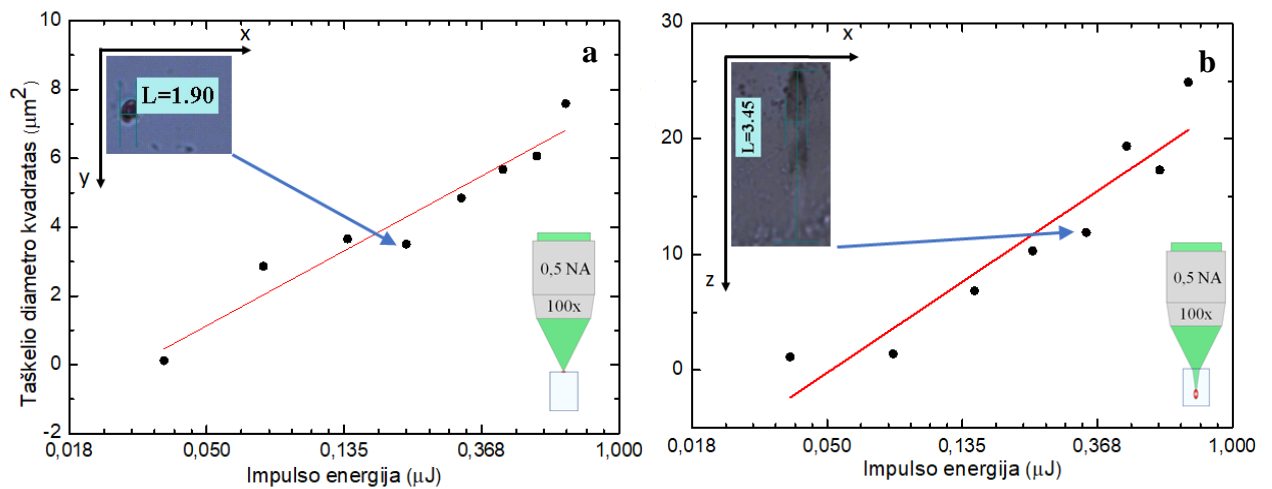
Parametras	Vertė
Impulso energija (nJ)	320 - 300
Pradinis Gauso pluošto fokusavimo gylis (mm)	4
Skenavimo greitis (mm/s)	5
Sluoksnių skaičius (storis)	21
Fazės vėlinimas	2π
Lygių skaičius elemente (diskretizavimas)	21
Modifikacijų linijų periodas (μm)	1
Modifikacijų pločio kompensavimo parametras (μm)	1
Vertikalus sluoksnių persiklojimas (%)	20
Įprasto eksikono kampas* ($^{\circ}$)	1
Frenelio eksikono diametras (μm)	4

* Įprasto eksikono kampas, kuris pagal skaičiavimus turi atitikti išmatuotą tūrinio fraksikono kampą.

Siekiant įvertinti technologijos patikimumą ir įrodyti, kad tokio tipo elementai gali būti taikomi lazerinėse sistemose lydyto kvarco tūryje įrašomas dar vienas Frenelio eksikonas. Lazerinėje sistemoje naudojamas bangos ilgis yra 515 nm, todėl sluoksnių skaičius parenkamas toks, kad perskaičiavus elemento storį pagal (2.2) formulę būtų gautas fazės vėlinimas per 2π . Sistemoje naudojamo pluoštelio diametras siekia apie 2 mm, todėl siekiant užtikrinti, kad pluoštas tikrai pataiko į elementą eksikono, diametras išplečiamas iki 4 mm. Fraksikono žiedai, kaip ir anksčiau rašomi spiralinėmis trajektorijomis, o centrinė dalis iš linijų su tuo pačiu 1 μm periodu. Elemento parametrai pateikti 2.8 lentelėje. Pagamintas elementas įtvirtinamas į laikiklį ir patalpinamas į femtosekundinę lazerinę sistemą optinio kelio vietoje. Išmatuojamas difrakcijos efektyvumas. Pirmojo ir antrojo fraksikonų storių skiriasi, tačiau remiantis pastovaus lūžio rodiklio pokyčio įrašymo parametrais, perskaičiuotas sluoksnių skaičius 515 nm bangos ilgiui neturėtų padaryti įtakos difrakcijos efektyvumui.

3. Tyrimo rezultatai

3.1 Lydyto kvarco pažeidimo slenkstis



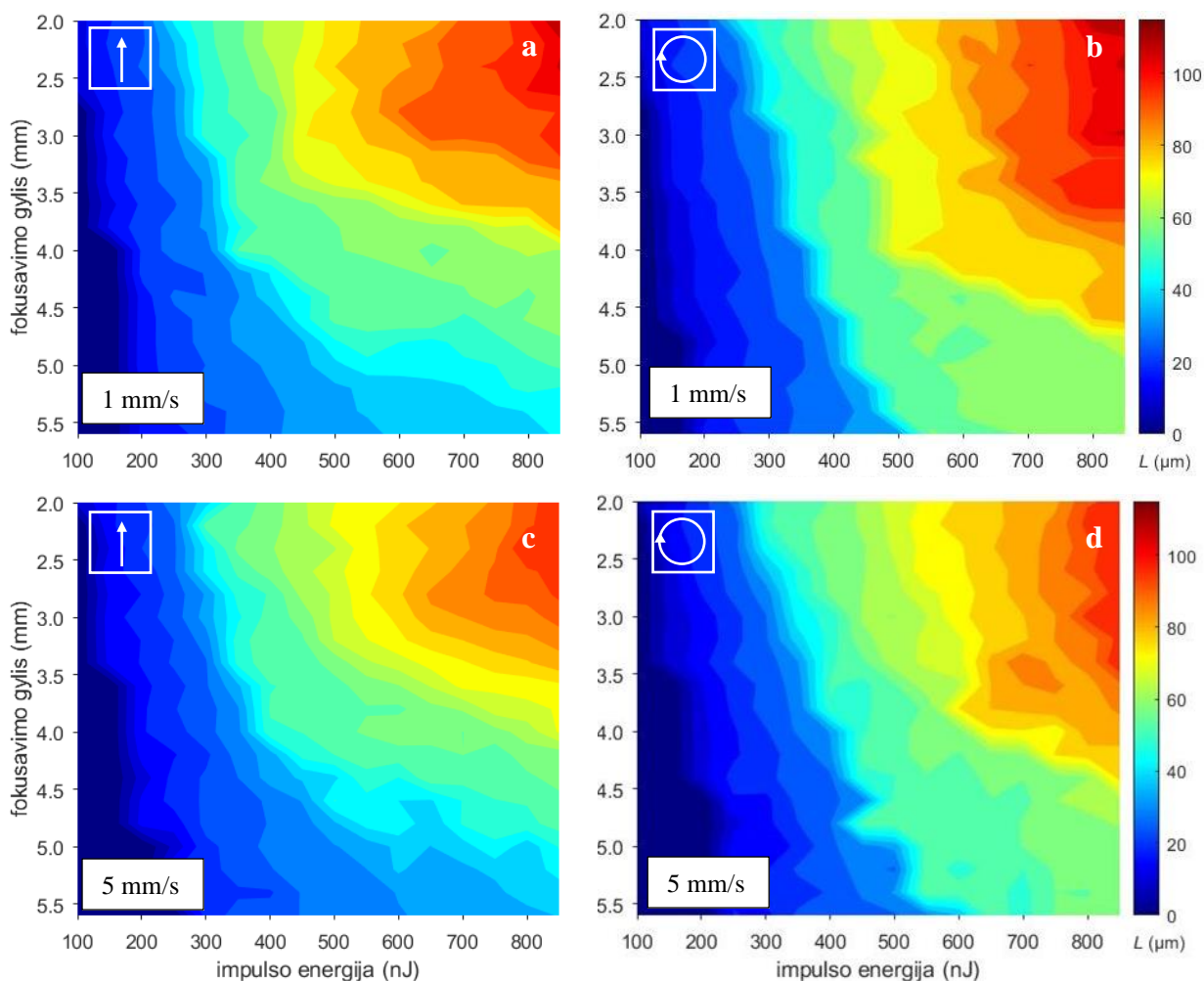
3.1 pav. Pažeidimo slenkščio lydyto kvarco a) paviršiuje ir b) tūryje (0,2 mm nuo paviršiaus) nustatymas su Mitutoyo 100x 0,5 NA objektyvu kai naudojama 515 nm bangos ilgio spinduliuotė ir 10 impulsų vienam taškeliui.

Ištirus lydyto kvarco pažeidimo slenkštį pastebėta, kad didesnio energijos tankio reikia apdirbant medžiagos paviršius, kadangi paviršinis pažeidimo slenkstis $F_{th} = 1.73 \frac{J}{cm^2}$, o tūrinis - $F_{th} = 0.83 \frac{J}{cm^2}$. Gautas tūrinio taškelių diametras 3,96 μm , kai tuo tarpu paviršiaus taškelių diametras siekia tik 2,09 μm . Gauti rezultatai parodė, jog norint sukurti pažeidimą lydyto kvarco tūryje reikalinga minimali 50 nJ impulso energija.

3.2 Modifikacijų ašiniai ilgiai ir I tipo modifikacijų zonos

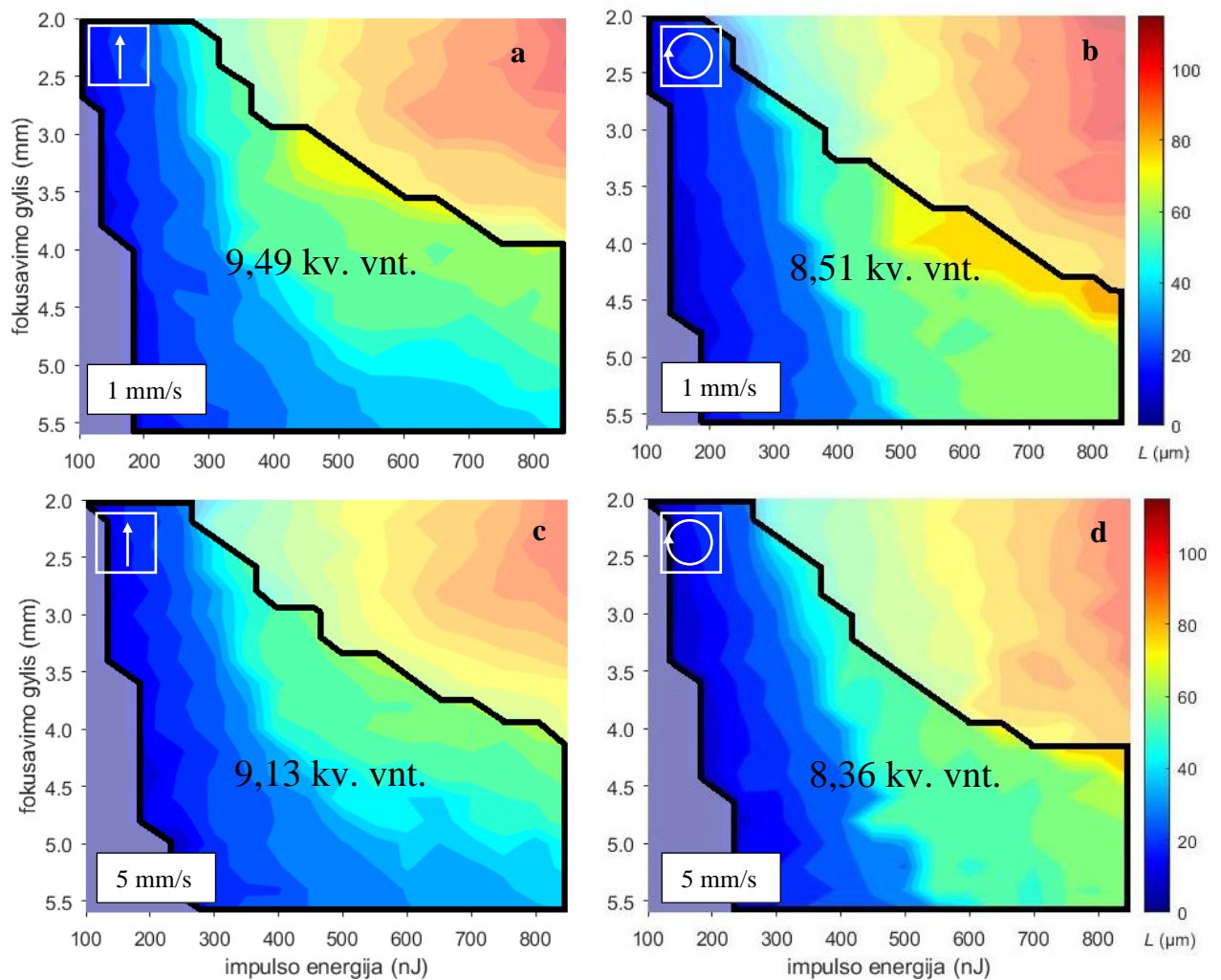
Remiantis tūrinio pažeidimo slenkščio rezultatais buvo ištirtas platus gausinio pluošto fokusavimo gylių ir impulso energijų intervalas matuojant įrašytų modifikacijų ašinius ilgius. Iš žemiau pateiktų grafikų matyti, kad esant per mažai impulso energijai modifikacijos ašinis ilgis lygus 0 μm . Tai reiškia, kad modifikacija nesusidaro dėl nepakankamo energijos tankio atitinkamam gyliui arba yra nestabili ir greitai išnykstanti, todėl nematoma po optiniu mikroskopu. Didžiausias modifikacijos ašinis ilgis tirtame parametų intervale gaunamas arčiau paviršiaus, kadangi fokusuojant giliau neužtenka energijos, reikalingos stabilios modifikacijos susiformavimui. Naudojant didesnę skenavimo greitį modifikacijos ašinis ilgis mažėja, kita vertus procesas tampa žymiai spartesnis, dėl ko įrašant didelio diametro (4 – 6 mm) elementus, tai tampa labai svarbus parametras. Palyginus tiesinę poliarizaciją, kai poliarizacijos kryptis statmena įrašymo kryptiai, ir apskritiminę poliarizaciją matyti, kad naudojant tiesinę poliarizaciją modifikacijos ašinis ilgis gaunamas didesnis prie mažesnio fokusavimo gylio ir didesnės impulso energijos nei apskritiminės

polarizacijos atveju. Tačiau prie didesnių fokusavimo gylių ir didesnės impulso energijos – čia didesnis modifikacijos ilgis gaunamas naudojant apskritiminę polarizaciją. Didesnis modifikacijos ašinis ilgis lemia tai, kad įrašant difrakcinį elementą gali prireikti mažesnio skaičiaus sluoksnių reikiamam elemento storiui pasiekti. Svarbu pabrėžti ir tai, kad įrašant fazinius difrakcinius elementus kartais tenka naudoti spiralines trajektorijas, tačiau naudojant tiesinę polarizaciją, ją reikėtų atitinkamai sukti pagal trajektoriją, kad polarizacija visą laiką būtų statmena įrašymo kryptiai, o tai gali apsunkinti procesą. Dėl šių priežasčių apskritiminės polarizacijos naudojimas elementų įrašymui lydyto kvarco tūryje yra praktiškesnis pasirinkimas.



3.2 pav. Modifikacijų ašiniai ilgiai L prie skirtingų impulso energijos ir fokusavimo gylio verčių su skirtingais greičiais bei polarizacijomis. Skenavimo greitis: a) ir b) 1 mm/s; c) ir d) 5 mm/s, polarizacija: a) ir c) tiesinė; b) ir d) apskritiminė.

Nagrinęjant lūžio rodiklio pokyčio modifikacijų susidarymo ribas (3.3 pav.) galima pastebėti, kad neženkliai platesnė zona susidaro prie didesnio skenavimo greičio, o lyginant skirtingas polarizacijas, didesnė I tipo modifikacijų zona susidaro naudojant tiesinę polarizaciją. Virš lūžio rodiklio modifikacijų susidarymo zonos yra sritys su nanogardelėmis.



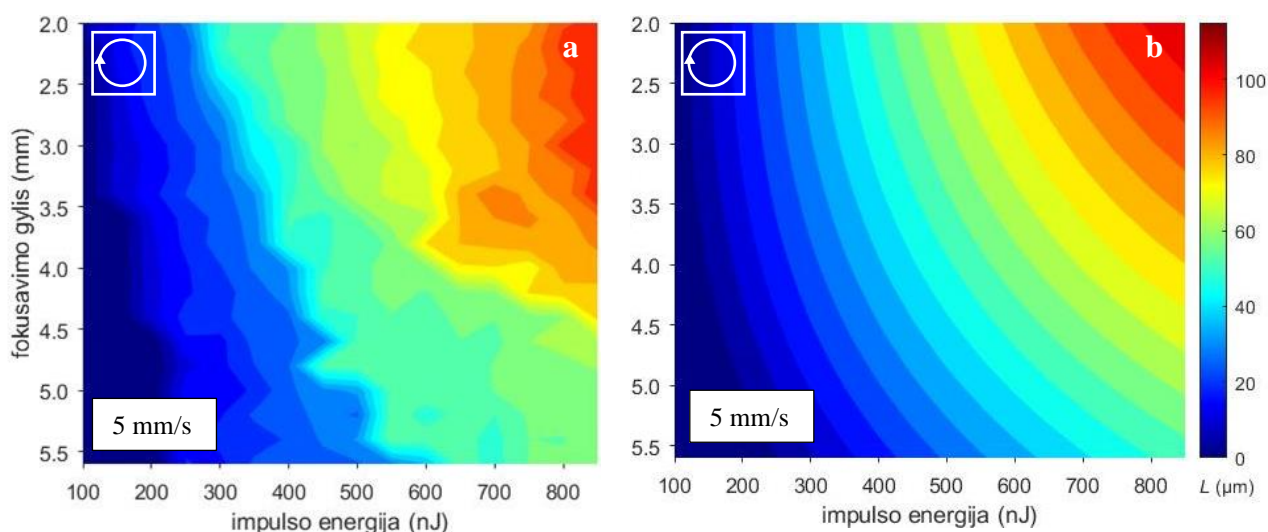
3.3 pav. Lūžio rodiklio pokyčio modifikacijų zonos prie skirtingų impulso energijos ir fokusavimo gylio verčių su skirtingais greičiais bei poliarizacijomis, kur L yra modifikacijos ašinis ilgis. Skenavimo greitis: a) ir b) 1 mm/s; c) ir d) 5 mm/s, poliarizacija: a) ir c) tiesinė; b) ir d) apskritiminė. Skaičiai ant grafiko žymi bendrą I tipo modifikacijų plotą kvadratiniais vienetais.

3.3 Ašinių ilgių aproksimavimas ir lūžio rodiklio pokyčio vertės

Tolimesniems eksperimentams pasirinktas didesnis skenavimo greitis dėl spartesnio įrašymo proceso ir apskritiminė poliarizacija, nes šiuo atveju nereikia keisti fazinės plokštelės $\lambda/2$ kampo ir gaunami didesni modifikacijų ašiniai ilgiai prie didesnės impulso energijos. Grafikas su modifikacijų ašiniais ilgiais naudojant 5 mm/s ir apskritiminę poliarizaciją aproksimuojamas 2D polinomu, kurio koeficientai pateikti 3.1 lentelėje.

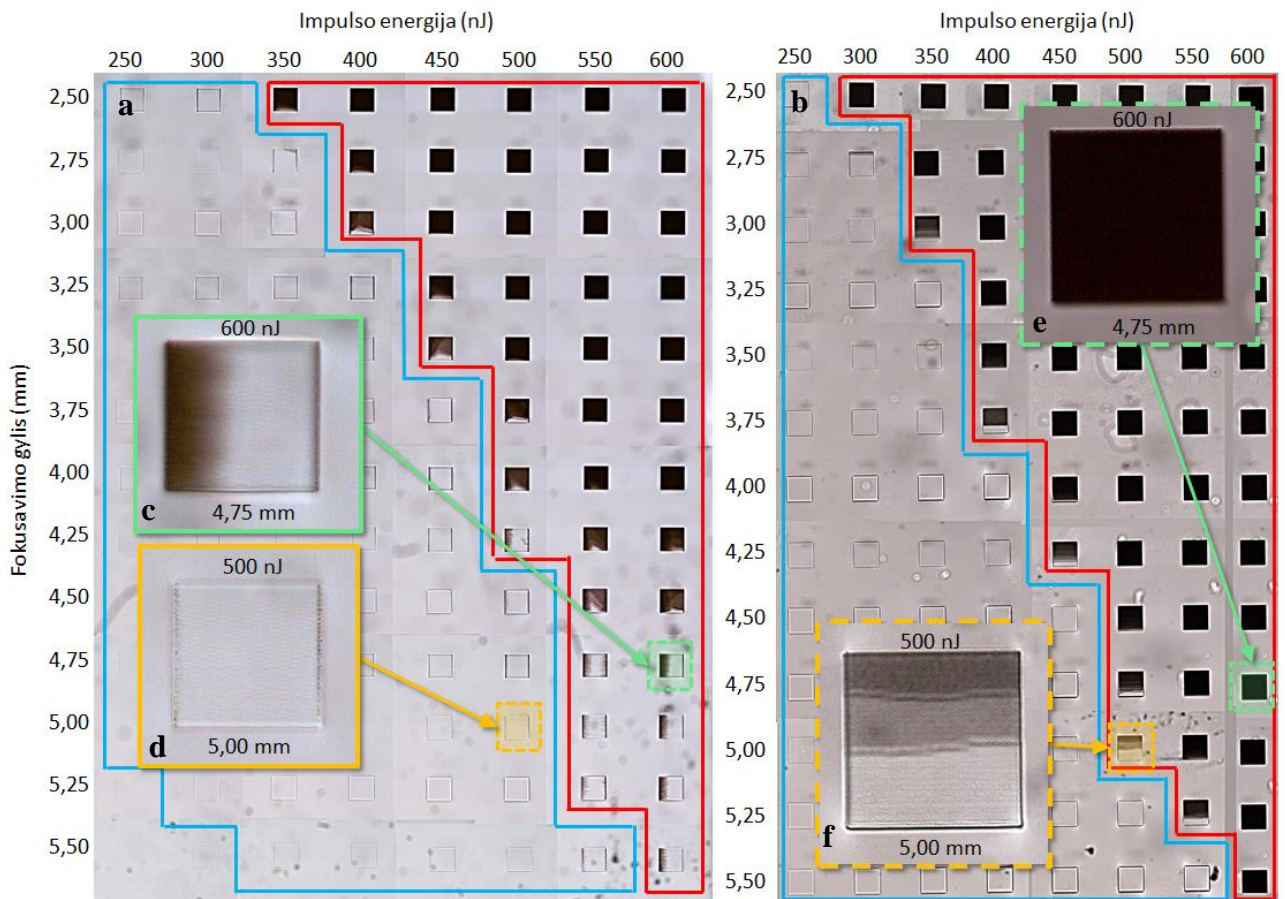
3.1 lentelė. Polinomo, skirto aproksimuoti modifikacijų ašinius ilgius, koeficientų vertės, kai skenavimo greitis 5 mm/s ir naudojama apskritiminė poliarizacija.

Koeficientas	Vertė
c0	-1.71E+01
c1	2.33E-01
c2	2.17E+00
c3	-1.11E-02
c4	-8.14E-05
c5	-7.64E-01
c6	-5.88E-08

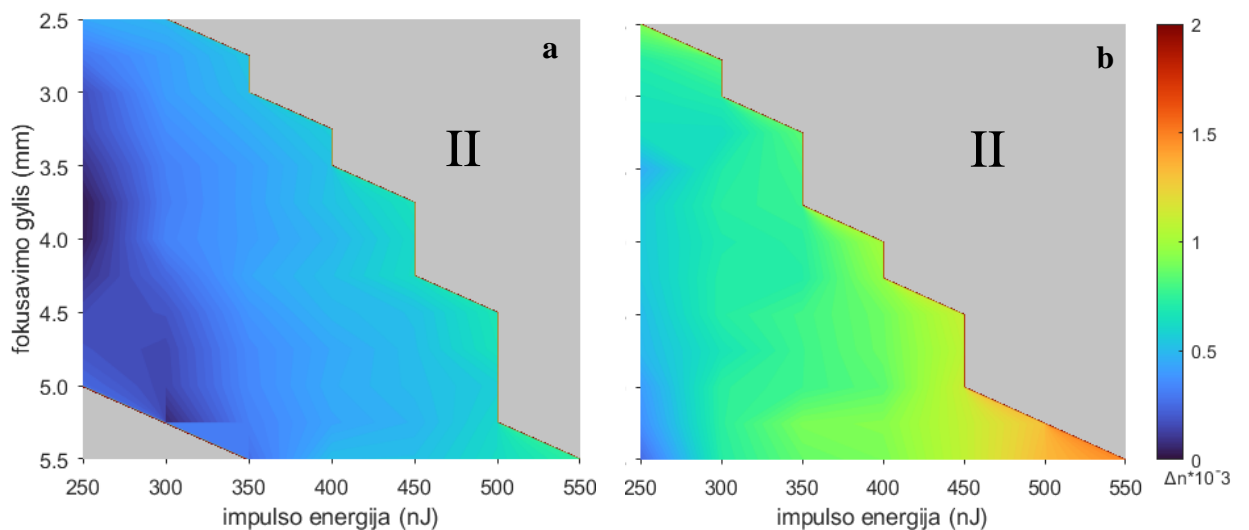


3.4 pav. Lūžio rodiklio pokyčio modifikacijų: a) ašiniai ilgiai; b) ašiniai ilgiai aproksimuoti 2D polinomu. L yra modifikacijos ašinis ilgis. Skenavimo greitis 5 mm/s, poliarizacija – apskritiminė.

Tyrinėjant I tipo modifikacijų lūžio rodiklio vertes buvo pastebėta, kad įrašant struktūras svarbu, kad jos būtų įrašomos su tokiu greičiu, koks yra nurodytas programoje. Kaip matyti iš pateiktų rezultatų 3.5 pav., struktūros, kurios buvo įrašomos be įsigreitėjimo turėjo platesnę struktūrą sudarytą iš lūžio rodiklio modifikacijų zoną. Taip galėjo nutikti dėl to, kad nepasiekiamas reikiamas 5 mm/s skenavimo greitis ir modifikacijos įsirašo mažesniu greičiu, kuris pagal 3.3 pav. atitinka platesnę lūžio rodiklio pokyčio modifikacijų zoną. 3.5 pav. c) nuotraukoje matyti, kad kairė struktūros dalis susidariusi iš nanogardelių, kai tuo tarpu naudojant įsigreitėjimą, ši struktūra gauta vien tik iš nanogardelių 3.5 pav. e). Taip pat svarbu paminėti, kad naudojant įsigreitėjimą išryškėja kita problema. Palyginus 3.5 pav. d) ir f) nuotraukas, matyti, kad naudojant įsigreitėjimą struktūros viršutinio sluoksnio apatinė dalis susidaro iš I tipo modifikacijų, o viršutinė iš II tipo. Kadangi įrašymas vyksta nuo apačios į viršų, daroma prielaida, kad su kiekviena nauja linija stiprėja įtempis, dėl kurio naujos linijos rašomos kitomis sąlygomis, kurių rezultatas nanogardelių atsiradimas.

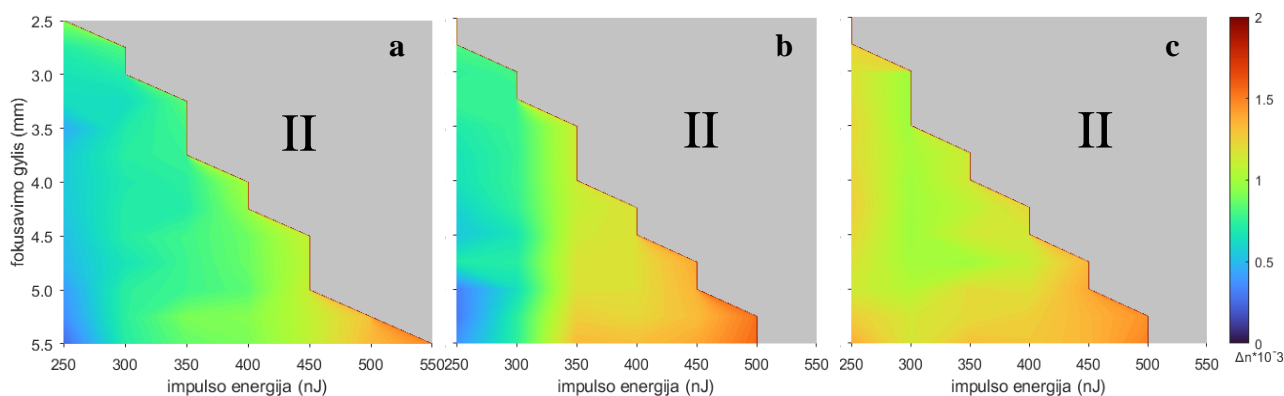


3.5 pav. Struktūrų sudarytų iš 8 modifikacijų sluoksnių su skirtingomis fokusavimo gylio bei impulso energijos vertėmis optinio mikroskopo nuotraukos, kai: a) nenaudojamas įsigreitėjimas; b) naudojamas įsigreitėjimas. Mėlynai apibrėžta zona žymi struktūras sudarytas iš I tipo modifikacijų, raudonai – dalinai arba pilnai iš II tipo. c) ir d) nuotraukose esančių struktūrų parametrai atitinka e) ir f) nuotraukose esančias struktūrų parametrus. Skenavimo kryptis lygiagreti x ašiai.



3.6 pav. Lūžio rodiklio pokyčio vertės prie skirtingų fokusavimo gylio bei impulso energijos verčių, kai vertikalus sluoksnių persiklojimas yra 0 %, o įrašant struktūras a) nenaudojamas įsigreitėjimas; b) naudojamas įsigreitėjimas. Viršuje parodyta II tipo modifikacijų zona, kurioje struktūros sudarytos dalinai arba pilnai iš nanogardelių.

Lyginant 3.6 pav. pateiktus grafikus matyti, kad didesnės lūžio rodiklio pokyčio vertės gaunamos tada, kai taikomas įsigeitėjimas. Taip pat galima pastebėti, kad struktūros sudarytos iš nanogardelių gaunamos ir tada, kai tyrinėjant 3.3 pav. d) grafiką, ten jos nepastebimos. Manoma, kad viena iš priežasčių yra susiformavę įtempiai tarp sluoksnių, o kita, kad per 8 struktūros sluoksnius fokusavimo gylis pasikeičia, tačiau impulso energija išlieka ta pati.



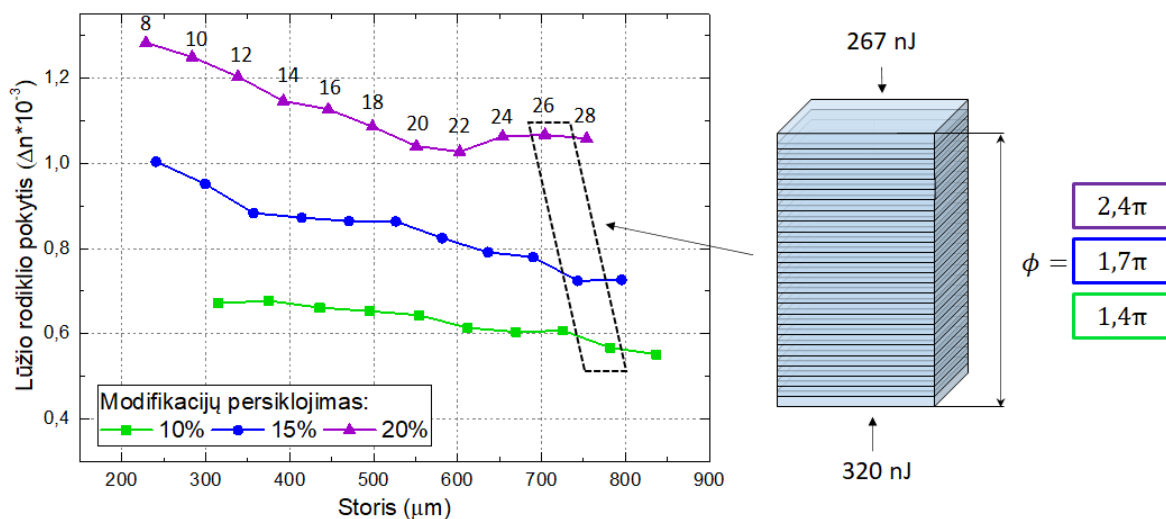
3.7 pav. Lūžio rodiklio pokyčio vertės prie skirtingų fokusavimo gylio bei impulso energijos verčių taikant įsigeitėjimą, kai vertikalūs sluoksnių persiklojimas yra: a) 0 %; b) 5 %; c) 10 %.

Panaudojus skirtingą vertikalų persiklojimą tarp modifikacijų sluoksnių pastebėta, kad didesnės lūžio rodiklio pokyčio vertės gaunamos prie didesnio persiklojimo (3.7 pav.). Taip pat šios vertės yra tolygesnės. Spėjama, kad tai gali būti susiję su tuo, jog nesant arba esant per mažam persiklojimui tarp dviejų atskirų sluoksnių, spindulys praeidamas vieną sluoksnį pradeda difraguoti ir patekdamas į kitą sluoksnį efektyviai nebesurenkamas. Siekiant gauti pastovią lūžio rodiklio pokyčio vertę kiti eksperimentai atliekami remiantis 10 % vertikalalaus persiklojimo rezultatais. Iš šio grafiko gaunama tiesinė priklausomybė, pagal kurią kiekvienas sluoksnis į viršų yra įrašomas su vis mažesne energija taip siekiant suvienodinti lūžio rodiklio pokytį visai struktūrai.

3.4 Pastovaus lūžio rodiklio vertė

Apytiksliai apskaičiavus tiesės parametrus buvo įrašyti stačiakampiai gretasieniai su skirtingais storiais siekiant įsitinkinti, ar keičiantis storiui, vidutinė lūžio rodiklio vertė per visą struktūros storį išlieka ta pati. Impulso energija buvo mažinama tiesiškai pagal apskaičiuotus tiesės koeficientus, taip pat buvo koreguojama sluoksnių pozicija, kadangi anksčiau gautame 2D polinomo išraiškoje keičiantis energijai, keičiasi modifikacijos ašinis ilgis. Rezultatai buvo gauti panaudojant kelias skirtingas vertikalalaus sluoksnių persiklojimo vertes, taip siekiant gauti dar didesnę lūžio rodiklio pokyčio vertę. Taip pat buvo išskirta kaip keičiasi fazės pokytis prie 26 sluoksnių su skirtingais persiklojimais. Iš pateikto grafiko 3.8 pav. matyti, kad dėl didesnio vertikalalaus sluoksnių persiklojimo

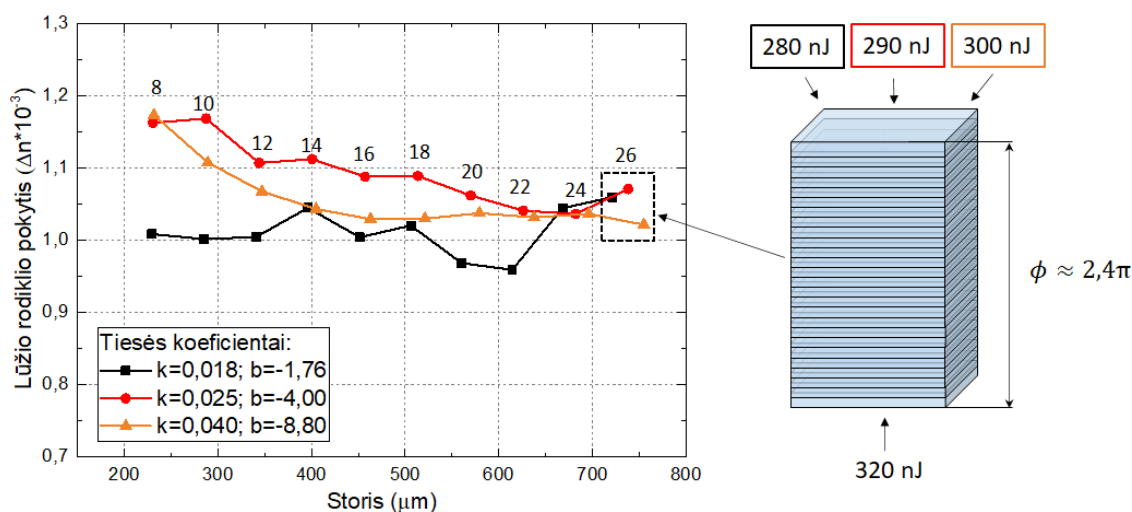
gaunamas didesnis lūžio rodiklio pokytis, o impulso energija mažinama per dideliu žingsniu, dėl ko lūžio rodiklio pokytis mažėja didėjant struktūros storiui.



3.8 pav. Lūžio rodiklio pokyčio priklausomybė nuo struktūros storio prie skirtingo vertikalaus sluoksnių persiklojimo verčių. Storis kontroliuojamas keičiant sluoksnių skaičių, kuris pažymėtas viršutinėje kreivėje. Tiesės koeficientai:

$$k = 0.0135; b = -0.33.$$

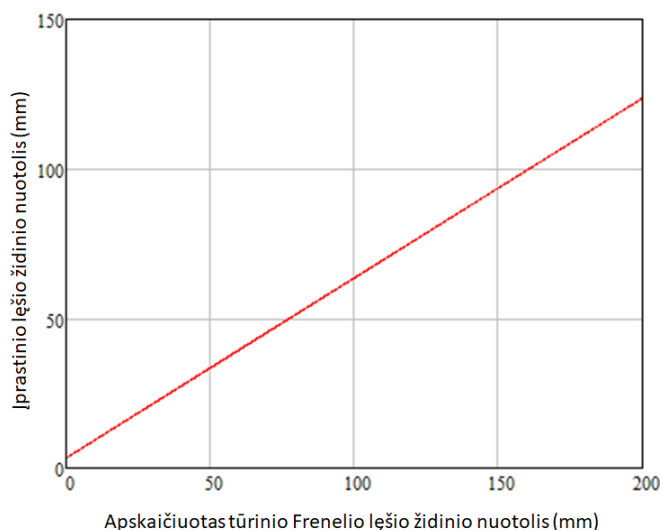
Nauji eksperimentai su skirtingais tiesės koeficientais ir 20 % persiklojimu parodė, jog pastoviausia lūžio rodiklio pokyčio vertė gaunama tada, kai tiesės koeficientai yra $k = 0.04$; $b = -8,8$ (3.9 pav.). Vadinasi įrašant 26 sluoksnius pradinis sluoksnis rašomas su 320 nJ impulso energija, o paskutinis su 300 nJ. Remiantis šiais rezultatais buvo paskaičiuota, kad norint gauti 2π fazės vėlinimą, kuris reikalingas diskretinių elementų gamybai, reikia įrašyti 21 I tipo modifikacijų sluoksnį.



3.9 pav. Lūžio rodiklio pokyčio priklausomybė nuo struktūros storio prie skirtingų tiesės koeficientų, kai modifikacijų sluoksnių persiklojimas yra 20 %. Storis kontroliuojamas keičiant sluoksnių skaičių, kuris pažymėtas viršutinėje kreivėje.

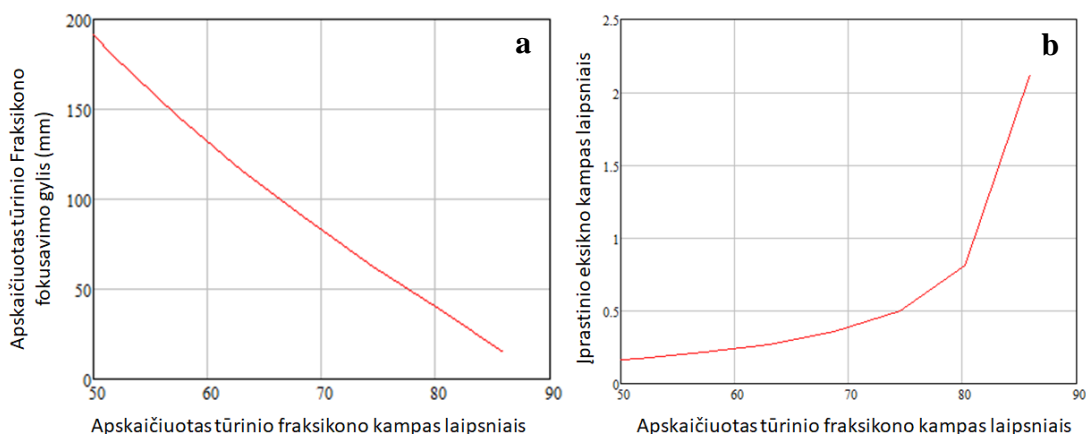
3.5 Frenelio lęšio ir eksikono technologinės galimybės

Įsivertinus vidutinę lūžio rodiklio vertę ir storį, reikalingą pasiekti fazės vėlinimą per 2π , bei charakterizavimo stende naudojamo pluoštelio diametrą, buvo atlikti skaičiavimai leidžiantys nusakyti difrakcinių elementų – Frenelio lęšio ir Frenelio eksikono – technologines galimybes naudojant tūrinį lazerinį įrašymą.



3.10 pav. Įprastinio lęšio židinio nuotolio priklausomybė nuo tūrinio Frenelio lęšio židinio nuotolio.

Pagrindinis Frenelio lęšį apibūdinantis parametras yra lęšio židinio nuotolis, todėl 3.10 pav. pateiktame grafike matoma įprastinio lęšio židinio nuotolio priklausomybė nuo tūrinio Frenelio lęšio židinio nuotolio. Nesunku pastebėti, kad apskaičiuotas tūrinio Frenelio lęšio židinio nuotolis mažesnis apie 15 % už įprastinio lęšio židinio nuotolį. Remiantis šiais rezultatai lydyto kvarco tūryje galima įrašyti ir labai mažo, kelių milimetrų, ir pakankamai didelio, kelių šimtų milimetrų, židinio nuotolio lęšį.

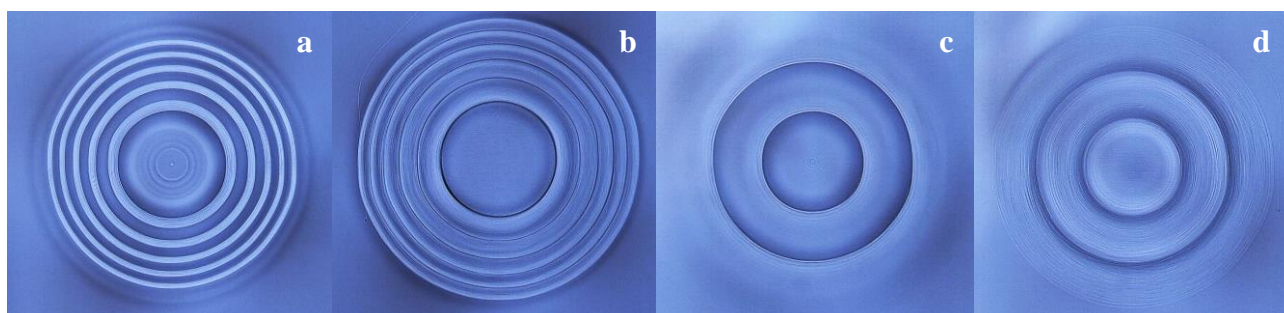


3.11 pav. a) Tūrinio fraksikono fokusavimo gylio priklausomybė nuo pagrindo kampo; b) įprastinio eksikono pagrindo kampo priklausomybė nuo tūrinio fraksikono pagrindo kampo.

Pagrindinis fraksikoną apibūdinantis parametras yra eksikono pagrindo kampas, todėl buvo sugeneruotos dvi priklausomybės, kurios parodo kaip nuo šio kampo keičiasi tūrinio fraksikono fokusavimo gylis (3.11 pav. a)) bei kokį įprastinio eksikono kampą jis atitinka (3.11 pav. b)). Iš pateiktos priklausomybės 3.11 pav. a) galima pastebėti, kad mažėjant tūrinio fraksikono pagrindo kampui staigiai didėja jo fokusavimo gylis, todėl įrašius tokio kampo fraksikoną, būtų sunku išmatuoti pluošto sklaidimą erdvėje dėl didelių atstumų. Kita vertus 3.11 pav. b) matoma, kad maksimalus tūrinio fraksikono kampas atitinka apie $2,1^\circ$ įprastinio eksikono kampą. Tokia maksimali vertė gaunama dėl mažo lūžio rodiklio pokyčio vertės bei geometrinių apribojimų.

3.6 Frenelio faziniai difrakciniai elementai ir jų efektyvumas

Lydyto kvarco tūryje buvo įrašyti du faziniai difrakciniai optiniai elementai: Frenelio lęšis ir Frenelio eksikonas. Šių elementų optinio mikroskopo nuotraukos pavaizduotos 3.12 pav. Siekiant įvertinti ar šie elementai buvo pagaminti pagal tokius pačius matmenis, pagal, kuriuos buvo sumodeliuoti DMC programoje, buvo išmatuoti centrinės dalies ir žiedų diametrai ir palyginti su sumodeliuotais. Rezultatai pateikti 3.2 lentelėje.

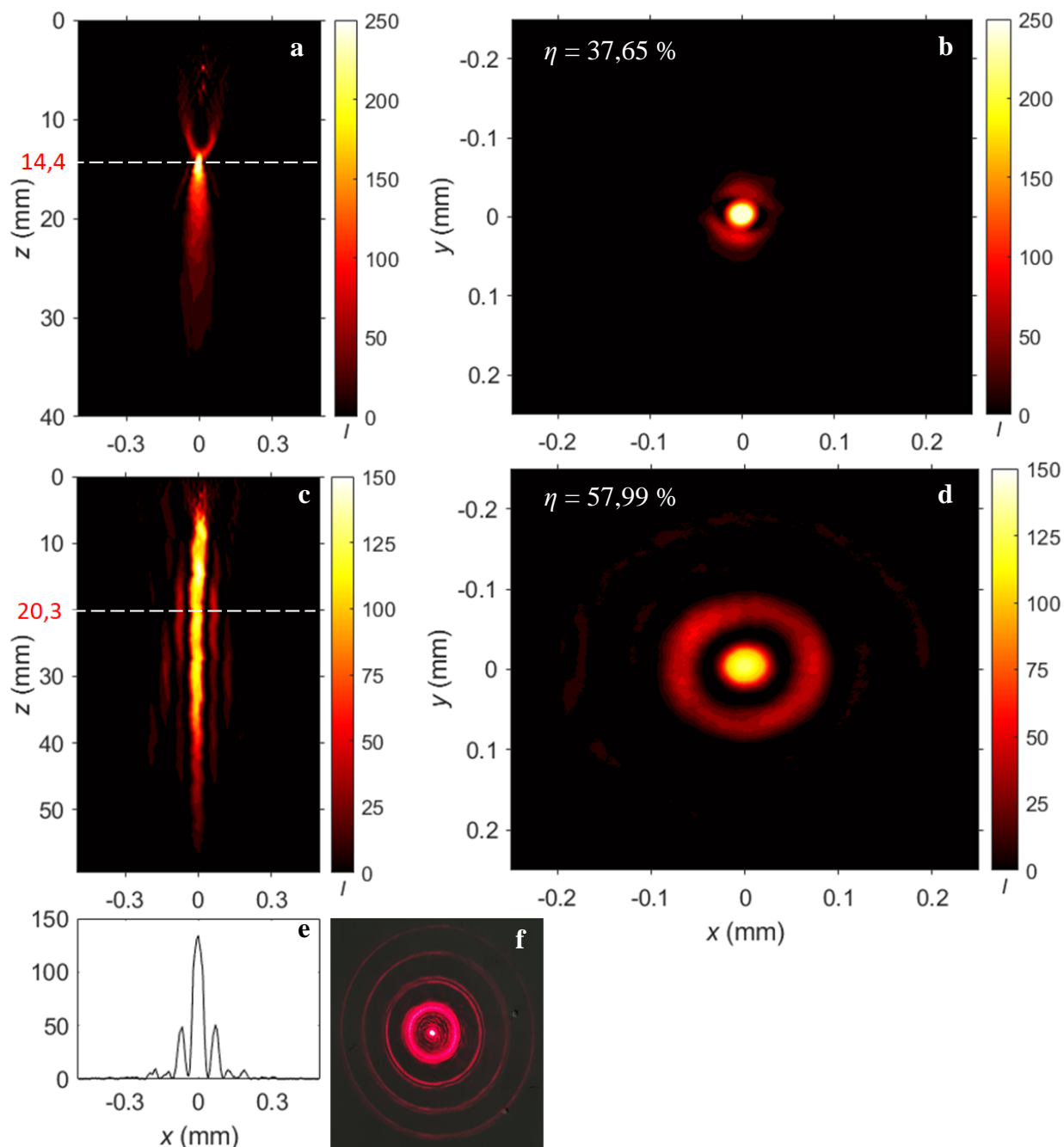


3.12 pav. Frenelio lęšis nuotrauka iš: a) viršaus; b) apačios. Frenelio eksikono nuotrauka iš: c) viršaus; d) apačios. Žiedų trajektorijose pastebimi nukrypimai nuo geometrijos.

3.2 lentelė. Frenelio elementų įrašytų ir sumodeliuotų DMC programoje žiedų diametrų palyginimai.

Žiedas	Frenelio lęšio			Frenelio eksikono		
	Sumodeliuoto (μm)	Įrašyto (μm)	Skirtumas	Sumodeliuoto (μm)	Įrašyto (μm)	Skirtumas
0 (centras)	262,1	259,7	2,4	196,0	197,6	-1,6
1	370,9	370,6	0,3	396,5	397,7	-1,2
2	454,6	458,8	-4,2	603,0	607,2	-4,2
3	525,4	527,7	-2,3	-	-	-
4	588,0	589,1	-1,1	-	-	-
5	645,0	650,1	-5,1	-	-	-

Frenelio elementų pluoštų pasiskirstymai už elemento pavaizduoti 3.13 pav. Iš šių pasiskirstymų galima pastebėti, kad elementai atlieka savo funkciją: lęšis fokusuoja, eksikonas Gauso pluoštą keičia Beselio pluoštu. Pagrindiniai tūrinių Frenelio elementų parametrai buvo palyginti su analogiškais įprastinių elementų parametrais. Rezultatai kartu su difrakcijos efektyvumais pateikti 3.3 lentelėje.



3.13 pav. Pluošto pasiskirstymas erdvėje už: a) Frenelio lęšio; c) Frenelio eksikono, kai nuotraukos pradedamos registruoti nuo elemento apačios. b) Frenelio lęšio intensyvumo skirstinys fokuso taške (14,4 mm); Frenelio eksikono d) intensyvumo skirstinys Beselio zonos viduryje (20,3 mm); f) tolimojo lauko vaizdo nuotrauka ant ekrano. Visų grafikų intensyvumai matuojami intensyvumo vienetais.

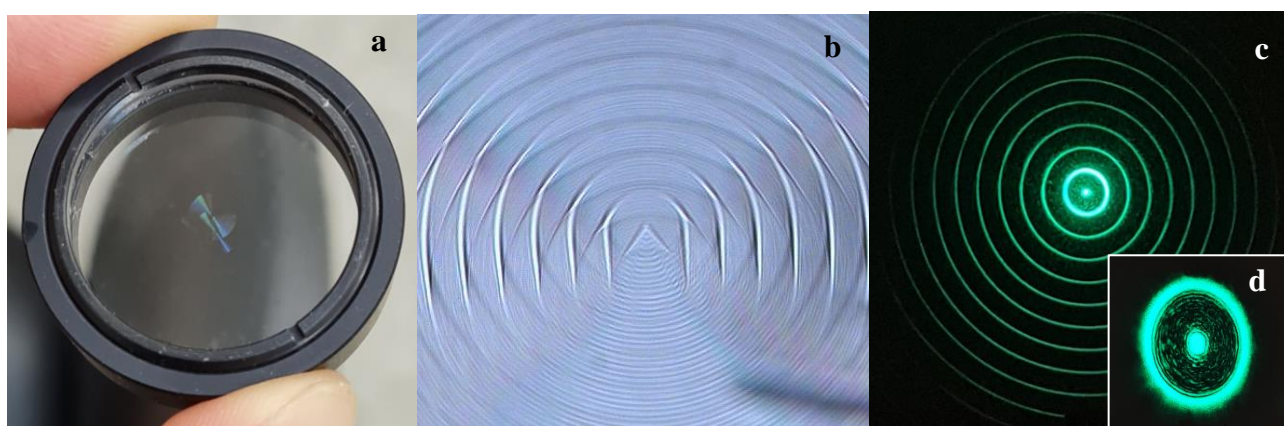
3.3 lentelė. Kvarcinių elementų ir įrašytų Frenelio elementų pagrindinių parametrų palyginimas bei difrakcijos efektyvumas.

Parametras	Įprastinio lęšio	Įrašyto Frenelio lęšio	Įprastinio eksikono	Įrašyto fraksikono
Difrakcijos efektyvumas (%)	100,00	37,65	100,00	57,99
Pagrindo kampas (°)	-	-	1,0	0,8
Židinio nuotolis (mm)	20,0	14,4	-	-

Iš pateiktų duomenų 3.3 lentelėje, matyti, kad Frenelio lęšio difrakcijos efektyvumas gautas pakankamai mažas, o židinio nuotolis smarkiai skiriasi nuo įprastinio lęšio, pagal kurį buvo įrašomas. Daroma prielaida, kad difrakcijos efektyvumui ir židinio nuotoliui įtakos galėjo turėti blogai paskaičiuoti žiedų diametrai. Tačiau Frenelio eksikono atveju įrašyto fraksikono pagrindo kampas panašus į įprastinio eksikono, o išmatuotas difrakcijos efektyvumas didesnis nei Frenelio lęšio.

3.7 Frenelio eksikono testavimas lazerinėje sistemoje

Remiantis įrašytų difrakcinių elementų efektyvumo rezultatais, lydyto kvarco tūryje buvo įrašytas tokio paties kampo, tačiau 4 mm apertūros fraksikonas skirtas 515 nm bangos ilgiui, kuris buvo testuojamas femtosekundinėje sistemoje. Elementas buvo įtvirtintas į laikiklį kaip pavaizduota 3.14 pav. a). Optinio mikroskopo nuotraukoje 3.14 pav. b) aiškiai matosi centrinis kūgis ir periferiniai žiedai. Išmatuotas difrakcijos efektyvumas siekė 55,86 %. Šis efektyvumas labai panašus į fraksikono skirto 633 nm bangos ilgiui. Kadangi šie elementai turi skirtingus storius, vadinasi elementų sluoksniai yra formuojami iš pastovaus lūžio rodiklio pokyčio modifikacijų sluoksnių. Tai suteikia galimybę gaminti elementus skirtingiems bangos ilgiams.



3.14 pav. 4 mm diametro fraksikono įrašyto apvaliame lydyto kvarco bandinyje ir įtvirtinto laikiklyje su sriegiu a) nuotrauka iš toli; b) optinio mikroskopo nuotrauka iš arti. c) 515 nm bangos ilgio lazeriu testuojamo fraksikono tolimojo lauko nuotrauka. d) nuotrauka gauta su apertūra uždengus periferinius žiedus. Ryškiaame žiede surenkama 55,86 % lazerio spinduliuotės.

Pagrindiniai rezultatai ir išvados

1. Naudojant apskritiminę poliarizaciją didesnis modifikacijos ašinis ilgis gaunamas naudojant didesnę impulso energiją, tačiau gaunama šiek tiek siauresnė I tipo modifikacijų susidarymo zona.
2. Esant tinkamam modifikacijų sluoksnių persiklojimui užtikrinama, kad spindulys pereidamas į kitą sluoksnį nepradeda difraguoti ir efektyviai surenkamas tame sluoksnyje taip padidinant lūžio rodiklio vertę.
3. Įrašant fazines kaukes impulso energija su kiekvienu nauju sluoksniu į viršų gali būti mažinama taip, kad lūžio rodiklio pokytis būtų pastovus visai struktūrai nepriklausomai nuo jos storio.
4. Apskaičiuotas tūrinio Frenelio lęšio židinio nuotolis gaunamas 15 % mažesnis už įprastinio lęšio, o tūrinio fraksikono pagrindo kampas gali siekti tik iki $2,1^\circ$ įprastinį eksikoną atitinkančio pagrindo kampo.
5. Išmatuotas Frenelio lęšio židinio nuotolis skyrėsi nuo apskaičiuoto dėl netinkamo žiedų diametru apskaičiavimo, o fraksikono pagrindo kampas buvo panašus į apskaičiuotą.
6. Dviejų skirtingo storio fraksikonų pritaikytų 633 nm arba 515 nm bangos ilgio spinduliuotėms difrakcijos efektyvumai buvo labai panašūs.

Literatūros sąrašas

- [1] D. C. O'Shea, T. J. Suleski, A. D. Kath, D. W. Prather, *Diffraction Optics: Design, Fabrication, and Test* (SPIE Press, Washington, 2004).
- [2] X. Li, Z. Shao, M. Zhu, J. Yang, *Fundamentals of Optical Computing Technology: Micro- and Diffractive Optical Elements* (National Defense Industry Press and Springer Nature Singapore Pte Ltd., Changsha, 2018) pp. 113-149.
- [3] K. Awasrhi, D. S. Reddy, M. K. Khan, Design of Fresnel lens with spherical facets for concentrated solar power applications, *International Journal of Energy Research*, **44**(1), 1-13 (2019).
- [4] P. Srisungsitthisunti, O. K. Ersoy, X. Xu, Volume Fresnel zone plates fabricated by femtosecond laser direct writing, *Applied Physics Letters*, **90**, 011104-(1-3) (2007).
- [5] Q. K. Li, Y. M. Lu, J. G. Hua, Y. H. Yu, L. Wang Q. D. Chen, S. Juodkazis, H. B. Sun, Multilevel phase-type diffractive lens embedded in sapphire, *Optics Letters*, **42**(19), 3832-3835 (2017).
- [6] P. Srisungsitthisunti, O. K. Ersoy, X. Xu¹, Optimization of modified volume, *Optical Society of America*, **26**(10), 2114-2120 (2009).
- [7] F. J. Salgado-Remacha, L. M. Sanchez-Brea, E. Bernabeu, Micromachining of Diffractive Optical Elements Embedded in Bulk Fused Silica by Nanosecond Pulses, *Journal of Lightwave Technology*, **29**(6), 850-855 (2011).
- [8] K. Gourley, I. Golub, B. Chebbi, First experimental demonstration of a Fresnel axicon, *Proceedings SPIE*, **7099**, 70990D(1-7) (2008).
- [9] I. Golub, Fresnel axicon, *Optics Letters*, **31**(12), 1890-1892 (2006).
- [10] Z. Zhai, Z. Cheng, Q. Lv, X. Wang, Tunable Axicons Generated by Spatial Light Modulator with High-Level Phase Computer-Generated Holograms, *Applied Sciences*, **10**(15), 1-11 (2020).
- [11] John E. Hergert, David J. Glugla, Amy C. Sullivan, Marvin D. Alim, and Robert R. McLeod, "High efficiency Fresnel lens design and fabrication in a two-stage photopolymer, *Optics Letters*, **44**(7), 1540-1543 (2019)
- [12] C. B Schaffer, A. Brodeur, E. Mazur, Laser-induced breakdown and damage in bulk transparent materials induced by tightly focused femtosecond laser pulses, *Measurement Science and Technology*, **12**(11), 1784-1794 (2001).
- [13] A. S. Epifanov, A. A. Manenkov, A. M. Prokhorov, Theory of avalanche ionization induced in transparent dielectrics by an electromagnetic field, *Soviet Physics*, **43**(2), 377-382 (1976).
- [14] R. W. Boyd, *Nonlinear Optics*, 3rd edition (Rochester, New York, 2007).

- [15] B. C. Stuart, M. D. Feit, A. M. Rubenchik, B.W. Shore, M. D. Perry, Laser-Induced Damage in Dielectrics with Nanosecond to Subpicosecond Pulses, *Physics Review Letters*, **74**(12), 2248-2251 (1995).
- [16] J. M. Liu, Simple technique for measurements of pulsed Gaussian-beam spot sizes, *Optics Letters*, **7**(5), 196-198 (1982).
- [17] C. B. Schaffer, A. Brodeur, J. F. García, E. Mazur, Micromachining bulk glass by use of femtosecond laser pulses with nanojoule energy, *Optics Letters*, **26**(2), 93-95 (2000).
- [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 Physics*, **19**(6), 1294–1299 (2009).
- [19] J. W. Chan, T. Huser, S. Risbud, D. M. Krol, Structural changes in fused silica after exposure to focused femtosecond laser pulses, *Optics Letters*, **26**(21), 1726-1728 (2001).
- [20] K. Miura, J. Qiu, H. Inouye, T. Mitsuyu, K. Hirao, Photowritten optical waveguides in various glasses with ultrashort pulse laser, *Applied Physics Letters*, **71**, 3329–3331 (1997).
- [21] M. Mikutis, T. Kudrius, G. Šlekys, D. Paipulas, S. Juodkazis, S. High 90% efficiency Bragg gratings formed in fused silica by femtosecond Gauss-Bessel laser beams, *Optical Materials Express*, **3**(11), 1862-1871 (2013).
- [22] Y. Shimotsuma, P. G. Kazansky, J. Qiu, K. Hirao, Self-organized nanogratings in glass irradiated by ultrashort light pulses, *Physical Review Letters* **91**(24), (2003).
- [23] E. N. Glezer, M. Milosavljevic, L. Huang, R. J. Finlay, T.-H. Her, J. P. Callan, E. Mazur, Three-dimensional optical storage inside transparent materials, *Optics Letters*, **21**(24), 2023 -2025 (1996).
- [24] S. M. Eaton, M. L. Ng, R. Osellame, and P. R. Herman, High refractive index contrast in fused silica waveguides by tightly focused, high-repetition rate femtosecond laser, *Journal of Non-Crystalline Solids*, **357**(1113), 2387–2391 (2011).
- [25] A. Pasquarello, R. Car, Identification of Raman Defect Lines as Signatures of Ring Structures in Vitreous Silica, *Physics Review Letters*, **80**(23), 5145–5147 (1998).
- [26] M. Sakakura, M. Terazima, Initial temporal and spatial changes of the refractive index induced by focused femtosecond pulsed laser irradiation inside a glass, *Physics Review B*, **71**(2), 024113(1–12) (2005).
- [27] H. Sun, S. Juodkazis, M. Watanabe, S. Matsuo, H. Misawa, J. Nishii, Generation and Recombination of Defects in Vitreous Silica Induced by Irradiation with a Near-Infrared Femtosecond Laser, *The Journal of Physical Chemistry*, **104**(15), 3450–3455 (2000).
- [28] A. M. Streltsov, N. F. Borrelli, Study of femtosecond-laser-written waveguides in glasses, *Journal of the Optics Society of America B*, **19**(10), 2496–2504 (2002).

- [29] A. Couairon, A. Mysyrowicz, *Self-focusing: Past and Present: Self-focusing and Filamentation of Femtosecond Pulses in Air and Condensed Matter: Simulations and Experiments* (Springer, New York, 2009) pp. 297-322.
- [30] Z. Wu, H. Jiang, L. Luo, H. Guo, H. Yang, Q. Gong, The refocusing behaviour of a focused femtosecond laser pulse in fused silica, *Pure and Applied Optics*, **5**(11), 102-107 (2003).
- [31] S. H. Wiersma, T. D. Visser, P. Török, Annular focusing through a dielectric interface: scanning and confining intensity, *Pure Applied Optics*, **7**(6), 137-1248 (1998).
- [32] Q. Sun, H. Jiang, Y. Liu, Y. Zhou, H. Yang, Q. Gong, Effect of spherical aberration on the propagation of a tightly focused femtosecond laser pulse inside fused silica, *Pure and Applied Optics*, **7**(11), 655–659 (2005).
- [33] A. Marcinkevicius, V. Mizeikis, S. Juodkazis, S. Matsuo, H. Misawa, Effect of refractive index-mismatch on laser microfabrication in silica glass, *Applied Physics A*, **76**(22), 257–60 (2003).
- [34] C. Hnatovsky, R. S. Taylor, E. Simova, V. R. Bhardwaj, D. M. Rayner, P. B. Corkum, High-resolution study of photoinduced modification in fused silica produced by a tightly focused femtosecond laser beam in the presence of aberrations, *Applied Physics*, **98**(1), 013517 (1-5) (2005).
- [35] D. Liu, Y. Li, R. An, Y. Dou, H. Yang, Q. Gong, Influence of focusing depth on the microfabrication of waveguides inside silica glass by femtosecond laser direct writing, *Applied Physics A: Materials Science and Processing*, **84**(3), 257–260 (2006).
- [36] A. Laskin, V. Laskin, A. Ostrun, Aberration-free high NA focusing in transparent media, *Proceedings of LMP2017*, 1-6 (2017).
- [37] H. Itoh, N. Matsumoto, T. Inoue, Spherical aberration correction suitable for wavefront controller, *Optics Express*, **17**(16), 14367-14373 (2009).
- [38] Q. Sun, T. Lee, Z. Ding, M. Beresna, and G. Brambilla, *Diffraction Fresnel Lens Fabrication with Femtosecond Bessel Beam Writing in Silica*, Optical Society of America (2018).
- [39] A. Žukauskas, I. Maltulaitienė, D. Paipulas, M. Malinauskas, R. Gadonas, Tuning the refractive index in 3D direct laser writing lithography: towards GRIN microoptics, *Laser Photonics*, **9**(6), 706-712 (2015).

Konferencijos ir publikacijos

Šio darbo autorius yra dalyvavęs 2 studentų mokslinėse konferencijose ir yra 1 publikacijos ir 3 pranešimų tarptautinėse konferencijose bendraautorius.

Konferencijos:

1. V. Stankevič, M. Gedvilas, J. Karosas, G. Račiukaitis, Recording of diffraction elements in fused silica by the deep focused femtosecond pulses, ICPEPA 11 2018, Vilnius, Lietuva (stendinis pranešimas).
2. J. Karosas, V. Stankevič, Lūžio rodiklio modifikacijų formavimas giliai lydyto kvarco tūryje ir jų charakterizavimas, FizTech, 2018, Vilnius, Lietuva (stendinis pranešimas).
3. V. Stankevič, J. Karosas, M. Gedvilas, G. Račiukaitis, Recording of complex phase DOE in fused silica by slicing simulated phase distribution to the binary images, Photonics West LASE 2019, San Francisco, California, United States (žodinis pranešimas).

Konferencijos nesusijusios su darbo tema:

1. J. Karosas, V. Stankevič, Formation of microlenses on fused silica surface by femtosecond laser pulses, OpenReadings 2019, Vilnius, Lietuva (stendinis pranešimas).
2. V. Stankevič, J. Karosas, G. Račiukaitis, Selective etching of Sapphire and Fused silica by double pulse femtosecond laser radiation, LiM, 2019, Munich, Germany (žodinis pranešimas).

Publikacijos nesusijusios su darbo tema

1. V. Stankevič, J. Karosas, G. Račiukaitis, P. Gečys, Improvement of Etching Anisotropy in Fused Silica by Double-Pulse Fabrication, Micromachines **11**(5), 1-12 (2020).

Santrauka

LŪŽIO RODIKLIO POKYČIO OPTIMIZAVIMAS ĮRAŠANT I TIPO MODIFIKACIJAS LYDYTO KVARCO TŪRYJE FAZINIŲ KAUKIŲ FORMAVIMUI SU FEMTOSEKUNDINIU LAZERIU

Jonas Karosas

Difrakciniai optiniai elementai dažniausiai gaminami fotolitografijos ar kitais paviršiaus apdirbimo metodais. Vis didesnio susidomėjimo sulaukia nauja tiesioginio tūrinio lazerinio rašymo technologija, leidžianti įrašyti fazinius difrakcinius optinius elementus arba fazines kaukes į skaidrios terpės tūrį. Ši technologija paremta lūžio rodiklio pokyčio modifikacijų formavimu lydyto kvarco tūryje. Modifikacijos yra išsitempusios spindulio sklidimo kryptimi dėl sferinių aberacijų atsirandančių dėl lūžio rodiklių nesuderinamumo tarp dviejų skirtingų terpių. Kadangi šios modifikacijos yra apibūdinamos savo ašiniu ilgiu, įrašant elementus iš kelių sluoksnių jas galima išdėstyti taip, kad jos turėtų vienodą persiklojimą. Tokiu būdu užtikrinamas elemento tolygumas, tačiau, kad elemento įrašymas būtų dar tolygesnis, būtina suvienodinti lūžio rodiklį visam elemento storiui, o tai padaroma matuojant lūžio rodiklio pokytį prie skirtingų parametrų ir pritaikant juos elementų įrašymui. Šio darbo tikslas pasinaudojant femtosekundine lazerio spinduliuote lydytame kvarce įrašyti lūžio rodiklio modifikacijas, iširti prie kokių parametrų gaunamas didžiausias pastovus lūžio rodiklio pokytis, o optimizuotus parametrus panaudoti fazinių kaukių įrašymui.

Modifikacijų pobūdžiui bei ašiniam ilgiui nustatyti buvo panaudoti skirtingi parametrai: impulso energija, skenavimo greitis, spinduliuotės fokusavimo gylis ir poliarizacija. Toliau buvo tiriama šių modifikacijų lūžio rodiklio moduliacija. Tam tikslui iš I tipo modifikacijų buvo įrašomi skirtingo vertikalios sluoksnių persiklojimo stačiakampiai gretasieniai, o matavimams panaudotas Maikelsono interferometras. Gauti rezultatai buvo panaudoti išvedant tiesinę energijos mažinimo priklausomybę su tikslu suvienodinti lūžio rodiklį per visą elemento storį.

Ištyrus sąlygas, kada gaunamas pastovus lūžio rodiklio pokytis, buvo paskaičiuota, prie kokio storio gaunamas reikiamas 2π fazės vėlinimas. Lydyto kvarco tūryje buvo atlikti skaičiavimai siekiant išsiaiškinti tūrinių elementų: Frenelio lęšio ir fraksikono, įrašymo technologines galimybes. Frenelio lęšio židinio buvo 15 % mažesnis, tačiau maksimalus fraksikono kampas tik $2,1^\circ$. Pritaikius gautus rezultatus, lydyto kvarco tūryje buvo įrašyti du difrakciniai elementai. Išmatuotas Frenelio lęšio židinio nuotolis skyrėsi nuo užduoto programoje, o difrakcijos efektyvumas siekė tik apie 38 % dėl blogai apskaičiuotų žiedų diametrų. Tūrinio fraksikono pagrindo kampas buvo panašus į užduotą programoje, o difrakcijos efektyvumas – 58 %.

Santrauka angų kalba (Summary)

OPTIMISATION OF THE REFRACTIVE INDEX CHANGE BY RECORDING TYPE I MODIFICATIONS IN FUSED SILICA VOLUME BY FEMTOSECOND LASER FOR PHASE MASKS

Jonas Karosas

Diffraction optical elements are typically made by photolithography or other surface structuring techniques. However, volume direct laser writing technology attracts more interest, which allows to record phase diffraction optical elements or phase masks inside the volume of a transparent material. This technology is based on recording refractive index change modifications. Modifications are stretched along the beam propagation direction because of mismatch between refractive indices of two different materials. Because these modifications are described by their axial length, recorded element layers can be positioned in such way that the layers overlay by the same distance. This guarantees that the element will be homogeneous, but in order to make the element more homogeneous it is necessary to optimize the refractive index through the whole element. This is done by measuring the refractive index change with different parameters and using these results to record elements. The aim of this work was to record refractive index change modifications inside fused silica with femtosecond laser, to find suitable parameters to obtain the highest homogeneous refractive index change and use these optimized parameters for recording phase masks.

For modification axial length measurement different parameters were used: pulse energy, scanning speed, radiation focus position and polarization. Afterwards, modulation of refractive index was measured. For this reason, rectangular parallelepiped structures made from I type modifications with different overlay values were recorded. For the measurements Michelson interferometer was used. Results were used for writing a linear pulse energy reduction formula to optimize refractive index through the whole thickness of the element.

When the homogeneous refractive index was obtained, calculations were done to find phase shift of 2π . Calculations for volume Fresnel lens and fraxicon were made to figure out the technological capabilities of this recording technology. Volume Fresnel lens focus position is 15 % smaller compared to the focus position written in program recipe and the highest base angle of the volume fraxicon can be only $2,1^\circ$. Results were used to record these two elements inside the fused silica sample. Measured volume Fresnel lens position differed from the written in program recipe and diffraction efficiency reached only 38 %, while fraxicon base angle was like the written in the program and diffraction efficiency reached 58 %.