

Vilniaus universitetas  
Fizikos fakultetas  
Kvantinės elektronikos katedra

Birutė Dargytė

AIRY PLUOŠTŲ GENERAVIMAS IR ASIMETRINIŲ PAŽAIDŲ FORMAVIMAS  
SKAIDRIOSE TERPĖSE

Magistrantūros studijų baigiamasis darbas  
LAZERINĖ TECHNOLOGIJA

Studentė

Birutė Dargytė

Darbo vadovas

dr. Titas Gertus

Recenzentas

dr. Sergejus Orlovas

Katedros vedėjas

prof. habil. dr. Valdas Sirutkaitis

Vilnius 2017

## Turinys

Įvadas.....	3
1 Literatūros apžvalga .....	4
1.1 Airy pluoštas ir jo fizikinės savybės.....	4
1.2 Erdvinis šviesos modulatorius (SLM).....	7
1.3 Geometrinė fazė ir jos užrašymas skaidriame dielektrike .....	10
2 Eksperimento įranga ir tyrimo metodai .....	15
2.1 Erdvinio šviesos modulatoriaus kalibravimas ir pluoštų generavimo metodika .....	15
2.2 Tūrinės geometrinės fazės gardelės užrašymas .....	20
2.3 Pluoštų generavimo tūrine geometrinės fazės gardele metodika.....	20
2.4 Sistema pažeidimų formavimui ultratrumpaisiais impulsais.....	21
3 Eksperimento rezultatai .....	22
3.1 Airy pluošto generavimas erdvinio šviesos modulatoriumi .....	22
3.2 Geometrinės fazės gardele generuojamo pluošto charakterizavimas .....	28
3.3 Pažeidų formavimas ant medžiagos paviršiaus ir medžiagos tūryje .....	34
4 Pagrindiniai rezultatai ir išvados .....	39
5 Padėka.....	39
6 Literatūros šaltinių sąrašas.....	40
Santrauka .....	43
Summary.....	44
Anotacija.....	45
Priedas Nr. 1. Fazinės kaukės.....	46

## Įvadas

Lazerinis medžiagų mikroapdirbimas – įvairiose srityse, pvz. elektronikoje, medicinoje, automobilių pramonėje, telekomunikacijų technologijose ir saulės energetikos sektoriuje, taikoma medžiagų apdirbimo technologija. Preciziškas proceso valdymas, didelis rezultatų tikslumas ir atsikartojamumas, galimybė apdirbti daugumą inžinerinių medžiagų, ir pasirinkti įrangą bei konkrečią apdirbimo metodiką atsižvelgiant į pageidaujamus rezultatus. Dėl šių priežasčių lazerinis mikroapdirbimas yra pranašesnis nei įprasti (mechaniniai ir cheminiai) medžiagų apdirbimo būdai.

Vienas iš svarbių lazerinio apdirbimo aspektų lemiančių proceso kokybę yra pluošto forma, t.y. skersinis pluošto intensyvumo pasiskirstymas ir jo kitimas pluošto sklidimo kryptimi. Pastaruoju metu didelio mokslininkų dėmesio susilaukė nedifraguojantys pluoštai, kadangi jų Relėjaus ilgis gali būti kelis kartus didesnis nei Gausinio pluošto – tai reiškia, kad pluoštas fokusuosis ne į vieną tašką, o į pailgą zoną. Vienas labiausiai žinomų ir jau atradusių savo pritaikymo sritis – Beselio-Gauso pluoštas [1]. Kitas, ne taip seniai eksperimentiškai pademonstruotas – Airy pluoštas. Jis išsiskiria dar ir tuo, kad pagrindinė intensyvumo smailė erdvėje sklinda ne tiesia trajektorija (kaip Beselio-Gauso pluoštas), o kreiva. Teoriškai Airy buvo apskaičiuotas anksčiau nei Beselio-Gauso pluoštas [2], tačiau eksperimentiškai sugeneruotas tik 2007 metais [3,4]. Parodyta, kad impulsiniu Airy pluoštu galima formuoti asimetrinius griovelius [5,6], tačiau tūrinių asimetrinių pažaidų formavimas skaidriose terpėse iki šiol nebuvo publikuotas.

Pagrindinis šio darbo tikslas – sugeneruoti Airy pluoštą keletu skirtingų metodų, įvertinti parametrų įtaką, bei suformuoti tūrines asimetrines pažaidas skaidrioje terpėje.

Pagrindiniai uždaviniai:

- Surinkti optinę Airy pluošto generavimo ir charakterizavimo sistemą.
- Sugeneruoti pageidaujamos geometrijos Airy pluoštus naudojantis erdviniu šviesos modulatoriumi ir geometrinės fazės gardele.
- Nustatyti parametrų įtaką Airy pluošto sklidimo atstumui ir trajektorijos kreivumui.
- Rasti metodą, kaip atskirti sugeneruotą Airy pluoštą nuo nedifragavusios pluošto dalies.
- Geometrinės fazės gardele sugeneruotu Airy pluoštu suformuoti tūrines asimetrines pažaidas stikle.

# 1 Literatūros apžvalga

## 1.1 Airy pluoštas ir jo fizikinės savybės

Per pastaruosius metus nedifraguojantys šviesos pluoštai susilaukė didelio mokslininkų dėmesio ir buvo sistemingai tyrinėjami. Bene labiausiai žinomas – Beselio-Gauso pluoštas, kurį 1987 metais pirmą kartą pasiūlė ir eksperimentiškai stebėjo J. Durnin su savo komanda [1]. Šis atradimas įžiebė kitų mokslininkų susidomėjimą tokio tipo pluoštais ir davė pagrindą tolimesniems tyrinėjimams bei kitų tokio tipo pluoštų atradimui. Tačiau dar anksčiau nei buvo atrastas Beselio pluoštas, 1979 metais M. V. Berry ir N. L. Balazs apskaičiavo, kad vienas iš Šredingerio lygties, aprašančios laisvos dalelės judėjimą, sprendinių gali būti Airy bangų paketas [2]. Šis darbas liko nepastebėtas mokslinės bendruomenės ir tik 2007 metais Airy pluoštas buvo sugeneruotas ir stebėtas eksperimentiškai G. A. Siviloglou ir jo komandos [3,4].

Airy pluoštas pasižymi keletu pagrindinių savybių. Esant idealioms sąlygoms (begalinė energija ir laisva, neapribota erdvė) Airy pluoštas nedifraguotų, o sklidimo atstumas būtų begalinis [2]. Airy pluoštas erdvėje sklinda su pagreičiu, kai jo neveikia jokia išorinė jėga [3,4]. Airy pluoštas pasižymi balistinėmis savybėmis, o pagrindinė intensyvumo smailė erdvėje sklinda paraboline trajektorija [7]. Be to, Airy pluoštas praėjęs kliūtį atsistato ir toliau sklinda nepasikeitusia trajektorija [8]. Dėl visų šių savybių Airy pluoštas yra ypatingas ir skatina mokslininkų susidomėjimą, bei intriguoja potencialiais praktiniais taikymais.

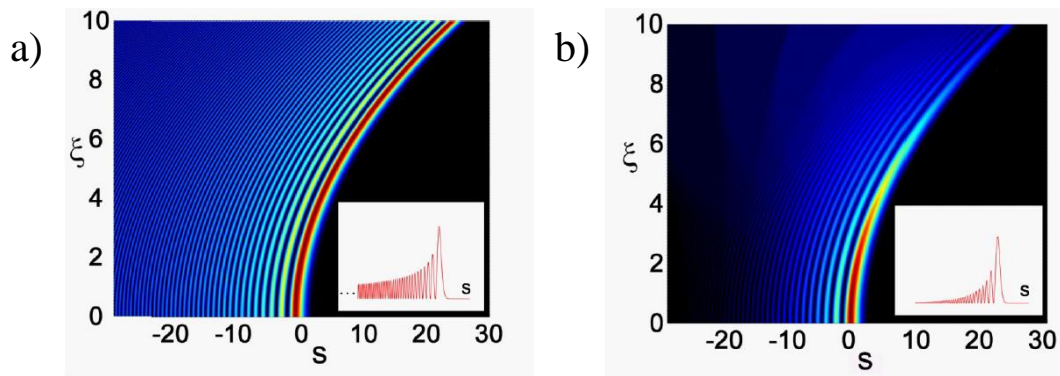
Matematinis Airy pluošto aprašymas prasideda nuo Šredingerio lygties aprašančios laisvos dalelės judėjimą [2-4]:

$$i \frac{\partial \phi}{\partial \xi} + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial s^2} = 0, \quad (1)$$

kur  $\phi$  - elektrinio lauko gaubtinė,  $s = x/x_0$  - sunormuota skersinė koordinatė,  $x_0$  - sutartinė skersinė skalė,  $\xi = z/kx_0^2$  - sunormuotas sklidimo atstumas, o  $k = 2\pi/\lambda_0$  - bangos skaičius. Vienas iš šios lygties sprendinių yra Airy bangų paketas aprašomas formule:

$$\phi(\xi, s) = \text{Ai} \left( s - \left( \frac{\xi}{2} \right)^2 \right) \exp \left( i \left( \frac{s\xi}{2} \right) - i \left( \frac{\xi^3}{12} \right) \right), \quad (2)$$

Kur Ai – Airy funkcija (paprasčiausias antros eilės tiesinės diferencialinės lygties, kurioje egzistuoja taškas, kuriame osciliacijos virsta eksponentiniu kitimu, sprendinys). Matyti, kad pluošto sklidimo pradžioje funkcija yra  $\phi(0, s) = \text{Ai}(s)$ . Kadangi realybėje sunku įgyvendinti idealius Airy pluoštus (1.1.1 pav.), įvedamas papildomas koeficientas  $\alpha$ , aprašantis eksponentinį funkcijos slopinimą.



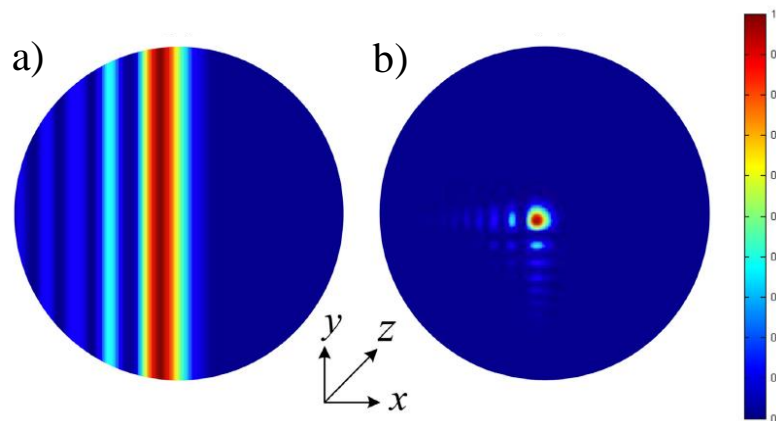
**1.1.1 pav.** Airy pluošto sklaidimo dinamika. a) Sklidimas laisvoje erdvėje – stebime idealaus Airy pluošto sklaidimo dinamiką, b) kai pluošto sklaidimas yra apribotas erdvėje – stebime realaus Airy pluošto sklaidimo dinamiką [3]

Tuomet pluošto sklaidimo pradžioje funkcija, aprašanti vienmatį Airy pluoštą (1.1.2 pav., a), kai skersinis intensyvumo pasiskirstymas yra moduluojamas vienoje koordinatėje, t.y.  $x$ , bus lygi:

$$\phi(s, \xi = 0) = \text{Ai}(s) \exp(\alpha s) \quad (3)$$

Dvimatis Airy pluoštas (1.1.2 pav., b), kai skersinis intensyvumo pasiskirstymas yra moduluojamas dviejose koordinatėse, t.y.  $x$  ir  $y$ , yra aprašomas šia lygtimi:

$$\phi(x, y, \xi = 0) = \text{Ai}\left(\frac{x}{x_0}\right) \text{Ai}\left(\frac{y}{y_0}\right) \exp\left[\left(\frac{\alpha x}{x_0}\right) + \left(\frac{\alpha y}{y_0}\right)\right]. \quad (4)$$

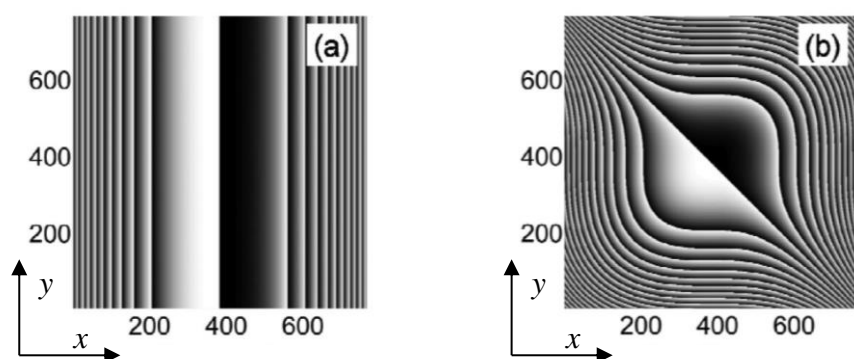


**1.1.2 pav.** Skersinis Airy pluošto intensyvumo pasiskirstymas. a) kai moduliacija vyksta vienoje koordinatėje, b) kai moduliacija vyksta dviejose koordinatėse [9]

Nustatyta, kad (4) lygties Furje transformacija yra gaunama Gauso pluošto fazę moduluojant kubine funkcija [3]:

$$\varphi(x_{OE}, y_{OE}) = a(x_{OE}^3 + y_{OE}^3) \quad (5)$$

kur  $a$  – parametras nusakantis kubinės funkcijos periodą, kai  $\varphi$  (fazė) kinta intervale  $[0, 2\pi]$ ,  $x_{OE}, y_{OE}$  – optinio elemento (šiam darbe – erdvinio šviesos modulatoriaus ir geometrinės fazės gardelės) fazinės kaukės koordinatės. Tokiu atveju gauname laiptuotą fazinę kaukę, kurią galima pritaikyti praktiškai formuojant Airy pluoštą faziniais optiniais elementais (1.1.3 pav.).

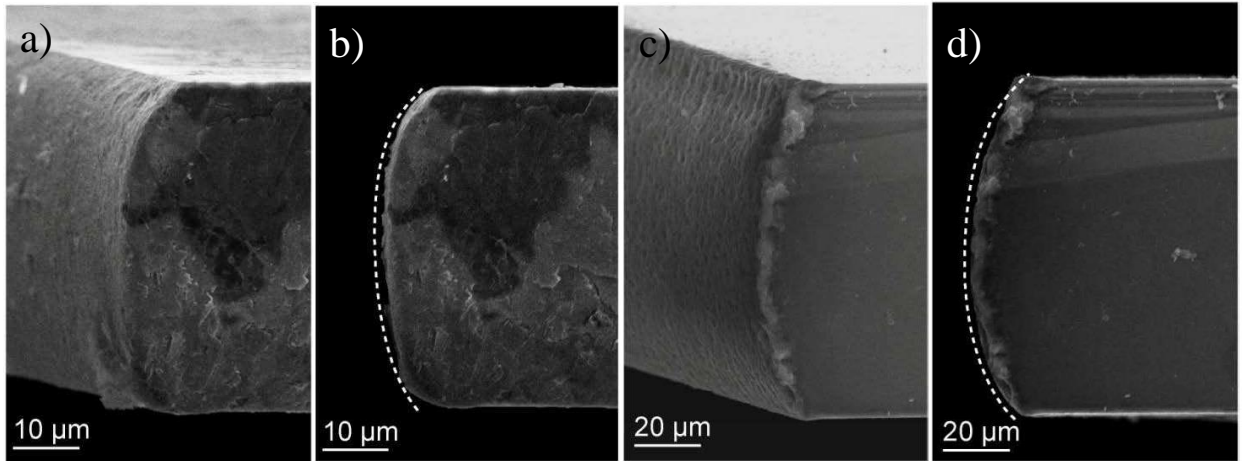


**1.1.3 pav.** Fazinės kaukės a) vienmačiui Airy pluoštui formuoti ir b) dvimačiui Airy pluoštui formuoti. Čia juoda spalva žymi fazės poslinkį lygų 0, balta spalva -  $2\pi$  [3]

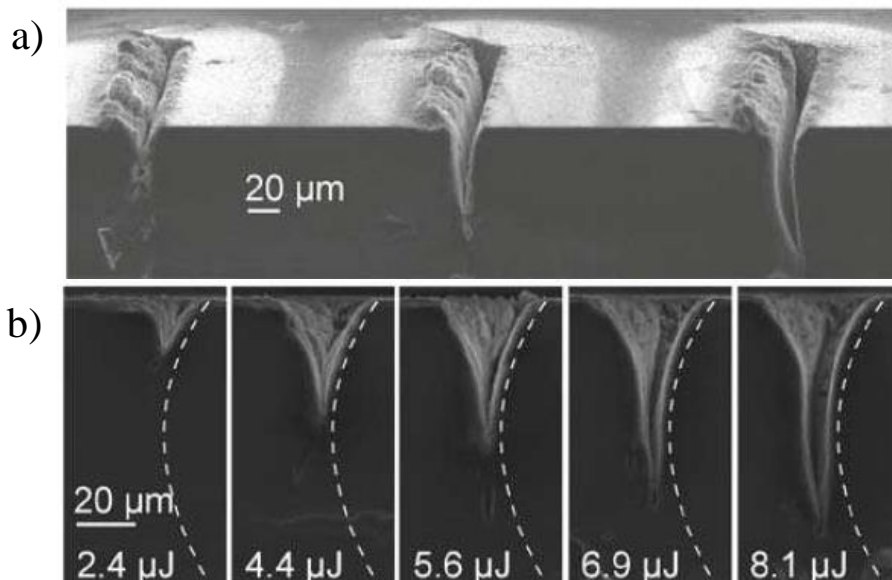
Praktikoje Airy pluoštas dažniausiai generuojamas erdviniais šviesos modulatoriais dėl greito ir paprasto pluošto fronto modifikavimo atliekant fazinę ir/arba amplitudinę moduliaciją [3,7,8]. Tačiau dėl nedidelio pažaidos slenksčio yra ieškoma kitų būdų, pavyzdžiui generavimas litografijos būdu chemiškai išsėdintomis difrakcinėmis gardelėmis [10], cilindrinų lęšių kombinacija [11] ar net tikslingai išnaudojant standartinių optinių elementų kuriamas aberacijas (komos aberaciją) [12].

Pirmiausia Airy pluoštas buvo sugeneruotas laisvoje erdvėje [3,7-12], tačiau praktiniai taikymai atsirado pluoštui sąveikaujant su kitomis dalelėmis: kreivų filamentų (plazmos kanalų) formavimas [13], dalelių valdymas keičiant jų judėjimo trajektoriją [14] ir kt. Taip pat Airy pluoštas gali išlaikyti savo savybes kitose terpėse: Airy plazmonų sklidimas dielektriko - metalo paviršių sandūroje [15,16], sklidimas fotoniniuose kristaluose [17], kreivų filamentų (plazmos kanalų) generavimas vandenyje [18].

Lazerinį mikroapdirbimą naudojant Airy pluoštą pirmą kartą 2012 metais pademonstravo A. Mathis ir jo komanda, kurie atliko deimanto ir silicio abliaciją femtosekundiniais impulsais [5]. Airy pluoštas buvo generuojamas nukreipus Ti:Safyro lazerio pluoštą, kurio bangos ilgis  $\lambda = 800\text{nm}$ , impulso trukmė  $\tau = 100\text{ fs}$ , pasikartojimų dažnis  $f = 5\text{ kHz}$ , į erdvinį šviesos moduliatorių. Sugeneruotas Airy pluoštas buvo fokusuojamas į ruošinį didelės skaitinės apertūros ( $NA = 0,8$ ) objektyvu. Stačiakampiai deimanto ir silicio ruošinių kraštai buvo nuabliuoti apvalia forma (1.1.4 pav.). Taip pat pademonstruotas asimetrinių griovelių silicio ruošinyje formavimas (1.1.5 pav.) [6].



**1.1.4 pav.** Deimanto (a, b) ir silicio (c, d) ruošinių abliacija Airy pluoštu [5]. Deimanto ruošinio storis 50  $\mu\text{m}$ , silicio ruošinio – 100  $\mu\text{m}$ . a) ir c) paveikslai rodo trimatį vaizdą, b) ir d) – vaizdas iš šono. Nuotraukos darytos skenuojančiu elektronų mikroskopu (SEM).



**1.1.5 pav.** Asimetrinių griovelių formavimas silicio ruošinyje [6]. a) Griovelio formos ir gylio priklausomybė nuo praėjimų skaičiaus (1, 2, 5 praėjimai), kai impulso energija 11  $\mu\text{J}$ , skenavimo greitis 10  $\mu\text{m/s}$ . b) Griovelio formos ir gylio priklausomybė nuo impulso energijos. Nuotraukos darytos skenuojančiu elektronų mikroskopu (SEM)

## 1.2 Erdvinis šviesos modulatorius (SLM)

Erdvinis šviesos modulatorius (SLM, *angl.* spatial light modulator) – tai dinaminis difrakcinis optinis elementas (DOE, *angl.* diffractive optical element), kuris leidžia moduluoti erdvinius šviesos pluošto parametrus – fazę ir/arba amplitudę.

Pagal veikimo principą erdviniai šviesos modulatoriai yra skirstomi į optiškai valdomus erdvinius šviesos modulatorius (*angl.* optically addressed spatial light modulator – OASLM) ir elektroniškai valdomus erdvinius šviesos modulatorius (*angl.* electrically addressed spatial light modulator – EASLM). Pirmuoju atveju pradinis šviesos pluoštas (*angl.* incident beam/read beam) yra valdomas kitu šviesos pluoštu (*angl.* optical control beam/write beam), antruoju atveju pradinis šviesos pluoštas yra valdomas elektriniais signalais [19].

Pagal moduliavimo mechanizmą prietaisai yra skirstomi į mechaninius, elektrooptinius, termooptinius ir magnetooptinius, iš kurių plačiausiai naudojami elektrooptiškai moduliuojantys skystųjų kristalų šviesos modulatoriai (*angl.* liquid crystal on silicon spatial light modulator – LCOS SLM).

Skystieji kristalai – tai medžiagos būseną, kuriai būdingos tiek skysčių, tiek kietųjų medžiagų savybės. Žvelgiant iš optikos pusės – svarbiausia savybė, dėl kurios skystieji kristalai yra naudojami šviesos modulatoriuose, yra dvejetainiškumas [19]:

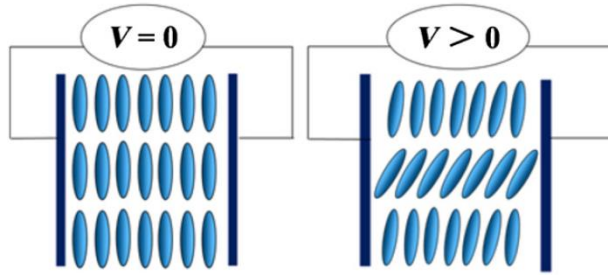
$$\Delta n = n_e - n_o, \quad (6)$$

kur  $n_o$  – paprastasis (*angl.* ordinary) lūžio rodiklis kritusiam pluoštui, o  $n_e$  – nepaprastasis (*angl.* extraordinary) lūžio rodiklis kritusiam pluoštui. Daugelio skystųjų kristalų dvejetainiškumas yra teigiamas ( $\Delta n > 0$ ). Patalpinus skystuosius kristalus į elektrinį lauką galima keisti molekulių orientaciją, taigi ir dvejetainiškumą.

Pagal skystųjų kristalų molekulių išsidėstymo pobūdį ir tankumą gali būti nematinės (*angl.* nematic) fazės ir smektinės (*angl.* smectic) fazės skystieji kristalai [19,20]. Smektinė skystųjų kristalų struktūra yra labiau tvarkinga nei nematinė, todėl tankesnė ir turi daugiau kietųjų medžiagų savybių. Tuo pačiu tai reiškia, kad tokių skystųjų kristalų klampumas yra didesnis, todėl jų atsakas patalpinus į elektrinį lauką yra lėtas. Be to, elektrinio lauko stipris turi būti sąlyginai didelis, kad pakeistų skystųjų kristalų orientaciją, o jau pakeitus kristalų orientaciją, labai sunku ją grąžinti į pradinę būseną be kaitinimo. Dėl šių priežasčių smektinės fazės skystieji kristalai nėra tinkami naudoti šviesos modulatoriuose.

Dažniausiai šviesos modulatoriuose naudojami nematinės fazės skystieji kristalai, kurių molekulių tarpusavio išsidėstymas yra mažiau tvarkingas ir retesnis. Konkrečiau - lygiagrečiai išsidėstę nematinės (*angl.* parallel aligned nematic - PAN) fazės skystieji kristalai [21]. Kai nėra išorinio poveikio, visos molekulės yra išsidėsčiusios lygiagrečiai. Patalpinus į išorinį elektrinį lauką molekulės pakrypsta kampu  $\theta$  (1.2.1 pav.).





**1.2.1 pav.** Lygiagrečiai išsidėsčiusios nematinės fazės skystųjų kristalų molekulės. Kairėje – kai nėra išorinio poveikio, dešinėje – patalpinus į išorinį elektrinį lauką [21]

Nepaprastasis lūžio rodiklis  $n_e$  yra priklausomas nuo  $\theta$  ir yra vadinamas efektyviuoju nepaprastuoju lūžio rodikliu  $n_e(\theta)$  [21], matematiškai aprašomu:

$$n_e(\theta) = \frac{n_e n_o}{\sqrt{n_e^2 \cos^2 \theta + n_o^2 \sin^2 \theta}}, \quad (7)$$

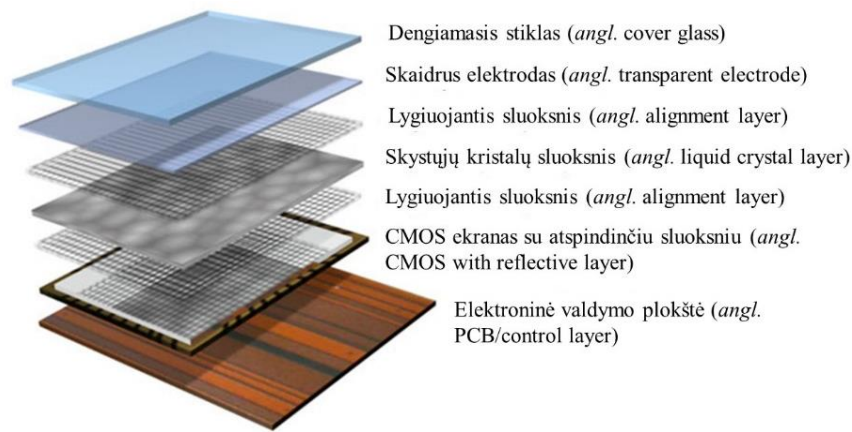
kur  $n_e$  yra nepaprastasis lūžio rodiklis, kai nėra išorinio elektrinio lauko. Fazės pokytis  $\varphi$ , kurį sukelia pasikeitęs lūžio rodiklis aprašomas formule:

$$\varphi = \frac{2\pi d |n_e(\theta) - n_o|}{\lambda}, \quad (8)$$

kur  $d$  – skystųjų kristalų sluoksnio storis, o  $\lambda$  – bangos ilgis. Jeigu į šviesos moduliatorių krentantis pluoštas yra tiesiškai poliarizuotas (lygiagretus skystųjų kristalų molekulių orientacijai, kai nėra išorinio elektrinio lauko), tai fazės pokytis lygus:

$$\varphi = \frac{2\pi d n_e(\theta)}{\lambda}. \quad (9)$$

Toks skystųjų kristalų šviesos moduliatorius gali veikti pralaidumo arba atspindžio būdais. Pirmuoju atveju gali būti moduluojama kritusio pluošto fazė ir amplitudė, antruoju atveju – tik fazė. Daugeliu atveju pageidaujama moduluoti tik pluošto fazę, nes moduluojant amplitudę pasireiškia dideli energiniai nuostoliai. Moduluojant pluošto fazę paprastai naudojami atspindžio tipo šviesos moduliatoriai, kurių principinė sandara pavaizduota 1.2.2 paveiksle. Dengiamasis stiklas yra reikalingas ekranui apsaugoti. Skaidrus elektrodas reikalingas elektriniam laukui skystųjų kristalų sluoksnyje sukurti (paprastai naudojamas indžio alavo oksidas). Lygiuojantys sluoksniai užtikrina, kad, kai nėra išorinio elektrinio lauko, skystųjų kristalų molekulės yra išsidėsčiusios lygiagrečiai, tam tikra pradine orientacija. CMOS sensoriuje kiekvienam pikseliui yra užduodamos skirtingos įtampų vertės pagal skaitmeninę šviesos moduliatoriaus fazinę kaukę, kuri įkeliami šviesos moduliatoriaus valdymo programoje.



**1.2.2 pav.** Principinė atspindžio tipo fazinio šviesos modulatoriaus sandara (HOLOEYE Photonics AG)

Erdviniai šviesos modulatoriai yra naudojami labai įvairiose srityse: daugiapluoščiui mikroapdirbimui [22-24], įvairių pluoštų formavimui [24,25], adaptyviai optikai [26], optinių pincetų formavimui [27] ir kt.

### 1.3 Geometrinė fazė ir jos užrašymas skaidriame dielektrike

Geometrinė fazė, dar kitaip vadinama Pancharatnam–Berry faze, yra fazės pokytis, kurį uždara sistema įgyja ciklo metu dėl geometrinių erdvės savybių. Optinėje sistemoje geometrinės fazės pokytį sukuria cikliška amplitudės ir poliarizacijos moduliacija. Šviesos poliarizacija – tai elektromagnetinės bangos savybė apibūdinanti elektrinio lauko vektoriaus osciliacijas. Elektrinis laukas, apibrėžiamas kaip dviejų tarpusavyje statmenų komponentių suma [19]:

$$\vec{E}(z,t) = E_x \vec{x} + E_y \vec{y}, \quad (10)$$

kur

$$E_x = a_x \cos \left[ \omega \left( t - \frac{z}{c} \right) + \varphi_x \right] \quad (11)$$

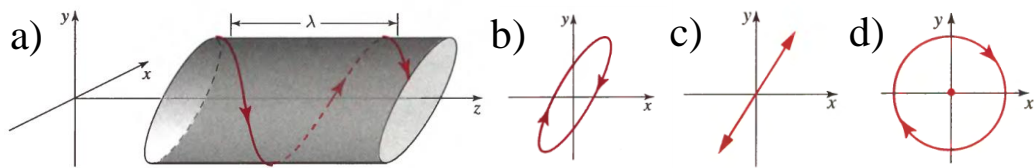
$$E_y = a_y \cos \left[ \omega \left( t - \frac{z}{c} \right) + \varphi_y \right] \quad (12)$$

yra elektrinio lauko vektoriaus  $x$  ir  $y$  komponentės. Šios lygtys yra parametrinės lygtys elipsei aprašyti:

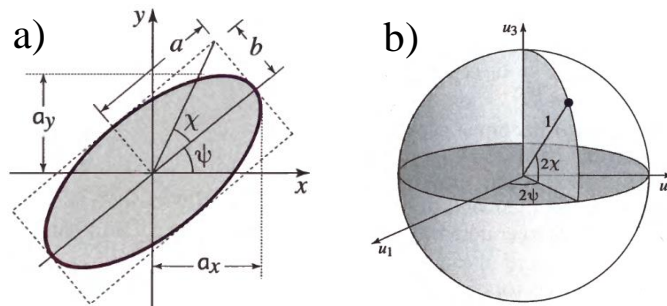
$$\frac{E_x^2}{a_x^2} + \frac{E_y^2}{a_y^2} - 2 \cos \varphi \frac{E_x E_y}{a_x a_y} = \sin^2 \varphi, \quad (13)$$

kur  $\varphi = \varphi_y - \varphi_x$  yra fazių skirtumas tarp elektrinio lauko komponentių. Kai  $\varphi \neq 0$  bendru atveju elektrinio vektoriaus viršūnė sklisdama  $z$  kryptimi  $x$  ir  $y$  plokštumoje piešia elipsę (1.3.1 pav. a, b).

Čia  $x$  ir  $y$  koordinatės atitinka vadinamąsias lėtąją ir greitąją ašis – lėtoji ašis atitinka tą, kurioje lūžio rodiklis yra didesnis, o greitoji atitinka tą, kurioje lūžio rodiklis didesnis. Elipsę apibūdina: kampas  $\psi$ , nusakantis elipsės ilgosios ašies nuokrypį nuo  $x$  ašies, ir kampas  $\chi$ , nusakantis eliptiškumą – ilgosios ir trumposios elipsės ašių santykį (1.3.2 pav. a). Šie kampai priklauso nuo elektrinio lauko vektoriaus komponentių amplitudžių santykio  $r = \frac{a_y}{a_x}$  ir nuo fazių skirtumo  $\varphi$ . Kraštiniais atvejais, kai  $\varphi = 0$  arba  $\pi$  – gauname tiesinę poliarizaciją (1.3.1 pav. c), kai  $\varphi = \pm\pi/2$  – gauname apskritiminę poliarizaciją (1.3.1 pav. d).



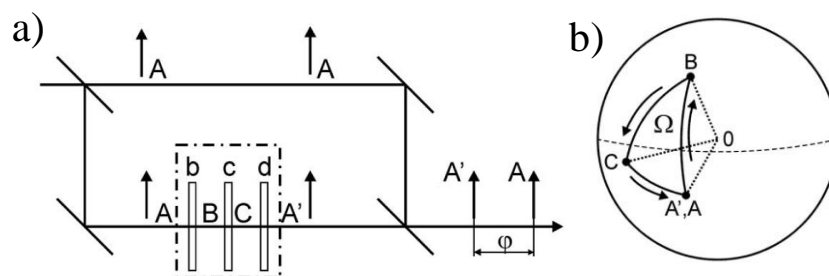
**1.3.1 pav.** a) Elektrinio lauko vektoriaus viršūnės sukimasis sklindant  $z$  kryptimi. Elektrinio lauko vektoriaus nubrėžta trajektorija nusklidus atstumą lygų vienam bangos ilgiui  $\lambda$ , kai pluošto poliarizacija b) elipsinė, c) tiesinė ir d) apskritiminė [19]



**1.3.2 pav.** a) Poliarizacijos elipsė, b) Poincaré sfera [19]

Kai elektrinio lauko vektoriaus komponentių amplitudės yra vienodos ir  $r = 1$ , tuomet visus galimus poliarizacijos variantus galima atvaizduoti Poincaré sferos paviršiuje (1.3.2 pav. b). Norint atvaizduoti ne tik elektromagnetinės bangos poliarizaciją bet ir intensyvumą – informacija aprašoma Stokso vektoriumi, kurį sudaro keturių Stokso parametrų rinkinys:  $S_0, S_1, S_2, S_3$ .  $S_0$  proporcingas intensyvumui ( $S_0 = a_x^2 + a_y^2$ ), o likę parametrai proporcingi Dekarto koordinatėms Poincaré sferoje. Ties sferos pusiauju, kai  $\chi = 0^\circ$ , turime visas tiesinės poliarizacijos variacijas, šiauriniame ir pietiniame poliuose – kai  $2\chi = \pm 90^\circ$  – turime atitinkamai dešininę ir kairinę apskritiminę poliarizaciją [19].

S. Pancharatnam ir M. V. Berry apibūdino geometrinę fazę taip: kai elektromagnetinės bangos poliarizacija nukeliauja uždarą kontūrą Poincaré sferos paviršiuje, tai galutinė pluošto fazė skiriasi nuo pradinės fazės per  $\varphi_g = \Omega/2$ , kai  $\Omega$  yra plotas apribotas poliarizacijos judėjimo trajektorijos kontūro [28,29]. Pavyzdžiui, vienoje Mach–Zehnder interferometro atšakoje patalpinus dvejopalausių banginių plokštelių rinkinį (plokštelės b, c ir d) kritusios bangos pradinė poliarizacija A bus transformuota į B, į C ir galiausiai į A', kuri bus lygiai tokia pati kaip ir pradinė A (1.3.3 pav.) [30]. Nors pradinė ir galutinė poliarizacijos bus tokios pat, tačiau atsiras tam tikras fazinis poslinkis, kurį nulėmė tarpinės poliarizacijos būsenos. Taigi skirtingai nei tradiciniuose difrakciniuose optiniuose elementuose, fazės poslinkis geometrinės fazės optiniame elemente atsiranda ne dėl optinių kelių skirtumo. Geometrinę fazę atsiranda dėl manipuliacijos pluošto poliarizacija.

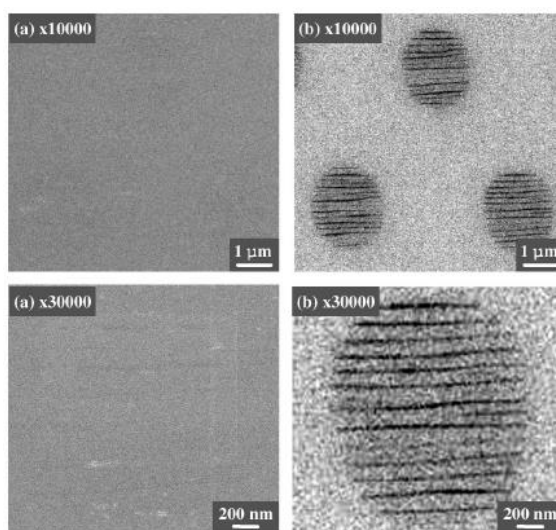


**1.3.3 pav.** a) Mach–Zehnder interferometras, kurio vienoje atšakoje patalpintas dvejopalausių banginių plokštelių rinkinys. b) Pancharatnam poliarizacijos būsenų trikampis ant Poincaré sferos geometrinei fazei pavaizduoti [30]

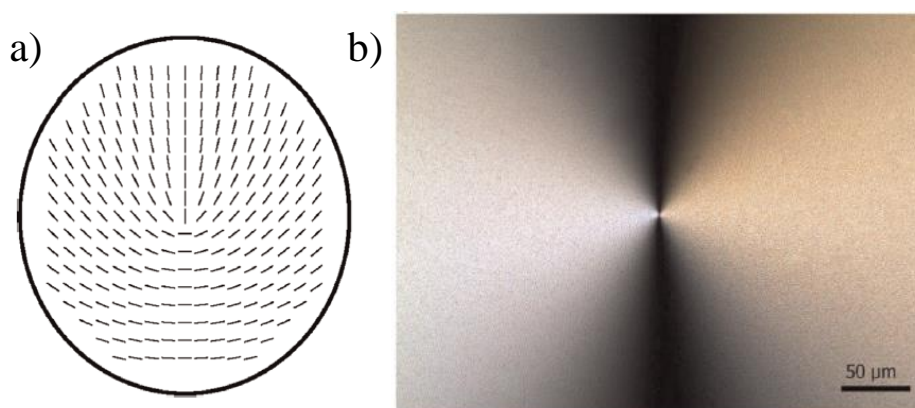
Geometrinės fazės optinių komponentų gamyba remiasi erdviškai moduluotos struktūros suformavimu, kai kiekvienas tos struktūros komponentas vienokiu ar kitokiu būdu sukuria geometrinės fazės poslinkį, t. y. pakeičia pluošto poliarizaciją. Praktiškai pademonstruotas tokių komponentų formavimas pasinaudojant medžiagos anizotropija (polimeruose [31] bei skystųjų kristalų molekulėse [32,33]) ir periodinėmis struktūromis, kurios pasižymi dvejopalausių kumu, kai struktūros periodas yra mažesnis nei bangos ilgis [34–37]. Periodinės struktūros, kurių periodas yra mažesnis nei bangos ilgis, gali būti formuojamos keliais metodais: litografija [34–37] ir tiesioginiu užrašymu ultratrumpaisiais impulsais, kai medžiagos tūryje savaime susiformuoja periodinė struktūra [39–41]. Tiesioginis užrašymas ultratrumpaisiais impulsais yra sąlyginai naujas metodas ir pranašesnis už litografiją. Litografinės sistemos yra difrakciškai ribotos, todėl suformuotų struktūrų periodai yra vos mažesni nei bangos ilgis, tad tinka naudoti tolimojoje infraraudonųjų spindulių srityje. Struktūrų, kurios suformuojamos tiesioginio užrašymo metu, periodas gali siekti vos keliasdešimt nanometrų, tad tokie optiniai elementai yra tinkami naudoti ir regimojoje srityje [41].

Tyrimo metu naudotos tūrinės geometrinės fazės gardelės suformuotos tiesioginio užrašymo metodu, kurį ir aptarsime kiek detaliau.

Femtosekundiniai impulsai sufokusuoti skaidraus dielektriko tūryje suformuoja II tipo tūrinės modifikacijas – nanometrinių matmenų gardeles – nanogardeles, kurių orientacija yra statmena kritusio pluošto poliarizacijai, o periodas lygus  $\lambda/2n$  [38,39,41]. Nustatyta, kad gardelė susidaro persiskirsčius deguonies atomams medžiagos tūryje (1.3.4 pav.) [38]. Keičiant kritusio pluošto poliarizaciją ir pluošto padėtį ant bandinio  $x$  ir  $y$  plokštumoje galima suformuoti erdviškai moduliuotą struktūrą (1.3.5 pav.) [42].

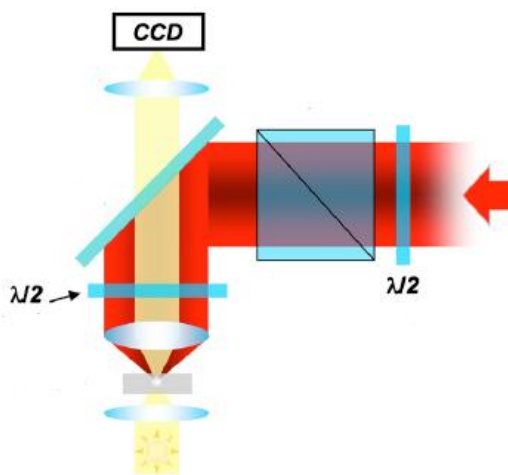


**1.3.4 pav.** Stiklo paviršius nupoliruotas iki nanogardelės. a) topografinis vaizdas (antriniai elektronai), b) atominė paviršiaus struktūra (atspindėti elektronai). Viršuje vaizdas padidintas 10 000 kartų, apačioje – 30 000 kartų. Nuotraukos darytos skenuojančiu elektronų mikroskopu [38]



**1.3.5 pav.** a) Principinė nanogardelių išdėstymo plokštumoje schema, b) Banginė plokštelė, kurioje nanogardelės išdėstytos pagal schemą pateiktą kairėje. Nuotrauka daryta optiniu mikroskopu, patalpinus plokštelę tarp dviejų sukryžmintų poliarizatorių [42]

Principinė proceso schema II tipo tūrinėms modifikacijoms formuoti pavaizduota 1.3.6 paveiksle. Naudojamas Yb:KGV lazerio pluoštas, kurio bangos ilgis  $\lambda = 1030\text{nm}$ , impulso trukmė  $\tau = 270\text{fs}$ , impulsų pasikartojimo dažnis  $f = 200\text{kHz}$ , skenavimo greitis  $v = 1\text{mm/s}$ . Pluoštas nukreipiamas į  $\lambda/2$  plokštelę, tuomet į poliarizatorių ir į kitą  $\lambda/2$  plokštelę. Sukant antrąją  $\lambda/2$  plokštelę galima keisti galutinę pluošto poliarizaciją ir atitinkamai formuojamos nanogardelės orientaciją. Reikiamos poliarizacijos pluoštas yra sufokusuojamas į lydyto kvarco ruošinį mažos skaitinės apertūros ( $\text{NA} = 0,35$ ) lęšiu. Taip suformuojama erdviškai moduluota geometrinės fazės gardelė [40].

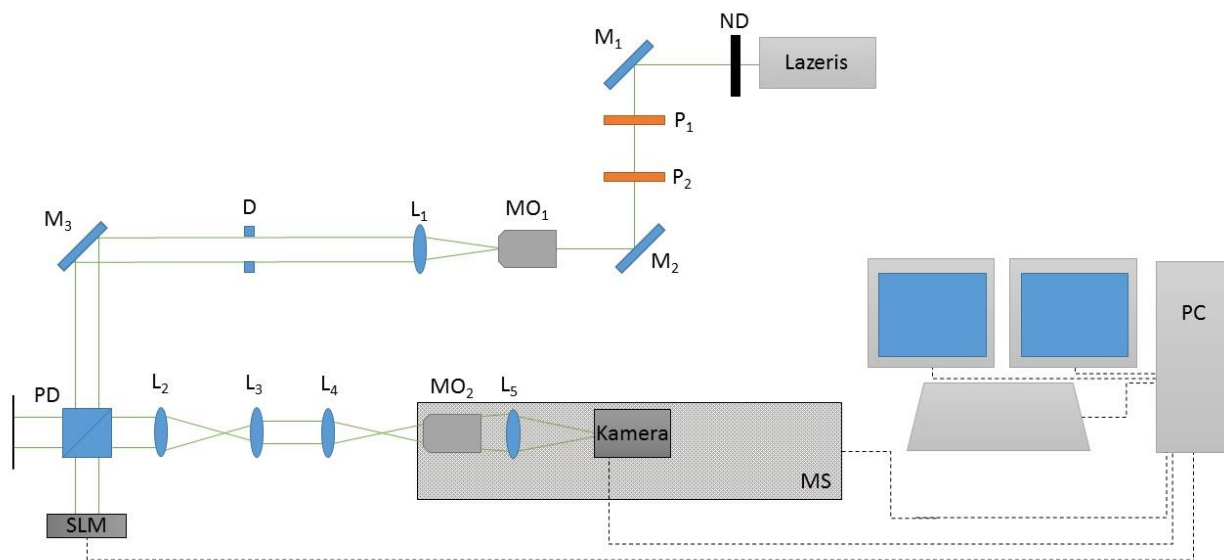


**1.3.6 pav.** Tiesioginio geometrinės fazės gardelės užrašymo ultratrumpaisiais impulsais proceso principinė schema [40]

## 2 Eksperimento įranga ir tyrimo metodai

### 2.1 Erdvinio šviesos modulatoriaus kalibravimas ir pluoštų generavimo metodika

Pirmojo eksperimento etapo metu erdvinio šviesos moduliatoriumi buvo generuojami Airy pluoštai ir tiriamos jų charakteristikos. Principinė eksperimento schema pavaizduota 2.1.1 paveiksle.



2.1.1 pav. Principinė eksperimento schema pirmojo etapo metu

Naudotas nuolatinės veikos DPSS lazeris (MGL-III-532-100mW, Changchun New Industries Optoelectronics Technology Co., Ltd.), kurio bangos ilgis  $\lambda = 532$  nm, išėjimo galia  $P_{out} = 100$  mW. ND – optinis filtras,  $P_1$  –  $\lambda/2$  plokštelė,  $P_2$  – Glan-Taylor tipo poliarizatorius,  $MO_1$  – Olympus 100x objektyvas, kurio darbinis nuotolis  $WD = 0,2$  mm,  $L_1$  – lęšis, kurio židinio nuotolis  $f = 150$  mm.  $L_1$  kartu su  $MO_1$  sudaro teleskopą, kuris išplečia ir kolimuoja pluoštą (reikalinga tinkamam erdvinio šviesos modulatoriaus veikimui). Pluošto skersmuo keičiamas diafragma D (eksperimento metu pluošto skersmuo – 8 mm). Tuomet pluoštas nukreipiamas į pluošto daliklį PD (CM1-BS013, Thorlabs, Inc.). Viena pluošto dalis uždengiama, o kita dalis nukreipiama į fazinį šviesos moduliatorių SLM (PLUTO-VIS-006-A, HOLOEYE Photonics AG), skirtą 420 nm – 700 nm bangų diapazonui, galintį vėlinti fazę iki  $\sim 6\pi$ . Faziniu šviesos moduliatoriumi formuojamas vaizdas atvaizduojamas 4f optine sistema, kurios pirmojo lęšio  $L_2$  židinio nuotolis  $f = 150$  mm, o antrojo  $L_3$   $f = 50$  mm. Tokia optinė sistema sumažina skersinius suformuoto pluošto matmenis 3 kartus, o išilginius – 9 kartus.  $L_4$  lęšio židinio nuotolis  $f = 18$  mm, jis atlieka suformuoto pluošto Furje transformaciją.  $MO_2$  – 20x objektyvas, kurio darbinis nuotolis  $WD = 10,5$  mm.  $L_5$  lęšio židinio nuotolis  $f = 200$  mm.  $MO_2$  ir  $L_5$  sistema padidina skersinius pluošto matmenis  $\sim 10$  kartų.  $MO_2$  ir  $L_5$  sistema bei pluošto profilio



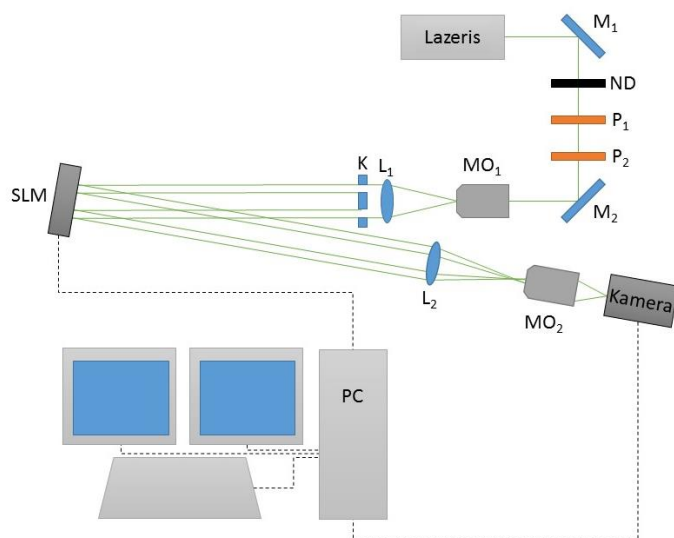
stebėjimo ir matavimo kamera (Spiricon SP620U, Ophir Optronics Solutions Ltd.) patalpinti ant motorizuoto transliacinio staliuko, kurio eiga 300 mm (ATS15030-2-40L-SM-FLY-NC, Aerotech Inc.).

Pirmojo etapo metu didelę dalį optinės sistemos konfigūracijos nulėmė fazinio šviesos modulatoriaus keliami reikalavimai. Siekiant užtikrinti sėkmingą modulatoriaus veikimą į modulatoriaus ekraną kritęs pluoštas turi būti tiesiškai poliarizuotas, kolimuotas, nedidesnio skersmens nei modulatoriaus ekrano plotis, o pluošto kritimo kampas neturi viršyti  $5^\circ$ . Be to, prieš pradėdant eksperimentą reikalinga susikalibruoti fazinį šviesos moduliatorių, kad apibrėžtume pageidaujamą fazių vėlinimo intervalą (šiuo atveju nuo 0 iki  $2\pi$ ) ir užtikrintume tiesinį fazės kitimą. Modulatoriaus kalibracija apima tris žingsnius.

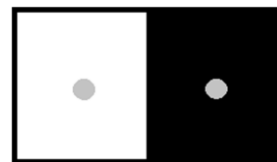
Pirmiausia reikia pasirinkti tinkamą konfigūracinį failą (*angl.* sequence), kuris aprašo, kaip skystųjų kristalų molekulės reaguos į užduodamas įtampos vertes. Skystųjų kristalų molekulių reakcijos greitį į užduodamas įtampų vertes riboja molekulių klampumas, bei įtampų kitimo/atnaujinimo dažnis. Tai reiškia, kad skystųjų kristalų molekulės, nespėjusios sureaguoti į užduodamą įtampos vertę, arba vis dar nesureagavusios, kad įtampos vertė jau pasikeitė, virpa apie vidutinę užduodamos įtampos vertę ir atsiranda laikinė priklausomybė stebint suformuotą pluoštą. To pasėkoje šviesos modulatoriaus suformuotuose pluoštuose pasireiškia faziniai virpėjimai. Kuo fazinis vėlinimas didesnis, tuo užduodamų įtampų intervalas yra platesnis – tuo labiau pasireiškia faziniai virpėjimai. Siekiant to išvengti pasirinktas konfigūracinis failas „5-6 sequence“.

Antra – reikia nustatyti įtampų vertes didžiausiam ir mažiausiam fazės vėlinimui, kad apsibrėžtume modulatoriaus dinaminį diapazoną. Kad nustatytume šį dinaminį diapazoną reikalinga atlikti dviejų pluoštų interferencijos eksperimentą, kurio principinė schema pavaizduota 2.1.2 paveiksle. Naudotas nuolatinės veikos DPSS lazeris, kurio bangos ilgis  $\lambda = 532$  nm, išėjimo galia  $P_{out} = 100$  mW. ND – optinis filtras,  $P_1$  –  $\lambda/2$  plokštelė,  $P_2$  – Glan-Taylor tipo poliarizatorius,  $MO_1$  – Olympus 100x objektyvas, kurio darbinis nuotolis  $WD = 0,2$  mm,  $L_1$  – lęšis, kurio židinio nuotolis  $f = 150$  mm.  $L_1$  kartu su  $MO_1$  sudaro teleskopą, kuris išplečia ir kolimuoja pluoštą. K – kaukė su dvejomis skylėmis, kurios praleidžia du koherentinius pluoštus. Šie pluoštai turi pataikyti į šviesos modulatoriaus SLM ekrano kairę ir dešinę pusę, kai šis yra vertikalčiai padalintas į dvi dalis. Rekomenduojama, kad abu pluoštai pataikytų į kiekvienos dalies centrą, taip kaip pavaizduota 2.1.3 paveiksle.  $L_2$  lęšio židinio nuotolis  $f = 200$  mm, ties jo židinio nuotoliu abu koherentiniai pluoštai persikloja ir pasireiškia interferencija (2.1.4 pav.).  $MO_2$  – Olympus 50x objektyvas, kurio darbinis nuotolis  $WD = 1$  mm padidina interferencinį vaizdą, kurį nukreipiame į kamerą (UI-5240CP-M-GL, IDS Imaging Development Systems GmbH).





**2.1.2 pav.** Principinė dviejų pluoštų interferencijos eksperimento schema



**2.1.3 pav.** Du koherentiniai pluoštai krentantys į šviesos modulatoriaus ekraną, kai šis vertikaliai padalintas į dvi dalis

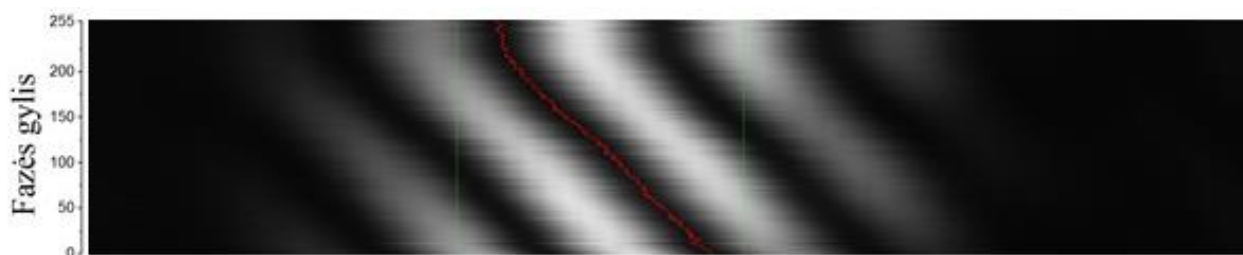


**2.1.4 pav.** Interferencinis dviejų koherentinių pluoštų vaizdas

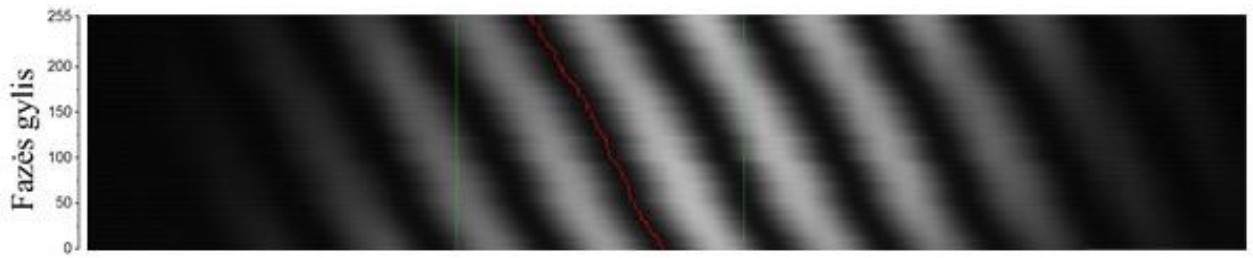
Naudojantis PhaseCam (HOLOEYE Photonics AG) programine įranga vienoje ekrano pusėje fazė yra vėlinama nuosekliai nuo mažiausios vertės iki didžiausios, o kitoje pusėje fazės vėlinimas nekinta (2.1.5 pav.). Tai sąlygoja interferencinio vaizdo poslinkį, kurį programa registruoja ir suformuoja interferencinio vaizdo poslinkio matricą (2.1.6-7 pav.). Pasirinkus matavimo intervalą (žalios linijos 2.1.6-7 pav.) programa nustato vienodo kontrasto sritį (raudonos linijos 2.1.6-7 pav.), kuri atitinka matuojamus taškus. Iš jų galima apskaičiuoti fazės vėlinimo diapazoną.



**2.1.5 pav.** Šviesos modulatoriaus ekranas, kai fazė vienoje pusėje yra nuosekliai keičiama (fazės vėlinimo koeficiento vertė kinta nuo 0 iki 255), o kitoje pusėje – nekinta



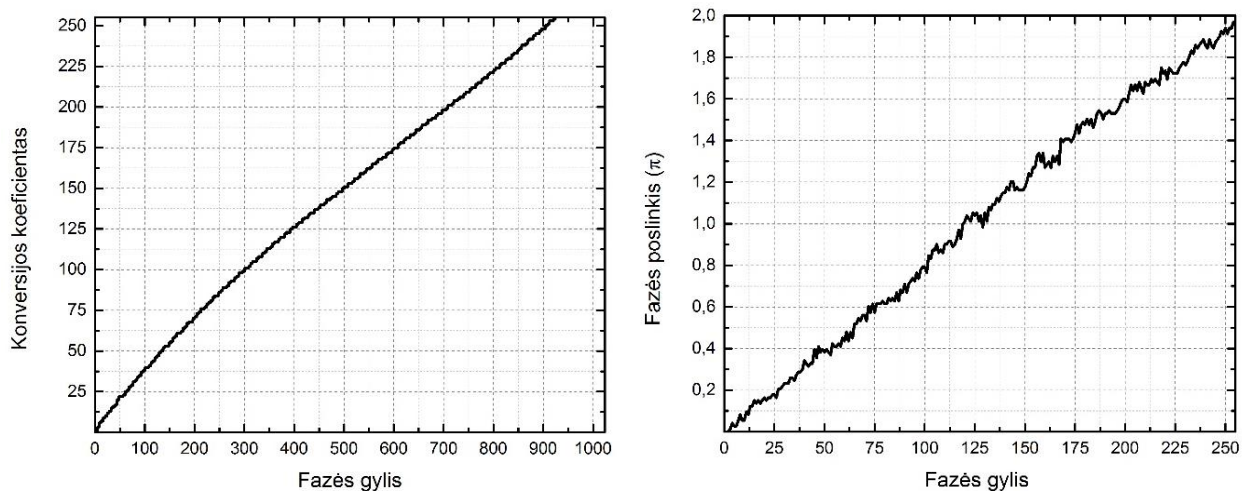
**2.1.6 pav.** Interferencinio vaizdo poslinkio matrica, kai  $U_{\min} = 0,43 \text{ V}$ ,  $U_{\max} = 1,15 \text{ V}$ , fazės vėlinimo diapazonas –  $2,59\pi$ .



**2.1.7 pav.** Interferencinio vaizdo poslinkio matrica, kai  $U_{\min} = 0,56 \text{ V}$ ,  $U_{\max} = 1,15 \text{ V}$ , fazės vėlinimo diapazonas –  $1,96\pi$ .

Tolimesniam eksperimentui buvo pasirinkta naudoti  $U_{\min} = 0,56 \text{ V}$ ,  $U_{\max} = 1,15 \text{ V}$ . Šiame įtampų intervale fazė yra vėlinama nuo 0 iki  $\sim 1,96\pi$ , o fazės kitimas (raudona linija) yra tiesinis (2.1.7 pav.).

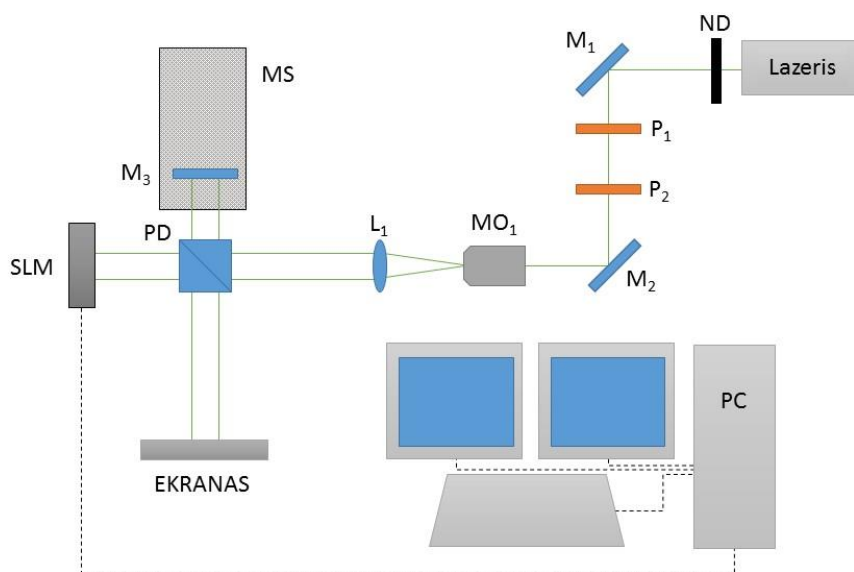
Trečia – kad modulatorius būtų sukalibruotas reikia pasirinkti tinkamą konversijos koeficiento kreivę (kitai – gama kreivė), kuri apibrėžia modulatoriaus atsaką į užduodamas fazės vėlinimo vertes ir užtikrina tiesinį atsaką. Eksperimentui buvo pasirinkta gamintojo siūloma gama kreivė (2.1.8 pav.), kai  $U_{\min} = 0,56 \text{ V}$ ,  $U_{\max} = 1,15 \text{ V}$ , skirta 532 nm bangos ilgiui, naudojama kartu su „5-6 sequence“ konfigūraciniu failu.



**2.1.8 pav.** Kairėje – gama kreivė, kai  $U_{\min} = 0,56 \text{ V}$ ,  $U_{\max} = 1,15 \text{ V}$ , dešinėje gaunamas fazės vėlinimo diapazonas nuo 0 iki  $1,96\pi$

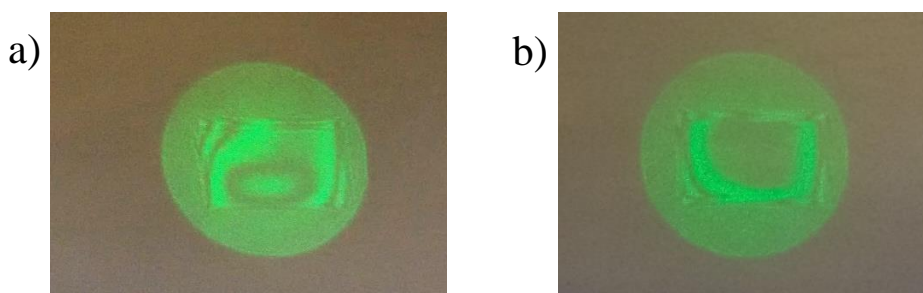
Papildomai buvo atlikta fronto kreivumo korekcija faziniam šviesos modulatoriui. Modulatoriaus skystųjų kristalų ekranų gamybos metu atliekamo padėklo pjaustymo liekamasis reiškiny – galinio paviršiaus įtempimai, kurie iškreipia modulatoriaus formuojamo pluošto frontą. Sunku visiškai kompensuoti sukuriamas fronto deformacijas, tačiau skaitmeniškai galima ištaisyti jas tiek, kad nedarytų didelės įtakos tolimesniems eksperimentams. Sukuriama korekcinė fazinė kaukė,

kuri vėliau gali būti pridėta prie bet kurios kitos fazinės kaukės. Korekcinė kaukė buvo sukurta stebint pluošto, kurio frontas plokščias, ir modulatoriaus formuojamo pluošto interferenciją Maikelsono interferometru (2.1.9 pav.).



**2.1.9 pav.** Fronto kreivumo korekcijos eksperimento principinė schema

Naudotas nuolatinės veikos DPSS lazeris (MGL-III-532-100mW, Changchun New Industries Optoelectronics Technology Co., Ltd.), kurio bangos ilgis  $\lambda = 532$  nm, išėjimo galia  $P_{\text{out}} = 100$  mW. ND – optinis filtras,  $P_1$  –  $\lambda/2$  plokštelė,  $P_2$  – Glan-Taylor tipo poliarizatorius,  $MO_1$  – Olympus 100x objektyvas, kurio darbinis nuotolis  $WD = 0,2$  mm,  $L_1$  – lęšis, kurio židinio nuotolis  $f = 150$  mm.  $L_1$  kartu su  $MO_1$  sudaro teleskopą, kuris išplečia ir kolimuoja pluoštą. Tuomet pluoštas padalijamas pluošto dalikliu PD (CM1-BS013, Thorlabs, Inc.). Viena pluošto dalis nukreipiama į veidrodį  $M_3$ , kuris stovi ant motorizuoto transliacinio staliuko MS (Aerotech Inc.), kad būtų lengviau pastatyti veidrodį reikiamu atstumu nuo ekrano, o kita dalis nukreipiama į fazinį šviesos moduliatorių SLM (PLUTO-VIS-006-A, HOLOEYE Photonics AG). Pluoštai atsispindėję nuo  $M_3$  ir SLM interferuoja ant ekrano (2.1.10 pav.).



**2.1.10 pav.** Pluošto, kurio frontas plokščias, ir modulatoriaus formuojamo pluošto fronto interferencija ant ekrano. a) be korekcinės kaukės, b) su korekcine kauke

Gauta korekcinė kaukė fronto kompensavimui pavaizduota priede Nr. 1, kaukė Nr. 1, buvo naudojama visų tolimesnių eksperimentų metu.

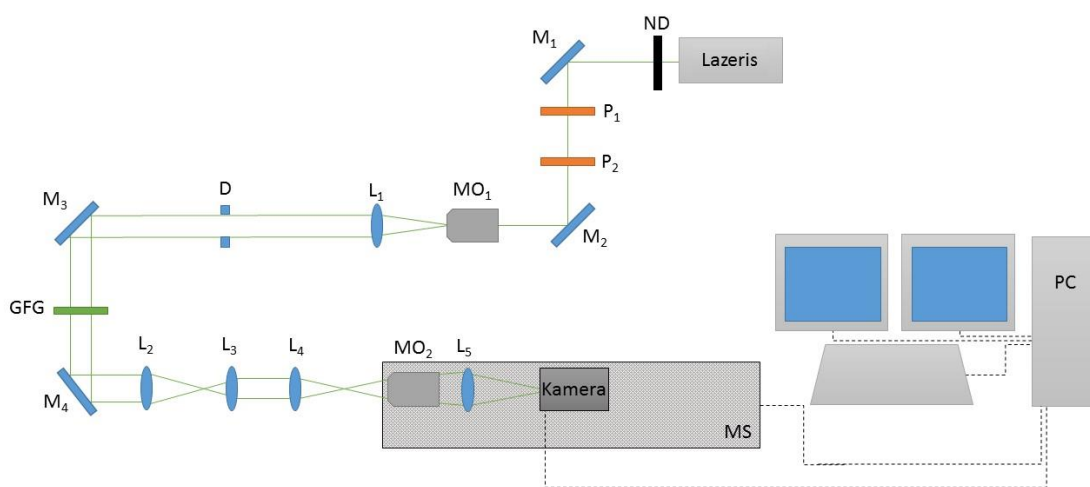
Pirmojo eksperimento etapo metu į programą Application Software 3.0 (HOLOEYE Photonics AG) buvo įkeliama fazinė kaukė Airy pluoštui generuoti, pridėjama korekcinė kaukė ir, stumdant motorizuotą staliuką MS  $z$  (pluošto sklaidimo) kryptimi, fiksuojamas skersinis intensyvumo pasiskirstymas ties kiekviena  $z$  padėtimi. Gauti rezultatai apdorojami MatLab (The MathWorks, Inc.) programa, kuria gaunami trimačiai intensyvumo pasiskirstymo paveikslai.

## 2.2 Tūrinės geometrinės fazės gardelės užrašymas

Antrojo etapo metu, pasinaudojant faziniu šviesos moduliatoriumi patikrintomis fazinėmis kaukėmis, ultratrumpaisiais lazerio impulsais buvo užrašytos tūrinės geometrinės fazės gardelės lydyto kvarco padėkluose. Užrašymas buvo vykdomas lazerinio mikroapdirbimo sistema FemtoLAB įmonėje UAB Altechna R&D. Tūrinių geometrinės fazės gardelių užrašymo metodika plačiau aprašyta 1.3 poskyryje.

## 2.3 Pluoštų generavimo tūrine geometrinės fazės gardele metodika

Trečiojo etapo metu buvo stebimas ir charakterizuojamas geometrinės fazės gardele generuojamas Airy pluoštas. Principinė eksperimento schema pavaizduota 2.3.1 paveiksle. Ši schema panaši į pirmojo etapo metu naudotą schemą (2.1 poskyris), tačiau šiuo atveju pluošto daliklį PD ir fazinį šviesos moduliatorių SLM pakeitė veidrodis  $M_4$  ir ultratrumpaisiais lazerio impulsais skaidriame dielektrike užrašyta tūrinė geometrinės fazės gardelė GFG. Be to, kritusio pluošto poliarizacija nebe tiesinė, o apskritiminė, tad čia  $P_1$  – Glan-Taylor tipo poliarizatorius,  $P_2$  –  $\lambda/4$  banginė plokštelė.

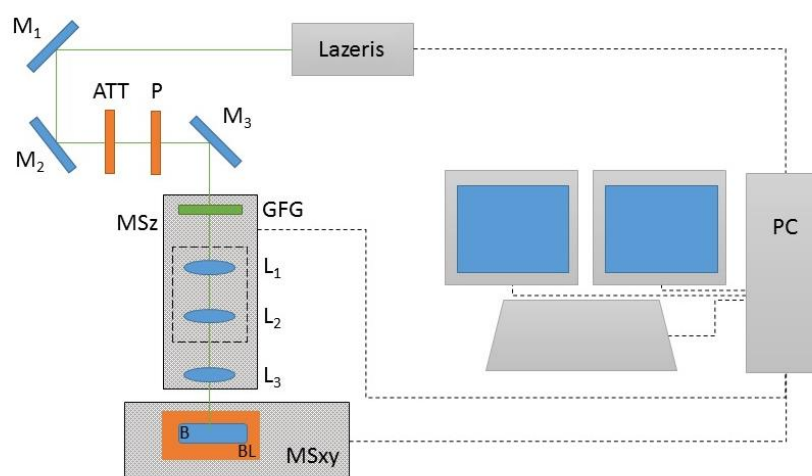


2.3.1 pav. Principinė eksperimento schema trečiojo etapo metu

Keičiant motorizuoto staliuko MS poziciją z (pluošto sklaidimo) kryptimi fiksuojamas skersinis intensyvumo pasiskirstymas ties kiekviena z padėtimi. Gauti rezultatai apdorojami MatLab (The MathWorks, Inc.) programa, kuria gaunami trimačiai intensyvumo pasiskirstymo paveikslai.

## 2.4 Sistema pažeidimų formavimui ultratrumpaisiais impulsais

Ketvirtojo etapo metu tūrinės geometrinės fazės gardelė formuojamu impulsiniu Airy pluoštu buvo inicijuojami paviršiniai (metalo ruošinyje) ir tūriniai (skaidraus dielektriko ruošinyje) pažeidimai. Principinė eksperimento schema pavaizduota 2.4.1 paveiksle.



2.4.1 pav. Principinė eksperimento schema ketvirtojo etapo metu

Naudotas lazeris Pharos (UAB MGF Šviesos konversija), kurio išvadinė galia  $P_{\text{out}} = 6 \text{ W}$ , impulsų pasikartojimo dažnis  $f = 200 \text{ kHz}$ , emituojamas bangos ilgis  $\lambda = 1028 \text{ nm}$ , impulso trukmė  $\Delta t = 5 \text{ ps}$ . M – veidrodžiai, ATT – atenuatorius, P –  $\lambda/4$  banginė plokštelė, GFG – geometrinės fazės gardelė.  $L_1$  ir  $L_2$  sudaro  $4f$  optinę sistemą, kuri sumažina skersinius suformuoto pluošto matmenis. Lęšis  $L_3$  atlieka suformuoto pluošto Furje transformaciją. GFG,  $L_1$ ,  $L_2$  ir  $L_3$  pritaisyti ant motorizuoto staliuko MSz, judančio z kryptimi (ANT130-L-ZS, Aerotech Inc.). Visi šie optiniai elementai buvo sudėti į cilindrinį laikiklį. Ant motorizuoto staliuko MSxy (ANT130-XY, Aerotech Inc.), judančio x ir y kryptimis, padėtas bandinių laikiklis BL, ant kurio padėtas bandinys B.

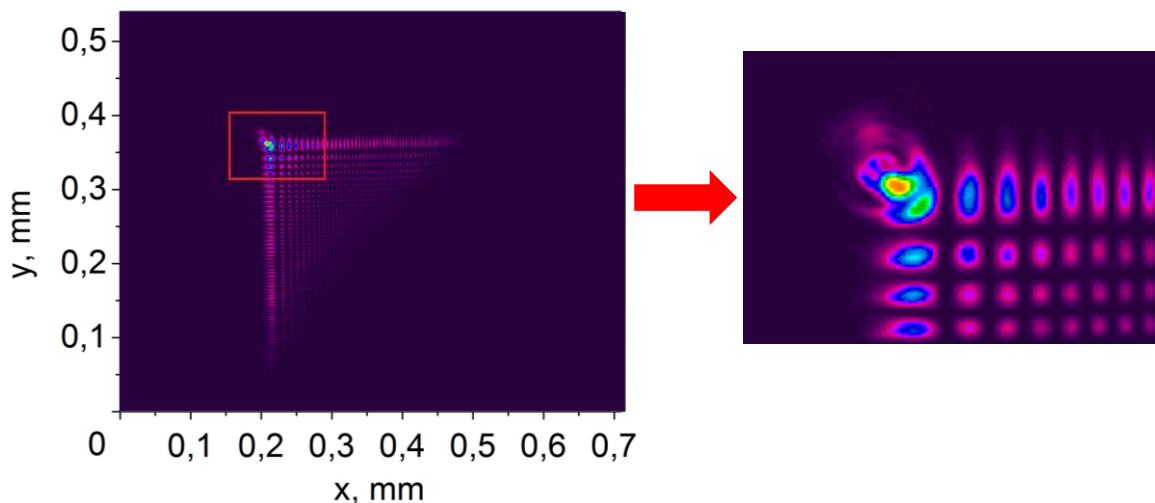
### 3 Eksperimento rezultatai

#### 3.1 Airy pluošto generavimas erdviu šviesos moduliatoriumi

Fazinės kaukės Airy pluoštui generuoti buvo apskaičiuotos MatLab (The MathWorks, Inc.) programa pagal (5) formulę. Buvo apskaičiuotos trys fazinės kaukės, kai  $a = 50, 100$  ir  $360$  (Priedas Nr. 1, kaukės Nr. 2-4).

Įkėlus šias fazines kaukes į programą Application Software 3.0 (HOLOEYE Photonics AG), kuria valdomas šviesos moduliatorius, kaukės buvo pritaikytos visam moduliatoriaus ekrano dydžiui (ekrano dydis  $1080 \times 1920$  pikselių, MatLab programa apskaičiuotos kaukės dydis  $1080 \times 1080$  pikselių) ir pridėta korekcinė kaukė (Priedas Nr. 1, kaukė Nr. 1).

Skenuojant suformuotą pluoštą  $z$  (pluošto sklidimo) kryptimi pastebėta, kad formuojasi taisyklingas Airy pluoštas, tačiau nedifragavusi nulinės eilės pluošto dalis susifokusuoja ir interferuoja su Airy pluoštu smarkiai iškraipydama pagrindinę pluošto smailę (3.1.1 pav.).



**3.1.1 pav.** Airy pluošto intensyvumo skirstinys už  $4f$  sistemos. Kairėje visas pluošto intensyvumo skirstinio vaizdas, dešinėje – priartinta sritis pažymėta raudonai kairėje

Nedifragavusį nulinės eilės pluoštą galima atskirti nuo sugeneruoto Airy pluošto prie Airy fazinės kaukės pridėjus tiesiškai kintančią fazinę kaukę. Matematiškai tokios kaukės fazinis vėlinimas yra aprašomas formule:

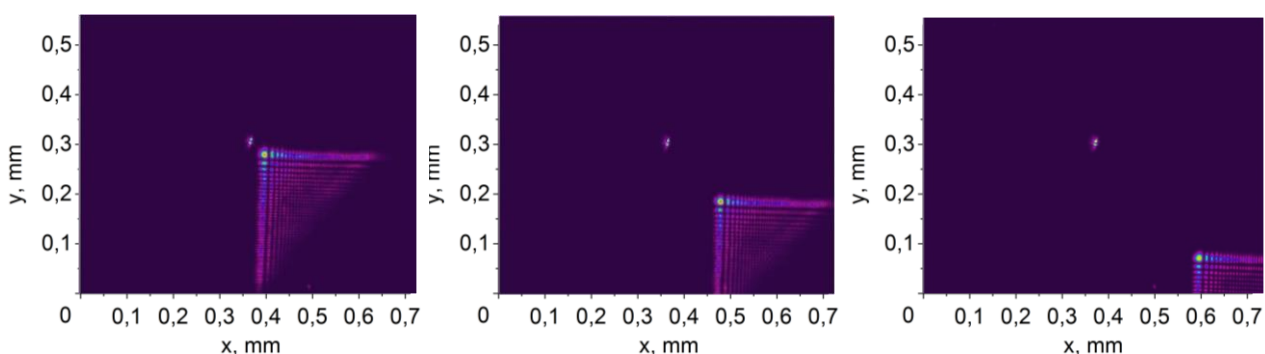
$$\varphi_{ig} = b(x_{OE} + y_{OE}); \quad (14)$$

kur  $b$  – parametras nusakantis fazės vėlinimo statumą. Jeigu apibrėžiame, kad  $\varphi_{ig}$  kinta intervale  $[0, 2\pi]$ , tai gauname laiptuotą fazinę kaukę, kur parametras  $b$  kartu nurodo ir kaukės periodą. Pridėjus tokią laiptuotą kaukę prie turimos Airy kaukės gauname tokią išraišką:

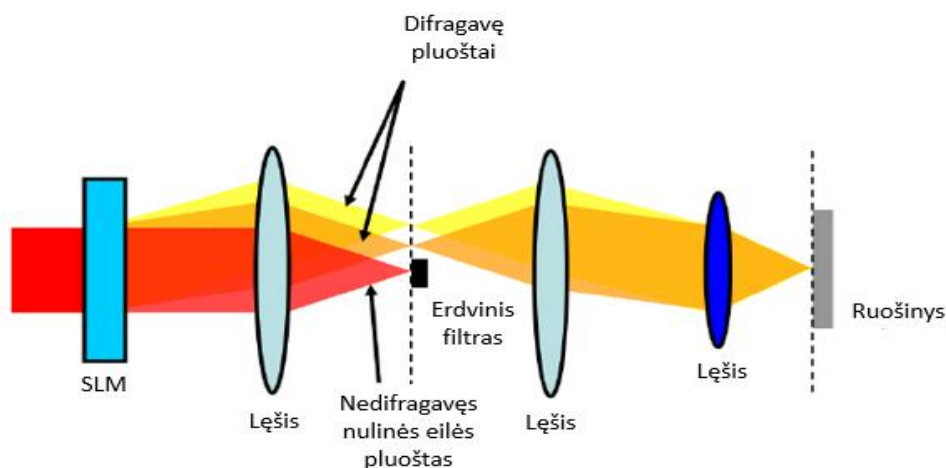


$$\varphi = a(x_{OE}^3 + y_{OE}^3) + b(x_{OE} + y_{OE}). \quad (15)$$

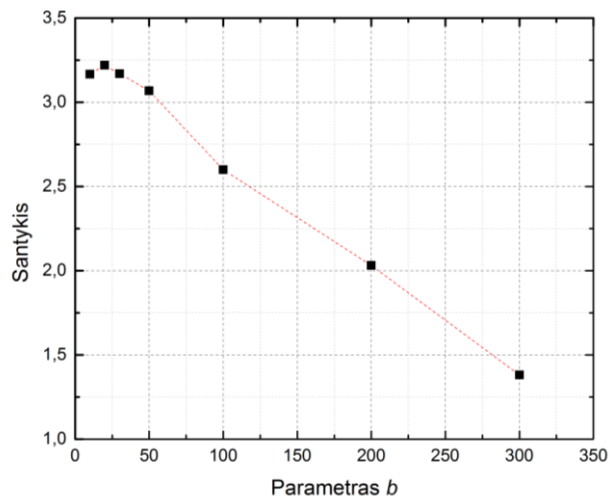
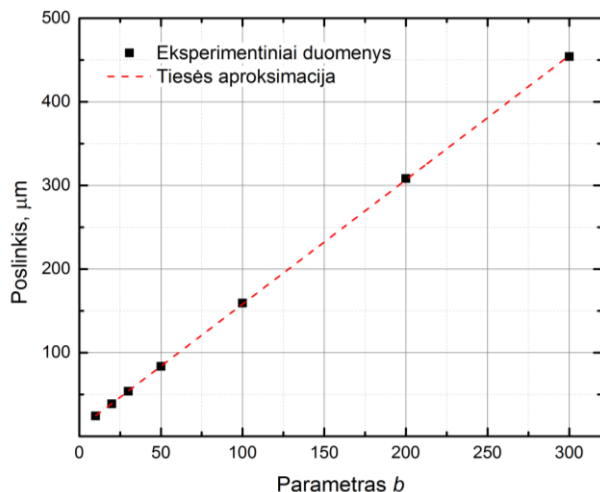
Generuojant Airy pluoštą fazine kauke apskaičiuota pagal (15) formulę, Airy pluoštas bus paslinktas į šoną (3.1.2 pav.), o nedifragavusį pluoštą galėsime užblokuoti  $4f$  sistemoje (3.1.3 pav.). Didėjant kaukės parametrai  $b$  Airy pluošto paslinkimas nuo nedifragavusio pluošto didėja tiesiškai (3.1.4 pav. kairėje), o Airy pluošto pagrindinės smailės ir nedifragavusio pluošto intensyvumo santykis mažėja – ku toliau pluoštas nunešamas, tuo nedifragavusio pluošto intensyvumas didėja (3.1.4 pav. dešinėje).



**3.1.2 pav.** Sugeneruotas Airy pluoštas prie Airy kaukės pridėjus tiesiškai kintančią fazinę kaukę, kai  $a = 100$ ,  $b = 20, 100$  ir  $200$

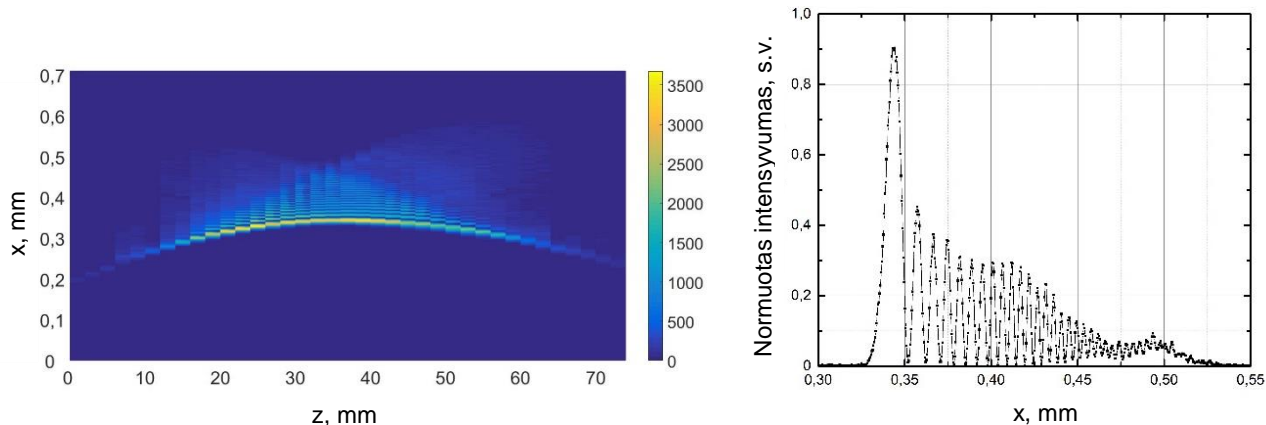


**3.1.3 pav.** Erdvinis suformuoto pluošto filtravimas, kai nedifragavęs nulinės eilės pluoštas ir sugeneruotas pluoštas sklinda skirtingais kampais ir už pirmojo  $4f$  sistemos lęšio yra atvaizduojami skirtinguose erdvės taškuose



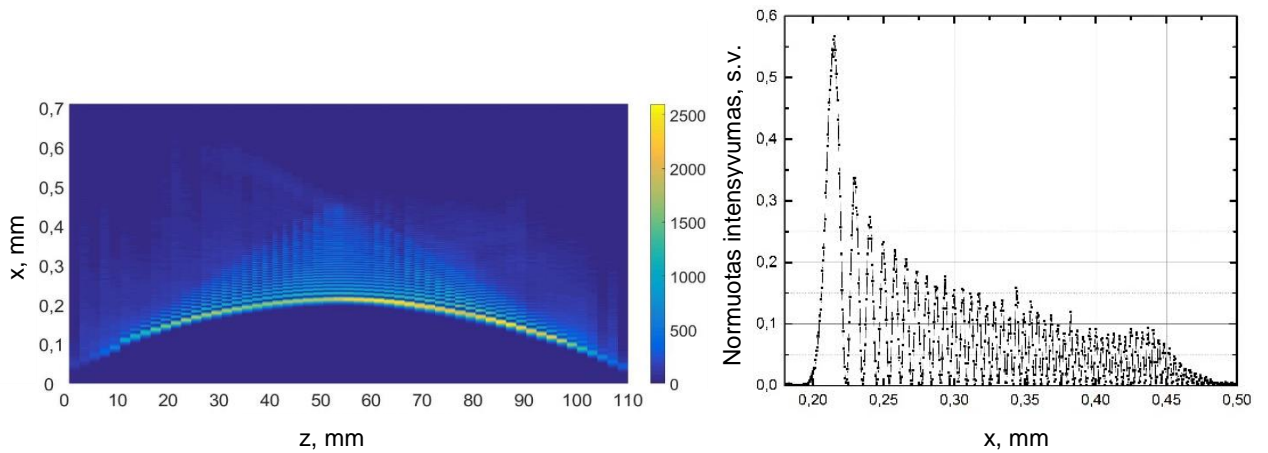
**3.1.4 pav.** Kairėje: Airy pluošto poslinkio nuo nedifragavusio pluošto priklausomybė nuo tiesiškai kintančios fazinės kaukės parametro  $b$ . Dešinėje: Airy pluošto smailės, kurios intensyvumas didžiausias, ir nedifragavusio pluošto intensyvumo santykiai, keičiantis tiesiškai kintančios fazinės kaukės parametru  $b$

Uždengus nedifragavusį nulinės eilės pluoštą stebėtas taisyklingas Airy pluoštas visame sklaidimo atstume (3.1.5-7 pav.).

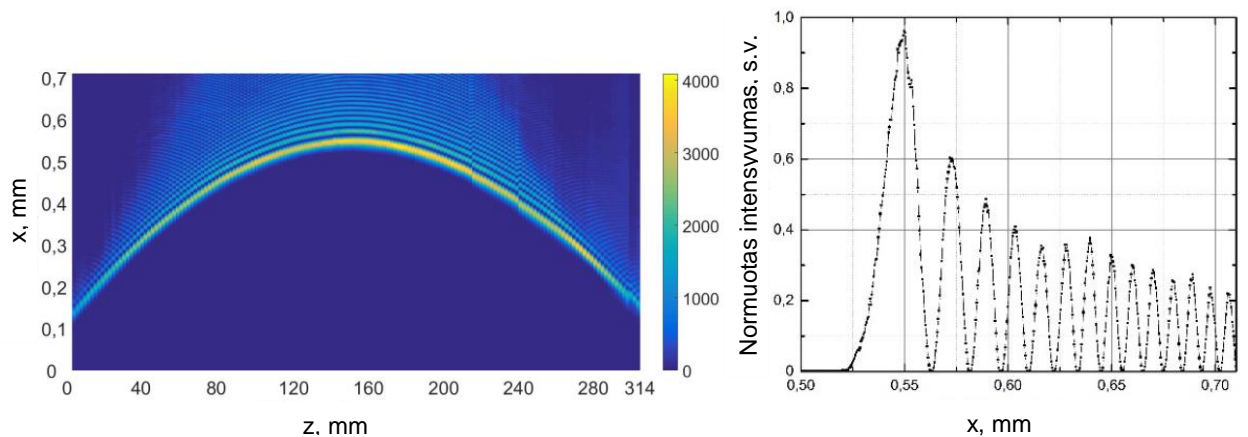


**3.1.5 pav.** Kairėje Airy pluoštas sugeneruotas kauke pagal (15) formulę, kai  $a = 50$ ,  $b = 200$  (Priedas Nr. 1, kaukė Nr. 5), dešinėje pluošto intensyvumo skerspjūvis ties intensyviausia smaile





**3.1.6 pav.** Kairėje Airy pluoštas sugeneruotas kauke pagal (15) formulę, kai  $a = 100$ ,  $b = 200$  (Priedas Nr. 1, kaukė Nr. 6), dešinėje pluošto intensyvumo skerspjūvis ties intensyviausia smaile



**3.1.7 pav.** Kairėje Airy pluoštas sugeneruotas kauke pagal (15) formulę, kai  $a = 360$ ,  $b = 200$  (Priedas Nr. 1, kaukė Nr. 7), dešinėje pluošto intensyvumo skerspjūvis ties intensyviausia smaile

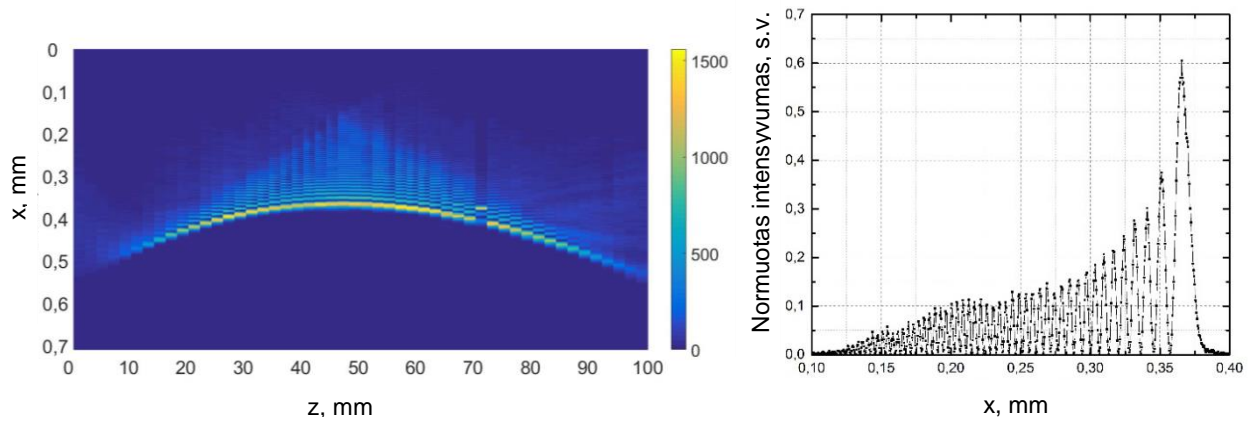
Nedifragavusį nulinės eilės pluoštą taip pat galima atskirti nuo sugeneruoto Airy pluošto prie Airy fazinės kaukės pridėjus kvadratu kintančią fazinę kaukę. Matematiškai tokios kaukės fazinis vėlinimas yra aprašomas formule:

$$\varphi_{kg} = c(x_{OE}^2 + y_{OE}^2), \quad (16)$$

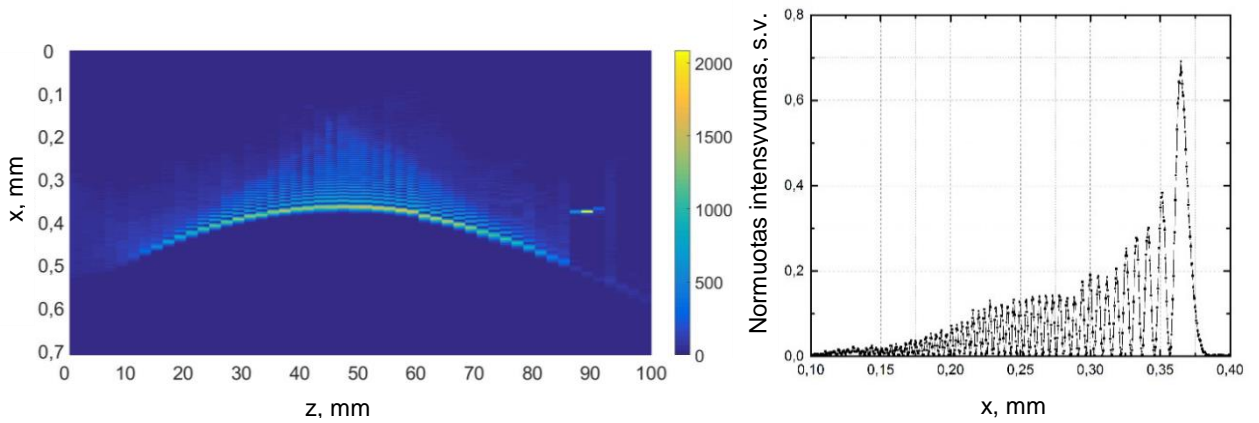
kur  $c$  – parametras nusakantis fazės vėlinimo statumą. Jeigu apsibrėžiame, kad  $\varphi_{kg}$  kinta intervale  $[0, 2\pi]$ , tai gauname laiptuotą fazinę kaukę, kur parametras  $c$  kartu nurodo ir kaukės periodą. Pridėjus tokią kaukę prie turimos Airy kaukės gauname tokią išraišką:

$$\varphi = a(x_{OE}^3 + y_{OE}^3) + c(x_{OE}^2 + y_{OE}^2) \quad (17)$$

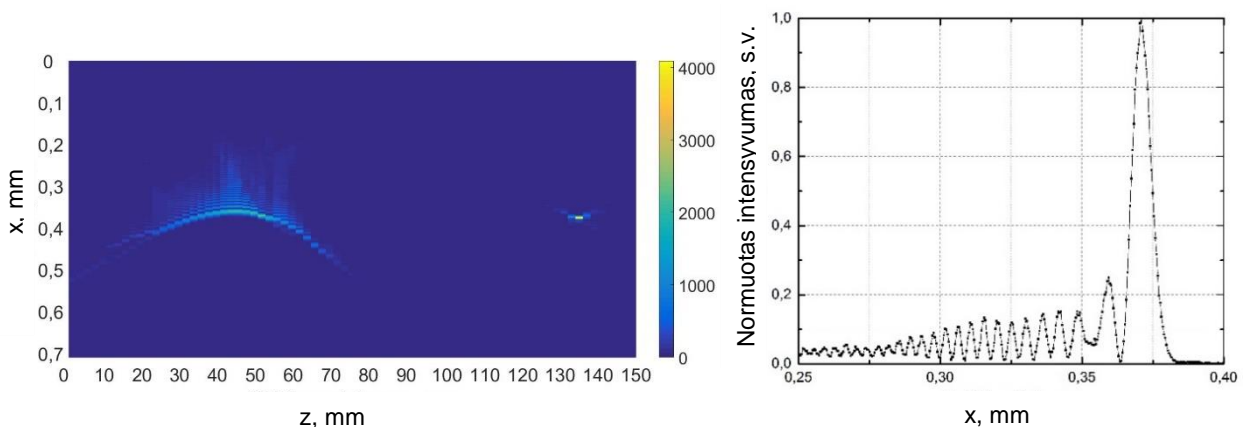
Generuojant Airy pluoštą fazine kauke apskaičiuota pagal (17) formulę, Airy pluoštas buvo paslinktas  $z$  kryptimi, tad nepasireiškė pagrindinės Airy pluošto smailės ir nedifragavusio pluošto interferencija (3.1.8-10 pav.).



**3.1.8 pav.** Kairėje Airy pluoštas sugeneruotas kauke pagal (17) formulę, kai  $a = 100$ ,  $c = 100$  (Priedas Nr. 1, kaukė Nr. 8). Dešinėje pluošto intensyvumo skerspjūvis ties intensyviausia smaile

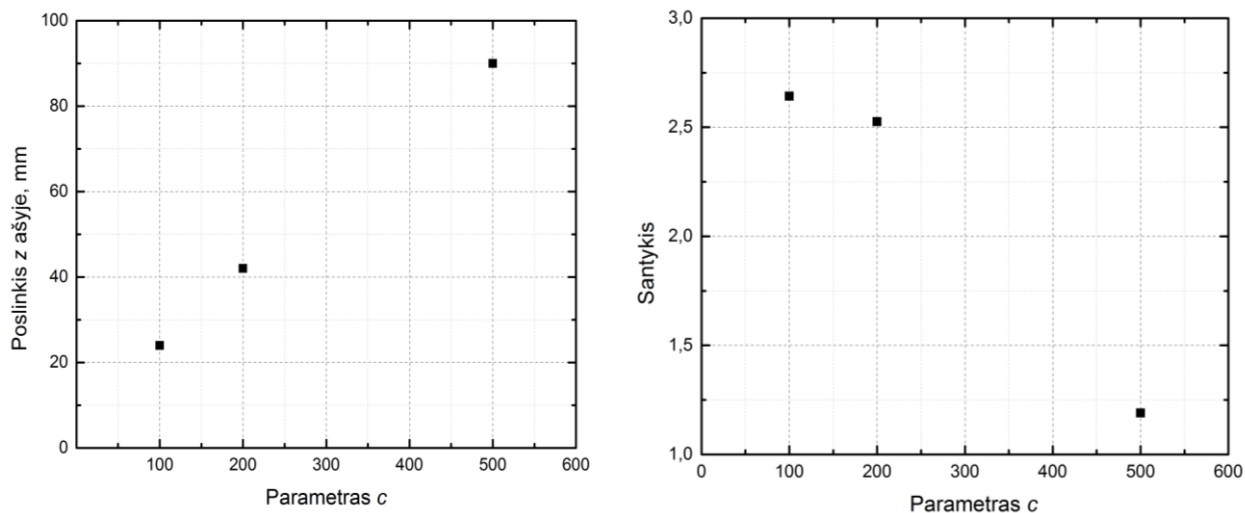


**3.1.9 pav.** Kairėje Airy pluoštas sugeneruotas kauke pagal (17) formulę, kai  $a = 100$ ,  $c = 200$  (Priedas Nr. 1, kaukė Nr. 9). Dešinėje pluošto intensyvumo skerspjūvis ties intensyviausia smaile



**3.1.10 pav.** Kairėje Airy pluoštas sugeneruotas kauke pagal (17) formulę, kai  $a = 100$ ,  $c = 500$  (Priedas Nr. 1, kaukė Nr. 10). Dešinėje pluošto intensyvumo skerspjūvis ties intensyviausia smaile

Didėjant kvadratu kintančios fazinės kaukės parametru  $c$ , Airy pluošto poslinkis  $z$  kryptimi didėja (3.1.11 pav. kairėje), o Airy pluošto pagrindinės smailės ir nedifragavusio pluošto intensyvumo santykis mažėja – kuo didesnis poslinkis, tuo nedifragavusio pluošto intensyvumas didėja (3.1.11 pav. dešinėje).



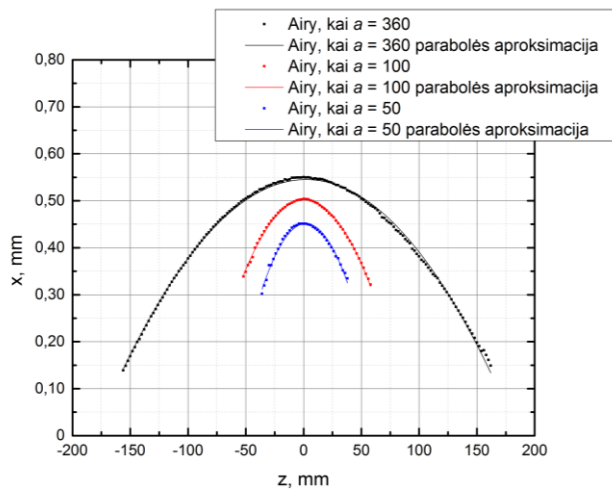
**3.1.11 pav.** Kairėje: Airy pluošto poslinkio nuo nedifragavusio pluošto priklausomybė nuo kvadratu kintančios fazinės kaukės parametro  $c$ . Kairėje: Airy pluošto smailės, kurios intensyvumas didžiausias, ir nedifragavusio pluošto intensyvumo santykiai, keičiantis kvadratu kintančios fazinės kaukės parametru  $c$

Kaip minėta anksčiau, Airy pluošto pagrindinės smailės formavimosi erdvėje trajektorija yra parabolinė. Radaus koeficientą esantį prie parabolės lygties kvadratinio nario, kai teorinė parabolės kreivė atitinka sugeneruoto Airy pluošto pagrindinės smailės trajektoriją – turėsime skaitinį trajektorijos apibūdinimą.

Prie Airy pluošto pagrindinės smailės trajektorijos buvo pritaikyta nepilnoji kvadratinė parabolės lygtis:

$$f(x) = mx^2, \quad (18)$$

kur narys  $m$  aprašo parabolės šakų kreivumą. Nustatyta, kad didėjant Airy parametru  $a$  parabolės koeficientas  $m$  mažėja – pagrindinės smailės trajektorijos skersinis poslinkis mažėja (3.1.12 pav., lentelė Nr. 1). Atitinkamai, kuo mažesnis poslinkis, tuo trajektorija ilgesnė.



**3.1.12 pav.** Airy pluošto trajektorijos ir pritaikytos kvadratinės parabolės funkcijos

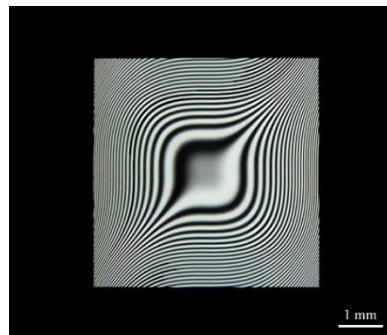
**Lentelė Nr. 1.** Parabolės koeficientai

Airy koeficientas $a$	Parabolės koeficientas $m$ (absoliutinė reikšmė)
50	0,21907
100	0,12819
360	0,03628

### 3.2 Geometrinės fazės gardelė generuojamo pluošto charakterizavimas

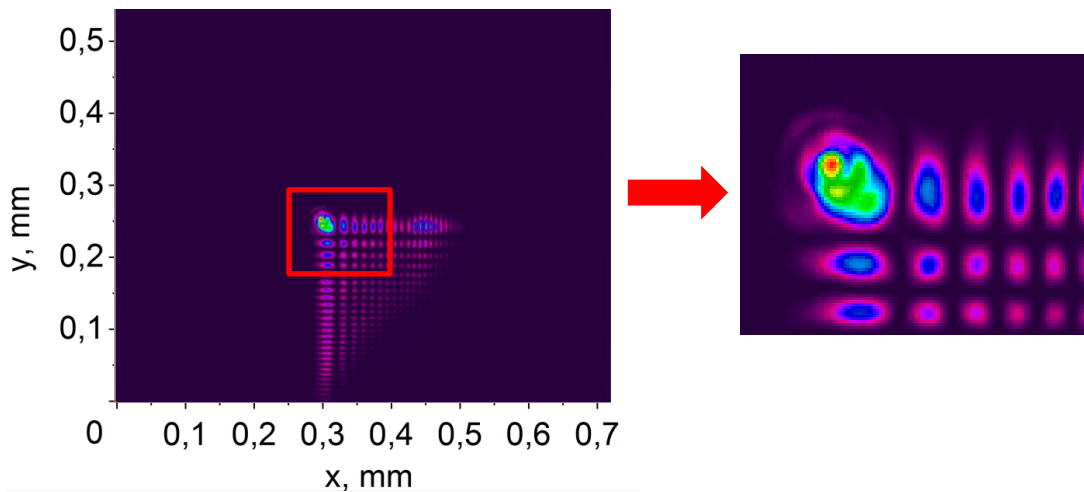
Pagal fazines kaukes, apskaičiuotas ir patikrintas pirmojo eksperimento etapo metu, ultratrumpaisiais lazerio impulsais užrašytos tūrinės geometrinės fazės gardelės. Jos buvo užrašytos lydyto kvarco - UVFS (*angl.* UV grade fused silica) padėkluose, nes šioje medžiagoje tiesioginio užrašymo ultratrumpaisiais impulsais metu susiformuoja nanogardelės pasižyminčios dvejopu lūžiu.

Pirmiausia užrašytos gardelės Airy pluoštui generuoti pagal (5) formulę 532 nm bangos ilgiui (3.2.1 pav.).



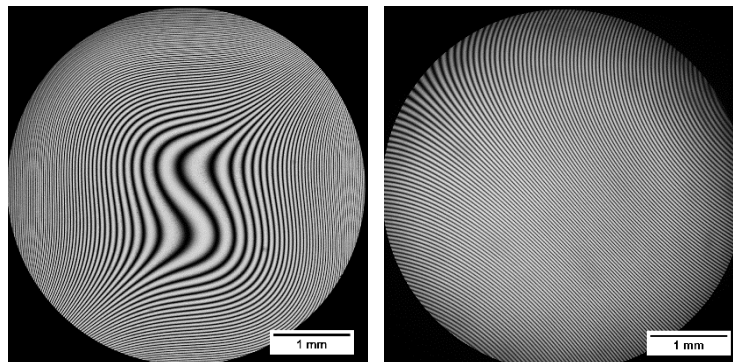
**3.2.1 pav.** Geometrinės fazės gardelė Airy pluoštui generuoti, kai  $a = 360$ . Skirta 532 nm bangos ilgiui. Nuotrauka daryta optiniu mikroskopu, patalpinus optinį elementą tarp sukryžmintų poliarizatorių

Generuojant Airy pluoštą geometrinės fazės gardelė, kai  $a = 360$  pastebėta, kad Airy pluoštas, taip pat kaip ir generuojant erdvinio šviesos modulatoriumi, interferuoja su nedifragavusiu nulinės eilės pluoštu smarkiai iškraipydamas pagrindinę Airy pluošto smailę (3.2.2 pav.).



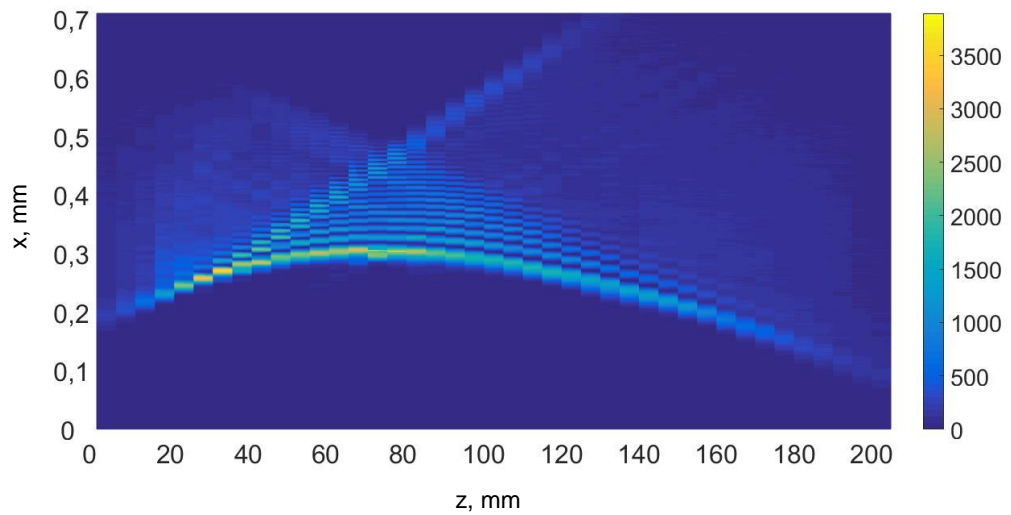
**3.2.2 pav.** Skersinis Airy pluošto intensyvumo skirstinys. Kairėje visas pluošto skersinio intensyvumo vaizdas, dešinėje – priartinta sritis pažymėta raudonai kairėje

Siekiant išvengti interferencijos tarp nedifragavusio pluošto ir pagrindinės Airy pluošto smailės, buvo užrašytos gardelės Airy pluoštui generuoti su tiesiškai kintančia fazine gardele pagal (15) formulę 532 nm bangos ilgiui (3.2.3 pav.).

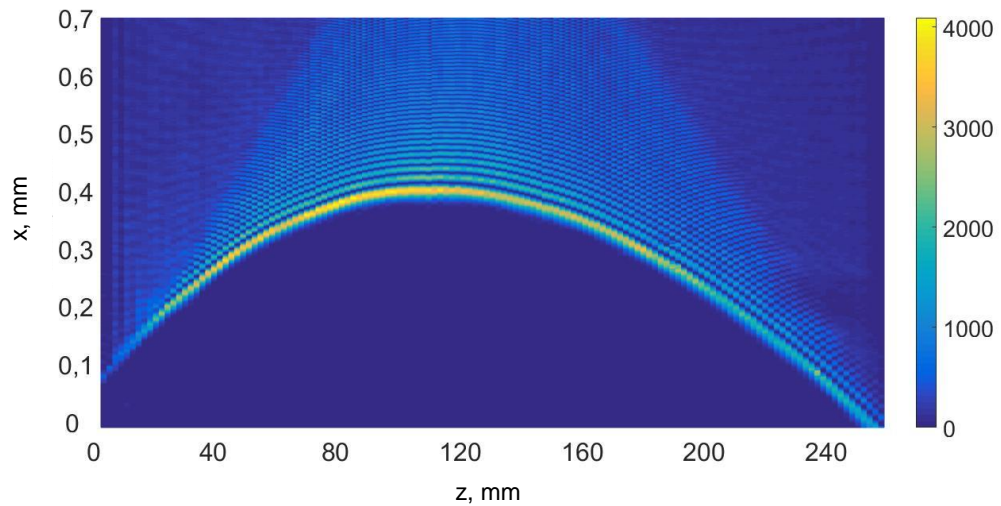


**3.2.3 pav.** Geometrinės fazės gardelės Airy pluoštui generuoti su tiesiškai kintančia fazine gardele, kai  $a = 360$ ,  $b = 200$  (kairėje),  $a = 100$ ,  $b = 2000$  (dešinėje). Skirtos 532 nm bangos ilgiui. Nuotraukos darytos optiniu mikroskopu, patalpinus optinius elementus tarp sukryžmintų poliarizatorių

Generuojant Airy pluoštą geometrinės fazės gardelėmis su tiesiškai kintančia fazine gardele stebėtas taisyklingas Airy pluoštas visame sklidimo atstume (3.2.4-5 pav.).



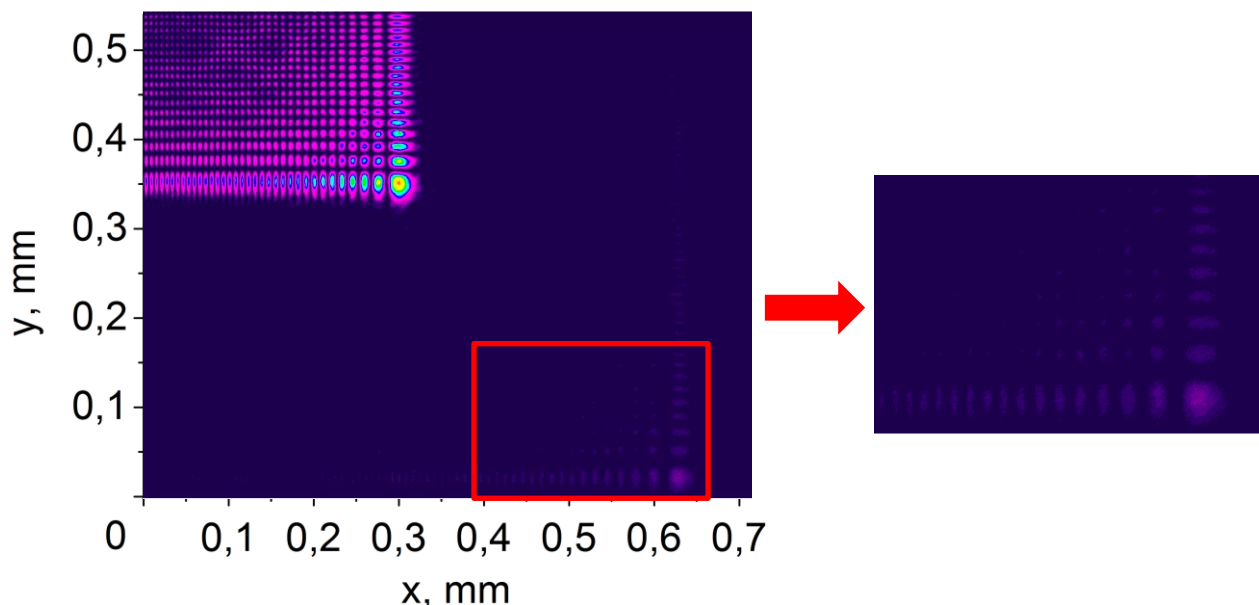
**3.2.4 pav.** Intensyvumo skirstinys pluošto sklaidimo kryptimi, kai  $a = 360$ ,  $b = 200$



**3.2.5 pav.** Intensyvumo skirstinys pluošto sklaidimo kryptimi, kai  $a = 100$ ,  $b = 2000$

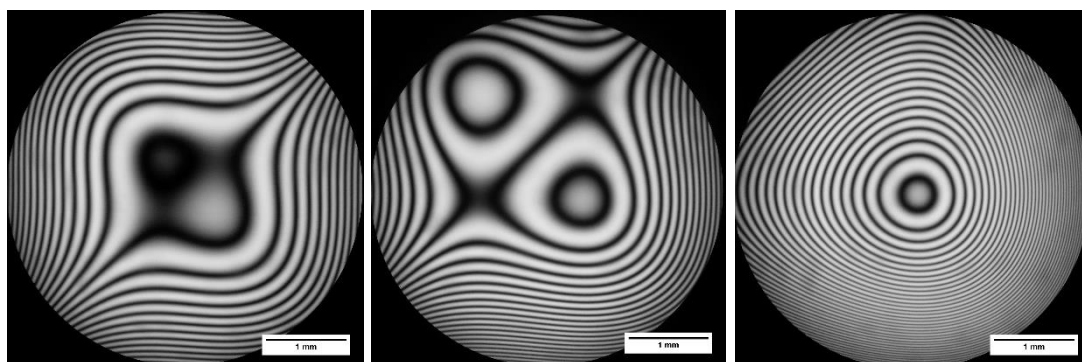
Pastebėta, kad kai tiesiškai kintančios fazinės gardelės koeficientas  $b = 2000$  – sugeneruoti šalutiniai pluoštai (3.2.6 pav.), tačiau jų intensyvumas toks mažas, kad mikroapdirbimo metu jų galima nepaisyti.





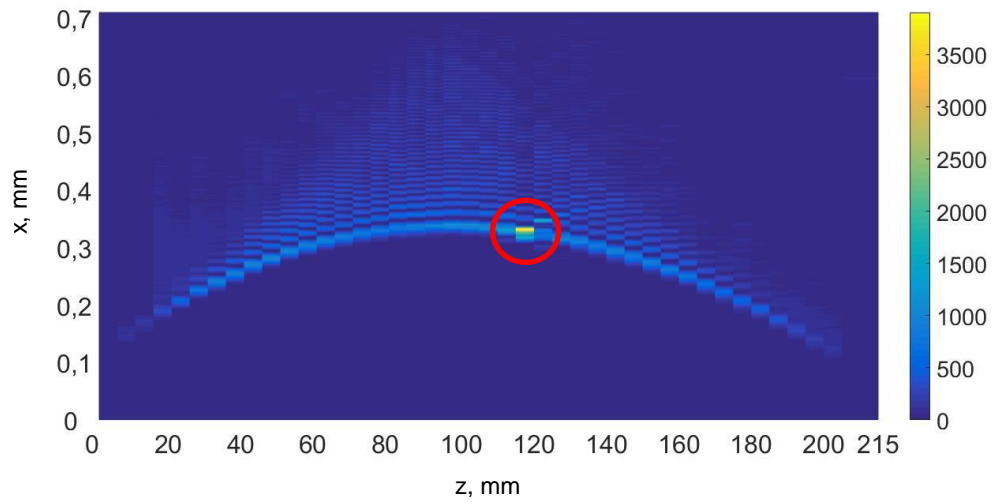
**3.2.6 pav.** Airy pluošto intensyvumo skirstinys, kai  $a = 100$ ,  $b = 2000$ . Apatiniame dešiniajame paveikslo kampe matyti šalutinis Airy pluoštas. Kairėje visas intensyvumo skirstinio vaizdas, dešinėje – priartinta sritis pažymėta raudonai kairėje

Airy pluošto, kuris būtų paslinktas  $z$  ašyje nuo nedifragavusio pluošto, generavimui buvo užrašytos gardelės Airy pluoštui generuoti su kvadratu kintančia fazine gardele pagal (17) formulę 532 nm bangos ilgiui ir 1030 nm bangos ilgiui (3.2.7 pav.).

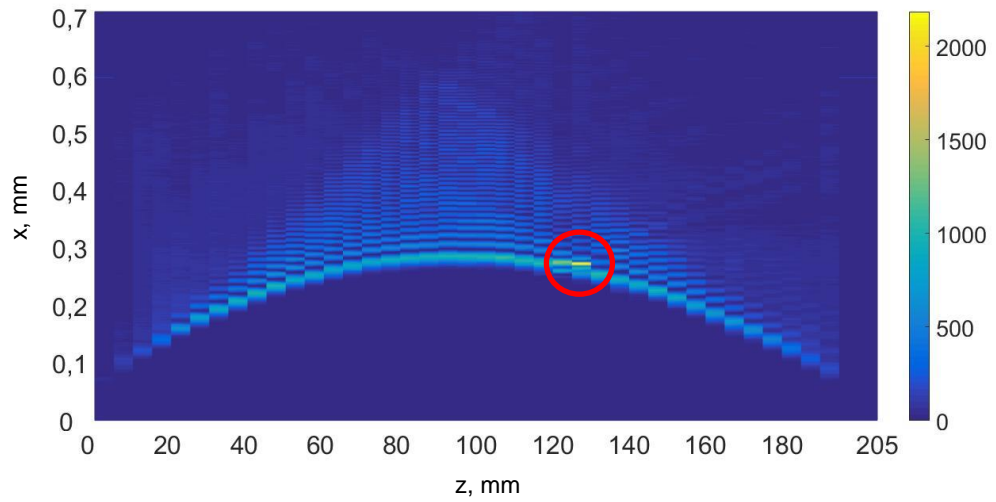


**3.2.7 pav.** Geometrinės fazės gardelės Airy pluoštui generuoti su kvadratu kintančia fazine gardele, kai  $a = 100$ ,  $c = 100$  (kairėje),  $a = 100$ ,  $c = 200$  (centre),  $a = 100$ ,  $c = 500$  (dešinėje). Skirtos 532 nm bangos ilgiui. Nuotraukos darytos optiniu mikroskopu, patalpinus optinius elementus tarp sukryžmintų poliarizatorių

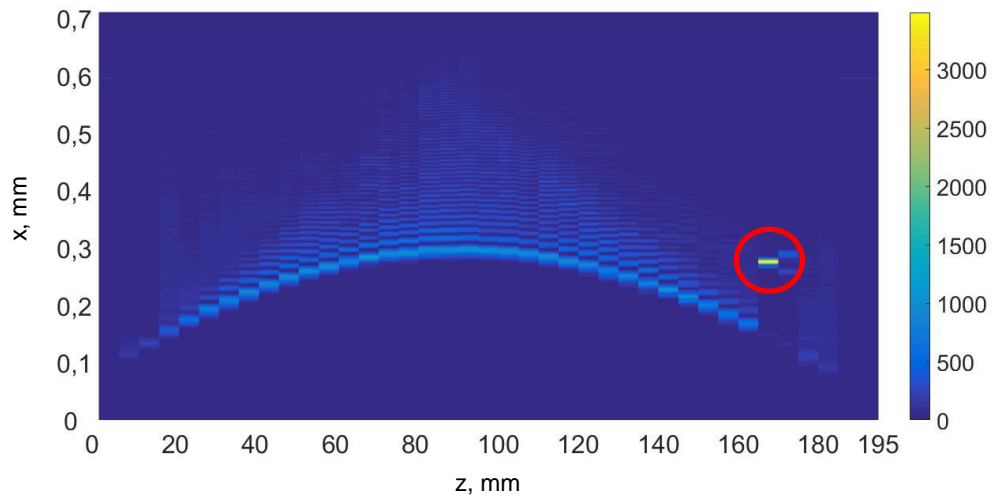
Generuojant Airy pluoštą geometrinės fazės gardelėmis su kvadratu kintančia fazine gardele matyti, kad Airy pluoštas yra paslinktas pluošto sklidimo kryptimi prieš sufokusuotą nedifragavusio pluošto dalį (3.2.10-12 pav.).



**3.2.10 pav.** Intensyvumo skirstinys pluošto sklaidimo kryptimi, kai  $a = 100, c = 100$



**3.2.11 pav.** Intensyvumo skirstinys pluošto sklaidimo kryptimi, kai  $a = 100, c = 200$

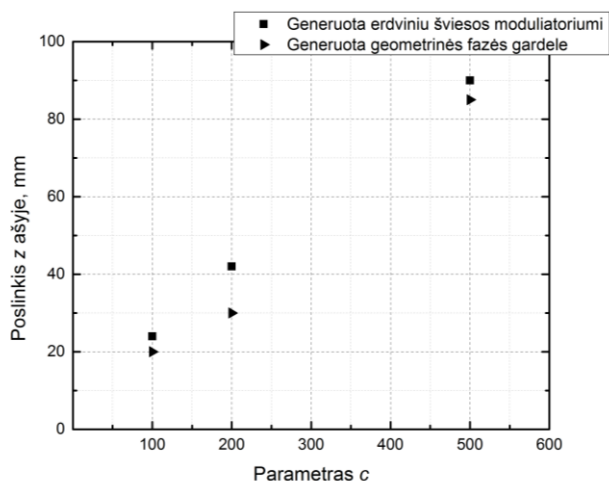


**3.2.12 pav.** Intensyvumo skirstinys pluošto sklaidimo kryptimi, kai  $a = 100, c = 500$

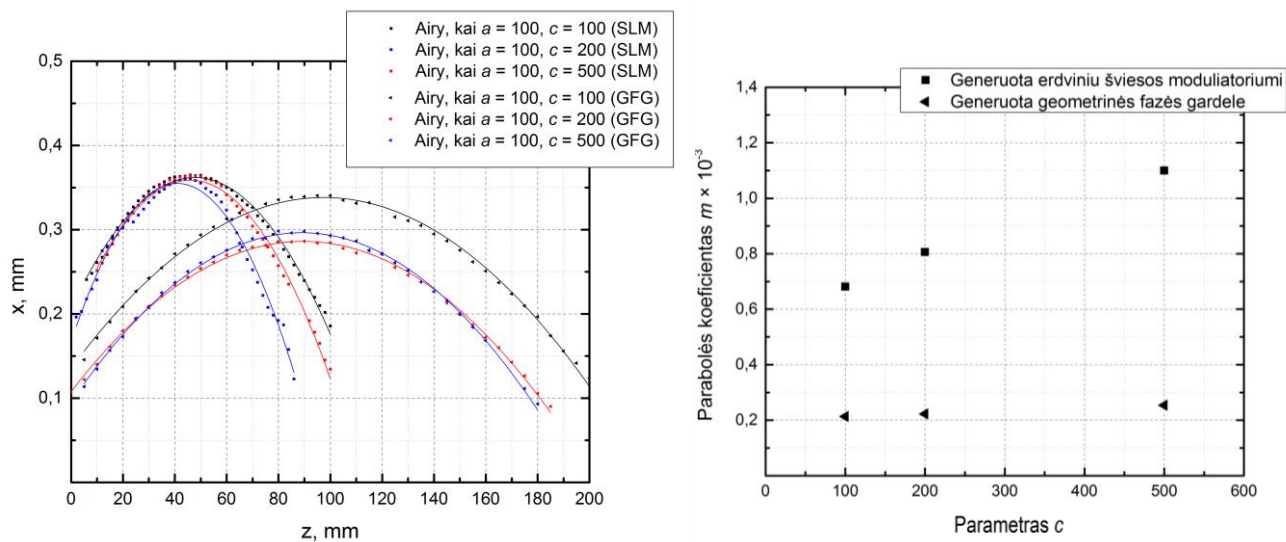


Nustatyta, kad didėjant kvadratu kintančios fazinės kaukės parametru  $c$ , Airy pluošto poslinkis  $z$  kryptimi didėja. Generuojant Airy pluoštą geometrinės fazės gardele parametras  $c$  turi būti didesnis, nei erdviniam šviesos moduliatoriui, kad būtų pasiektas toks pat poslinkis  $z$  ašyje (3.2.13 pav.).

Rezultatai rodo, kad didėjant parametru  $c$ , parabolės koeficientas  $m$  didėja (3.2.14 pav.). Generuojant Airy pluoštą erdvinio šviesos moduliatoriumi poslinkis  $z$  ašyje ir parabolės koeficientas  $m$  yra didesnis, nei generuojant Airy pluoštą geometrinės fazės gardele, esant tokioms pat parametru  $a$  ir  $c$  reikšmėms.



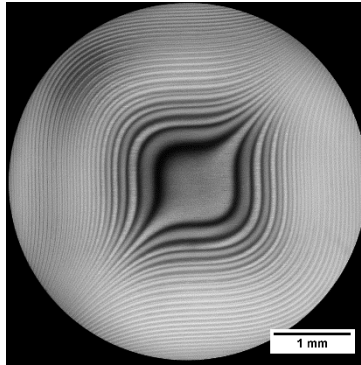
**3.2.13 pav.** Airy pluošto poslinkio  $z$  ašyje priklausomybė nuo parametro  $c$  ir palyginimas, kaip keičiasi poslinkis nuo pluošto generavimo metodo



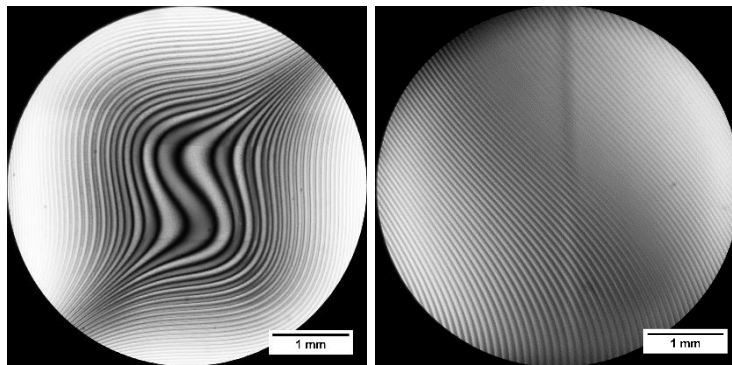
**3.2.14 pav.** Kairėje Airy pluošto pagrindinės smailės trajektorijos ir pritaikytos kvadratinės parabolės funkcijos. Dešinėje parabolės koeficiento  $m$  palyginimas

### 3.3 Pažaidų formavimas ant medžiagos paviršiaus ir medžiagos tūryje

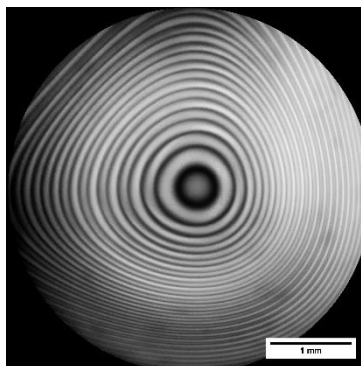
Pažaidų formavimas buvo atliekamas geometrinės fazės gardelėmis, skirtomis 1030 nm bangos ilgiui (3.3.1-3 pav.).



**3.3.1 pav.** Geometrinės fazės gardelė Airy pluoštui generuoti, kai  $a = 360$ . Nuotrauka daryta optiniu mikroskopu, patalpinus optinį elementą tarp sukryžmintų poliarizatorių



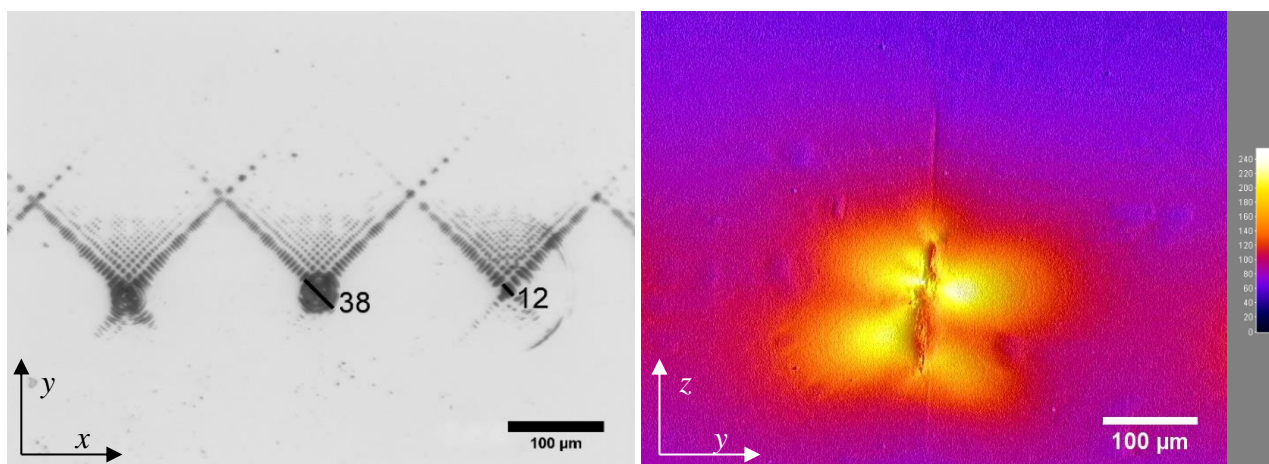
**3.3.2 pav.** Geometrinės fazės gardelės Airy pluoštui generuoti su tiesiškai kintančia fazine gardele, kai  $a = 360$ ,  $b = 200$  (kairėje),  $a = 100$ ,  $b = 2000$  (dešinėje). Nuotraukos darytos optiniu mikroskopu, patalpinus optinius elementus tarp sukryžmintų poliarizatorių



**3.3.3 pav.** Geometrinės fazės gardelė Airy pluoštui generuoti su kvadratu kintančia fazine gardele, kai  $a = 100$ ,  $c = 500$ . Nuotrauka daryta optiniu mikroskopu, patalpinus optinį elementą tarp sukryžmintų poliarizatorių

Generuojant impulsinį Airy pluoštą be papildomų gardelių, kai  $a = 360$ , Furje transformaciją atliekančio lęšio židinio nuotolis  $f = 18$  mm,  $4f$  atvaizdavimo sistemos nėra. Formuojant pažaidas chromo dangos paviršiuje matyti, kad toje plokštumoje, kur sufokusuojamas nedifragavęs impulsinis pluoštas, suformuotos pažaidos skersmuo (pagrindinės impulsinio Airy pluošto smailės srityje) apie 3 kartus didesnis nei plokštumoje, kurioje nedifragavęs impulsinis pluoštas išfokusuotas ir galima išskirti pagrindinę impulsinio Airy pluošto smailę (3.3.4 pav. kairėje).

Formuojant pažaidas VIOSIL tipo kvarciniame stikle (itin mažai priemaišų turintis stiklas,  $> 90$  % pralaidumas 200-1100 nm bangų intervale), impulsinio Airy pluošto sukuriamos pažaidos ilgis  $\sim 289$   $\mu\text{m}$ . Skersinis pažaidos poslinkis siekia  $\sim 17$   $\mu\text{m}$ . Pusė suformuotos pažaidos yra tolygi, o kita pusė – chaotiškos modifikacijos, kurias lėmė nedifragavęs impulsinis pluoštas. Dėl jų buvo užblokuotas tolimesnis impulsinio Airy pluošto sklidimas ir pažaida toliau nebesiformavo. Tūrinės pažaidos nuotrauka daryta bandinį patalpinus tarp sukryžmintų poliarizatorių, paveikslo spalvos netikros (3.3.4 pav. dešinėje).

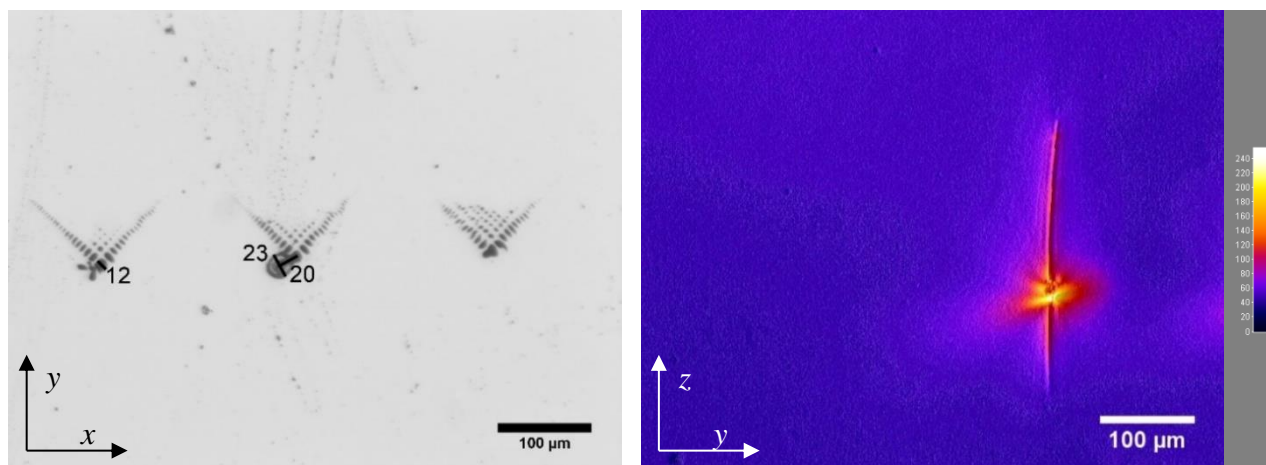


**3.3.4 pav.** Pažaidos chromo dangos paviršiuje (kairėje) ir VIOSIL tipo kvarciniame stikle (dešinėje) suformuotos impulsinio Airy pluošto be papildomų gardelių, kai  $a = 360$ . Nuotraukos darytos optiniu mikroskopu

Generuojant impulsinį Airy pluoštą su tiesiškai kintančia geometrinės fazės gardele, kai  $a = 360$ ,  $b = 200$ , Furje transformaciją atliekančio lęšio židinio nuotolis  $f = 10$  mm,  $4f$  atvaizdavimo sistemos nėra. Matyti, kad impulsinis Airy pluoštas yra paslinktas į šoną nuo nedifragavusio impulsinio pluošto per  $\sim 20$   $\mu\text{m}$ . Nedifragavusio impulsinio pluošto suformuotos pažaidos skersmuo apie 2 kartus didesnis nei pagrindinės impulsinio Airy pluošto smailės (3.3.5 pav. kairėje).

Formuojant pažaidas VIOSIL tipo kvarciniame stikle matyti, kad impulsinio Airy pluošto sukuriamos pažaidos ilgis  $\sim 286$   $\mu\text{m}$ . Skersinis pažaidos poslinkis siekia  $\sim 11$   $\mu\text{m}$ . Skersinio poslinkio ir pažaidos ilgio santykis siekia 0,04. Nedifragavusio impulsinio pluošto paveikta sritis neturėjo

žymaus poveikio tolimesniam impulsinio Airy pluošto sklidimui. Tūrinės pažaidos nuotrauka daryta bandinį patalpinus tarp sukryžmintų poliarizatorių, paveikslo spalvos netikros (3.3.5 pav. dešinėje).



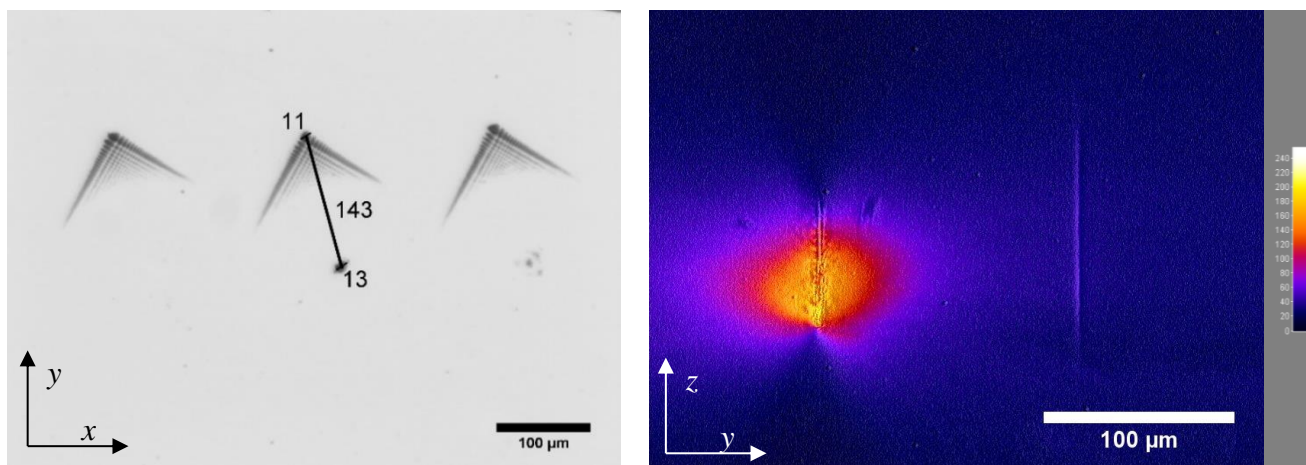
**3.3.5 pav.** Pažaidos chromo dangos paviršiuje (kairėje) ir VIOSIL tipo kvarciniame stikle (dešinėje) suformuotos impulsinio Airy pluošto su tiesine geometrinės fazės gardele, kai  $a = 360$ ,  $b = 200$ .

Nuotraukos darytos optiniu mikroskopu

Generuojant impulsinį Airy pluoštą su tiesiškai kintančia geometrinės fazės gardele, kai  $a = 100$ ,  $b = 2000$ , buvo surinkta  $4f$  sistema, kurios pirmojo lęšio židinio nuotolis  $f_1 = 40$  mm, antrojo lęšio židinio nuotolis  $f_2 = 18$  mm. Tokios optinės sistemos skersinis didinimas lygus 0,45, o išilginis - 0,2025. Furje transformaciją atliekančio lęšio židinio nuotolis  $f_3 = 4$  mm. Matyti, kad impulsinis Airy pluoštas yra paslinktas į šoną nuo nedifragavusio impulsinio pluošto per  $\sim 143$   $\mu\text{m}$ . Nedifragavusio impulsinio pluošto suformuotos pažaidos skersmuo apie 1,2 kartus didesnis nei pagrindinės impulsinio Airy pluošto smailės (3.3.6 pav. kairėje).

Formuojant pažaidas VIOSIL tipo kvarciniame stikle, impulsinio Airy pluošto sukuriama pažaidos ilgis siekia  $\sim 143$   $\mu\text{m}$ . Skersinis pažaidos poslinkis siekia  $\sim 1,5$   $\mu\text{m}$ . Skersinio poslinkio ir pažaidos ilgio santykis siekia 0,01. Nedifragavusio impulsinio pluošto paveikta sritis nutolusi nuo impulsinio Airy pluošto suformuotos pažaidos  $\sim 138$   $\mu\text{m}$ . Tūrinės pažaidos nuotrauka daryta bandinį patalpinus tarp sukryžmintų poliarizatorių, paveikslo spalvos netikros (3.3.6 pav. dešinėje).



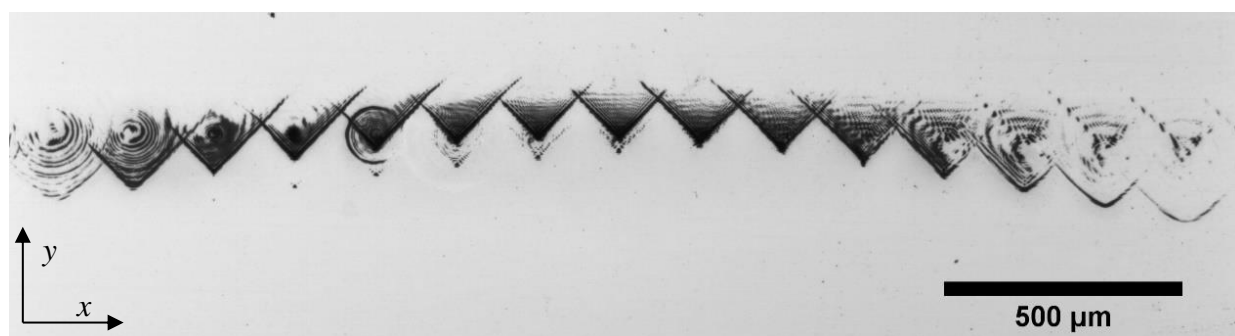


**3.3.6 pav.** Pažaidos chromo dangos paviršiuje (kairėje) ir VIOSIL tipo kvarciniame stikle (dešinėje) suformuotos impulsinio Airy pluošto su tiesine geometrinės fazės gardele, kai  $a = 100$ ,  $b = 2000$ .

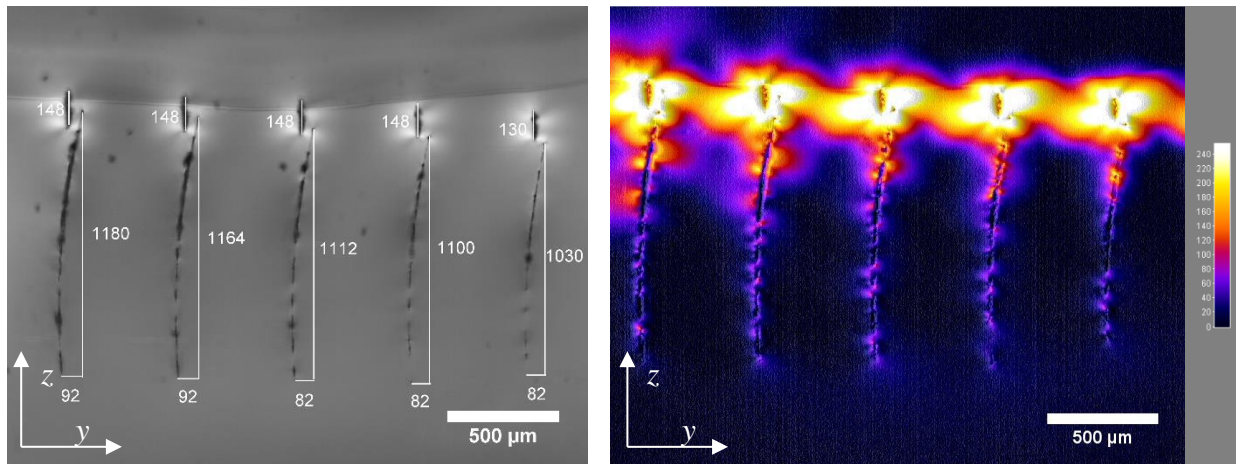
Nuotraukos daryta optiniu mikroskopu

Generuojant impulsinį Airy pluoštą su kvadratu kintančia geometrinės fazės gardele, kai  $a = 100$ ,  $c = 500$ , buvo surinkta  $4f$  sistema, kurios pirmojo lęšio židinio nuotolis  $f_1 = 40$  mm, antrojo lęšio židinio nuotolis  $f_2 = 18$  mm. Tokios optinės sistemos skersinis didinimas lygus 0,45, o išilginis - 0,2025. Furje transformaciją atliekančio lęšio židinio nuotolis  $f_3 = 4$  mm. Matyti, kad impulsinis Airy pluoštas yra paslinktas nuo nedifragavusio impulsinio pluošto, kuris sufokusuojamas impulsinio Airy pluošto sklidimo pradžioje, tad interferencija pasireiškia ne su pagrindine impulsinio Airy pluošto smaile (3.3.7 pav.).

Formuojant pažaidas VIOSIL tipo kvarciniame stikle impulsinio Airy pluošto sukuriamos pažaidos ilgis siekia vidutiniškai  $\sim 1,117$  mm. Skersinis pažaidos poslinkis siekia vidutiniškai  $\sim 86$   $\mu\text{m}$ . Skersinio poslinkio ir pažaidos ilgio santykis siekia 0,08. Nedifragavusio impulsinio pluošto paveikta sritis suformuota prieš impulsinio Airy pluošto suformuotą pažaidą, jos vidutinis ilgis  $\sim 144$   $\mu\text{m}$  (3.3.7 pav.). Nuotraukoje, kai bandinys patalpintas tarp sukryžmintų poliarizatorių matyti, kad formuojasi netolydi pažaida (3.3.87 pav. dešinėje).



**3.3.7 pav.** Pažaidos chromo dangos paviršiuje suformuotos impulsinio Airy pluošto su kvadratine geometrinės fazės gardele, kai  $a = 100$ ,  $c = 500$ . Nuotrauka daryta optiniu mikroskopu



**3.3.8 pav.** Pažaidos VIOSIL tipo kvarciniame stikle suformuotos impulsinio Airy pluošto su kvadratine geometrinės fazės gardele, kai  $a = 100$ ,  $c = 500$ . Nuotraukos darytos optiniu mikroskopu, dešinėje – patalpinus bandinį tarp sukryžmintų poliarizatorių, paveikslo spalvos netikros

## 4 Pagrindiniai rezultatai ir išvados

1. Surinkus optines sistemas, paremtas erdviu šviesos moduliatoriumi ir geometrinės fazės gardelėmis, bei sugeneravus Airy pluoštus, nustatyta, kad nedifragavęs nulinės eilės pluoštas susifokusuoja ir interferuoja su pagrindine Airy pluošto smaile.
2. Nustatyta, kad pridėjus tiesiškai arba kvadratu kintančias fazines kaukes prie Airy pluoštą generuojančios kaukės, Airy pluoštas paslenkamas atitinkamai skersai ir išilgai Airy pluošto sklidimo kryptčiai nuo sufokusuotos nedifragavusios pluošto dalies.
3. Parodyta, kad naudojant erdvinį šviesos moduliatorių parabolės koeficientas, apibūdinantis Airy pluošto pagrindinės smailės trajektorijos kreivumą, siekia 0,22.
4. Parodyta, kad naudojant geometrinės fazės gardeles ultratrumpaisiais lazerio impulsais galima suformuoti asimetrines tūrines pažaidas VIOSIL tipo kvarciniame stikle, kurių skersinio poslinkio ir pažaidos ilgio santykis siekia 0,08.

## 5 Padėka

Dėkoju darbo vadovui dr. Titui Gertui, taip pat kolegoms iš įmonės UAB Altechna R&D - Orestui Ulčinui, Mindaugui Mikučiui ir dr. Antanui Urbui – už naudingas diskusijas, vertingas žinias ir bendradarbiavimą šio tiriamojo darbo metu.

## 6 Literatūros šaltinių sąrašas

- [1] J. Durnin, J.J. Miceli, J.H. Eberly, Diffraction-free beams, *Phys. Rev. Lett.* **58**, 1499 (1987).
- [2] M. V. Berry, N. L. Balazs, Nonspreading wave packets, *Am. J. Phys.* **47**(3), (1979).
- [3] G. A. Siviloglou, J. Broky, A. Dogariu, D. N. Christodoulides, Observation of Accelerating Airy Beams, *Phys. Rev. Lett.* **99**, 213901 (2007).
- [4] G. A. Siviloglou, D. N. Christodoulides, Accelerating finite energy Airy beams, *Opt. Lett.* **32**(8), 979-981 (2007).
- [5] A. Mathis, F. Courvoisier, L. Froehly, L. Furfaro, M. Jacquot, P. Lacourt, J. M. Dudley, Micromachining along a curve: Femtosecond laser micromachining of curved profiles in diamond and silicon using accelerating beams, *App. Phys. Lett.* **101**(7), 071110 (2012).
- [6] A. Mathis, L. Froehly, L. Furfaro, M. Jacquot, J. M. Dudley, F. Courvoisier, Direct machining of curved trenches in silicon with femtosecond accelerating beams, *J. Europ. Opt. Soc. Rap. Public.* **8**, 13019 (2013).
- [7] G. A. Siviloglou, J. Broky, A. Dogariu, D. N. Christodoulides, Ballistic dynamics of Airy beams, *Opt. Lett.* **33**(3), (2008).
- [8] J. Broky, G. A. Siviloglou, A. Dogariu, D. N. Christodoulides, Self-healing properties of optical Airy beams, *Opt. Express* **16**(17), 12881 (2008).
- [9] H. Zhao, J. Lin, J. Tan, P. Jin, Multi-focus of modulated polarized Airy beam, *Opt. Laser Technol.* **81**, 107-114 (2016).
- [10] J. Wang, J. Bu, M. Wang, Y. Yang ir X. Yuan, Generation of high quality Airy beams with blazed micro-optical cubic phase plates. *Appl. Opt.*, **50**(36), 6627–6631 (2011).
- [11] B. Yalizay, B. Soylu ir S. Akturk, Optical element for generation of accelerating Airy beams. *J. Opt. Soc. Am. A*, **27**(10), 2344–2346 (2010).
- [12] D. Abdollahpour, S. Suntsov, D. G. Papazoglou ir S. Tzortzakis, Spatiotemporal Airy light bullets in the linear and nonlinear regimes. *Phys. Rev. Lett.*, **105**(25), 253901 (2010).
- [13] P. Polynkin, M. Kolesik, J. V. Moloney, G. A. Siviloglou ir D. N. Christodoulides, Curved plasma channel generation using ultraintense Airy beams, *Science* **324**(5924), 229–232 (2009).
- [14] J. Baumgartl, M. Mazilu ir K. Dholakia, Optically mediated particle clearing using Airy wavepackets, *Nat. Photonics* **2**(11), 675–678 (2008).
- [15] A. Salandrino ir D. N. Christodoulides, Airy plasmon: a nondiffracting surface wave, *Opt. Lett.* **35**(12), 2082–2084 (2010).
- [16] W. Liu, D. N. Neshev, I. V. Shadrivov, A. E. Miroshnichenko ir Y. S. Kivshar, Plasmonic Airy beam manipulation in linear optical potentials, *Opt. Lett.* **36**(7), (2011).



- [17] I. Kaminer, J. Nemirovsky, K. G. Makris ir M. Segev, Self-accelerating beams in photonic crystals, *Opt. Express* **21**(7), 8886-8896 (2013).
- [18] P. Polynkin, M. Kolesik ir J. Moloney, Filamentation of femtosecond laser Airy beams in water, *Phys. Rev. Lett.* **103**, 123902 (2009).
- [19] B. E. A. Saleh, M. C. Teich, *Fundamentals of Photonics, 2nd Edition* (A John Wiley & Sons, Inc., Publication, JAV, 2007).
- [20] Z. Zhang, Z. You ir D. Chu, Fundamentals of phase-only liquid crystal on silicon (LCOS) devices, *Review, Light: Science & Applications* **3**, (2014).
- [21] S. Panezai, D. Wang, J. Zhao, Y. Wang, L. Rong, S. Maa, Study of oblique incidence characterization of parallel aligned liquid crystal on silicon, *Opt. Eng.* **54**(3), 037109 (2015).
- [22] G. Dearden, Z. Kuang, D. Liu, W. Perrie, S.P. Edwardson, K.G. Watkins, Advances in ultra short pulsed parallel processing using a spatial light modulator, *Physics Procedia* **39**, 650 – 660, (2012).
- [23] Z. Kuang, W. Perrie, D. Liu, S. Edwardson, J. Cheng, G. Dearden, K. Watkins, Diffractive multi-beam surface micro-processing using 10 ps laser pulses, *Appl. Surf. Sci.* **255**(22), 9040-9044 (2009).
- [24] S. H. Tao, X.-C. Yuan, B. S. Ahluwalia, The generation of an array of nondiffracting beams by a single composite computer generated hologram, *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* **7**, 40–46 (2005).
- [25] I. A. Litvin, T. Mhlanga, A. Forbes, Digital generation of shape-invariant Bessel-like beams, *Opt. Express* **23**(6), 7313, (2015).
- [26] C. J. Henderson, B. Robertson, D. Gil Leyva, T. D. Wilkinson, Control of a free-space adaptive optical interconnect using a liquid-crystal spatial light modulator for beam steering, *Opt. Eng.* **44**(7), 075401, (2005).
- [27] A. Hermerschmidt, S. Krüger, T. Haist, S. Zwick, M. Warber, W. Osten, Holographic optical tweezers with real-time hologram calculation using a phase-only modulating LCOS-based SLM at 1064 nm, *Proc. of SPIE* **6905**, 690508, (2008).
- [28] S. Pancharatnam, Generalized theory of interference, and its applications, *Proc. Indian Acad. Sci.* **44**, 247, (1956).
- [29] M. V. Berry, Quantal Phase Factors Accompanying Adiabatic Changes, *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, **392**(1802), (1984).
- [30] P. Kurzynowski, W. A. Woźniak, M. Szarycz, Geometric phase: two triangles on the Poincaré sphere, *J. Opt. Soc. Am. A.* **28**(3), (2011).
- [31] M. Fratz, S. Sinzinger, D. Giel1, Design and fabrication of polarization-holographic elements for laser beam shaping, *App. Opt.* **48**(14), (2009).

- [32] G. P. Crawford, J. N. Eakin, M. D. Radcliffe, A. Callan-Jones, R. A. Pelcovits, Liquid-crystal diffraction gratings using polarization holography alignment techniques, *J. of App. Phys.* **98**, 123102, (2005).
- [33] J. Kim, Y. Li, M. N. Miskiewicz, C. Oh, M. W. Kudenov, M. J. Escuti, Fabrication of ideal geometric-phase holograms with arbitrary wavefronts, *Optica*, **2**(11), 958-964, (2015).
- [34] F. S. Roux, Geometric phase lens, *J. Opt. Soc. Am. A* **23**(2), 476-482 (2006).
- [35] Z. Bomzon, G. Biener, V. Kleiner, E. Hasman, Space-variant Pancharatnam–Berry phase optical elements with computer-generated subwavelength gratings, *Opt. Lett.* **27**(13), (2002).
- [36] G. Biener, A. Niv, V. Kleiner, E. Hasman, Formation of helical beams by use of Pancharatnam–Berry phase optical elements, *Opt. Lett.* **27**(21), (2002).
- [37] F. Xu, R. C. Tyan, P. C. Sun, Y. Fainman, Fabrication, modeling, and characterization of form-birefringent nanostructures, *Opt. Lett.* **20**(24), (1995).
- [38] Y. Shimotsuma, P. G. Kazansky, J. Qiu, K. Hirao, Self-Organized Nanogratings in Glass Irradiated by Ultrashort Light Pulses, *Phys. Rev. Lett.* **91**, 247405, (2003).
- [39] V. R. Bhardwaj, E. Simova, P. P. Rajeev, C. Hnatovsky, R. S. Taylor, D. M. Rayner, P. B. Corkum, *Phys. Rev. Lett.* **96**, 057404, (2006).
- [40] M. Beresna, M. Gecevičius, P. G. Kazansky, T. Gertus, Radially polarized optical vortex converter created by femtosecond laser nanostructuring of glass, *App. Phys. Lett.* **98**, 201101, (2011).
- [41] R. Osellame, G. Cerullo, R. Ramponi, *Femtosecond Laser Micromachining* (Politecnico di Milano, Italy, 2012).
- [42] A. Matijošius, P. Stanislovaitis, T. Gertus, V. Smilgevičius, Formation of second order optical vortices with a radial polarization converter using the double-pass technique, *Opt. Commun.* **349**(15), (2015).

## Santrauka

### Airy pluoštų generavimas ir asimetrinių pažaidų formavimas skaidriose terpėse Birutė Dargytė

Vienas iš svarbių lazerinio apdirbimo aspektų lemiančių proceso kokybę yra pluošto forma, t.y. skersinis pluošto intensyvumo pasiskirstymas ir jo kitimas pluošto sklidimo kryptimi. Airy pluoštas yra ypatingas tuo, kad jo Relėjaus atstumas yra kelis kartus ilgesnis, nei Gausinio pluošto, o pagrindinės smailės formavimosi trajektorija yra kreiva. Žinoma, kad Airy pluoštu įmanoma formuoti asimetrinius griovelius medžiagos paviršiuje, tačiau tūrinių asimetrinių pažaidų formavimas skaidriose terpėse dar nėra pademonstruotas. Taigi pagrindinis šio darbo tikslas – sugeneruoti Airy pluoštą keletu skirtingų metodų, įvertinti parametrų įtaką, bei suformuoti tūrines asimetrines pažaidas skaidrioje terpėje.

Pirmoji surinkta optinė pluošto formavimo sistema buvo paremta erdviniu šviesos moduliatoriumi, kuriame fazinio vėlinimo kaukė yra sukuriama ir kontroliuojama elektrinio lauko pagalba manipuluojant skystųjų kristalų molekulių orientaciją ir dvejopalauiškumą. Antroji optinė pluošto formavimo sistema buvo paremta geometrinės fazės gardele, kurioje fazinis vėlinimas yra sukuriamas dėl erdviškai moduluotos struktūros, kai kiekvienas tos struktūros komponentas vienokiu ar kitokiu būdu sukuria geometrinės fazės poslinkį, t. y. pakeičia pluošto poliarizaciją.

Nustatyta, kad didėjant Airy pluoštą generuojančios kaukės/gardelės koeficientui, pagrindinės smailės formavimosi trajektorijos skersinis poslinkis mažėja. Kartu, kuo poslinkis mažesnis, tuo trajektorija ilgesnė. Esant vienodiems parametrams, geometrinės fazės gardele generuojamo Airy pluošto skersinis poslinkis mažesnis, nei generuojant erdviniu šviesos moduliatoriumi.

Generuojant Airy pluoštą abejomis optinėmis sistemomis pagrindinė problema yra nedifragavusi nulinės eilės pluošto dalis, kuri, praėjusi pro Furje transformaciją Airy pluoštui atliekantį lęšį, susifokusuoja ir interferuoja su pagrindine Airy pluošto smaile. Nustatyta, kad atskirti erdvėje šiuos du pluoštus galima prie Airy pluoštą generuojančios kaukės/gardelės pridėti tiesiškai arba kvadratu kintančią fazinę kaukę/gardelę. Airy pluoštas pasislenka į šoną atitinkamai statmenai ir išilgai Airy pluošto sklidimo kryptčiai nuo sufokusuotos nedifragavusios pluošto dalies. Nustatyta, kad kuo didesnis poslinkis, tuo mažesnė pluošto dalis difraguoja.

Generuojant impulsinį Airy pluoštą geometrinės fazės gardele paremta optine pluošto formavimo sistema, ultratrumpaisiais lazerio impulsais suformuotos asimetrinės tūrinės pažaidos VIOSIL tipo kvarciniame stikle, kurių skersinio poslinkio ir pažaidos ilgio santykis siekia 0,08.

## Summary

### **Airy beams generation and induction of asymmetric modifications in transparent material bulk**

**Birutė Dargytė**

One of the challenges for the laser micromachining technologies is the beam shape and its longitudinal profile, which makes a huge impact for the result of the process. Airy beam is a unique beam shape, because its Rayleigh length is a few times longer compared to a Gaussian beam. Also, its intensity peak travels along a curved trajectory during the propagation. Curved trench machining is proved to be possible using Airy beams. However, machining of asymmetric modifications in a transparent material bulk has not been demonstrated. Hence, the aim of this work is to generate Airy beams using a few different methods and measure the weight of parameters. Finally, to induce asymmetric modifications in transparent material bulk using the Airy beam.

First optical system for a beam shaping was based on a spatial light modulator. In a spatial light modulator, the phase retardance is induced and controlled by means of an electric field due to the birefringence of liquid crystals. Second optical system for a beam shaping was based on geometric phase gratings. In geometric phase gratings, phase retardance is induced by space-variant self-assembled form birefringence in fused silica glass.

It has been determined, that when the coefficient of the phase mask for Airy beam generation increases, the curvature of the trajectory of an intensity peak decreases. Herewith, the smaller the curvature, the longer the trajectory. Using the same parameters, an Airy beam generated by a geometric phase grating has a smaller curvature, compared to an Airy beam generated by a spatial light modulator.

The main problem when generating Airy beams using both optical systems is the undiffracted zero order beam, which interferes with an intensity peak of a diffracted Airy beam. Experiments show that combining phase masks for Airy beam generation with linearly-variant and quadratically-variant phase masks induce displacement of an Airy beam transversely and longitudinally, respectively. The larger the displacement is, the bigger the intensity of the undiffracted zero order beam becomes, and less diffraction occurs.

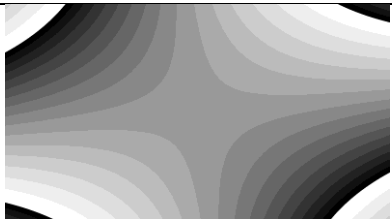
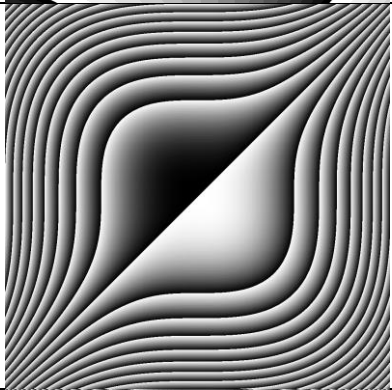
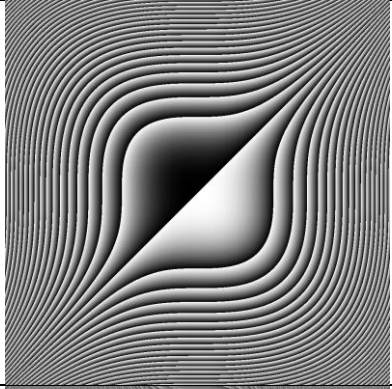
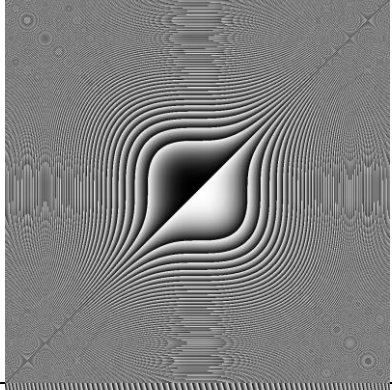
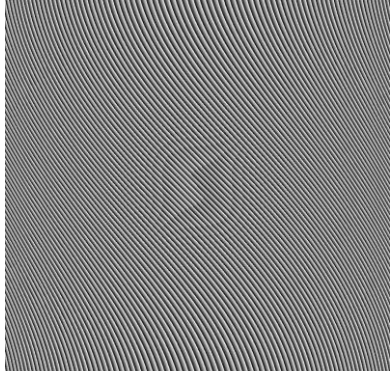
Finally, asymmetric modifications in VIOSIL type synthetic quartz glass substrates were induced using ultrashort Airy beams generated by geometric phase gratings. The ratio of a transverse shift of the modifications to the length of the modifications of 0,08 has been demonstrated.

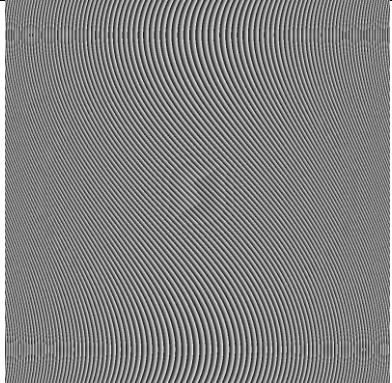
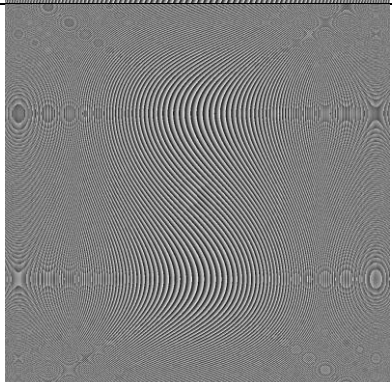
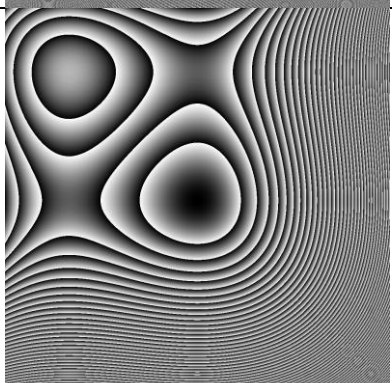
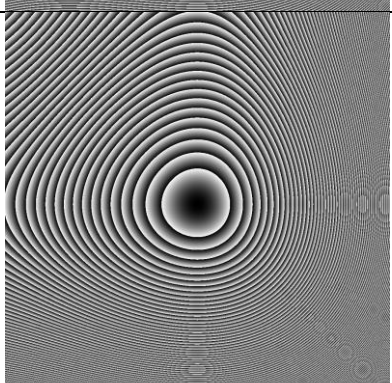
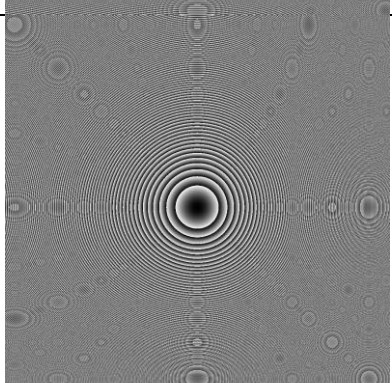
DARGYTĖ, Birutė. *Airy pluoštų generavimas ir asimetrinių pažaidų formavimas skaidriose terpėse*: Lazerinių technologijų magistro studijų programos baigiamasis darbas. Vad. dr. Titas Gertus. Vilnius: Vilniaus universitetas Fizikos fakultetas, 47 p.

## **Anotacija**

Darbe nagrinėjamas Airy pluoštų generavimas optinėmis sistemomis, paremtomis erdviniais šviesos modulatoriais ir tūrinėmis geometrinės fazės gardelėmis. Nustatyta, kad atskirti erdvėje sugeneruotą Airy pluoštą nuo nedifragavusio nulinės eilės pluošto, kuris susifokusuoja ir interferuoja su pagrindine Airy pluošto smaile, galima prie Airy pluoštą generuojančios fazinės kaukės/gardelės pridėjus tiesiškai arba kvadratu kintančias fazines kaukes/gardeles. Pademonstruota, kad generuojant impulsinį Airy pluoštą tūrinėmis geometrinės fazės gardelėmis ultratrumpaisiais impulsais galima suformuoti asimetrines tūrines pažaidas kvarciniame stikle.

## Priedas Nr. 1. Fazinės kaukės

Eil. Nr.	Fazinė kaukė	Aprašymas
1.		Fazinė kaukė pluošto frontui kompensuoti.
2.		Fazinė kaukė Airy pluoštui generuoti pagal formulę: $\varphi = a(x_{OE}^3 + y_{OE}^3),$ kai $a = 50$ .
3.		Fazinė kaukė Airy pluoštui generuoti pagal formulę: $\varphi = a(x_{OE}^3 + y_{OE}^3),$ kai $a = 100$ .
4.		Fazinė kaukė Airy pluoštui generuoti pagal formulę: $\varphi = a(x_{OE}^3 + y_{OE}^3),$ kai $a = 360$ .
5.		Fazinė kaukė Airy pluoštui generuoti pagal formulę: $\varphi = a(x_{OE}^3 + y_{OE}^3) + b(x_{OE} + y_{OE}),$ kai $a = 50, b = 200$ .

6.		<p>Fazinė kaukė Airy pluoštui generuoti pagal formulę:</p> $\varphi = a(x_{OE}^3 + y_{OE}^3) + b(x_{OE} + y_{OE}),$ <p>kai <math>a = 100, b = 200</math>.</p>
7.		<p>Fazinė kaukė Airy pluoštui generuoti pagal formulę:</p> $\varphi = a(x_{OE}^3 + y_{OE}^3) + b(x_{OE} + y_{OE}),$ <p>kai <math>a = 360, b = 200</math>.</p>
8.		<p>Fazinė kaukė Airy pluoštui generuoti pagal formulę:</p> $\varphi = a(x_{OE}^3 + y_{OE}^3) + c(x_{OE}^2 + y_{OE}^2),$ <p>kai <math>a = 100, c = 100</math>.</p>
9.		<p>Fazinė kaukė Airy pluoštui generuoti pagal formulę:</p> $\varphi = a(x_{OE}^3 + y_{OE}^3) + c(x_{OE}^2 + y_{OE}^2),$ <p>kai <math>a = 100, c = 200</math>.</p>
10.		<p>Fazinė kaukė Airy pluoštui generuoti pagal formulę:</p> $\varphi = a(x_{OE}^3 + y_{OE}^3) + c(x_{OE}^2 + y_{OE}^2),$ <p>kai <math>a = 100, c = 500</math>.</p>