

Vilniaus universitetas  
Fizikos fakultetas  
Lazerinių tyrimų centras

Justas Baltrukonis

AUKŠTESNIŲJŲ EILIŲ VEKTORINIŲ BESELIO-GAUSO PLUOŠTŲ GENERAVIMAS IR  
JAIS SUKURTŲ TŪRINIŲ MODIFIKACIJŲ STIKLUOSE CHEMINIS ĖSDINIMAS

Magistrantūros studijų baigiamasis darbas

Lazerinės technologijos  
studijų programa

Studentas

Justas Baltrukonis

Darbo vadovas

doc. dr. Vytautas Jukna

Recenzentas

doc. dr. Aidas Matijošius

Centro direktorius

doc. dr. Aidas Matijošius

Vilnius 2020

# Turinys

Įvadas .....	1
1 Literatūros apžvalga .....	6
1.1 Lazerinis skaidrių medžiagų pažeidimas .....	6
1.2 Lazerinės spinduliuotės inicijuotas cheminis ėsdinimas .....	7
1.3 Radialinė ir azimutinė poliarizacijos .....	8
1.4 S-bangos plokštelė .....	9
1.5 Beselio pluoštai .....	12
1.6 Beselio-Gauso pluoštų generavimas .....	13
2 Metodika .....	17
2.1 Skaitmeninis modeliavimas .....	17
2.2 Eksperimento schema ir įranga .....	17
2.3 Cheminis ėsdinimas .....	20
3 Rezultatai .....	21
3.1 Skaitmeninio modeliavimo rezultatai .....	21
3.2 Eksperimentinis pluoštų generavimas .....	24
3.2.1 Kokybiško Beselio-Gauso pluošto generacija .....	24
3.2.2 Skersiniai ir išilginiai intensyvumo skirstiniai .....	26
3.3 Skaidrių medžiagų modifikavimas vektoriniais Beselio-Gauso pluoštais ir jų komponentėmis .....	29
3.3.1 Pažeidimų pavieniais impulsais analizė .....	29
3.3.2 Pirminis cheminio ėsdinimo eksperimentas ir modifikacijos daugeliu im- pulsų .....	33
3.4 Lazeriu indukuotas selektyvus cheminis ėsdinimas .....	37
Išvados .....	40
Literatūros sąrašas .....	42
Santrauka .....	46
Summary .....	48

# Įvadas

Beselio-Gauso pluoštai vis plačiau naudojami skaidrių terpių mikroapdirbimui dėl savo unikalios savybių - sklaidimo erdvėje nepatiriant difrakcijos ir itin didelio židinio ilgio/pločio santykio, kas dažniausiai išnaudojama siekiant pagreitinti ar patobulinti esamus procesus. Pavyzdžiui, pagreitinti bangolaidžių įrašymą stikle [1], sparčiam Brego gardelių įrašymui [2], didelio ilgio/pločio santykio mikrokanalų gavimui [3,4], o plačiausiai paplitęs taikymas - stiklo pjovimas įprastais [5,6] ar modifikuotais, pasižyminčiais asimetrija [7,8] Beselio-Gauso pluoštais.

Visiems anksčiau išvardytiems taikymams naudoti nulinės eilės Beselio-Gauso pluoštai, tačiau egzistuoja ir egzotiškesnių variacijų su sudėtingesniais skersinio intensyvumo skirstiniais, potencialiai atveriant dar daugiau pritaikymo galimybių mikroapdirbime. Pavyzdžiui, specifinėms užduotims atlikti naudojami aukštesnės eilės  $n$  vektoriniai ar sūkuriniai Beselio-Gauso pluoštai, pasižymintys žiedo formos, kurio skersmuo priklauso nuo eilės  $n$ , skersiniu intensyvumo skirstiniu [9]. Eilės  $n$  Beselio-Gauso pluoštai jau dabar pritaikomi žiedinių struktūrų gavimui dvifotonės polimerizacijos būdu [10] ar netgi grafeno mikro ir nano diskų gamybai [11]. Tačiau, šie pluoštai dažniausiai gaunami naudojant fazines plokšteles [9] ar erdvinius šviesos moduliatorius [10,11], kurie nėra pritaikyti dirbi su didelės energijos ultra-trumpaisiais impulsais, kas apriboja pluoštų pritaikomumą mikroapdirbime.

Dažnai procesų vystymui pasitelkiami ir pagalbiniai procesai, tokie kaip selektyvus cheminis ėsdinimas [12–14]. Ryškus medžiagos ėsdinimo spartos padidėjimas lazeriu modifikuotose zonose leidžia formuoti įvairius mikromechaninius prietaisus stiklo tūryje išėsdinant fokusuotu Gauso pluoštu modifikuotas zonas [15,16] ar sparčiai formuoti ilgus ir siaurus kanalus ėsdinant Beselio-Gauso pluoštais padarytas pažaidas [17]. Taigi, selektyvaus cheminio ėsdinimo ir aukštesnių eilių  $n$  vektorinių ir sūkurinių Beselio-Gauso pluoštų kombinacija galėtų tapti puikiu įrankiu mikroapdirbimo procesų tobulinimui, pavyzdžiui, gaminat kiek didesnio skersmens kiaurymes ar siekiant spartesnio ir/ar geresnės kokybės rezultato.

Siekiant atrasti naujus taikymus, labai svarbus efektyvus bei kokybiškas tokių pluoštų realizavimas bei pritaikymas didelės energijos ultratrumpų impulsų lazerinėms sistemoms. Aukštesniųjų eilių ( $n = 1$ ,  $n = 4$  ir  $n = 6$ ) vektoriniai ir sūkuriniai Beselio-Gauso pluoštai darbe efektyviai realizuojami pasitelkiant atitinkamos struktūros S-bangos plokštelę (Workshop of Photonics) - erdviškai moduluotą banginę plokštelę [18,19], naudojamą tiesinės lazerio pluošto poliarizacijos konversijai, bei aksikoną, kuris iš gauto pluošto sukuria vektorinius Beselio-Gauso pluoštus, o apskritiminės poliarizacijos atveju - sūkurinius Beselio-Gauso pluoštus.

Šio darbo tikslas - efektyviai realizuoti kokybiškus aukštesnės eilės vektorinius Beselio-Gauso pluoštus bei ištirti jais sukurtų modifikacijų stikle pritaikomumą kiaurymių gavimui pasitelkiant selektyvų cheminį ėsdinimą. Darbo užduotys: skaitmeniškai sumodeliuoti pluoštų sklaidimą erdvėje, juos eksperimentiškai realizuoti bei išmatuoti, įrašyti modifikacijas stikle, jas ištirti ir atlikti jų selektyvaus cheminio ėsdinimo tyrimą.

## Studento mokslinė veikla

Šis baigiamasis darbas yra dalis atliekamos mokslinės veiklos, kuri paremta tūrinių nanogardelių elementų tyrimu ir jų kuriamų pluoštų sąveika su medžiaga, o rezultatai yra pristatyti šiose mokslinėse konferencijose bei publikacijose:

### Studento paruošti ir pristatyti pranešimai mokslinėse konferencijose

1. S. Orlov, A. Gajauskaitė, **J. Baltrukonis**, Radially and azimuthally polarized nondiffracting vectorial X pulses, DoKDok, Zuhl, Gemrmany (2017).
2. **J. Baltrukonis**, S. Orlov, P. Gotovski, Experimental implementation of the focal line engineering with weber beams using spatial light modulator, Open Readings, Vilnius, Lithuania (2018).
3. **J. Baltrukonis**, A. Juršėnas, S. Orlov, Controllable spatial array of Bessel-like beams with independent axial intensity distributions for laser microprocessing, LPM, Edinburgh, United Kingdom (2018).
4. S. Orlov, A. Juršėnas, **J. Baltrukonis**, Controllable spatial array of optical needles with independent axial intensity distributions for Laser Microprocessing, LANE, Furth, Germany (2018).
5. **J. Baltrukonis**, S. Orlov, V. Jukna, Vector Bessel beams for ultrafast pulse induced modifications in transparent materials, Open Readings, Vilnius, Lithuania (2019).
6. **J. Baltrukonis**, O. Ulčinas, T. Gertus, V. Jukna, S. Orlov, High aspect ratio voids and micro-cracks formation with vector Bessel beams, EMRS, Nice, France (2019).
7. **J. Baltrukonis**, O. Ulčinas, T. Gertus, V. Jukna, S. Orlov, Generation of vector Bessel beams and their application for laser microprocessing of transparent materials, CLEO, Munich, Germany (2019).
8. **J. Baltrukonis**, O. Ulčinas, P. Gotovski, S. Orlov, V. Jukna, Realization of higher order vector Bessel beams for transparent material processing applications, Photonics West, San Francisco, United States (2020).

### Kiti pranešimai mokslinėse konferencijose

1. S. Orlov, A. Juršėnas, A. Gajauskaitė, V. Vosylius, P. Gotovski, A. Grabusovas, **J. Baltrukonis**, E. Nacius, T. Gertus, Optical engineering of vector pulsed beams with parabolic and elliptic cross-sections for laser material processing applications, EMRS, Strasbourg, France (2018).

2. P. Gotovski, **J. Baltrukonis**, S. Orlov, Nondiffracting and nondispersive vector shovel pulsed beams, LANE, Furth, Germany (2018).
3. S. Orlov, V. Vosylius, P. Gotovski, A. Grabusovas, **J. Baltrukonis**, T. Gertus, Vector beams with parabolic and elliptic cross-sections for laser material processing applications, LPM, Edinburgh, United Kingdom (2018).
4. S. Orlov, P. Gotovski, **J. Baltrukonis**, V. Jukna, T. Gertus, Optical Engineering of Vector Beams with Parabolic and Elliptic Cross-Sections, CLEO, San Jose, United States, (2019).
5. P. Šlevas, S. Orlov, E. Nacius, O. Ulčinas, P. Gotovski, **J. Baltrukonis**, V. Jukna, Laser induced modifications in transparent materials using azimuthally modulated axicon beams, Photonics West, San Francisco, United States (2020).
6. P. Gotovski, P. Šlevas, E. Nacius, V. Jukna, S. Orlov, **J. Baltrukonis**, O. Ulčinas, T. Gertus, Formation of optical needles by Pancharatnam-Berry phase element for laser-induced modifications in transparent materials, Photonics West, San Francisco, United States (2020).
7. P. Gotovski, P. Šlevas, E. Nacius, V. Jukna, S. Orlov, O. Ulčinas, **J. Baltrukonis**, T. Gertus, Design of efficient Gauss to top-hat converters using geometrical phase elements inscribed in the glass by femtosecond laser pulses, Photonics West, San Francisco, United States (2020).

## Straipsniai

1. S. Orlov, A. Juršėnas, **J. Baltrukonis**, Controllable spatial array of bessel-like beams with independent axial intensity distributions for laser microprocessing, *Journal of Laser Micro Nanoengineering* **13**(3), 324–329 (2018).
2. S. Orlov, V. Vosylius, P. Gotovski, A. Grabusovas, **J. Baltrukonis**, T. Gertus, Vector beams with parabolic and elliptic cross-sections for laser material processing applications, *Journal of Laser Micro Nanoengineering* **13**(3), 280-286 (2018).
3. P. Gotovski, P. Šlevas, E. Nacius, V. Jukna, S. Orlov, O. Ulčinas, **J. Baltrukonis**, T. Gertus, Design of efficient gauss to top-hat converters using geometrical phase elements inscribed in the glass by femtosecond laser pulses, *in Laser Resonators, Microresonators, and Beam Control XXII* (International Society for Optics and Photonics, 2020), volume 11266, 112661J.

4. P. Gotovski, P. Šlevas, E. Nacius, V. Jukna, S. Orlov, **J. Baltrukonis**, O. Ulčinas, T. Gertus, Formation of optical needles by pancharatnam-berry phase element for laser-induced modifications in transparent materials, *in Laser-based Micro-and Nanoprocessing XIV* (International Society for Optics and Photonics, 2020), volume 11268, 112681Y.
5. P. Slevas, S. Orlov, E. Nacius, O. Ulčinas, P. Gotovski, **J. Baltrukonis**, V. Jukna, Laser induced modifications in transparent materials using azimuthally modulated axi-con beams, *in Laser Applications in Microelectronic and Optoelectronic Manufacturing (LAMOM) XXV* (International Society for Optics and Photonics, 2020), volume 11267, 112670B.
6. **J. Baltrukonis**, O. Ulčinas, P. Gotovski, S. Orlov, V. Jukna, Realization of higher order vector Bessel beams for transparent material processing applications, *in Laser-based Microand Nanoprocessing XIV* (International Society for Optics and Photonics, 2020), volume 11268, 112681D.
7. **J. Baltrukonis**, O. Ulčinas, S. Orlov, V. Jukna, Void and micro-crack Generation in transparent materials with high energy first order vector Bessel beam, *JOSA B*, accepted, (2020).

# 1 Literatūros apžvalga

## 1.1 Lazerinis skaidrių medžiagų pažeidimas

Priklausomai nuo lazerinės spinduliuotės tipo (bangos ilgis, impulso trukmė, pasikartojimo dažnis) bei medžiagos (skaidri, sugerianti ir t.t.) lazerinio mikroapdirbimo fizika ir vykstantys procesai gana skirtingi, tačiau bendru atveju lazerinis medžiagų apdirbimas gali būti suskirstytas į keletą vienas po kito vykstančių procesų: lazerio energija perduodama bandiniui, šviesa sugerama dėl tiesinės arba netiesinės sugerties ir disipuuodama bandinyje, priklausomai nuo sugertos energijos tankio sukelia medžiagos reakciją - abliaciją, lydymąsį, fotocheminius reiškinius, fazinius šuolius.

Optiniu pramušimu galima vadinti negrįžtamus medžiagos struktūrinius pažeidimus sukeltus intensyvaus šviesos impulso. Įvairūs stiklai dažnu atveju turi gan platų draustinės juostos plotį, didesnę nei fotono energija optiniame diapazone, todėl vieno fotono sugerties neužtenka perkelti elektronui iš valentinės į laidumo juostą, taip pat normaliomis sąlygomis dielektriko laidumo zona būna beveik tuščia - dauguma ten esančių elektronų išsidėstę priemaišiniuose lygmenyse arba atsirandantys atsitiktinai, pavyzdžiui, dėl terminių reiškinių. Veikiant skaidrias medžiagas didelio intensyvumo lazerine spinduliuote pradeda reikštis netiesinės sugerties reiškiniai - griūtinė ir daugiafotonė jonizacija. Esant labai dideliame lazerio spinduliuotės intensyvumui daugiafotonės jonizacijos metu keli, mažesnės nei draustinės juostos plotis energijos fotonai, gali būti sugeriami tuo pačiu laiko momentu. Elektronui suteiktos energijos pakanka šuoliu iš valentinės į laidumo zoną ir elektronas tampa laisvu. Pavyzdžiui, populiaraus Corning Eagle XG stiklo, kurio draustinės juostos plotis 3.45 eV [20], bei pirmos Pharos (Light Conversion) lazerio harmonikos generuojančios 1028 nm bangos ilgio spinduliuotę su fotono energija lygia 1.206 eV atveju, reikalinga trifotonė sugertis elektronų jonizacijai. Realiose terpėse laisvieji elektronai atsiranda ir dėl terminės ar tiesinės priemaišinių lygmenų jonizacijos. Sąveikos zonoje esantys laisvieji elektronai gali sugerti energiją, o susidurdami su kitais elektronais juos jonizuoti, taip sukeldami grandinę reakciją - griūtinę jonizaciją. Šio proceso metu itin sparčiai didėja laisvųjų elektronų tankis, kol įsisotina pasiekęs kritinį tankį  $\rho_k$ , kuris lygus [20]

$$\rho_k = \frac{(\omega^2 m_e \varepsilon_0)}{e}, \quad (1)$$

čia  $\omega$ ,  $m_e$ ,  $e$  ir  $\varepsilon_0$  yra lazerio spinduliuotės dažnis, efektinė kvazi-laisvo elektrono masė, elektrono krūvis, bei dielektrinė konstanta vakuume. Veikiant lazerine spinduliuote elektronų tankio laikinis kitimas nusakomas bendra išraiška:

$$\frac{\delta \rho}{\delta t} = \sigma I^k + \alpha_c I \rho - \eta_{rek} \rho^2 - \eta_{dif} \rho, \quad (2)$$

čia dydžiai lygties dešinėje yra fotojonizacijos, griūtinės jonizacijos, elektronų rekombinacijos

ir difuzijos spartos atitinkamai,  $k$  - daugiafotonės jonizacijos laipsnis, o  $\sigma$ ,  $\alpha_c$ ,  $\eta_{rek}$  ir  $\eta_{diff}$  atitinkamų procesų koeficientai. Esant ultratrumpiems impulsams, elektronų difuzijos galima nepaisyti, mat elektronų tankis pagrinde mažėja dėl dominuojančios elektronų rekombinacijos [20].

Laisvųjų elektronų tankiui pasiekus  $\rho_k$  vertę, iš pradžių buvusi skaidri terpė transformuojama į stipriai absorbuojančią bei atspindinčią lazerinę spinduliuotę medžiagą - plazmą. Stipriai išauga lazerinės spinduliuotės energijos sugertis, atspindys ir galiausiai relaksuojant sukauptai energijai elektronai ją perduoda gardelei, terpė sparčiai įkaitinama, kas sukelia fazinius virsmus ir negrįžtamai suardo medžiagą - įvyksta optinis pramušimas. Priklausomai nuo spinduliuotės parametrų ir fokusavimo sąlygų pažeidimo vietoje gali pakisti lūžio rodiklis, formotis nanogardelės [18,21], formotis tuštumos [3] bei skilimai dėl susidariusių įtempių [7,22]. Ultratrumpųjų impulsų atveju sukauptos energijos relaksacija vyksta po lazerinio impulso, todėl galima sakyti, jog optinis pramušimas įvyks ten, kur bus viršyta tam tikra kritinė laisvų elektronų koncentracija, atitinkanti relaksacijos proceso sukurtą temperatūrą, artimą arba viršijančią fazinio virsmo temperatūrą. Silikatinio stiklo ir lydyto kvarco atveju kritinė laisvų elektronų koncentracija (1) artima  $10^{20} \text{ cm}^{-3}$  [6,21]. Kadangi optinis pažeidimas priklauso nuo lokalaus lazerinės spinduliuotės srauto, spinduliuotės srauto valdymas įgalina sukurti zonas, kuriose elektronų tankis viršys kritinį ir taip formuoti valdomos formos pažeidimus - asimetrinius, žiedo formos ir t.t. Asimetrinio optinio pažeidimo atveju dėl lokalaus įšilimo sukurti įtempiai terpėje gali turėti dominuojančias skilimų kryptis [22].

## 1.2 Lazerinės spinduliuotės inicijuotas cheminis ėsdinimas

Įvairios technologijos neretai naudojamos kartu siekiant pasiekti naujų ar geresnių rezultatų. Aštriai fokusuoti tam tikro intensyvumo (priklausomai nuo norimo rezultato) ultratrumpieji impulsai dažnai naudojami įvairių trimačių struktūrų įrašymui skaidriose terpėse, pavyzdžiui bangolaidžių įrašymui [1], kai lazeriu paveiktoje zonoje modifikuojamas lūžio rodiklis, difrakcinių elementų [23] gamybai, kai įrašomos nanogardelės, ar tiesiog tūriniam ženklinimui, kai terpės tūryje sukuriama plika akimi matomi defektai. Nors trimatis lazerinis tūrinis mikroapdirbimas suteikia daug laisvės kurti įvairios formos struktūras, susiduriama su medžiagos pašalinimo problema t.y. neįmanoma sukurti tuščiavidurių sudėtingų struktūrų.

Technologinį proveržį sukėlė tyrimai, parodę jog aštriai fokusuotais ultratrumpaisiais impulsais modifikuoto stiklo tūrio ėsdinimo sparta iki kelių šimtų kartų didesnė nei nemonifikuotos [24]. Femtosekundinės lazerinės spinduliuotės inicijuotas cheminis ėsdinimas (angl. - FLICE - Femtosecond Laser Induced Chemical Etching) leidžia pašalinti lazeriu modifikuotą medžiagą ir taip kurti tuščiavidurius kanalus [17,25] ar sudėtingas struktūras bei įvairius mikrofluidikos prietaisus [15,16]. Ėsdinimo sparta stipriai priklauso nuo pažeidimo tipo [25] - lūžio rodiklio modifikacijos atveju ėsdinimo sparta padidėja nežymiai, o nanogardelių formavimosi ir mikro-



įtrūkimų atveju išauga ženkliai. Dažnai naudojamas dydis apibūdinantis selektyvų medžiagos pašalinimą cheminio ęsdinimo metu - selektyvumas, kuris išreiškiamas kaip lazeriu paveiktos medžiagos ęsdinimo spartos santykis su nepaveiktos srities ęsdinimo sparta.

Ęsdinimo spartos padidėjimas siejamas su atominės struktūros pokyčiais stiklo struktūroje [24] - lydytas kvarcas sudarytas iš žiedinių struktūrų su 3-9 Si-O jungtimis [26], o paveikus lazeriu daugėja struktūrų su 3 ir 4 jungtimis, taip sumažinant vidutinį jungčių kampą, bei padidinant tankį. Sumažėjęs jungčių kampas dėl deformuotos valentinių elektronų konfigūracijos padidina deguonies atomu reaktyvumą ir kartu ęsdinimo spartą. Nanogardelių ir mikroįtrūkimų atveju suformuotos nanoertmės ir įtrūkimai palengvina ęsdinančiosios medžiagos įsiskverbimą į tūrį tokiu būdu dar padidinant cheminio ęsdinimo spartą.

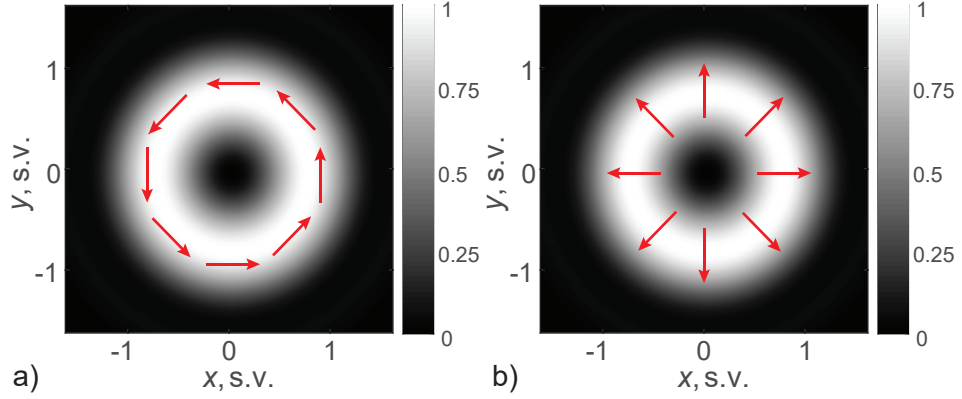
FLICE metodika gana plačiai ištirta ir aprašyta literatūroje, dažniausiai naudojama su lydyto kvarco bandiniais, tačiau sėkmingai išbandyta ir su YAG kristalu [27] safyru [12] ar borosilikatiniu stiklu [15]. Viena pirmųjų ir populiariausių ęsdinančiųjų medžiagų - hidrofliorido (HF) rūgštis tirpalas (2 % - 20 % koncentracijos), tačiau šiam taikymui vis dažniau naudojamas mažiau agresyvus bei kenksmingas aukštos temperatūros ( $\sim 80$  °C) koncentruotas kalio hidroksido (KOH) tirpalas (30 % - 40 % koncentracijos). Atlikti palyginamieji tyrimai [13] taip pat atskleidžia, jog nors koncentruoto KOH tirpalo atveju ęsdinimo sparta yra mažesnė, tačiau šis pasižymi gerokai didesniu selektyvumu lazerio paveiktai zonai nei HF tirpalas, kas leidžia dar geriau išnaudoti selektyvaus ęsdinimo efektą.

### 1.3 Radialinė ir azimutinė poliarizacijos

Lazerio pluošto poliarizacija - parametras apibūdinantis geometrinę elektromagnetinių bangų osciliacijų kryptį. Lazerinėse sistemose dažniausiai sutinkamos tiesinė - kai elektrinio lauko vektoriai išdėstyti vienoje plokštumoje, bei apskritiminė - kai poliarizacijos vektoriaus dydis nekinta, o kryptis sukasi statmenoje sklidimui plokštume bėgant laikui. Apskritiminę poliarizaciją galima įsivaizduoti, kaip dviejų vienodų amplitudžių bei statmenų viena kitai bangų superpoziciją, kai vienos bangos fazė pastumta per  $\pi/2$ . Lazerio pluošto poliarizacija gali turėti didelę įtaką lazerinio mikroapdirbimo procesams. Pluošto poliarizacija ypač svarbi nanogardelių susidarymui [18], stiklo abliacijos kokybei [28], bei skilimų krypties kontrolei pjaustant kristalines medžiagas Beselio-Gauso pluoštais [29].

Egzistuoja ir kiek kitokią - ašinę poliarizacijos simetriją turintys pluoštai, dar vadinami vektoriniais cilindriniais pluoštais. Tokių pluoštų pavyzdžiai - radialiai bei azimutiškai poliarizuoti pluoštai, pasižymintys žiedo formos intensyvumo pasiskirstymu (1 pav.). Tokių pluoštų poliarizacijos vektoriaus kryptis centre yra neapibrėžta, kiek toliau nuo centro vektorius nukreiptas radialine ir azimutine kryptimis radialinės ir azimutinės poliarizacijų atveju atitinkamai.

Unikalios tokių pluoštų savybės leidžia juos pritaikyti įvairiose bei perspektyviose srityse. Aštriai fokusuojant radialiai poliarizuotą pluoštą, formuojasi stipri išilginė elektrinio lauko kom-



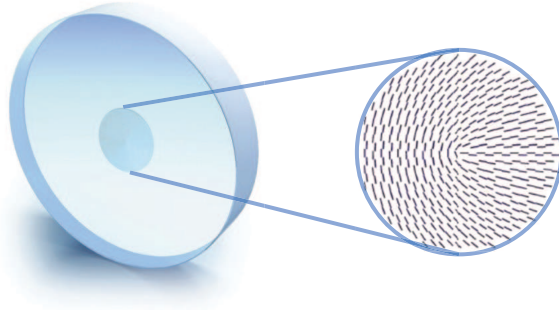
1 pav. Azimutinės a) ir radialinės b) poliarizacijos pluoštai. Rodyklės rodo poliarizacijos vektoriaus kryptį.

ponentė, kuri sėkmingai naudojama dalelių sulaikymui [30] ir įgreitinimui [31], bei tokį pluoštą galima sufokusuoti į mažesnę dėmę, nei tiesinės poliarizacijos pluoštus [32]. Ši savybė plačiai naudojama litografijos bei optinės mikroskopijos taikymuose, kur reikalinga didesnė skyra. Taip pat pastebėta, jog tokios poliarizacijos pluoštai turi pranašumų ir lazerinio medžiagų mikroapdirbimo srityje [33]. Radialią ir azimutinę poliarizaciją turinčius pluoštus galima gauti įvairiais būdais, pavyzdžiui, naudojant erdvinį šviesos moduliatorių [34], hologramas [35] ar S-bangos plokštelę (angl. S-waveplate) [18].

## 1.4 S-bangos plokštelė

Plačiau pakalbėsime apie poliarizacijos konversijai itin dažnai naudojamą S-bangos plokštelę (angl. spatial-variant waveplate). Šis elementas pasižymi unikaliomis savybėmis - itin aukštu pramušimo slenksčiu ( $26.25 \text{ J/cm}^2$  ties  $1064 \text{ nm}$  ir  $4.71 \text{ J/cm}^2$  ties  $532 \text{ nm}$ ), pralaidumu (50 % - 90 %, priklausomai nuo bangos ilgio) bei paprastumu naudotis [19]. Iš esmės tai yra  $\lambda/2$  banginė plokštelė nuo tradicinės  $\lambda/2$  plokštelės besiskirianti tuo, jog jos optinės ašies orientacija priklauso nuo azimutinio kampo kaip  $\theta = n\phi/2$ , kur  $\phi$  - azimutinis kampas, o  $n$  - sveikas skaičius nusakantis eilę. S-bangos plokštelės gaminamos femtosekundiniais impulsais tūryje formuojant nanogardelės [36] lydyto kvarco padėkliukuose, o gautų struktūrų periodas mažesnis nei bangos ilgis, kuriuo gardelės užrašomos. Apšvietus šias struktūras lazerio spinduliuote, jos elgiasi kaip dvejetainė medžiaga ir esant tinkamam struktūros aukščiui bei krentančios bangos ilgiui veikia taip pat kaip  $\lambda/2$  plokštelė - įvesdama fazės vėlinimą vienai iš komponentų pasuka kritusią poliarizaciją kampu  $2\gamma$ , kur  $\gamma$  nusako plokštelės ašies pasukimo kampą kritusios poliarizacijos atžvilgiu. Išdėsčius tokias nanogardelės įvairiomis orientacijomis sukuriama sudėtingi poliarizaciniai elementai, galintys efektyviai (iki 100 % [19]) transformuoti pluošto poliarizaciją. Nanogardelių orientacijos S-bangos plokštelės atveju pavaizduotos (2 pav.).

Tokia erdviškai moduluota banginė plokštelė, veikianti kaip poliarizacijos keitiklis, gali kurti tiek radialinės tiek ir azimutinės poliarizacijos, jų superpoziciją arba sudėtingą poliari-



2 pav. Kairėje -  $n = 1$  S-bangos plokštelė, dešinėje - schematinis nanogardelių išdėstymo vaizdavimas S-bangos plokštelėje.

zacinį lauką turinčius pluoštus, priklausomai nuo į plokštelę krentančios tiesinės poliarizacijos orientacijos ir plokštelės parametro  $n$ , bei formuoti šviesos sūkurius - sūkurinę fazę turinčius pluoštus, kai plokštelė apšviečiama apskritimiškai poliarizuota šviesa [37]. Tokio poliarizacijos keitiklio veikimas nesunkiai aprašomas Jones matricomis [23]. Pluošto poliarizaciją už S-bangos plokštelės galime užrašyti

$$\vec{E}_{už} = S\vec{E}_{prieš}, \quad (3)$$

čia  $\vec{E}_{prieš}$  ir  $\vec{E}_{už}$  yra į banginę plokštelę kritusi ir ją praėjusi poliarizacijos, o  $S$  - S-bangos plokštelę aprašanti matrica iš keturių elementų:

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

Tuo tarpu vertikali, horizontali ir apskritiminė poliarizacijos Jones matricomis aprašomos atitinkamai

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

čia  $i$  - menamas vienetas ir poliarizacija apskritiminė kairinė, kai  $+i$ , ir dešininė, kai  $-i$ . Atveju kai  $n = 1$  sudauginę matricas pagal (3) lygtį, kai į elementą krentą vertikali  $\vec{E}_v$  ir horizontali  $\vec{E}_h$  poliarizacijos, gauname, jog  $n = 1$  S-bangos plokštelė transformuoja poliarizaciją į anksčiau aprašytas azimutinę  $\vec{E}_{azim}$  ir radialinę  $\vec{E}_{rad}$  atitinkamai:

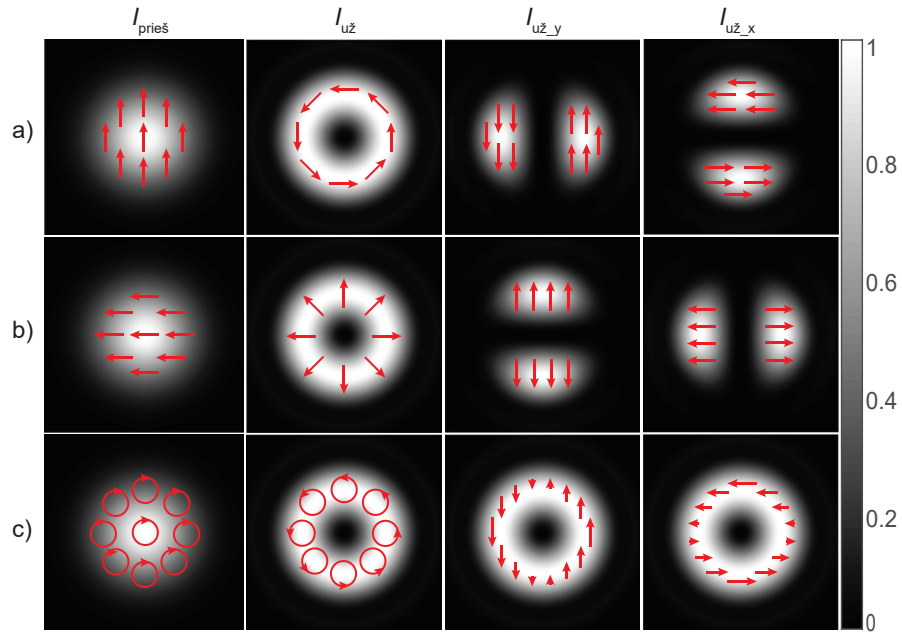
$$\vec{E}_{azim} = \begin{bmatrix} \cos \phi \\ \sin \phi \end{bmatrix} \quad \text{ir} \quad \vec{E}_{rad} = \begin{bmatrix} \sin \phi \\ -\cos \phi \end{bmatrix}.$$

Kitais atvejais gaunamas sudėtingesnis poliarizacinis laukas, kur poliarizacijos vektorius  $360^\circ$  kampų, priklausomai nuo azimutinio kampo apsisuka  $n$  kartų. Kiek įdomesnis rezultatas gaunamas į S-bangos plokštelę kritus apskritimiškai poliarizuotai šviesai, pavyzdžiui, apskritiminės

kairinės poliarizacijos atveju gauname

$$\vec{E}_{už} = e^{in\phi} \begin{bmatrix} 1 \\ -i \end{bmatrix}.$$

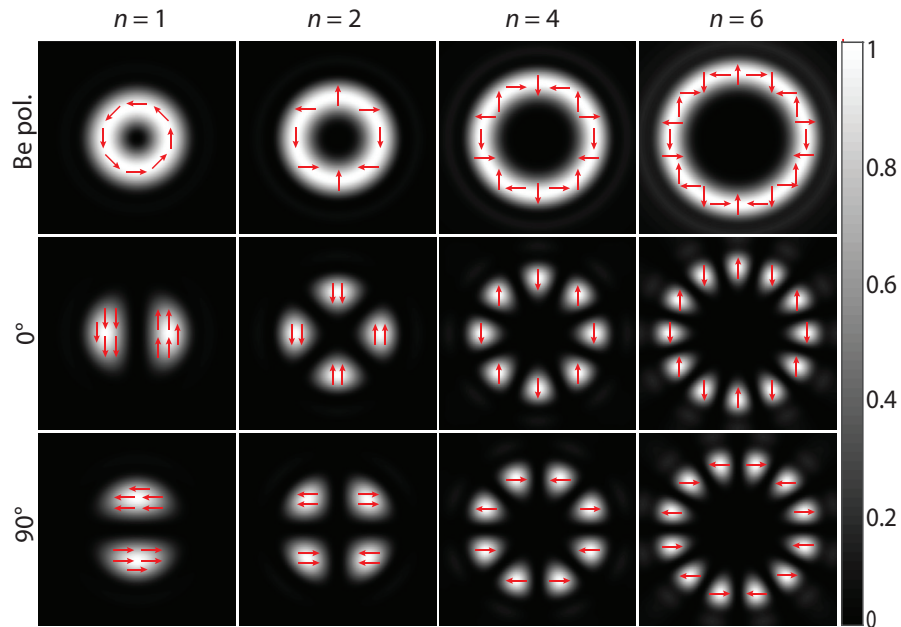
Pagal gautą išraišką matome, jog apskritiminės poliarizacijos kryptis pasikeis, bei atsiras daugiklis  $e^{in\phi}$ , nusakantis nuo azimutinio kampo priklausančią geometrinę fazę - bus sugeneruotas topologinio krūvio  $n$  šviesos sūkurys. Gausinio pluošto poliarizacijos bei skersinio intensyvumo skirstinio transformacija  $n = 1$  S-bangos plokštele grafiškai pavaizduota 3 paveikslėlyje.



3 pav. Gausinio pluošto poliarizacijos bei skersinio intensyvumo skirstinio transformacija  $n = 1$  S-bangos plokštele, kai kritusio Gauso pluošto poliarizacija vertikali a), horizontali b) bei apskritiminė c). Rodyklės nurodo poliarizacijos vektoriaus kryptis tam tikru laiko momentu, o jų ilgis nusako fazę.  $I_{\text{prieš}}$  - kritęs ir  $I_{\text{už}}$  - praėjęs intensyvumo skirstiniai, o  $I_{\text{už}_y}$  ir  $I_{\text{už}_x}$  vertikali ir horizontali komponentės. Intensyvumo skirstiniai gauti skaitmeniškai modeliuojant Gauso pluošto transformavimą už S-bangos plokštelės. Intensyvumas sunormuotas į maksimalią vertę kiekvienu atveju.

Iš 3 iliustracijos matome, jog už S-bangos plokštelės pasikeičia ne tik pluošto poliarizacija, bet ir intensyvumo skirstinys. Azimutinės ir radialinės poliarizacijų atveju formuojamas žiedo formos intensyvumo skirstinys, o vektorinį pluoštą sudarančios statmenos komponentės pasižymi intensyvumo skirstiniu, sudarytu iš dviejų asimetrinių intensyvumo zonų. Apskritiminės poliarizacijos atveju tiek viso pluošto, tiek ir komponentių intensyvumo skirstinys yra žiedo formos bei kartu formuojamas šviesos sūkurys - tokio pluošto fazė nėra tolygi ir priklauso nuo azimutinio kampo. Didėjant parametru  $n$  analogiškoje sistemoje formuojami didesnio topologinio krūvio sūkuriniai pluoštai ir aukštesnės eilės vektoriniai pluoštai pasižymintys vis didesniu formuojamo žiedo skersmeniu bei sudėtingesniu poliarizaciniu lauku, kurio dėka atski-

ros statmenos pluošto komponentės yra didėjančio skersmens žiedinės struktūros sudarytos iš  $2n$  intensyvumo smailių (4 pav.).



4 pav. Gausinio pluošto skersinio intensyvumo skirstinio transformacija erdvine bangine plokšte su skirtingu parametru  $n$  nesant poliarizatoriaus (viršuje), bei atskiros statmenos komponentės išskirtos poliarizatoriumi (centre ir apačioje). Rodyklės nurodo poliarizacijos vektoriaus kryptis tam tikru laiko momentu.

Krentančios poliarizacijos konversija S-bangos plokšte yra vienas iš būdų leidžiančių efektyviai ir lengvai keisti krentančios lazerinės spinduliuotės poliarizaciją bei intensyvumo skirstinį. Tai leidžia praktikoje gauti netradicinio - žiedo formos intensyvumo skirstinius, turinčius radialinę, azimutinę, apskritiminę poliarizacijas arba sudėtingus poliarizacinius laukus, o naudojant poliarizatorių ir atskiras vektorinių pluoštų komponentes - pluoštus sudarytus iš  $2n$  intensyvumo smailių išdėliotų ratu, kurių išsidėstymo pozicijas galime valdyti sukdam poliarizatorių.

## 1.5 Beselio pluoštai

Dažniausiai sutinkamas ir plačiausiai medžiagų apdirbime naudojamas Gauso pluoštas, pasižymintis tuo, jog jo Furjė transformacija taipogi yra Gauso formos. Ši savybė leidžia tokiems pluoštams skliti per lęšius įvairiose optinėse sistemose neprarandant pluošto formos. Plokščią bangos frontą turintis Gauso pluoštas sklisdamas erdvėje patiria difrakciją - pluošto matmenys didėja. Pluošto sklidimą tiesinėje terpėje be nuostolių aprašo Helmholco lygtis

$$(\nabla^2 + k_0^2)E = 0, \quad (4)$$

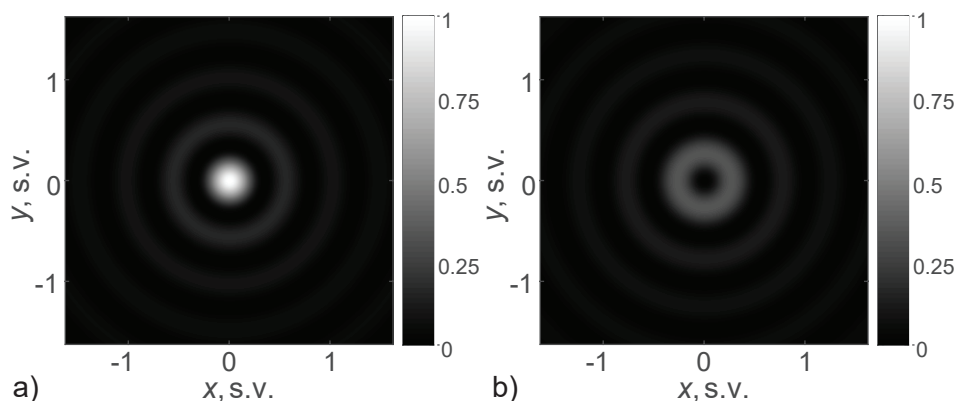
čia  $k_0 = \omega/c$  yra bangos skaičius,  $c$  - šviesos greitis vakuume,  $\omega$  - bangos dažnis,  $\nabla^2$  - Laplaso operatorius,  $E$  - elektrinio lauko funkcija. Anksčiau minėtas Gauso pluoštas difraguoja, kadangi

jis nėra invariantinis Helmholco lygties sprendinys.

Egzistuoja tokia šios lygties sprendinių šeima, vadinama nedifraguojančiais pluoštais, kuri aprašo pluoštus nepatiriančius difrakcijos jiems sklindant laisvoje erdvėje. Nedifraguojančius pluoštus pirmą kartą aprašė J. Durnin [38]. Spręsdami Helmholco lygtį trancliacinę simetriją turinčioje cilindrinėje koordinatinių sistemoje gauname nedifraguojančio Beselio pluošto elektrinio lauko matematinę išraišką

$$E(r, t, z) = A_0 e^{i(\omega t - k_z z)} J_n(k_r r), \quad (5)$$

čia  $J_n$  yra  $n$  - tosios eilės Beselio funkcija, o  $k_z$  ir  $k_r = (k_x^2 + k_y^2)^{1/2}$  yra atitinkamai išilginė ir radialinė bangos vektoriaus komponentė,  $r$  ir  $z$  - skersinė ir išilginė koordinatės,  $t$  - laikas,  $A_0$  - pluošto amplitudė. Nulinės eilės Beselio funkcija aprašomo pluošto skirstinys pasižymi labai intensyvia centrine smaile bei apie ją koncentriškai išdėstyta be galo didelio skaičiaus žiedų. Aukštesnės eilės Beselio funkcijos lemia intensyvumo minimumo pluošto centre atsiradimą (5 pav.), o didinant Beselio funkcijos eilę susidariusio žiedo skersmuo didėja, o tai kartu sąlygoja ir intensyvumo mažėjimą.



5 pav. Skersiniai pluošto intensyvumo skirstiniai, aprašomi a)  $J_0$  ir b)  $J_1$  funkcijomis.

## 1.6 Beselio-Gauso pluoštų generavimas

Praktikoje idealūs nedifraguojantys Beselio pluoštai neegzistuoja, mat jiems sukurti reiktų begalinių matmenų apertūrų bei begalinės energijos. Nulinės eilės Beselio pluoštai, naudojami mikroapdirbimo taikymams, dažniausiai formuojami naudojant optinius difrakcinius elementus arba aksikonus - kūgio formos optinius elementus pagamintus iš stiklo, kurie krentančio pluošto fazei suteikia kūgio formą. Gauso pluošto atveju elektrinis laukas tada gali būti aprašomas lygtimi

$$E(r, \phi) = A_0 e^{(-r^2/\omega_0^2 - i\beta_0 r)}, \quad (6)$$

čia  $\omega_0$  - į aksikoną krentančio Gauso pluošto sąsmaukos radiusas,  $\beta_0 = k_0 \sin(\theta_B)$  - fazės gradientas, kur  $\theta_B$  Beselio-Gauso kūgio kampas (9). Gauti pluoštai vadinami Gauso gaubtine

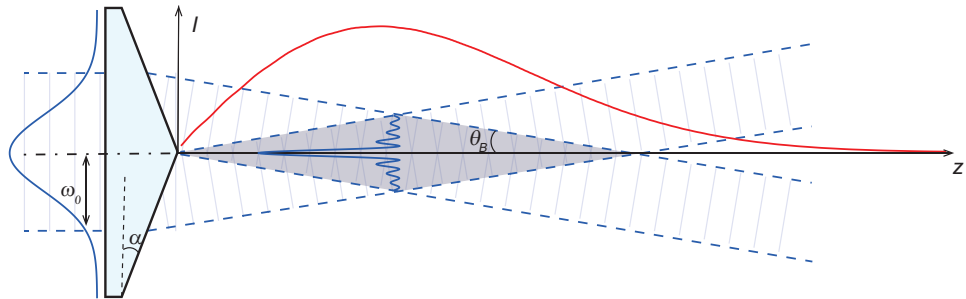
apodizuotais Beselio pluoštais arba tumpiau - Beselio-Gauso pluoštais. Spinduliai praėję refrakcinį aksikoną lūžta vienodais kampais ir yra nukreipiami link ašies, kur vienodu atstumu nuo aksikono centro jų kirtę spinduliai dėl vienodo optinio kelio ilgio konstruktyviai interferuoja ir formuoja stiprią intensyvumo smailę. Tokio pluošto erdvinis spektras žiedo formos su Gauso profiliu aplink nešantįjį dažnį  $\beta_0$  ir nulinės eilės pluošto atveju gali būti aprašomas [39]

$$S_b(\beta_s, \phi_s) \approx \frac{\omega_0 e^{-(\beta_s - \beta_0)^2 \omega_0^2 / 4}}{\sqrt{\beta_0 \beta_s / \pi}}, \quad (7)$$

čia  $\beta_s$  ir  $\phi_s$  - spektro radiusas ir spektro azimutinis kampas. Beselio-Gauso pluoštai sklisdami erdvėje nepatiria difrakcijos tam tikrame ribotame nuotolyje, vadinamame Beselio zona, o jos ilgis geometrinės optikos aproksimacija nusakomas išraiška:

$$L_{Bz} \approx \omega_0 \cot((n_{stiklo} - 1)\alpha), \quad (8)$$

kur  $n_{stiklo}$  - stiklo, iš kurio pagamintas aksikonas, lūžio rodiklis, o  $\alpha$  - aksikono kūgio pagrindo kampas.



6 pav. Beselio-Gauso pluošto gavimas refrakciniu aksikonu. Mėlynos linijos - skersiniai intensyvumo skirstiniai prieš ir už aksikono, raudona linija - ašinis intensyvumo skirstinys už aksikono.

Intensyvumas Beselio zonoje taip pat nėra pastovus. Idealiu atveju, kritus Gauso pluoštui intensyvumas lėtai kinta ir kuria ašinį intensyvumo skirstinį pavaizduotą 6 paveikslėlyje. Dažnai Beselio-Gauso pluošto gavimui naudojami aksikonai nėra idealūs - turi kiek užapvalintą viršūnę, paviršiaus netolygumus ir kitus nukrypimus nuo idealios formos. Toks elemento netikslumas lemia kiek kitokiais kampais sklindančio dalies pluošto atsiradimą, kuris interferuodamas su likusiu pluoštu sukelia ašinio intensyvumo osciliacias, bei lemia nežymų centrinės smailės radiuso kitimą [40]. Siekiant pašalinti šiuos trūkumus, naudojamas erdvinis pluošto filtravimas, užden-giant netinkamais kampais sklindančius spindulius [41]. Labai svarbus parametras - aksikonu sukurto Beselio-Gauso kūgio kampas

$$\theta_B \approx \frac{(n_{stiklo} - 1)\alpha}{n_{terpės}}, \quad (9)$$

čia  $n_{terpės}$  - apdirbamos medžiagos lūžio rodiklis. Lazerinio mikroapdirbimo taikymams dažnai

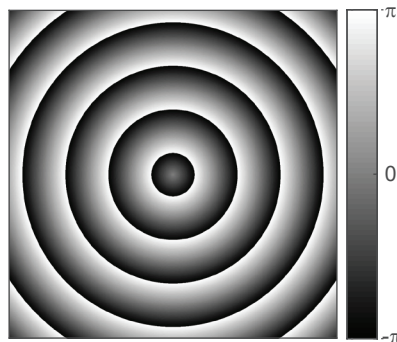
reikalinga turėti  $10^\circ < \theta_B < 20^\circ$  [6] dydžio kampus, mat nuo jų priklauso centrinės pluošto smailės radiusas [40]. Esant didesniems kampams  $\theta_B$  gaunamas pluoštas su siauresne centrine smaile, kurios radiusas (atstumas nuo centrinio maksimumo iki pirmo minimumo) yra lygus

$$\rho_0 = \frac{2.4048}{k_0 \sin \theta_B}. \quad (10)$$

Beselio-Gausso pluoštai efektyviai generuojami ir naudojant įvairius difrakcinius elementus: skistųjų kristalų optiką [10, 42], fazines plokšteles [43] ar Pancharatnam-Berry geometrinės fazės elementus [9], kurie gali būti gaminami ir femtosekundiniais impulsais formuojant nanogardeles stikle [44], tokiu pat būdu kaip gaminamos darbe naudotos S-bangos plokštelės. Elementuose užkoduojama aksikono fazinė holograma (7 pav.). Aksikono kompleksinis pralaidumas aprašomas išraiška [42]:

$$T = e^{ik_0 \sin(\theta_B)r}, \quad (11)$$

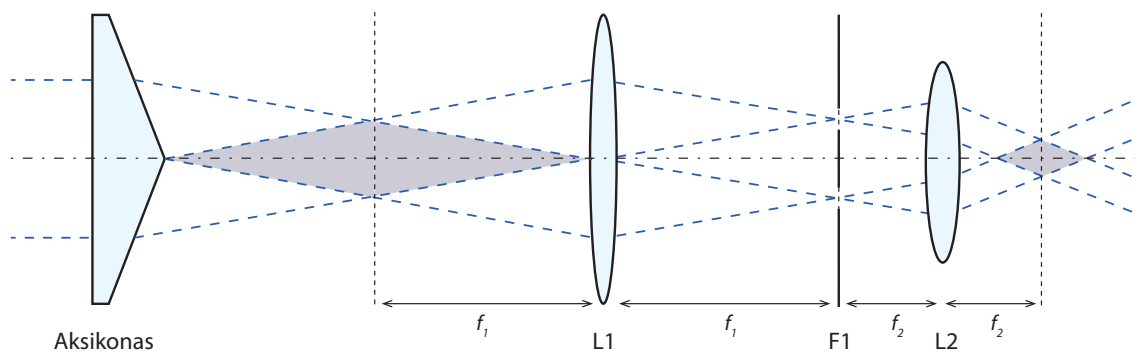
čia  $r$  - atstumas nuo centro. Beselio-Gauso pluošto generacija difrakciniais elementais turi savų plusų ir minusų. Didžiausias plusas yra tai, jog išvengiama bukos aksikono viršūnės problemos, mat elemento struktūra visame plote įrašoma vienoda. Tai atveria galimybes formuoti kokybiškus Beselio-Gauso pluoštus išvengiant nepageidautinos intensyvumo moduliacijos bei smailės radiuso kitimo. Tačiau, priklausomai nuo gamybos technologijos, tokie elementai turi žemą pažaidos slenkstį, pvz, skistųjų kristalų optika, nėra 100 % efektyvūs (dažnai efektyvumas siekia iki 80 % - 95 %), bei kelis-keliasdešimt kartų brangesni nei refrakciniai aksikonai.



7 pav. Refrakcinį aksikoną atitinkanti fazinė holograma.

Reikiamam Beselio kūgio kampo ir pluošto matmenų gavimui dažnai naudojamos 4f vaizdo mažinimo sistemos, mažinančios skersinius pluošto matmenis  $D = f_1/f_2$  kartų, kur  $f_1$  ir  $f_2$  pirmo ir antro lęšių židinio nuotoliai, išilginius matmenis -  $D^2$  kartų, o kūgio kampą padidinančios  $D$  kartų (8 pav.). Kitas tokios vaizdavimo sistemos privalumas - joje galima atlikti anksčiau minėtą netinkamais kampais sklindančio pluošto filtravimą - pirmo lęšio Furjė plokštumoje pastatant erdvinį filtrą sudarytą iš tam tikro dydžio apertūros bei ekrano, uždengiančio centrinę dalį, tokiu būdu erdviškai išfiltruojant siaurą žiedą.





8 pav. Refrakciniu aksikonu sugeneruoto Beselio-Gauso pluošto matmenų transformavimas  $4f$  optine sistema. L1 ir L2 - lęšiai, F1 - erdvinis filtras.

## 2 Metodika

### 2.1 Skaitmeninis modeliavimas

Siekiant susipažinti su šiame darbe tiriamais vektoriniais ir sūkuriniais Beselio-Gauso pluoštais bei jų gavimu naudojant S-bangos plokštelę ir aksikoną, visų pirma buvo atlikti tokių pluoštų skaitmeninio modeliavimo darbai. Monochromatinio, dažnio  $\omega_0$ , pluošto sklidimą tiesinėje izotropinėje terpėje be nuostolių aprašo anksčiau minėta Helmholco lygtis (4). Darome prielaidą, jog šviesa sklinda mažais kampais - pritaikome paraksialinį artinį ir pluošto kompleksinės amplitudės kitimą erdvėje aprašome paraboline difrakcijos lygtimi [45]

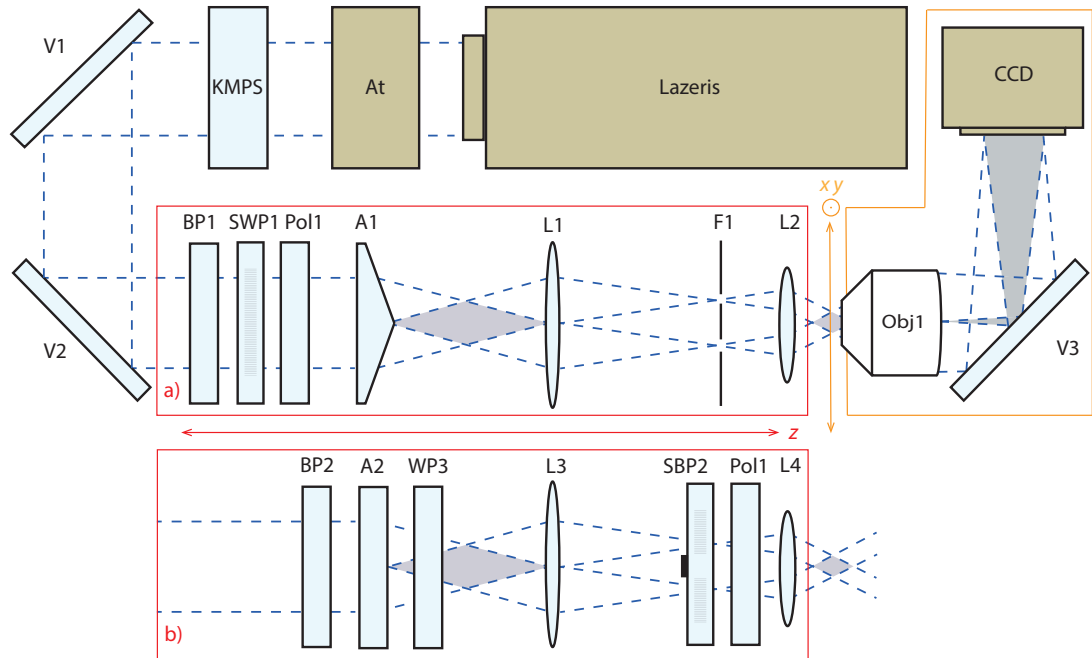
$$\frac{\partial A}{\partial z} = -\frac{i}{2k_0} \left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) A. \quad (12)$$

Jos pagrindu skaičiuojama, kaip keičiasi pluošto kompleksinė amplitudė kiekviename taške  $A(x, y, z)$  pluoštui propaguojant erdvėje bei per norimų optinių elementų skaitmeninius atitikmenis. Kompleksinė amplitudė savyje turi informaciją apie pluošto fazę ir amplitudę, o pakėlę amplitudę kvadratu gauname pluošto intensyvumą kiekviename norime erdvės taške  $I(x, y, z)$ . Toks pluošto sklidimo modeliavimo metodas įskaičiuoja ir difrakciją bei interferenciją ir leidžia pakankamai tiksliai numatyti pluošto formavimąsi. Apskaičiuotas pluošto intensyvumas ir yra tas parametras, kurį galime išmatuoti eksperimento metu bei lyginti su modeliavimo rezultatais. Atliekant sudėtingesnių - vektorinių pluoštų skaitmeninį modeliavimą atskiros statmenos komponentės skaičiuojamos atskirai, o galutiniam rezultatui gauti jos sudedamos. Skaitmeninis vektorinių ir sūkurinių pluoštų gavimo S-bangos plokštele ir aksikonu bei sklidimo tiesinėje terpėje be nuostolių modeliavimas atliktas programiniu paketu Matlab.

### 2.2 Eksperimento schema ir įranga

Vektorinių bei sūkurinių Beselio-Gauso pluoštų formavimui ir skaidrių medžiagų apdirbimo eksperimentams naudota femtosekundinė mikroapdirbimo sistema (Workshop of Photonics). Eksperimente naudotas 6 W galios Pharos PH1-SP-1.5mJ (Šviesos konversija) lazeris, pasižymintis galimybe generuoti itin galingus, iki 1.5 mJ energijos, 158 femtosekundžių trukmės ir 1028 nm bangos ilgio impulsus su galimybe juos išplėsti iki  $\sim 10$  ps, faziškai moduluojant impulsus. Lazeris gali veikti 4 kHz - 200 kHz impulsų pasikartojimo dažniu, su galimybe dažnį sumažinti naudojant vidinį impulsų daliklį. Lazerio išėjime formuojamas 9 mm - 9.5 mm, ties  $1/e^2$  intensyvumo,  $M^2 = 1.3$  Gauso pluoštas. Pozicionavimo sistema susideda iš trijų nepriklausomų ašių (Aerotech), leidžiančių pozicionuoti bandinį  $x$  ir  $y$  kryptimis, bei keisti sufokusuoto pluošto aukštį  $z$  kryptimi bandinių laikiklio atžvilgiu. Optinė eksperimento sistema pavaizduota 9 paveikslėlyje. Eksperimento metu buvo naudotos dvi konfigūracijos a) ir b) (apvesta raudonai). Konfigūracija a) vaizduoja pluoštų generaciją refrakciniu aksikonu ir buvo naudo-

ta pirmiauose eksperimentuose  $n = 1$  vektorinių Beselio-Gauso pluoštų gavimui. Tuo tarpu konfigūracija b) vaizduoja pluoštų generaciją difrakciniu aksikonu ir buvo naudota vėlesniuose eksperimentuose  $n = 4$  ir  $n = 6$  vektorinių Beselio-Gauso pluoštų gavimui. Konfigūracija b) su difrakciniu aksikonu naudota siekiant generuoti kokybiškus pluoštus išvengiant erdvinio filtravimo.



9 pav. Vektorinių ir sūkurinių Beselio-Gauso pluoštų generavimo bei matavimo eksperimentinė schema. Oranžine linija apvesti elementai patalpinti ant  $x$  ir  $y$  ašių. Raudona linija apvesti elementai patalpinti ant  $z$  pozicionavimo ašies. Schemos konfigūracija a) naudota  $n = 1$  pluoštų generacijai refrakciniu aksikonu ir  $n = 1$  S-bangos plokštele, b) konfigūracija naudota  $n = 4$  ir  $n = 6$  pluoštų generacijai difrakciniu aksikonu bei atitinkamomis banginėmis plokštelėmis. Mėlyna punktyrinė linija žymi pluošto sklaidimo kelią.

Bendrojoje schemos dalyje pavaizduoti At - motorizuotas atenuatorius galios valdymui, KMPS - kintamo mažinimo pluošto spaustuvas, V1 - V3 - dielektriniai veidrodžiai, Obj1 - 60x objektyvas, CCD - pluošto stebėjimo kamera. Obj1, V1 ir CCD pritvirtinti ant  $x$  ir  $y$  ašių (apvesta oranžine linija), šalia bandinių laikiklio, sudarant galimybę patogiai stebėti ir matuoti pluošto intensyvumo skirstinį tarp mikroapdirbimo eksperimentų. Raudonai apvestos zonos patalpintos ant  $z$  ašies, siekiant valdyti Beselio zonos padėtį bandinio paviršiaus atžvilgiu. Konfigūracijoje a) pavaizduoti BP1 -  $\lambda/4$  arba  $\lambda/2$  banginė plokštelė, SBP1 -  $n = 1$  S-bangos plokštelė (Workshop of Photonics), Pol1 - poliarizuojantis kubas, A1 -  $1 \pm 0.25^\circ$  pagrindo kampo refrakcinis aksikonas, L1 - 250 mm židinio nuotolio sferinis lęšis, F1 - erdvinis filtras, L2 - 8 mm židinio nuotolio asferinis lęšis. Konfigūracijoje b) pavaizduoti BP2 ir BP3 -  $\lambda/4$  banginės plokštelės, SBP2 -  $n = 4$  arba  $n = 6$  S-bangos plokštelė (Workshop of Photonics), Pol1 - poliarizuojantis kubas, A2 - difrakcinis aksikonas atitinkantis  $2^\circ$  pagrindo kampo refrakcinį aksikoną, L3 - 125 mm židinio nuotolio sferinis lęšis, L2 - 8 mm židinio nuotolio asferinis lęšis.

Konfigūracijos a) atveju iš lazerio išėjęs tiesiškai poliarizuotas Gauso pluoštas veidrodžiais nukreipiamas į  $\lambda/2$  banginę plokštelę BP - tiesinės poliarizacijos sukimui, jei generuojami azimutinės ar radialinės poliarizacijos pluoštai. Plokštelė pakeičiama į  $\lambda/4$  - poliarizacijos keitimui į apskritiminę, jei generuojami sūkuriniai Beselio-Gauso pluoštai. Toliau pluoštas keliauja pro S-bangos plokštelę SBP1, kur atliekama poliarizacijos transformacija. Jei generuojamos atskiros vektorinių ar sūkurinių pluoštų komponentės - pluoštas praeina pro poliarizatorių Pol1, kurio pasukimo kampą galime valdyti, kitu atveju - poliarizatorius išimamas ir pluoštas sklinda tiesiai į aksikoną A1, už kurio formuojasi Beselio zona (5 pav.). Kadangi aksikono kampas labai mažas, sugeneruotas Beselio-Gauso pluoštas dėl per didelių matmenų nėra tinkamas mikroapdirbimo taikymams. Pluošto matmenys sumažinami 4f optine sistema (8 pav.) sudaryta iš L1 ir L2. Tokia optinė sistema sumažina skersinius matmenis 31.25 karto, o išilginius 976.56 karto. Tokiu būdu gaunamas  $\theta_B \approx 14.06^\circ$  kūgio kampo Beselio-Gauso pluoštas ore. Tarp 4f sistemos lęšių pastatytas erdvinis filtras pluošto filtravimui. Bendras sistemos pralaidumas, kai nenaudojamas poliarizatorius siekia  $\sim 60\%$ , o kai poliarizatoriumi išskiriamos komponentės, pralaidumas krenta per pus ir bendras pralaidumas tada siekia  $\sim 30\%$ . Didelę įtaką mažam sistemos pralaidumui daro antirefleksinė danga nedengta S-bangos plokštelė ir lęšis L1, bei nuostoliai dėl erdvinio filtro.

Konfigūracijos b) atveju iš lazerio išėjęs pluoštas sumažinamas dvigubai KMPS pluošto spauštuvu. Pluošto poliarizacija  $\lambda/4$  plokštele BP2 konvertuojama į apskritiminę, reikalingą difrakcinio aksikono veikimui. Toliau pluoštas sklinda į difrakcinį aksikoną A2, kuris formuoja Beselio-Gauso pluoštą. Difrakcinis aksikonas taip pat pakeičia apskritiminės poliarizacijos kryptį į priešingą. Toliau pluoštas keliauja pro dar vieną  $\lambda/4$  plokštelę BP3 poliarizacijos konversijai į tiesinę, reikalingą S-bangos plokštelės SBP2 veikimui formuojant vektorinius Beselio-Gauso pluoštus. Formuojant sūkurinius pluoštus BP3 nėra naudojama. Pluošto matmenys sumažinami 4f optine sistema (8 pav.) sudaryta iš lęšių L3 ir L4. Tokia sistema skersiniai matmenys mažinami 15.625 karto, o išilginiai 244.141 karto. Maždaug L3 lęšio židinio plokštumoje patalpinta SW2 banginė plokštelė poliarizacijos konversijai, su užtušuotu centru nedifragavusio maksimumo uždengimui (apie 15% praėjusio pluošto energijos), bei poliarizatorius atskirų komponentių išskyrimui. Dvigubai sumažintas į sistemą krentantis pluoštas, bei kiek kitokia 4f sistema, nei prieš tai, leidžia formuoti tokių pačių išilginių ir skersinių matmenų, bei kūgio kampo  $\theta_B$  Beselio-Gauso pluoštus, kai naudojamas dvigubai didesnio pagrindo kampo aksikonas A2, nei konfigūracijos a) atveju. Bendras sistemos pralaidumas, kai nenaudojamas poliarizatorius siekia  $\sim 72\%$ , o kai poliarizatoriumi išskiriamos komponentės, pralaidumas krenta per pus ir bendras pralaidumas tada siekia  $\sim 36\%$ . Šiuo atveju didžiausią įtaką sistemos pralaidumui daro antirefleksinė danga nedengti S-bangos plokštelė ir difrakcinis aksikonas, bei pačio aksikono difrakcijos efektyvumas ( $\sim 85\%$ ). Sugeneruotų pluoštų intensyvumo skirstinių matavimui naudojamas 60x didinantis objektyvas bei CCD kamera. Keičiant  $z$  ašies padėtį objektyvo atžvilgiu išmatuojami ašiniai intensyvumo skirstiniai.

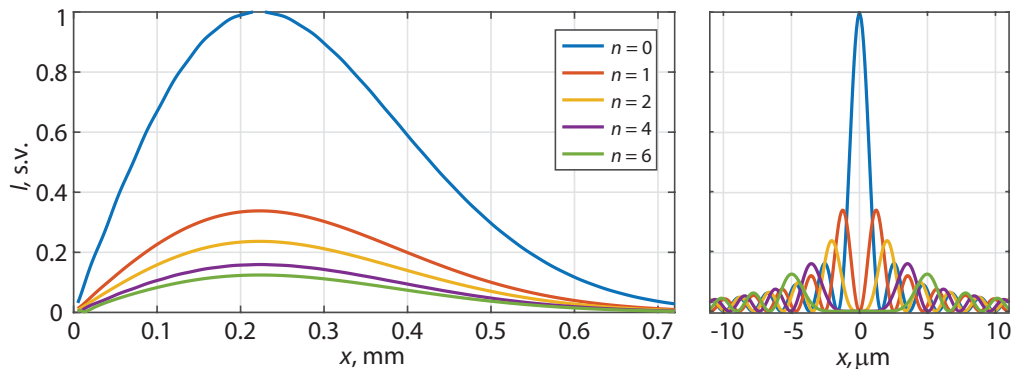
## 2.3 Cheminis ėsdinimas

Cheminis ėsdinimas darbe naudotas selektyviai pašalinti vektoriniais Beselio-Gauso pluoštais modifikuotą stiklo tūrį, tokiu būdu siekiant gauti geros kokybės kiaurymes per visą stiklo storį. Cheminio ėsdinimo daliai pasirinkti literatūroje aprašyti ir gerai veikiantys metodai ir parametrai [13]. Kaip saugesnė ir selektyvesnė ėsdinimo medžiaga pasirinktas KOH tirpalas. 30 % KOH tirpalas paruošiamas 50 ml plastikiniame indelyje. Paruošti 4-6 identiški bandiniai patalpinami tirpale taip, jog lazeriu modifikuota zona neliestų sienelių ir laikiklio, o visų bandinių orientacija būtų vienoda taip siekiant sukurti kuo vienodesnes sąlygas visiems bandiniams. Dar vienas identiškas bandinys neėsdinamas ir paliekamas palyginimui. Indelis uždaromas siekiant išvengti vandens garavimo ir koncentracijos tirpale kitimo ir patalpinamas į iki 80 °C laipsnių įkaitintą krosnį. Iš indelio kas 12 valandų išimamas vienas bandinys, o likę toliau ėsdinami. Sekančiame etape bandiniai supjaustomi, šlifuojamas ir poliruojamas bandinio kraštas šalia modifikacijų siekiant aiškiai matyti bandinio skerspjūvį bei poveikį medžiagai ir modifikacijos analizuojamos optiniu mikroskopu (Olympus BX51).

## 3 Rezultatai

### 3.1 Skaitmeninio modeliavimo rezultatai

Programiniu paketu Matlab buvo atliktas vektorinių ir sūkurinių Beselio-Gauso pluoštų skaitmeninis modeliavimas. Siekiant teoriškai įsivertinti eksperimentine optine sistema (9 pav.) kuriamų pluoštų matmenis, buvo stengiamasi kuo tiksliau atkartoti eksperimentinę optinę sistemą. Modeliavimas atliktas tik konfigūracijos a) atveju, mat matmenys konfigūracijos b) atveju turėtų būti tokie patys (9 pav.). Modeliavimo darbams buvo pasirinktas 9.5 mm, ties  $1/e^2$  intensyvumo aukštyje, skersmens Gauso pluoštas su  $M^2 = 1$ . Šis pluoštas buvo transformuotas 1 laipsnio pagrindo kampo aksikonu bei S-bangos plokštelėmis su įvairiais  $n$  ir tiriama tokio pluošto difrakcija. Modeliavime, kaip ir eksperimente S-bangos plokštelė stovi šalia aksikono. Pluošto matmenų mažinimas 4f sistema taipogi įtrauktas į skaičiavimus. Vektorinių pluoštų atveju atskiros poliarizacijos komponentės skaičiuojamos atskirai, o galutiniame rezultate intensyvumo skirstiniai sudedami. 10 pav. pavaizduoti rezultatai demonstruoja skaitmeninio modeliavimo rezultatus, kuriuose palyginamas pluoštų sklidimas atvejais, kuomet S-bangos plokštelė naudojama ir kai jos nėra (mėlynos spalvos kreivės,  $n = 0$ ). Pluoštų sklidimo metu maksimalaus pasiekto intensyvumo skirstinys pavaizduotas 10 pav. (kairėje) demonstruoja tolygų intensyvumo kitimą, kuris turi maksimumą ties 0.22 mm. Pluoštų skersiniai intensyvumo skirstiniai ties šiuo tašku pavaizduoti 10 pav. (dešinėje). Nesant S-bangos plokštelės gaunamas tradicinis Beselio-Gauso pluoštas.

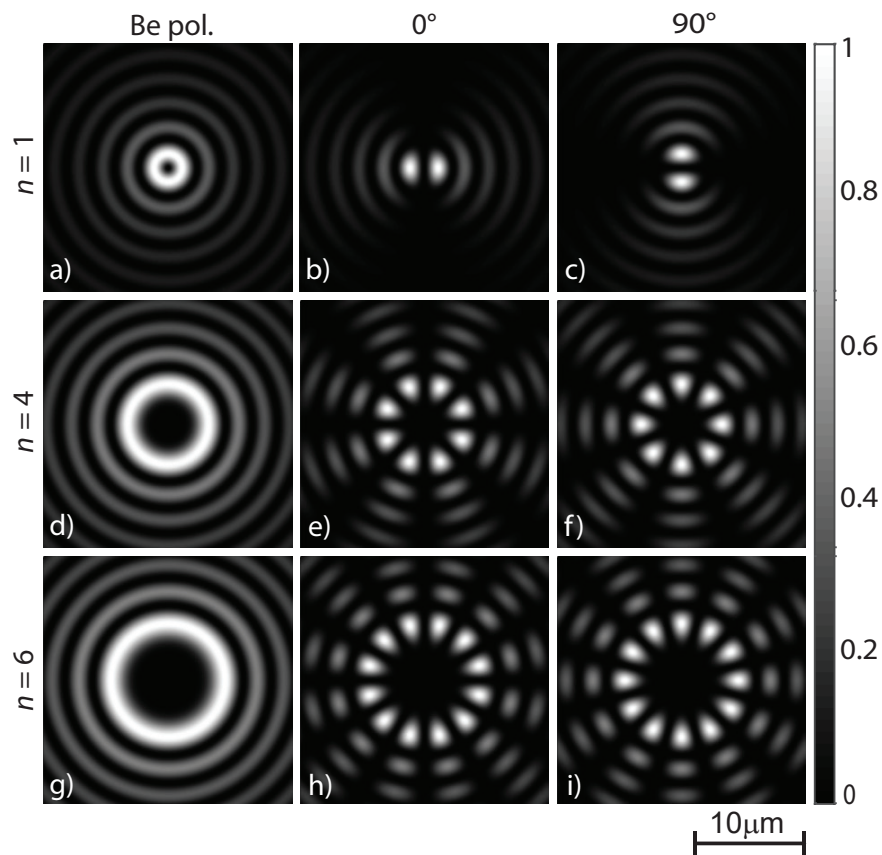


10 pav. Skaitmeniškai sumodeliuoti ašiniai (kairėje) ir skersiniai (dešinėje) (ties intensyviausia vieta ant ašies,  $z = 0.22$  mm) intensyvumo skirstiniai kai į eksperimento sistemą krenta tiesiškai poliarizuotas Gauso pluoštas. Skirtingos spalvos linijos žymi skirtingo  $n$  vektorinio Beselio-Gauso pluošto intensyvumo skirstinius.

Iš modeliavimo rezultatų matome, jog Beselio zonos ilgis visais atvejais yra  $\sim 0.357$  mm pusės intensyvumo aukštyje. Tradicinio Beselio-Gauso pluošto centrinės smailės radiusas prie pagrindo  $\sim 1.6$   $\mu\text{m}$ . Smailės radiusas, apskaičiuotas pagal 10 formulę  $1.62$   $\mu\text{m}$ , kas parodo neblogą sutapimą. Vektorinių ir sūkurinių pluoštų atveju formuojamas žiedo formos skersinis intensyvumo skirstinys, kurio radiusas ties intensyviausia vieta, kai  $n = 1$  yra  $1.26$   $\mu\text{m}$ , kai  $n = 2$

yra  $2.04 \mu\text{m}$ , kai  $n = 4$  yra  $3.522 \mu\text{m}$ , kai  $n = 6$  yra  $5 \mu\text{m}$ . Formuojant vis aukštesnės eilės  $n$  pluoštus krentančio pluošto energija pasiskirsto didesnio skersmens žiede, pvz. intensyviausia vieta ant žiedo, kai  $n = 1$ , pagal 10 pav. siekia apie 34 % intensyviausios vietos lyginant su intensyviausia vieta, kai formuojama viena smailė. Mikroapdirbimo taikymuose tai reiškia, kad esant fiksuotai impulso energijai, energijos tankis medžiagoje skirsis fokusuojant skirtingo  $n$  pluoštus, galimai nulemiant skirtingą medžiagos atsaką.

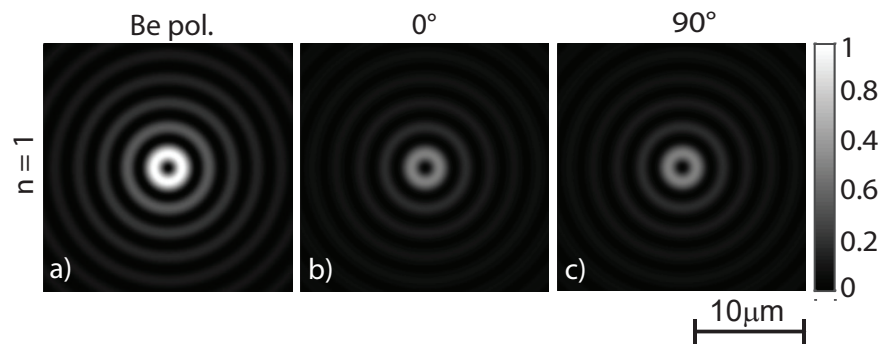
Kiek giliau panagrinėtas  $n = 1$ ,  $n = 4$  ir  $n = 6$  pluoštų formavimasis, nes eksperimentiškai bus generuojami būtent tokie pluoštai. Skaitmeniškai sumodeliuoti skersiniai dvimačiai intensyvumo skirstiniai ir jų statmenos komponentės, ties intensyviausia vieta ant ašies, pavaizduoti 11 ir 12 paveikslėliuose. Visų pirma, modeliavimas atliktas tariant, kad į sistemą krenta tiesiškai poliarizuotas Gauso pluoštas (11 pav.).



11 pav. Skaitmeniškai sumodeliuotas sistemos formuojamo vektorinio Beselio-Gauso pluošto, su skirtingu parametru  $n$ , kai į sistemą krinta tiesiškai poliarizuotas Gauso pluoštas, intensyvumo skirstiniai  $xy$  plokštumoje (a, b, c) ir jo statmenos komponentės (d, e, f) ir (g, h, i).

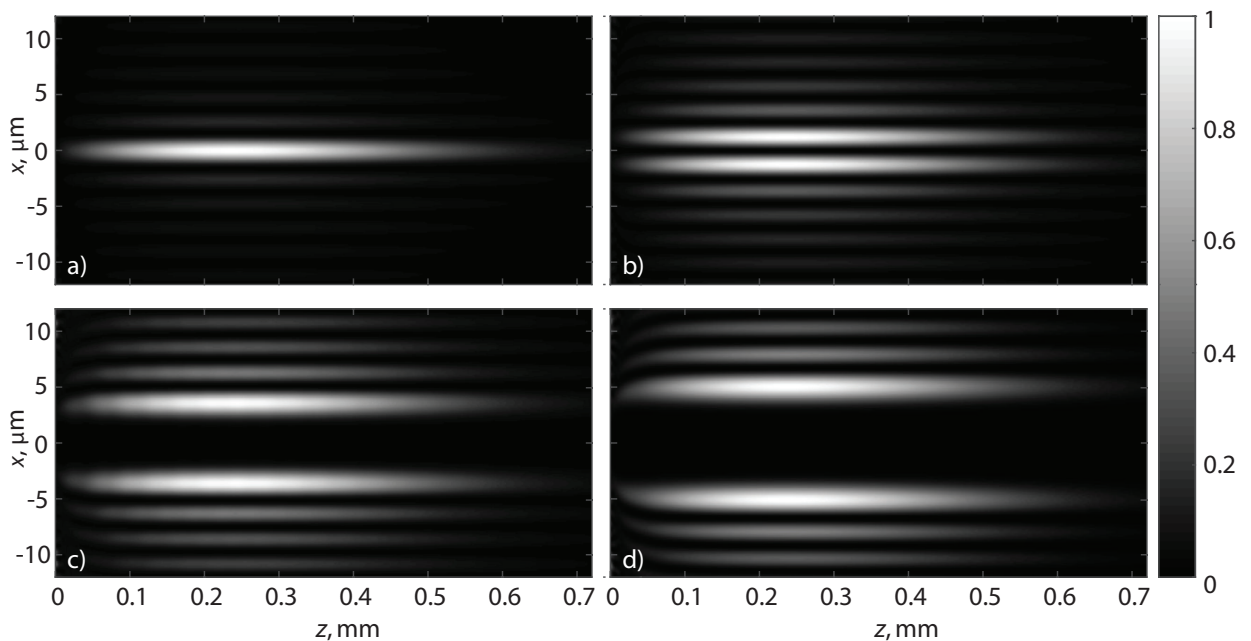
Krentant tiesiškai poliarizuotam Gauso pluoštui, dvimatis intensyvumo skirstinys žiedo formos, kurio skersmuo didėja didėjant  $n$ , su koncentrinėmis žiedų sistema aplink jį. Atskira komponentė formuoja pluoštą iš ratu išdėstytų  $2n$  vienodo intensyvumo smailių su matomomis koncentrinėmis žiedų dalimis aplink juos. Pasukus poliarizatorių  $90^\circ$ , matoma statmena komponentė, kurios intensyvumo skirstinys identiškas pirmajai, tik pasuktas  $90/n$  laipsnių kampu.

Atveju, kai į sistemą krenta apskritimiškai poliarizuotas Gauso pluoštas, visada formuojamas žiedo formos, kurio skersmuo toks pat kaip ir vektorinių pluoštų atveju, intensyvumo skirstinys, o atskirų komponentių atveju jo intensyvumas lygus 50 % viso intensyvumo (12 pav.). Visais atvejais gauto pluošto intensyvumo simetrijos priklausomybė nuo krentančio pluošto poliarizacijos priklauso taip pat, kaip pavaizduota 3 ir 4 paveikslėliuose - esant vien tik S-bangos plokštei.



12 pav. Skaitmeniškai sumodeliuotas sistemos formuojamo sūkurinio  $n = 1$  Beselio-Gauso pluošto, kai į sistemą krinta apskritimiškai poliarizuotas Gauso pluoštas, intensyvumo skirstinys  $xy$  plokštumoje a) ir jo statmenos komponentės b), c).

Skaitmeniškai sumodeliuotas ir dvimatis intensyvumo skirstinys  $xz$  plokštumoje, į sistemą krentant tiesiškai poliarizuotam Gauso pluoštui, kai  $n = 1$ ,  $n = 4$  ir  $n = 6$ . (13 pav).



13 pav. Skaitmeniškai sumodeliuotas sistemos formuojamo vektorinio Beselio-Gauso pluošto intensyvumo skirstiniai  $xz$  plokštumoje, kai į sistemą krinta tiesiškai poliarizuotas Gauso pluoštas atvejais, kai a)  $n = 0$ , b)  $n = 1$ , c)  $n = 4$ , d)  $n = 6$ .

Iš gautų rezultatų matome, jog idealiu atveju kuriamas vektorinis Beselio-Gauso pluoštas

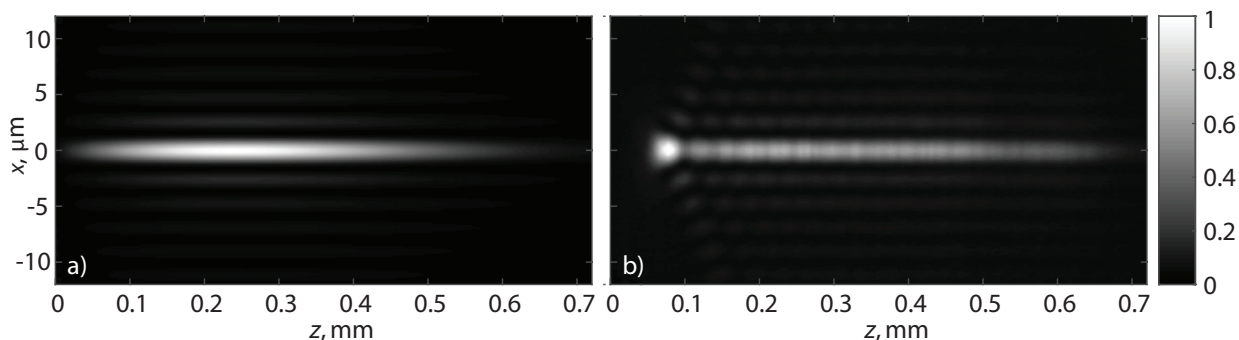


turėtų išlaikyti simetriją  $xy$  plokštumose visoje pluošto formavimosi zonoje ir neturėti jokių pašalinių intensyvumo moduliacijų.

## 3.2 Eksperimentinis pluoštų generavimas

### 3.2.1 Kokybiško Beselio-Gauso pluošto generacija

Siekiant atlikti skaidrių terpių mikroapdirbimo eksperimentus vektoriniais Beselio-Gauso pluoštais, visų pirma reikalinga turėti sprendimą kokybiškų pluoštų generacijai. Nulinės eilės Beselio-Gauso pluoštai dažniausiai generuojami aksikonu ir atvaizduojami 4f sistema (8 pav.). Analogiška sistema naudota ir šiame darbe, tačiau vektorinių Beselio-Gauso pluoštų formavimui papildomai naudotos banginės plokšteles - poliarizacijos keitikliai (9 pav.), todėl siekiant kokybiškų vektorinių pluoštų - visų pirma reikalinga turėti kokybišką nulinės eilės Beselio-Gauso pluoštą. Pluošto kokybė buvo vertinama matuojant pluošto intensyvumo profilius ir lyginant juos su teoriniu modeliu. Intensyvumo profilio matavimai atlikti keičiant  $z$  ašies, o kartu ir Beselio zonos padėtį objektyvo atžvilgiu, taip išmatuojant  $xy$  intensyvumo skirstinius kiekvienoje plokštumoje tam tikru žingsniu.

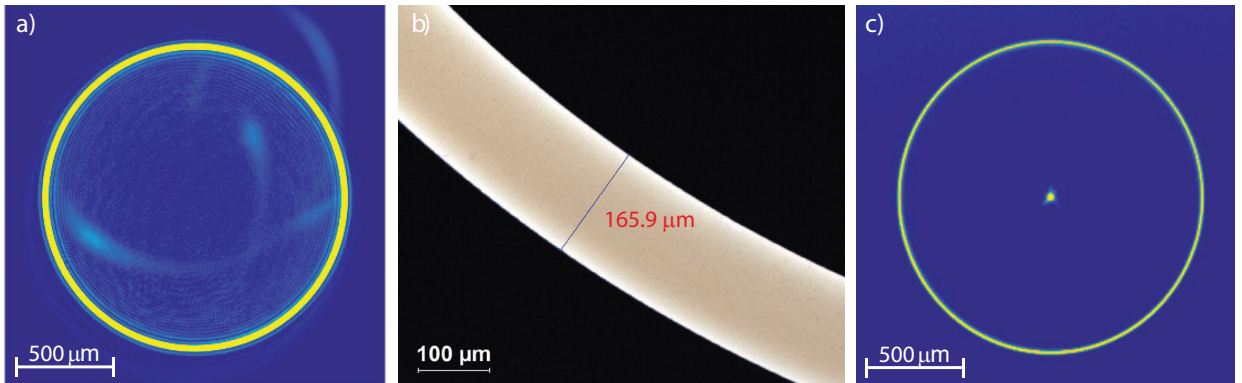


14 pav. Sumodeliuotas a), bei eksperimentiškai išmatuotas b) optinės sistemos formuojamo Beselio-Gauso pluošto intensyvumo skirstinys  $xz$  koordinatėse, kai Beselio-Gauso pluoštas generuojamas refrakciniu aksikonu (9 pav. a)) be filtro.

Kaip minėta ankstesniuose skyriuose, dažnu atveju formuojamas Beselio-Gauso pluoštas nekokybiškas dėl optinių elementų trūkumų. Ne išimtis ir darbe naudota optika - lyginant eksperimentinį  $xz$  intensyvumo skirstinį sugeneruotą vien refrakciniu aksikonu ir 4f sistema su teoriniu modeliavimu (14 pav.) matomas netaisyklingas pluošto formavimasis, tipiškas neidealios formoms aksikonams [40, 41], pasireiškiantis netolygiu centrinės smailės skersmeniu ir intensyvumo osciliacijomis ant ašies. Iš išmatuoto skirstinio matome, jog centrinės smailės skersmuo pluošto pradžioje gerokai didesnis nei likusioje pluošto dalyje, kas yra nepageidautina tolimesniems eksperimentams.

Šiame darbe išbandyti du variantai kokybiškų Beselio-Gauso pluoštų gavimui: pirminiuose eksperimentuose naudojant refrakcinį aksikoną ir erdvinį filtrą  $n = 1$  vektorinių pluoštų gavimui, bei vėlesniuose naudojant difrakcinį aksikoną  $n = 4$  ir  $n = 6$  vektorinių pluoštų gavimui. Pirmu

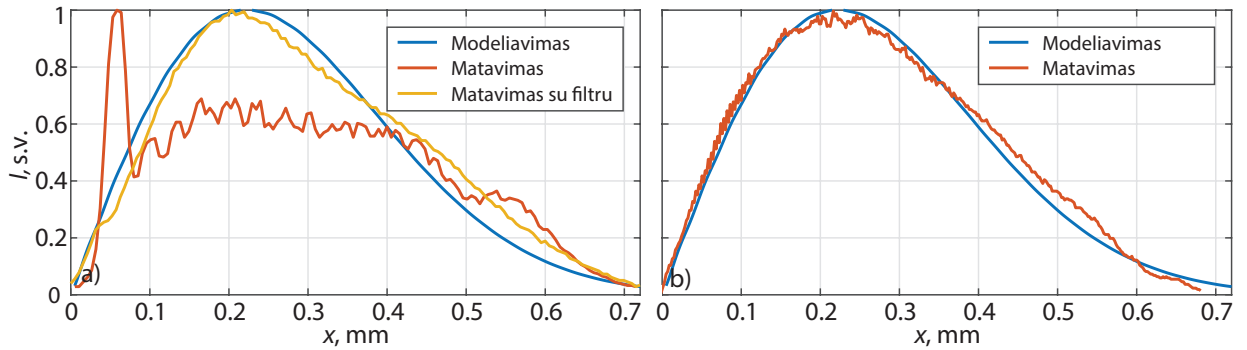
atveju erdvinis filtravimas įgyvendintas L1 lęšio židinio plokštumoje pastatant erdvinį filtrą. Beselio-Gauso pluošto tipiškas erdvinis spektras yra baigtinio pločio žiedas, o 9 a) sistemos erdvinio spektro L1 lęšio židinio plokštumoje matavimas pateiktas 15 a) paveikslėlyje.



15 pav. Išmatuotas refrakciniu aksikonu (9 pav. a)) kuriamas erdvinis spektras L1 lęšio židinio plokštumoje a) (spektras vaizdumo dėlei matavimo metu persotintas) ir pagaminto erdvinio filtro segmentas b) bei išmatuotas difrakciniu aksikonu (9 pav. b)) kuriamas erdvinis spektras L3 lęšio židinio plokštumoje c).

Esamos optinės sistemos atveju, matome, jog erdvinis spektras yra  $\sim 3.985$  mm skersmens bei apie  $120 \mu\text{m}$  pločio žiedas. Iš spektro vaizdavimo matome vieną ryškų žiedą ir papildomus, pašalinius silpnesnius žiedus aplink jį bei žiedo viduryje egzistuojantį stipresnį, lyginant su žiedo išore, foninį triukšmą. Kiek didesnės ir netaisyklingos formos figūros matomos spektre - iš pačio lazerio atėję artefaktai arba pašaliniai atspindžiai. Visiems šiems trūkumams pašalinti selektyvios lazerinės abliacijos femtosekundiniais impulsais metodu nuo chromu dengto  $0.3$  mm storio stiklo buvo nuvalytas reikiamo skersmens ir kiek platesnis - apie  $166 \mu\text{m}$  storio žiedas, taip gaunant erdvinį filtrą, uždengiantį didžiąją dalį pašalinių darinių (15 pav. b)). Išmatuoti ašiniai intensyvumo skirstiniai prieš ir po filtravimo, bei pritinkinta teorinė kreivė pateikti 16 a) paveikslėlyje. Iš grafiko matome, jog nesant erdvinio filtravimo, pluošto pradžioje esanti didesnio skersmens centrinė smailė taip pat yra gerokai intensyvesnė, bei aiškiai matomos ašinės intensyvumo osciliacijos. L3 lęšio židinio plokštumoje pastatytas pagamintas erdvinis filtras ištaisė didžiąją dalį nukrypimų nuo teorinio modelio - ašinės osciliacijos stipriai sumažėjo, nebėra intensyvumo smailės pluošto pradžioje, o bendra ašinio intensyvumo forma nedaug skiriasi nuo teorinio modelio. Pagrindinis tokio metodo trūkumas yra tai, jog sudėtinga pagaminti erdvinį filtrą tiksliai iškerpantį tik reikalingą žiedą, bei tokio filtro išstatymas.

Vėlesniuose eksperimentuose, generuojant  $n = 4$  ir  $n = 6$  vektorinius pluoštus, išbandytas ir kiek kitoks metodas kokybiško Beselio-Gauso pluošto generacijai vietoj refrakcinio aksikono naudojant difrakcinį (9 pav. b)), taip išvengiant netobulos refrakcinio aksikono viršūnės įtakos intensyvumo skirstiniams. Išmatuotas šios sistemos kuriamas erdvinis spektras pateiktas (15 pav. c)). Iliustracijoje matome, jog spektrą sudaro vienas, baigtinio pločio, panašaus skersmens kaip ir prieš tai žiedas, bei intensyvus taškas centre, atsirandantis dėl nepilnai dif-



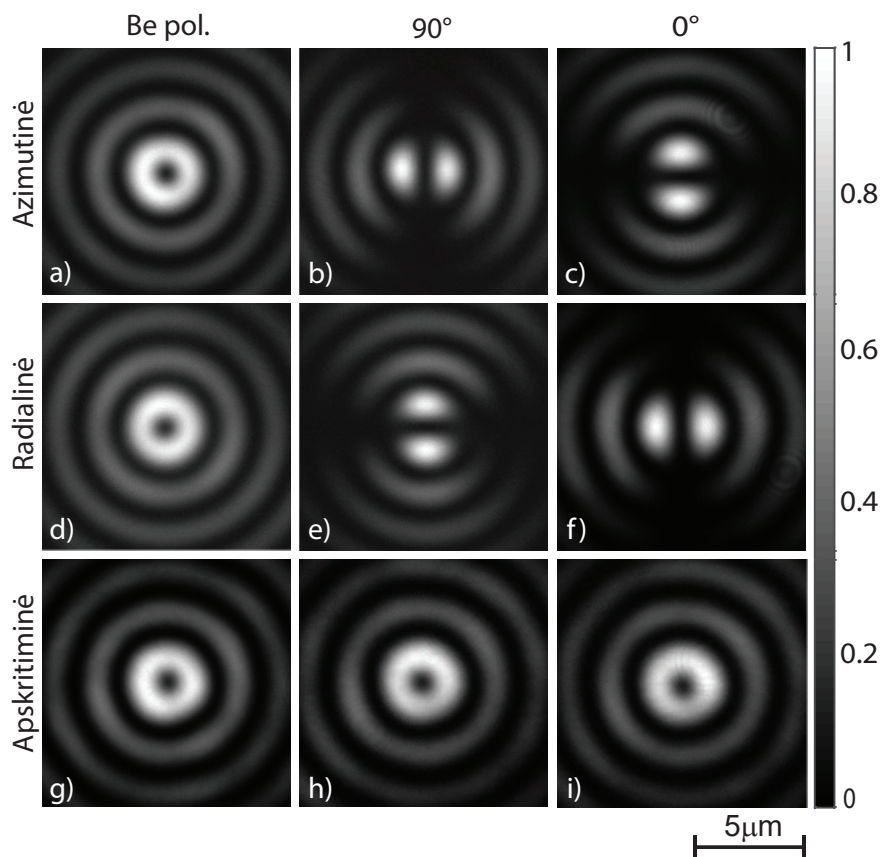
16 pav. Išmatuoti ašiniai Beselio-Gauso pluošto intensyvumo skirstiniai sugeneruoti refrakciniu a) bei difrakciniu b) aksikonu (pav. 9 a) ir b) atitinkamai). Mėlyna linija - teorinės kreivės tinkinimas, raudona - matavimai be erdvinio filtro, geltona - su erdviu filtru.

ragavusio pluošto. Šiuo atveju šis intensyvus taškas gali būti nesunkiai uždengiamas L3 lęšio židinio plokštumoje. Išmatuotas sistemos kuriamas intensyvumo skirstinys pateiktas 16 b) paveikslėlyje. Iš grafiko matome, jog kuriamas Beselio-Gauso pluoštas gan kokybiškas ir gerai atitinka teorinį modelį bei pasižymi tik minimaliomis intensyvumo osciliacijomis. Šio metodo pagrindinis privalumas, lyginant su aukščiau aprašytu, yra tas, jog gan paprastai generuojamas kokybiškas Beselio-Gauso pluoštas išvengiant sudėtingo erdvinio filtravimo. Tačiau yra ir keli trūkumai - naudojamas difrakcinis aksikonas tinkamai veikia tik su apskritimine poliarizacija, bei jo difrakcijos efektyvumas siekia  $\sim 85\%$ . Abu metodai leidžia sugeneruoti kokybiškus Beselio-Gauso pluoštus ir panaudoti juos aukštesnių eilių vektorinių Beselio-Gauso pluoštų gavimui, papildomomis banginėmis plokštelėmis modifikuojant esamas sistemas.

### 3.2.2 Skersiniai ir išilginiai intensyvumo skirstiniai

Teoriškai modeliuodami sistemą gavome, jog vektoriniai ir sūkuriniai pluoštai visais atvejais generuoja pluoštus turinčius intensyvų žiedą centre, o pluoštų statmenos komponentės, formuoja pluoštą iš  $2n$  asimetrinių intensyvumo zonų, kurių išsidėstymas turėtų priklausyti nuo poliarizatoriaus krypties. Eksperimentiškai gauti rezultatai patvirtina teorinio modeliavimo rezultatus (17 ir 18 pav.). Visais atvejais pluošto simetrija ir matmenys glaudžiai atkartojo teorinį modelį, tiesa, eksperimentiniuose rezultatuose matomos intensyvumo variacijos ant žiedų. Intensyvumo variacija siekia iki  $20\%$  nuo maksimalios vertės ir jos kiek ryškesnės sūkurinių pluoštų atveju (17 pav. (g,h,i)). Geriausi rezultatai gauti atskirų vektorinių pluoštų atveju (b,c,e,f). Sugeneruotų aukštesnės eilės  $n = 4$  ir  $n = 6$  atveju (18 pav.) gauti panašūs rezultatai - intensyvumo variacija siekia iki  $20\%$  maksimalios vertės, o pluoštų simetrija gerai atitinka teorinį modelį, tačiau matomos kiek ryškesnės periodinės intensyvumo moduliacijos. Aukštesnės eilės vektoriniai pluoštai pasižymi gerokai sudėtingesniu poliarizacinių lauku ir dėl to yra jautresni sistemos netobulumams.

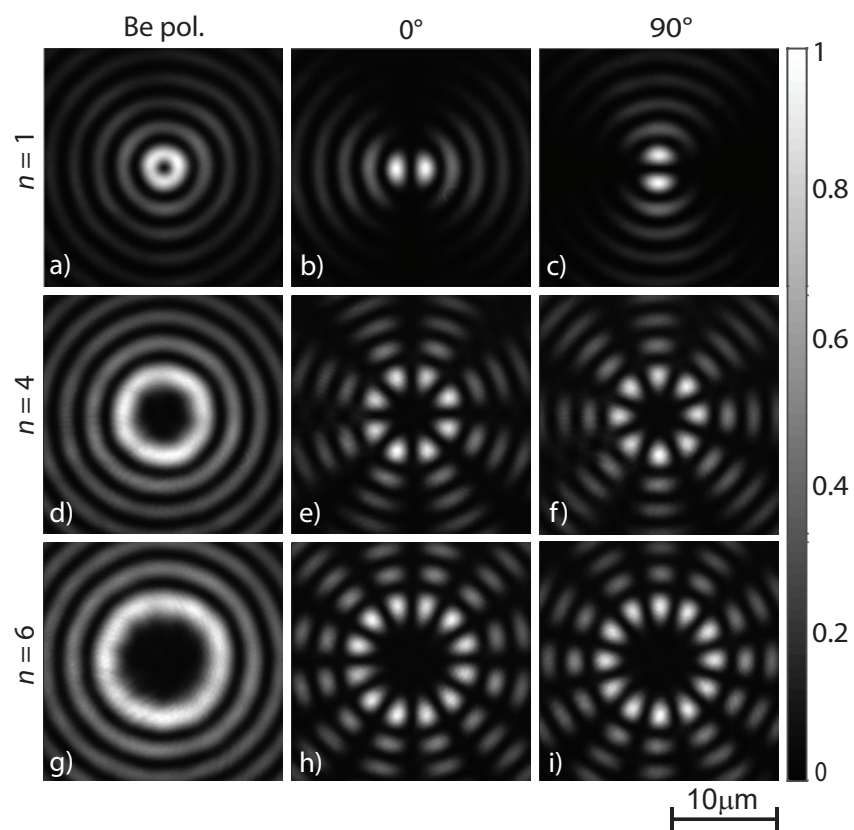
Iš pluoštų intensyvumo skirstinų matavimų  $xz$  plokštumoje (19 pav.) matome panašius



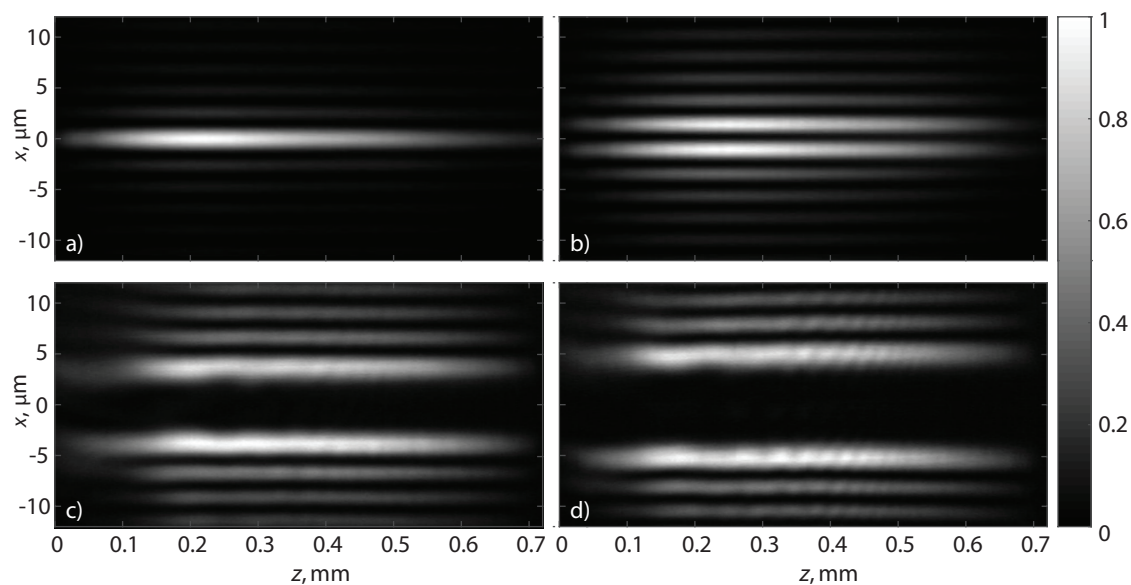
17 pav. Eksperimentiškai išmatuoti dvimačiai azimutinės a), radialinės b) ir sūkurinių c) Beselio-Gauso pluoštų intensyvumo skirstiniai intensyviausioje vietoje ant ašies, bei jų atskiros komponentės atitinkamai (b,c,e,f,h,i).

rezultatus - skirstinių forma ir matmenys artimi teoriniams skaičiavimams, tačiau matoma ir nedidelių nukrypimų, pasireiškiančių nedidele asimetrija bei įvairaus dažnio intensyvumo moduliacijomis. Matomi neatitikimai nuo teorinio modelio kiek didesni  $n = 6$  atveju ir mažiausi  $n = 1$  atveju. Taip pat galime pastebėti, jog  $xy$  intensyvumo skirstiniai išlaiko simetriją visoje pluošto formavimosi zonoje.

Nukrypimai nuo teorinių modelių galėjo atsirasti dėl netobulų optinių elementų ar S-bangos ir banginių plokštelių, bei netikslaus sistemos suvedimo. Dėl šių iškraipymų sistemoje galėjo atsirasti kiek kitokio dažnio spektrinės komponentės ar pluošto ar jo dalių fazės nukrypimai ir tai sukelti stebimas intensyvumo moduliacijas. Tačiau nepaisant to, sistemoje sugeneruoti pluoštai pakankamai kokybiški ir tinkami tolimesniems eksperimentams.



18 pav. Eksperimentiškai išmatuoti dvimačiai azimutinės vektorinių Beselio-Gauso pluoštų intensyvumo skirstiniai  $xy$  plokštumoje, kai į sistemą krinta tiesiškai poliarizuotas Gauso pluoštas atvejais, kai a)  $n = 1$ , d)  $n = 4$ , g)  $n = 6$ , bei atskiros statmenos komponentės (b,c), (e,f) ir (h,i) atitinkamai.



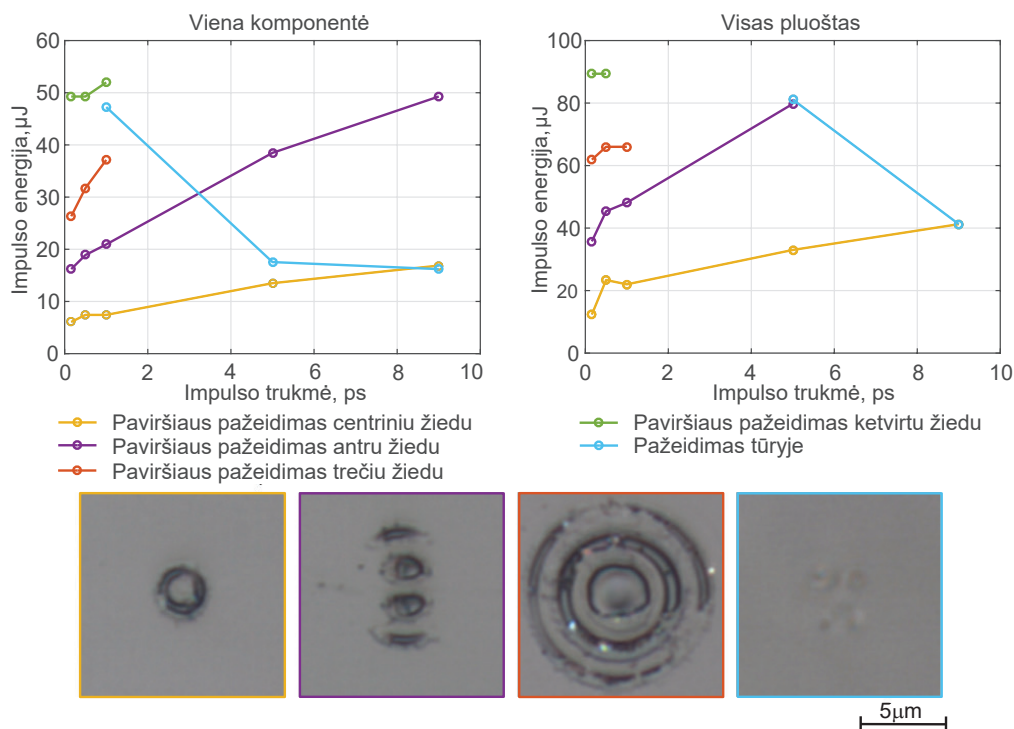
19 pav. Eksperimentiškai išmatuoti sistemos formuojamo vektorinio Beselio-Gauso pluošto intensyvumo skirstiniai  $xz$  plokštumoje, kai į sistemą krinta tiesiškai poliarizuotas Gauso pluoštas atvejais, kai a)  $n = 0$ , b)  $n = 1$ , c)  $n = 4$ , d)  $n = 6$ .

### 3.3 Skaidrių medžiagų modifikavimas vektoriniais Beselio-Gauso pluoštais ir jų komponentėmis

#### 3.3.1 Pažeidimų pavieniais impulsais analizė

Pirminiai skaidrių terpių mikroapdirbimo eksperimentai atlikti radialinę ir azimutinę poliarizaciją turinčiais  $n = 1$  vektoriniais Beselio-Gauso pluoštais siekiant išsiaiškinti impulso trukmės, energijos, bei pačio pluošto simetrijos ir poliarizacijos įtaką pažeidų formavimuisi. Visų pirma siekta išsiaiškinti lazerio parametrus, kuriems esat įvyksta optinis pažeidimas paviršiuje ir tūryje. Tikslas rasti parametrus, su kuriais būtų formuojamas pažeidimas per visą bandinio tūrį, o paviršinis pažeidimas būtų kuo mažesnis - tik su pirmu skersinio intensyvumo žiedu, taip siekiant sukurti taisyklingo tuščiavidurio cilindro formos pažeidimas bandinyje tolimesniems cheminio išdininimo tyrimams.

Turimas lazeris leidžia ištirti pažeidimų formavimąsi gan plačiame impulso energijų (iki 1.5 mJ) bei trukmių (0.157 ps - 10 ps) diapazone. Visų pirma atlikti optinio pramušimo slenksčio ir priklausomybės nuo impulso trukmės eksperimentai radialinę simetriją turinčiu  $n = 1$  Beselio-Gauso pluoštu ir jo komponente. Eksperimentai atlikti pastoviu greičiu (20 mm/s) transliuojant Eagle XG stiklo bandinį viena kryptimi, nekeičiant pluošto padėties bandinio atžvilgiu ir pastoviu pasikartojimo dažniu (savasis dažnis 6 kHz, bei impulsų dalikliu papildomai sumažintas iki 0.2 kHz) veikiant lazeriui, taip išmėtant atskirus impulsus 100  $\mu\text{m}$  atstumu vie-



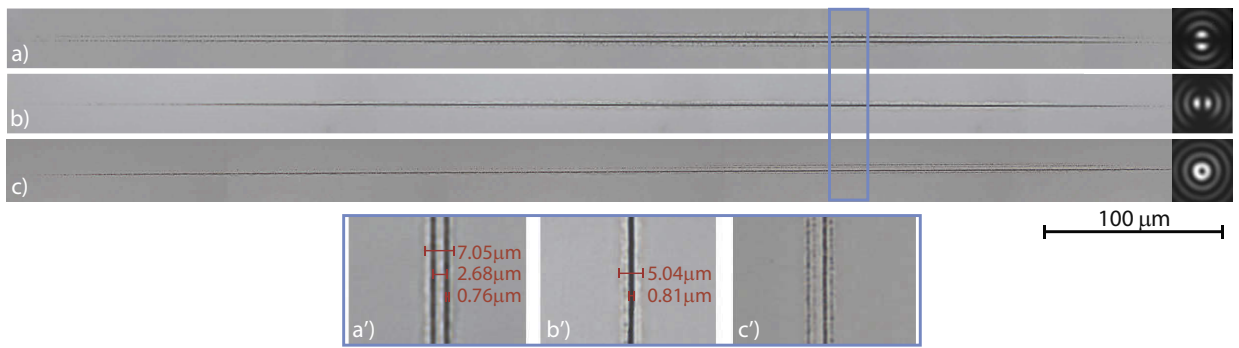
20 pav. Radialinės poliarizacijos vektoriniu Beselio-Gauso pluoštu bei vienos iš jo komponentių pažeidimo tipo priklausomybė nuo impulso trukmės ir galios, bei tipinių pažeidimų pavyzdžiai Eagle XG stikle (spalvotas rėmelis atitinka legendą).

nas nuo kito, siekiant minimalizuoti formavimosi įtaką vienas kitam. Eksperimento duomenys apibendrinti 20 paveikslėlyje. Grafike apskritimai žymi duomenų taškus, o skirtingos spalvos skirtingus pramušimo tipus, kurie atlikus eksperimentą buvo sugrupuoti į penkias kategorijas - paviršiaus pramušimą vienu - keturiais žiedais, bei tūrinį pažeidimą. Atitinkamos spalvos kontūru apvesti paveikslėliai vaizduoja tipinius pramušimo vaizdus. Iš grafikų matome, jog esant trumpoms impulso trukmėms (0.158 ps - 1 ps) dominuoja paviršiaus pažeidimas - didinant impulso energiją energijos pažeisti paviršių užtenka vis daugiau žiedų, tačiau pažeidimas tūryje neatsiranda, o ilgesnių trukmių atveju priešingai - paviršiuje formuojasi pažeidimas tik centriniu žiedu, o didinant impulso energiją atsiranda pastebimas pažeidimas tūryje. Tai galima paaiškinti tuo, jog itin trumpų impulsų atvejų smailinė galia yra daug didesnė, ir jos pakanka prasidėti daugiafotonei jonizacijai vos impulsas pasiekia bandinį. Taip pat galimai vyksta netiesiniai reiškiniai (Kero efektas, savifokusacija) dėl kurių sklindant didelio intensyvumo pluoštai iškraipomi. Iškraipytos fazės pluoštas nebesudaro taisyklingos Beselio zonos ir energijos tankio nebepakanka tūriniam pažeidimui. Ilgų impulsų atveju pramušimas nevyksta tolimesniais žiedais, nes energijos nepakanka sukelti netiesinei sugerčiai, tačiau pluoštui pasiekus Beselio zoną ir ten konstruktyviai suinterferavus, centrinio žiedo intensyvumas Beselio zonoje stipriai išauga ir energijos pakanka indukuoti daugiafotonei sugerčiai bei griūtinei jonizacijai, kas sukelia stiprią spinduliuotės sugertį bei medžiagos šilumą ir galiausiai tūrinį pažeidimą. Šią situaciją vaizduoja ir 21 paveikslėlis, kuriame matomi pažeidimai lydyto kvarco tūryje iš poliruoto šono, esant skirtingoms impulso trukmėms.



21 pav. Radialinės poliarizacijos vektorinio Beselio-Gauso pluošto komponente padaryti pažeidimai lydyto kvarco stikle esant fiksuotai 67.5  $\mu\text{J}$  impulso energijai ir skirtingoms impulso trukmėms.

Matomas pažeidimas atskira radialinės poliarizacijos Beselio-Gauso pluošto komponente, esant 67.5  $\mu\text{J}$  energijos impulsui, išryškėja tik trukmei pasiekus 3ps. Didinant impulso trukmę matomas vis ryškesnis ir trumpesnis pažeidimas. Taip pat pastebėta, jog panašaus tipo pažeidimams padaryti vektorinio pluošto komponente užtenka maždaug dvigubai mažesnių energijų. Esant atskirai komponentei, pluoštas užima maždaug dvigubai mažesnę turį nei žiedo atveju, todėl energijos tankis išlieka panašus. Energijos sumažėjimas esamoje sistemoje atsiranda dėl poliarizatoriaus nufiltruojamos kitos, statmenos praėjusiai, komponentės su panašia energija



22 pav. Radialinės poliarizacijos vektoriniu Beselio-Gauso pluoštu c), bei jo statmenomis komponentėmis (a,b) padaryti pažeidimai lydyto kvarco stikle 5 ps trukmės impulsais. Impulso energija 137.5  $\mu\text{J}$  c) atveju, bei 67.5  $\mu\text{J}$  (a, b) atvejais. Mėlyna linija apvesti (a', b', c') žymi išdidintas sritis. Dešinėje - modifikacijoms naudoti atitinkami pluoštų intensyvumo skirstiniai bei orientacija.

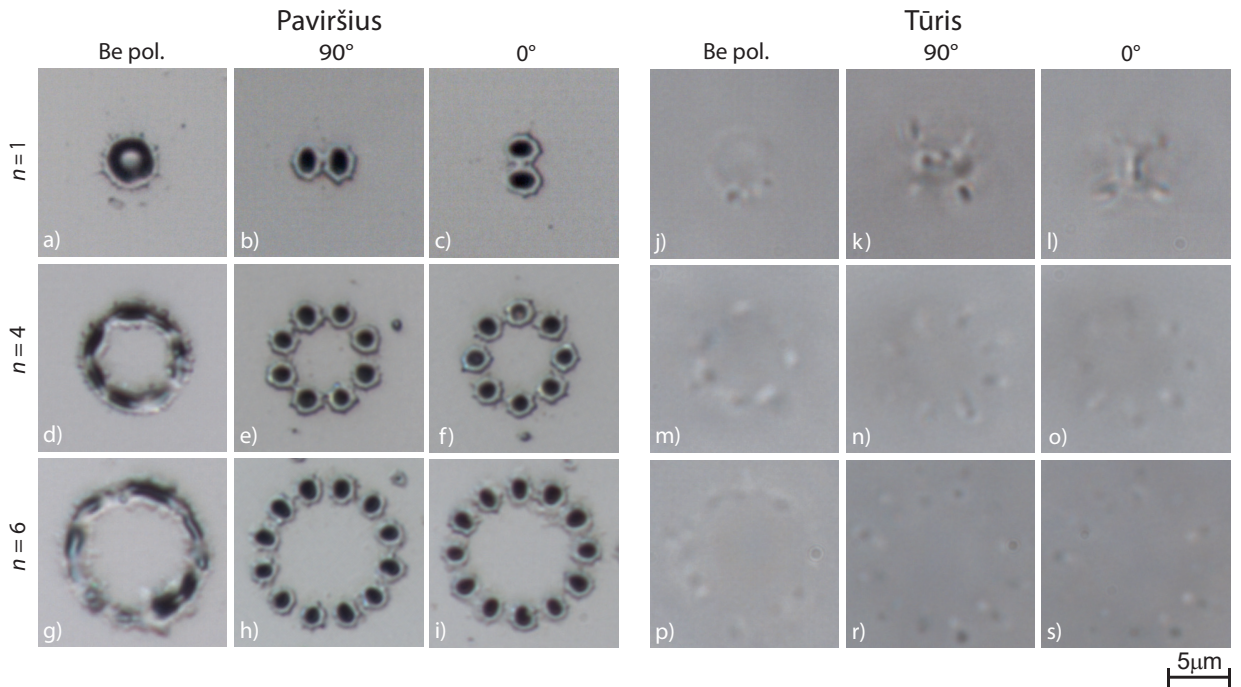
kaip ir praėjusios.

Svarbu ir tai jog pažeidimai visame tūryje nepraranda simetrijos. 22 paveikslėlyje pavaizduoti pažeidimai tūryje padaryti radialiai poliarizuotu Beselio-Gauso pluoštu bei statmenomis jo komponentėmis lydyto kvarco bandinyje. Iš iliustracijos matome, jog pluoštas sudarytas iš dviejų intensyvumo zonų tūryje daro du lygiagrečius pažeidimo kanalus, kurie tarpusavyje nesusijungia - simetrija išlaikoma per visą ilgį. Pluošto pažeidimo pradžioje ir pabaigoje matoma, jog lygiagretūs pažaidos kanalai nevienodo ilgio, dėl intensyvumo netolygumo tarp atskirų zonų. Atstumas tarp kanalo centrų apie 2.67  $\mu\text{m}$ , o kanalo plotis  $\sim 0.8 \mu\text{m}$ . Matmenys gali būti netikslūs, nes mikroskopas sukalibruotas matavimams bandinių paviršiuje. Pažaidos tūryje žiedo simetrija pasižymintčio pluošto atveju matomi ne taip aiškiai išreikšti kanalai, bei didesnė asimetrija dėl netolygaus skersinio pluošto intensyvumo.

Pramušimo pavieniais impulsais slenksčio eksperimentai buvo pakartoti ir naudojant SCHOTT D263T stiklą bei aukštesnių eilių Beselio-Gauso pluoštus, o gauti rezultatai parodė panašias priklausomybes kaip ir Eagle XG stiklo bei  $n = 1$  pluoštų atveju.

Pažaidų D263t stiklo paviršiuje ir tūryje, suformuotų aukštesnės eilės vektoriniais Beselio-Gauso pluoštais iliustracijos pateiktos 23 ir 25 paveikslėliuose. Visais atvejais gautos pažaidos tūryje ir paviršiuje atitinka išmatuotus pluoštus (18 pav.). Galima pastebėti, jog atskiros  $n = 1$  vektorinio pluošto komponentės formuoja asimetrines pažaidas (23 b, c, k, l), kurios kuria kryptingus skilimus, išilgai atskirų pažaidų ištempimo krypties. Ankstesniuose tyrimuose tokios pažaidos buvo sėkmingai panaudotos stiklų pjovimui [46]. Tuo tarpu  $n = 4$  ir  $n = 6$  vektoriniai pluoštai turi kitą įdomią savybę - formuoja kiek didesnio ( $\sim 7 \mu\text{m}$ , kai  $n = 4$  ir  $\sim 10 \mu\text{m}$ , kai  $n = 6$  esamos sistemos atveju) tuščiavidurius cilindrus erdvėje. Atskirų komponentių atveju žiedai sudaryti iš  $2n$  intensyvumo smailių išdėstytų ratu, kurių pozicija kinta priklausomai nuo poliarizatoriaus pasukimo kampo. Tokie pluoštai gali būti panaudojami didelio ilgio-pločio santykio tuščiavidurių cilindrinė struktūrų formavimui skaidriose terpėse.



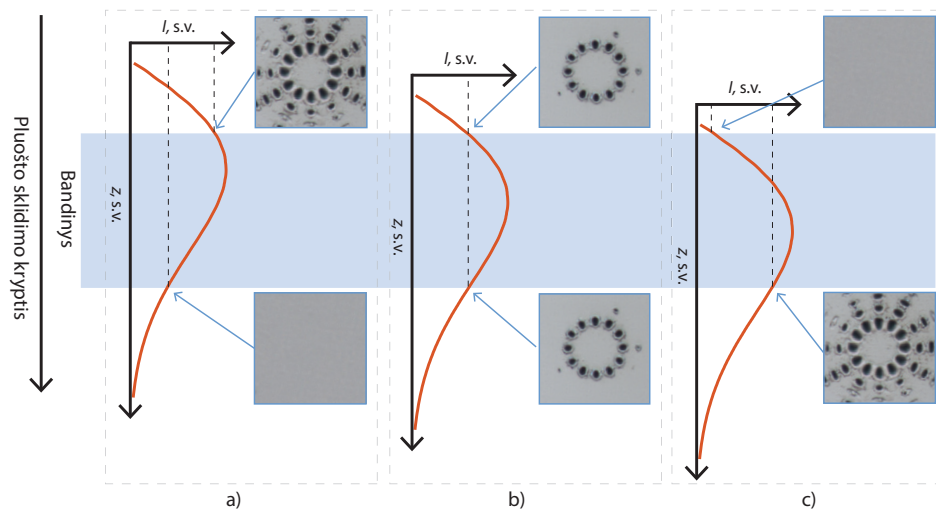


23 pav. Pažeidimai vektoriniais Beselio-Gauso pluoštais bandinio paviršiuje, kai a)  $n = 1$ , d)  $n = 4$ , g)  $n = 6$ , bei atskiromis statmenomis komponentėmis (b,c), (e, f) ir (h, i) atitinkamai. Bei pažeidimai bandinio tūryje, kai j)  $n = 1$ , m)  $n = 4$ , n)  $n = 6$ , bei atskiromis statmenomis komponentėmis (k, l), (n, o) ir (r, s) atitinkamai. Bandinys - SCHOTT D263T stiklas. Pažeidimai padaryti  $265.2 \mu\text{J}$  (a, d, g, j, m, p) ir  $131.5 \mu\text{J}$  (b, c, e, f, h, g, k, l, n, o, r, s) energijos ir 5 ps trukmės impulsais.

Galima pastebėti, jog nors padarytos pažaidos pavieniais impulsais išlaiko pluošto simetriją, tačiau yra gana netolygios tiek tūryje tiek paviršiuje, tiesa, panašus netolygumas buvo stebimas ir eksperimentiniuose pluošto matavimo rezultatuose. Atskirų komponentių atveju netolygumai daug mažesni nei pilnų pluoštų atvejų ir formuojami gana taisyklingos formos dariniai su minimaliu skirtumu tarp atskiromis intensyvumo smailėmis suformuotų pažaidų, o tūryje aiškiai matomos gan vienodos atskiromis intensyvumo smailėmis modifikuotos vietos. Tūrinių pažaidų atveju terpės modifikacijos padarytos  $n = 4$  ir  $n = 6$  pluoštais nėra taip ryškiai išreikštos lyginant su  $n = 1$  eilės pluoštais naudojant panašios energijos impulsus. Taip yra dėl to, jog dėl didesnio žiedo skersmens energija pasiskirsto didesniame plote, taip sumažinant intensyvumo tankį.

Verta paminėti, jog pluošto pozicionavimas  $z$  ašyje bandinio atžvilgiu labai svarbus gaunamiems rezultatams, todėl 20 pav. gautos vertės gali labai skirtis. Ašinis sugeneruotų pluoštų intensyvumas nėra tolygus (16 pav.) ir sudaro "kalniuką"  $z$  ašyje. Dėl šios priežasties pažaidos tiek paviršiuje tiek tūryje gali labai skirtis esant skirtingoms pluošto padėtimis bandinio atžvilgiu (24 pav.). Jei pluoštas per aukštai ar per žemai (24 pav. (a, c)) energijos tankis didesnis viršutiniame ar apatiniame paviršiuje atitinkamai, tokiu būdu gaunant skirtingas pažaidas (ar visai jų negaunant, jei neviršijamas pažaidos slenkstis) esant tai pačiai impulso energijos vertei. Tūrinės pažaidos atveju stebima analogiška situacija - maksimali ašinė intensyvumo vertė ir tuo

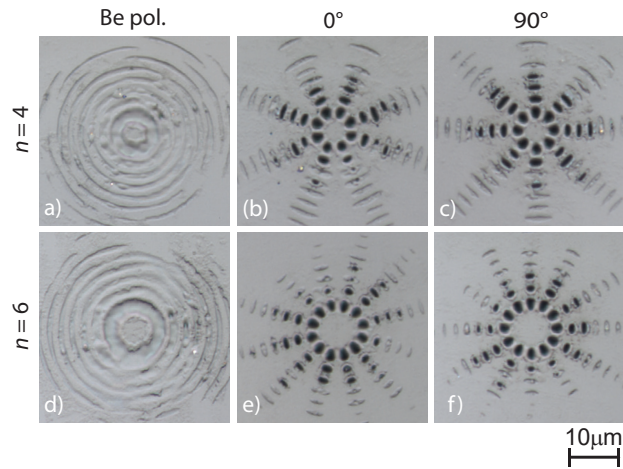
pačiu maksimalus energijos tankis bus arčiau viršutinio ar apatinio paviršiaus. 25 paveikslėlis vaizduoja pažaidas bandinio paviršiuje, padarytas tokios pačios energijos impulsais kaip ir 23 pav. atveju, tačiau šiuo atveju pluoštas yra kilstelėtas 150  $\mu\text{m}$  aukščiau bandinio atžvilgiu. Gauti pažeidimai ryškesni - energijos tankio pakako paviršių pažeisti ir tolimesniais žiedais. Idealiu atveju (24 pav. b)), siekiant kokybiškų bandinių cheminio ėsdinimo eksperimentams, pluoštas bandinio atžvilgiu turėtų būti pozicinuotas taip, kad ašinis intensyvumas abiejose paviršiuose būtų vienodas, o viršutiniame ir apatiniame paviršiuje būtų matomos tik pirmo žiedo pažaidos, tuo pačiu gaunant ir tolygiausią intensyvumo pasiskirstymą tūryje.



24 pav. Iliustracija parodanti sugeneruoto pluošto pozicionavimo bandinio atžvilgiu svarbą pažeidimo formavimuisi. Raudona linija - ašinis pluošto intensyvumo skirstinys. Esant tiems patiems pluošto parametrų, atveju a) energijos tankis bandinio viršutiniame paviršiuje didesnis nei apatiniame, b) atveju energijos tankiai vienodi, c) atveju energijos tankis didesnis apatiniame paviršiuje. Visais atvejais atitinkamai netolygus ir energijos tankis bandinio tūryje.

### 3.3.2 Pirminis cheminio ėsdinimo eksperimentas ir modifikacijos daugeliu impulsų

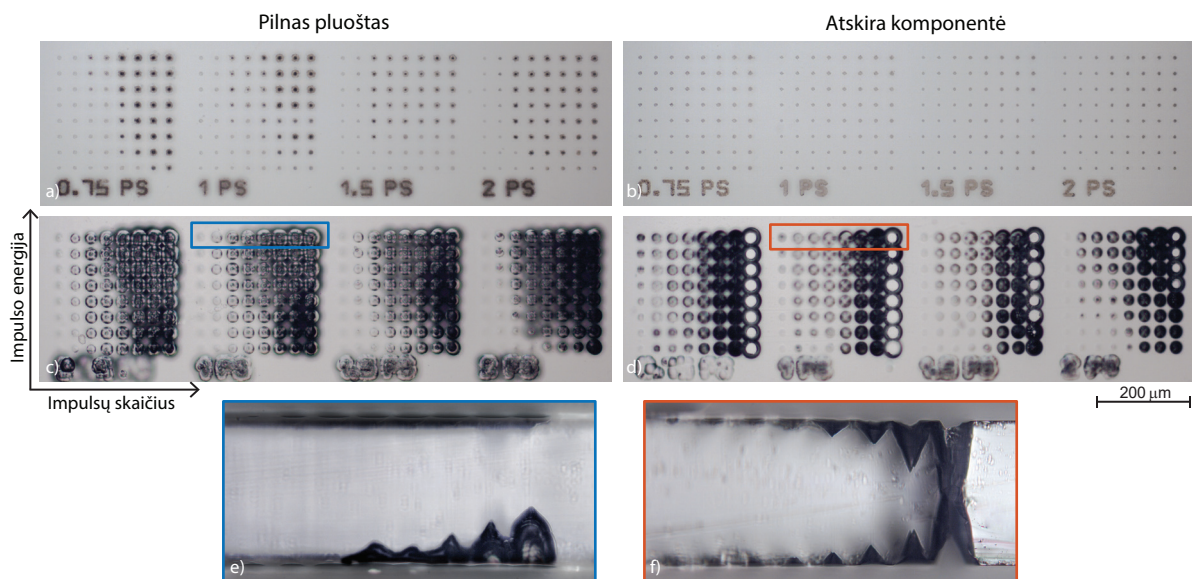
Mikroapdirbimo eksperimentai pavieniais impulsais parodė, jog esama sistema galime sėkmingai pagaminti tuščiavidurio cilindro simetriją turinčias struktūras stiklo tūryje naudojant aukštesnių eilių vektorinius Beselio-Gauso pluoštus. Tolimesnio eksperimento tikslas - pasinaudojus gautomis žiniomis bei pasitelkiant cheminį ėsdinimą selektyviam modifikuotos struktūros pašalinimui iširti tokių pluoštų pritaikymą kiaurymių 0.3 mm storio D263T bandinyje gaviui. Tolimesniems eksperimentams dėl didžiausio skersmens kuriamo žiedo pasirinktas  $n = 6$  pluoštas. Įrašytų struktūrų tolygumas tiesiogiai daro įtaką išėsdintų kiaurymių tolygumui, todėl siekiant kokybiškų kiaurymių, visais atvejais pluoštas pozicinuojamas impulso energija parenkami taip, jog abiejuose paviršiuose pažaidos būtų vienodos ir medžiaga būtų pažeidžiama tik pirmu žiedu (24 pav. b)). Aukštesniųjų eilių Beselio-Gauso pluoštų atveju intensyvumas antrajame žiede daug artimesnis pirmojo žiedo intensyvumui ( $\sim 49\%$  pirmojo žiedo intensy-



25 pav. Pažeidimai vektoriniais Beselio-Gauso pluoštais, kai a)  $n = 4$ , d)  $n = 6$ , bei atskiromis statmenomis komponentėmis (b,c), (e,f) atitinkamai, SCHOTT D263T stiklo paviršiuje. Pažeidimai padaryti  $265.2 \mu\text{J}$  (a, d) ir  $131.5 \mu\text{J}$  (b, c, e, f) energijos ir 5 ps trukmės impulsais. Pluoštas formuojamas kiek aukščiau bandinio nei 23 atveju, tokiu būdu dėl netolygaus ašinio intensyvumo gaunant didesnę intensyvumo tankį bandinio paviršiuje.

vumo), lyginant su nulinės eilės Beselio-Gauso pluoštų ( $\sim 16\%$  centrinės smailės intensyvumo) (10 pav.). Dėl šios priežasties norimų struktūrų formavimui turėsime kiek mažesnę tinkamų lazerio parametrų langą nei nulinės eilės pluoštų atveju. Siekiant tolygesnio ašinio intensyvumo skirstinio per bandinio storį iš eksperimento sistemos (9 pav. b)) buvo pašalintas 2x pluošto spaustuvas, tokiu būdu sukuriant dvigubai ilgesnį pluoštą, kuris išlaiko tokį patį skersinį intensyvumo pasiskirstymą.

Pirminiuose cheminio ėsdinimo eksperimentuose buvo pastebėta, jog stiklo modifikacijos pavieniais impulsais atitinkančios aukščiau išskeltus reikalavimus pasižymi labai mažu selektyvumu ėsdinimui ir dėl šios priežasties nėra tinkamos kiaurymių gavimui. Sekančiame eksperimente buvo įtrauktas dar vienas kintamasis - impulsų į vieną vietą skaičius, tokiu būdu siekiant stipresnių modifikacijų (nanogardelių formavimasis/įtempiai ir mikroskilimai) sukeltų akumuliacinių ar šiluminių efektų medžiagoje. Tuo pačiu buvo siekiama susiaurinti tinkamų lazerinio proceso parametrų langą - visų pirma vizualiai buvo ištirta ėsdinimo spartos ir selektyvumo priklausomybė nuo impulso trukmės, energijos bei impulsų skaičiaus, bandinius ėsdinant KOH tirpale tol, kol gausime kiaurymes per visą bandinio storį. Ėsdinimo procesas užtruko 60 h, o rezultatai pateikti 26 paveikslėlyje. Iliustracijoje pavaizduotas bandinio paviršius, jį stebint pralaidumo mikroskopijos režime, prieš (a, b) ir po (c, d) ėsdinimo atvejais, kai bandinys buvo modifikuojamas pilnu pluoštu (kairėje) ir atskira poliarizacine komponente (dešinėje). Eksperimentas parodė, jog didžiausias ėsdinimo sparta (matomos kiaurymės) buvo pasiekta atskira pluošto komponente esant labai dideliame impulsų skaičiui (500000 impulsų) bei naudojant kiek mažesnės trukmės impulsus (0.75 ps - 1.5 ps) ir didžiausią impulso energiją. Pilno pluošto atveju analogiškos modifikacijos pasižymėjo mažesniu selektyvumu cheminiam ėsdinimui. Rezultatai

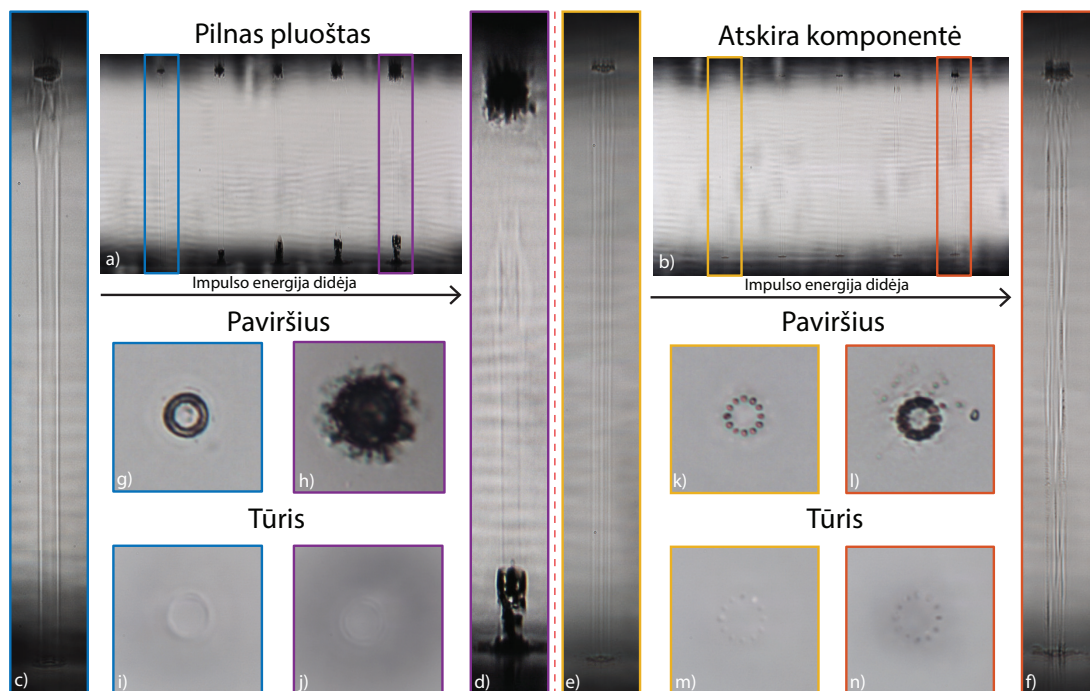


26 pav. Mikroapdirbimo parametrų tyrimo cheminiam išdinimui iliustracija. Pralaidumo mikroskopijos nuotraukos (a, b) - bandinys prieš cheminį išdinimą, (c, d) - bandinys po cheminio išdinimo (60 h 80 °C temperatūros ir 30 % koncentracijos KOH). Kiekvienu atveju testuotos keturios impulsų trukmės (0.75 ps, 1 ps, 1.5 ps ir 2 ps). Kiekvienos trukmės atveju testuotos pažeidimų matricos, kuriose horizontaliojoje ašyje kinta impulsų skaičius (1, 10, 100, 1000, 10000, 50000, 100000, 500000) o vertikaliojoje impulsų energija (71.4  $\mu\text{J}$  - 100.8  $\mu\text{J}$ , 4.2  $\mu\text{J}$  žingsniu, atskiros komponentės atveju vertės dvigubai mažesnės). (e, f) - atitinkama spalva pažymėtų zonų vaizdas pro poliruotą bandinio šoną.

leidžia manyti, jog šiuo atveju didesnė išdinimo sparta buvo pasiekta dėl akumuliacinių efektų medžiagoje, o jiems įtaką turi ir skersinis pluošto intensyvumo pasiskirstymas.

Siekiant giliau panagrinėti ir suprasti šiuos efektus atliktos dar kelios eksperimentų serijos susiaurintoje lazerinio proceso parametrų erdvėje - tolimesnei analizei pasirinkti 1 ps trukmės impulsai, bei paleidžiama po 500000 impulsų į vieną vietą, kaskart keičiant impulso energiją (71.4  $\mu\text{J}$  iki 105  $\mu\text{J}$ , 8.4  $\mu\text{J}$  žingsniu (vertės dvigubai mažesnės atskiros komponentės atveju)). Lazeriui dirbant 40 kHz dažniu kiekvienos struktūros įrašymas užtruko po 12.5 s. Šiuo atveju pažeidos buvo formuojamos vienoje linijoje šalia bandinio krašto, tokiu būdu sudarant galimybę stebėti pažeidų formavimąsi bei cheminį išdinimą iš šono pro poliruotą bandinio kraštą.

Siekiant geriau suprasti procesą, visų pirma kiek giliau panagrinėtos gautos modifikacijos stikle (27 pav.). Nors rezultatai panašūs kaip ir pavienių impulsų atveju (23 pav.), tačiau galima išžvelgti esminių skirtumų. Vienas pagrindinių skirtumų yra tas, jog daugelio impulsų atveju galime gauti tolygias struktūras, net ir su netobulu pluoštu, priešingai nei pavienių impulsų atveju. Tai puikiai vaizduoja lūžio rodiklio modifikacijos bandinyje mažesnės energijos impulsais (71.4  $\mu\text{J}$  pilnu pluoštu ir  $\sim 30.7 \mu\text{J}$  atskira komponente, mėlyna ir geltona linija apvestos 27 pav. dalys atitinkamai). Modifikacijos simetriškos ir tolygios tiek paviršiuje tiek ir tūryje žiūrint iš viršaus ar iš šono. Tūryje matomi aiškūs modifikuoto lūžio rodiklio kanalai atitinkantys pirmąjį sugeneruoto pluošto intensyvumo žiedą. Kiek didesni netobulumai matosi tik tūryje

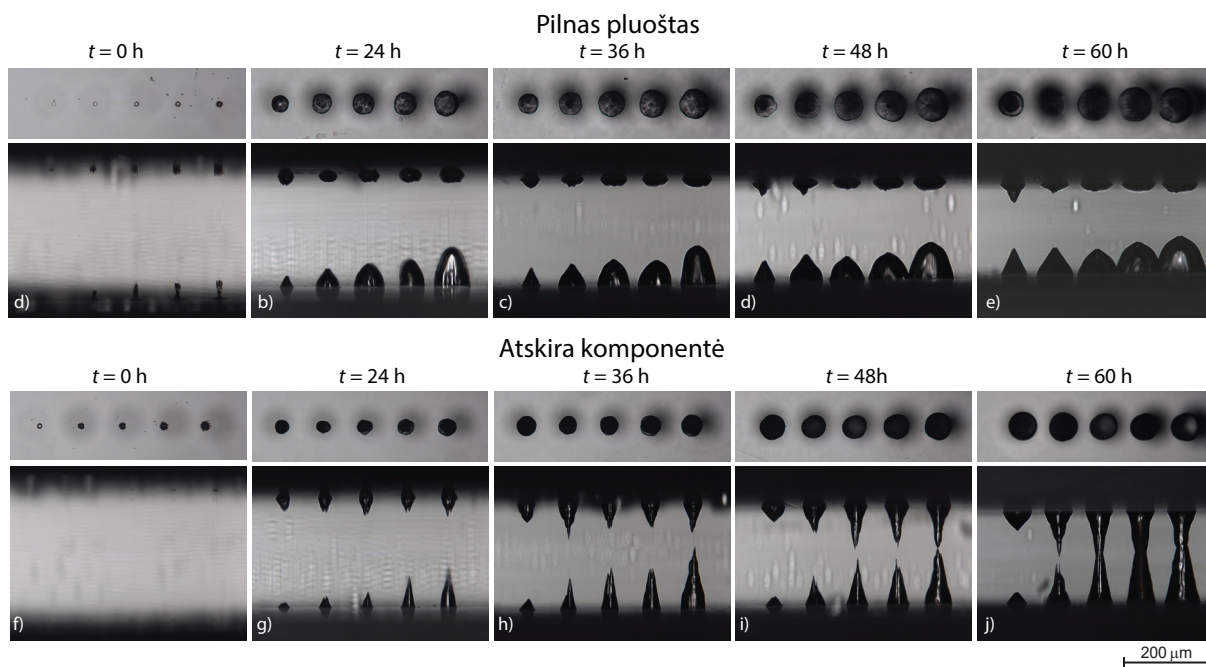


27 pav. Pažeidimai SCHOTT D263T bandinio paviršiuje ir tūryje pilnu vektoriniu  $n = 6$  Beselio-Gauso pluoštu (kairėje) bei atskira poliarizacijos komponente (dešinėje). Impulso trukmė 1 ps, impulsų skaičius 500000, energija didėja iš kairės į dešinę (a ir b) nuo  $71.4 \mu\text{J}$  iki  $105 \mu\text{J}$ ,  $8.4 \mu\text{J}$  žingsniu (vertės dvigubai mažesnės atskiros komponentės atveju). Atitinkamos spalvos linijos žymi padidintas sritis. (a - f) - vaizdas pro poliruotą bandinio šoną, (g - n) - vaizdas iš viršaus.

šalia paviršiaus. Situacija kiek įdomesnė modifikacijų didesnės energijos impulsais ( $105 \mu\text{J}$  pilnu pluoštu ir  $\sim 52.5 \mu\text{J}$  atskira komponente, violetine ir raudona linija apvestos 27 pav. dalys atitinkamai). Pilno pluošto atveju stebima ryški paviršiaus abliacija - matomos iki  $\sim 47 \mu\text{m}$  gylio duobės netaisyklingais kraštais paviršiuje. Galimai dėl to tūryje formuojasi nebe tokia tolygi struktūra. Atskiros komponentės atveju situacija kitokia - paviršiaus abliacija minimali, o tūryje formuojama struktūra nors ir netokia tolygi, tačiau pasižymi ryškesnėmis linijomis. Stebint tūrį iš bandinio viršaus matomos modifikacijos daug tamsesnės ir ryškesnės nei silpnesnių impulsų atveju (27 pav. (m, n)), kas pralaidumo mikroskopijos atveju, esant apšvietimui iš apačios gali reikšti šešėlių nuo mikroskilimų ar mikroertmių formavimąsi. Atskiros komponentės atveju pluoštos pasižymi 12 ratu išdėstytų intensyvių zonų, o veikiant bandinį tokia lazerine spinduliuote atitinkamai formuojamos ir ratu išdėstytos didelio-mažo-didelio įtempimų zonos, kas galimai lemia mikroskilimų formavimąsi. O daugelio impulsų atveju šis efektas dar labiau sustiprinamas dėl akumuliacinių ir šiluminių efektų. Taigi, gavome bandinius su skirtingais modifikacijų tipais, ir tolimesniuose eksperimentuose tirsime kokią įtaką tai turi ėsdinimo spartai.

### 3.4 Lazeriu indukuotas selektyvus cheminis ėsdinimas

Tolimesniame eksperimente panagrinėsime, kaip anksčiau SCHOTT D263T stikle suformuotos ir nagrinėtos skirtingų parametrų struktūros ėsdinosis  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$  ir  $30\%$  koncentracijos KOH. Eksperimento tikslas nustatyti atskirų struktūrų ėsdinimo greičius ir gauti kiaurymes per visą bandinio storį. Cheminio ėsdinimo eksperimentas užtruko 60 h, kas 12h valandų paimant po vieną bandinį analizei. Eksperimento rezultatai pateikti 28 ir 29 paveikslėliuose. 28 paveikslėlyje pavaizduota laikinė įrašytų modifikacijų cheminio ėsdinimo eiga, o 29 pateiktos ėsdinimo spartos bei išėsdinto bandinio storio laikinė priklausomybė. Lazeriu nemonifikuota bandinio dalis pasižymėjo  $0.79\text{ }\mu\text{m/h}$  (vienam paviršiui) cheminio ėsdinimo sparta ir per 60 h bandinys iš viso suplonėjo  $95.3\text{ }\mu\text{m}$ . Apdorojus cheminio ėsdinimo rezultatus, pastebėta jog visais atvejais laiko intervale tarp 24 h ir 36 h matomas ėsdinimo spartos sumažėjimas (29 pav.), kuris galėjo kilti iš nepastebėto ėsdinimo sąlygų pasikeitimo. Tačiau nepaisant to, rezultatai tinkami ir leido padaryti svarbių išvalgų bei palyginti ėsdinimo procesus esant skirtingiems pažaidų tipams. Vaizdas pro poliruotą bandinio šoną suteikia daugiau informacijos apie vykstančius procesus - galime pastebėti labai skirtingą cheminio ėsdinimo eigą pilno  $n = 6$  pluošto ir atskirtos poliarizacinės komponentės atvejais.



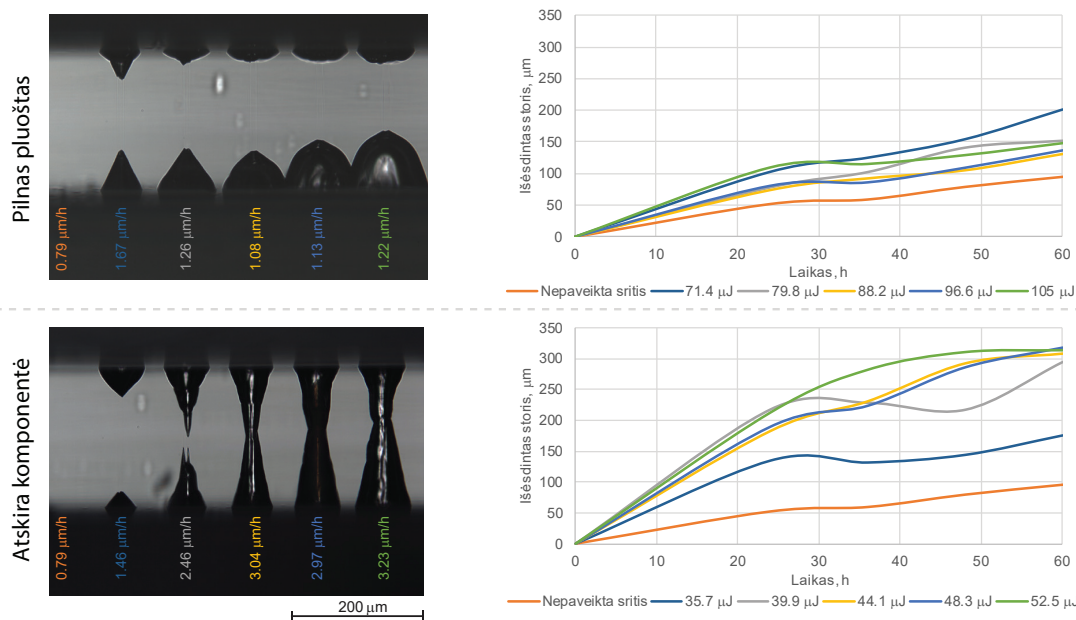
28 pav. SCHOTT D263T bandinio paviršius (viršuje) ir vaizdas pro poliruotą šoną (apačioje) kas 12 valandų cheminio ėsdinimo ( $80\text{ }^{\circ}\text{C}$  ir  $30\%$  koncentracijos KOH). Pažeidimai padaryti  $n = 6$  vektoriniu Beselio-Gauso pluoštu (a - e), bei atskira poliarizacine komponente (f - j). Impulso trukmė 1 ps, impulsų skaičius - 500000, energija didėja iš kairės į dešinę kiekvienu atveju nuo  $71.4\text{ }\mu\text{J}$  iki  $105\text{ }\mu\text{J}$ ,  $8.4\text{ }\mu\text{J}$  žingsniu (vertės dvigubai mažesnės atskiros poliarizacinės komponentės atveju).

Pilno pluošto atveju, kiaurymė per visą bandinio storį nėra suformuojama, ėsdinimo pradžioje matomas staigus kiaurymės didėjimas, tačiau laikui bėgant stipriai sulėtėja. Tai gali būti

paaškinama tuo, jog iš pradžių ėsdinimo sparta didesnė dėl stipriai lazeriu modifikuoto paviršiaus bei suformuotų duobių, o vėliau tirpalui pasiekus silpniau modifikuotas zonas ėsdinimas sulėtėja. Šiuo atveju po 60 h cheminio ėsdinimo suformuojamos ir kiek didesnio skersmens (iki 116  $\mu\text{m}$ ) duobės, bei matomas stiprus ėsdinimo spartos skirtumas viršutiniame ir apatiniame paviršiuje. Didžiausia ėsdinimo sparta šiuo atveju buvo 1.67  $\mu\text{m}/\text{h}$ , o selektyvumas 2.1, kai medžiaga buvo modifikuota mažiausios energijos impulsais. Didesnės energijos impulsai stipriai pažeidė paviršių ir galimai dėl to nesusiformavo taisyklingas pluoštas medžiagos tūryje. Iš optinio mikroskopo nuotraukų galime spręsti, jog tūryje turėjome tik lūžio rodiklio modifikaciją (I tipo pažeidimas), tai patvirtina ir gana maža ėsdinimo sparta, kaip minima ir literatūroje tokių modifikacijų atveju [25].

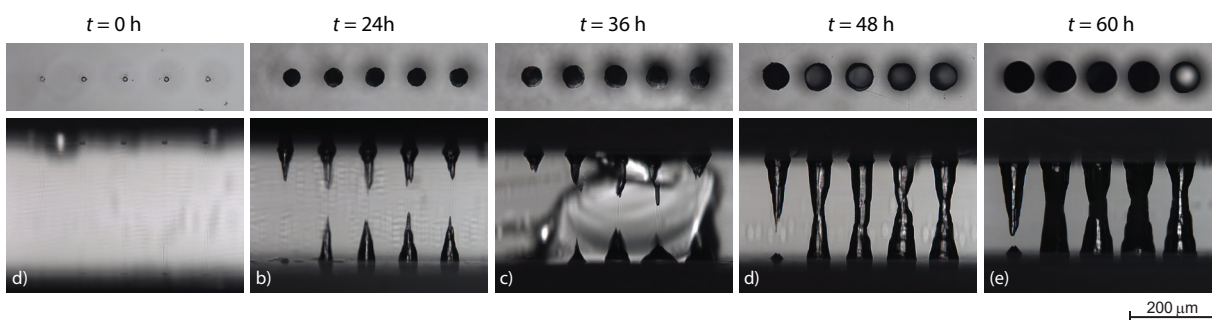
Atskiros poliarizacinės komponentės atveju situacija kiek kitokia, vizualiai ėsdinimo sparta atrodo daug tolygesnė bėgant laikui ir po 60 h suformuojamos kiaurymės per visą bandinio storį. Šiuo atveju didžiausia ėsdinimo sparta pasižymėjo modifikacijos padarytos didžiausios energijos impulsais ir siekė 3.23  $\mu\text{m}/\text{h}$ , tuo tarpu apskaičiuotas selektyvumas lygus 4.07. Didžiausią ėsdinimo greitį galima susieti su ryškiausiai optiniu mikroskopu matomomis tūrinėmis modifikacijomis (27 pav. (f, n)) darant prielaidą jog šiuo atveju buvo suformuoti mikrojskilimai ir mikroertmės (II tipo pažeidimas). Kiaurymės skersmuo apie 70  $\mu\text{m}$  visais impulso energijos atvejais. Dėl ne itin didelio cheminio ėsdinimo selektyvumo lazeriu modifikuotai bandinio zonai formuojasi kūgio formos kiaurymės su sąsmauka netoli bandinio centro. Kiaurymės sienelės su statmeniu iš bandinio paviršiaus sudaro 9°-12° kampą. Taip pat, išėsdintų kiaurymių paviršius nėra tolygus - cheminis ėsdinimas atkartoja ir išryškina visus lazeriu įrašytos struktūros netolygumus.

Kaip galime pastebėti kiaurymės sąsmauka nėra tiksliai bandinio centre, todėl buvo atliktas ir pluošto pozicionavimo jautrumo bandinio atžvilgiu sąsmaukos formavimuisi eksperimentas. Kaip minėta anksčiau, mūsų siekiamo tikslo atveju pluošto pozicionavimas bandinio atžvilgiu labai svarbus (24 pav. b)). Atvejais iliustruotais 24 a) ir c) paveikslėliuose, kai turime nesimetrišką ašinio intensyvumo pasiskirstymą per bandinio storį, lazerinio procesu metu bandinyje įrašysime ir atitinkamai netolygias modifikacijas. Kadangi ėsdinimo sparta priklauso nuo įrašytos modifikacijos, skirtingose bandinio pusėse turėsime skirtingas ėsdinimo spartas ir tokiu būdu susiformuos netaisyklingos kiaurymės. Tai puikiai iliustruoja 30 pavaizduoti eksperimento rezultatai, kai pluoštas bandinio atžvilgiu kaskart paveikiant lazeriu nuleidžiamas per 50  $\mu\text{m}$ , tokiu būdu eksperimentiškai realizuojant visus atvejus pavaizduotus 24 paveikslėlyje. Kiekvienos modifikacijos atveju naudoti anksčiau naudotas ir gerai veikiantis lazerio parametrų rinkinys:  $n = 6$  pluošto komponentė, 500000, 1 ps trukmės ir 50.4  $\mu\text{J}$  energijos impulsų. Cheminiam ėsdinimui naudotos analogiškos sąlygos: 60 h 80 °C ir 30 % koncentracijos KOH tirpale, analizuojant ėsdinimo progresą kas 12h. Rezultatai puikiai iliustruoja anksčiau iškeltą hipotezę - esant nesimetriškai bandinio storiui pozicinuotam pluoštui cheminio ėsdinimo metu formuojamos asimetrinės kiaurymės, kurių sąsmaukos padėtis kinta priklausomai nuo pluošto



29 pav. Apskaičiuotos skirtingomis impulsų energijomis įrašytų modifikacijų vidutinės cheminio ėsdinimo spartos (kairėje) pilno pluošto (viršuje) ir atskiros komponentės (apačioje) atvejais. Dešinėje - išėsdinto bandinio storio priklausomybė nuo laiko pilno pluošto (viršuje) ir atskiros komponentės (apačioje) atvejais. Kreivių spalvos atitinka skirtingos spalvos šriftu pažymėtas modifikacijas.

padėties bandinio atžvilgiu. Kai intensyviausia pluošto ašinio intensyvumo vieta yra arčiau apatinio paviršiaus, toje pusėje ėsdinimo sparta didesnė, todėl kiaurymės sąsmauka formuojasi arčiau viršutinio paviršiaus ir atvirkščiai (30 (e)). Centrinės kiaurymės atveju sąsmauka yra bandinio centre, dėl to galime daryti išvadą, jog pluoštas pozicinuotas teisingai.



30 pav. SCHOTT D263T bandinio paviršius (viršuje) ir vaizdas pro poliruotą šoną (apačioje) kas 12 valandų cheminio ėsdinimo (80 °C ir 30 % koncentracijos KOH). Pažeidimai padaryti  $n = 6$  vektorinio Beselio-Gauso pluošto komponente, pluoštą kaskart nuleidžiant bandinio atžvilgiu per 50 μm. Impulso trukmė 1 ps, energija 50.4 μJ, impulsų skaičius 500000.

Taigi, rezultatas pasiektas ir kiaurymė sėkmingai suformuota chemiškai ėsdinant  $n = 6$  vektorinio Beselio-Gauso pluošto poliarizacine komponente suformuotas struktūras, tačiau ėsdinimo trukmė labai ilga, dėl to stipriai suplonėja bandinys, o suformuotos kiaurymės pasižymi



nestačiomis sienelėmis ir sąsmauka. Iš gautų rezultatų galima spręsti, jog norint padidinti ėsdirimo spartą, bei tuo pačiu gauti statesnių sienelių kiaurymes reiktų stipriau pažeisti medžiagą  $n = 6$  pluošto komponente suformuojant ryškesnius mikrojskilimus/mikroertmes.

## Išvados

1. Įgyvendinus erdvinio filtravimo ir difrakcinio aksikono metodus kokybiškų Beselio-Gauso pluoštų generacijai eksperimento schemoje sėkmingai gauti ir išmatuoti kokybiški vektoriniai  $n = 1$ ,  $n = 4$  ir  $n = 6$  eilės Beselio-Gauso pluoštai ir jų statmenos poliarizacinės komponentės.
2. Palyginus išmatuotus eksperimentinius rezultatus su gautais teorinio pluošto sklidimo erdvėje modeliavimo rezultatais nustatytas glaudus sutapimas, tačiau išmatuotuose intensyvumo skirstiniuose stebimi pašaliniai intensyvumo svyravimai iki  $\sim 20\%$  sukelti netobulos optinės sistemos ir elementų.
3. Atlikus skaidrių medžiagų optinio pramušimo eksperimentus, sėkmingai įrašytos tuščia-vidurės  $\sim 3\ \mu\text{m}$  (kai  $n = 1$ ),  $\sim 7\ \mu\text{m}$  (kai  $n = 4$ ) ir  $\sim 10\ \mu\text{m}$  (kai  $n = 6$ ) skersmens vientisos, bei atskirų komponentių atveju sudarytos iš  $2n$  intensyvumo smailių struktūros stikle, o struktūrų tolygumas stipriai padidintas stiklą vienoje vietoje modifikuojant daugeliu impulsų.
4. Chemiškai išdvinant  $n = 6$  pluoštais įrašytas struktūras suformuotos kiaurymės per visą bandinio storį, o didžiausia išdvinimo sparta ( $3.23\ \mu\text{m}/\text{h}$ ) ir selektyvumas (4.07) pasiekti naudojant  $500000$ ,  $1\ \text{ps}$  ir  $52.5\ \mu\text{J}$  energijos impulsų, kai atskira pluošto poliarizacine komponente tūryje suformuojami mikroįskilimai ir mikroertmės.

## Literatūros sąrašas

- [1] F. Xin, M. Flammini, F. Di Mei, L. Falsi, D. Pierangeli, A. J. Agranat, E. DelRe, Using bessel beams to induce optical waveguides, *Physical Review Applied* **11**(2), 024011 (2019).
- [2] M. Mikutis, T. Kudrius, G. Šlekys, D. Paipulas, S. Juodkazis, High 90% efficiency bragg gratings formed in fused silica by femtosecond gauss-bessel laser beams, *Optical Materials Express* **3**(11), 1862–1871 (2013).
- [3] M. Bhuyan, P. K. Velpula, J.-P. Colombier, T. Olivier, N. Faure, R. Stoian, Single-shot high aspect ratio bulk nanostructuring of fused silica using chirp-controlled ultrafast laser bessel beams, *Applied Physics Letters* **104**(2), 021107 (2014).
- [4] F. Courvoisier, J. Zhang, M. Bhuyan, M. Jacquot, J. M. Dudley, Applications of femtosecond bessel beams to laser ablation, *Applied Physics A* **112**(1), 29–34 (2013).
- [5] M. Bhuyan, O. Jedrkiewicz, V. Sabonis, M. Mikutis, S. Recchia, A. Aprea, M. Bollani, P. Di Trapani, High-speed laser-assisted cutting of strong transparent materials using picosecond bessel beams, *Applied Physics A* **120**(2), 443–446 (2015).
- [6] K. Mishchik, R. Beuton, O. D. Caulier, S. Skupin, B. Chimier, G. Duchateau, B. Chasagne, R. Kling, C. Hönninger, E. Mottay, et al., Improved laser glass cutting by spatio-temporal control of energy deposition using bursts of femtosecond pulses, *Optics Express* **25**(26), 33271–33282 (2017).
- [7] J. Dudutis, P. Gečys, G. Račiukaitis, Non-ideal axicon-generated bessel beam application for intra-volume glass modification, *Optics express* **24**(25), 28433–28443 (2016).
- [8] R. Meyer, M. Jacquot, R. Giust, J. Safioui, L. Rapp, L. Furfaro, P.-A. Lacourt, J. Dudley, F. Courvoisier, Single-shot ultrafast laser processing of high-aspect-ratio nanochannels using elliptical bessel beams, *Optics letters* **42**(21), 4307–4310 (2017).
- [9] A. Niv, G. Biener, V. Kleiner, E. Hasman, Propagation-invariant vectorial bessel beams obtained by use of quantized pancharatnam–berry phase optical elements, *Optics letters* **29**(3), 238–240 (2004).
- [10] L. Yang, D. Qian, C. Xin, Z. Hu, S. Ji, D. Wu, Y. Hu, J. Li, W. Huang, J. Chu, Two-photon polymerization of microstructures by a non-diffraction multifoci pattern generated from a superposed bessel beam, *Optics letters* **42**(4), 743–746 (2017).
- [11] B. Wetzels, C. Xie, P.-A. Lacourt, J. M. Dudley, F. Courvoisier, Femtosecond laser fabrication of micro and nano-disks in single layer graphene using vortex bessel beams, *Applied Physics Letters* **103**(24), 241111 (2013).

- [12] S. Juodkazis, Y. Nishi, H. Misawa, Femtosecond laser-assisted formation of channels in sapphire using koh solution, *physica status solidi (RRL)–Rapid Research Letters* **2**(6), 275–277 (2008).
- [13] S. Kiyama, S. Matsuo, S. Hashimoto, Y. Morihira, Examination of etching agent and etching mechanism on femtosecond laser microfabrication of channels inside vitreous silica substrates, *The Journal of Physical Chemistry C* **113**(27), 11560–11566 (2009).
- [14] J. Qi, Z. Wang, J. Xu, Z. Lin, X. Li, W. Chu, Y. Cheng, Femtosecond laser induced selective etching in fused silica: optimization of the inscription conditions with a high-repetition-rate laser source, *Optics express* **26**(23), 29669–29678 (2018).
- [15] A. Crespi, R. Osellame, F. Bragheri, Femtosecond-laser-written optofluidics in aluminoborosilicate glass, *Optical Materials: X* **4**, 100042 (2019).
- [16] S. He, F. Chen, K. Liu, Q. Yang, H. Liu, H. Bian, X. Meng, C. Shan, J. Si, Y. Zhao, et al., Fabrication of three-dimensional helical microchannels with arbitrary length and uniform diameter inside fused silica, *Optics letters* **37**(18), 3825–3827 (2012).
- [17] Z. Wang, L. Jiang, X. Li, A. Wang, Z. Yao, K. Zhang, Y. Lu, High-throughput microchannel fabrication in fused silica by temporally shaped femtosecond laser bessel-beam-assisted chemical etching, *Optics letters* **43**(1), 98–101 (2018).
- [18] M. Beresna, M. Gecevičius, P. G. Kazansky, T. Gertus, Radially polarized optical vortex converter created by femtosecond laser nanostructuring of glass, *Applied Physics Letters* **98**(20), 201101 (2011).
- [19] S-waveplate operation manual, <https://www.wophotonics.com/product/radial-polarization-converter-s-waveplate/>.
- [20] M. Sun, U. Eppelt, S. Russ, C. Hartmann, C. Siebert, J. Zhu, W. Schulz, Laser ablation mechanism of transparent dielectrics with picosecond laser pulses, in *Laser-Induced Damage in Optical Materials: 2012* (International Society for Optics and Photonics, 2012), volume 8530, 853007.
- [21] C. Mauclair, M. Zamfirescu, J.-P. Colombier, G. Cheng, K. Mishchik, E. Audouard, R. Stolian, Control of ultrafast laser-induced bulk nanogratings in fused silica via pulse time envelopes, *Optics express* **20**(12), 12997–13005 (2012).
- [22] F. Hendricks, V. Matylitsky, M. Domke, H. P. Huber, Time-resolved study of femtosecond laser induced micro-modifications inside transparent brittle materials, in *Frontiers in Ultrafast Optics: Biomedical, Scientific, and Industrial Applications XVI* (International Society for Optics and Photonics, 2016), volume 9740, 97401A.

- [23] M. Beresna, M. Gecevičius, P. G. Kazansky, Polarization sensitive elements fabricated by femtosecond laser nanostructuring of glass, *Optical Materials Express* **1**(4), 783–795 (2011).
- [24] A. Marcinkevičius, S. Juodkazis, M. Watanabe, M. Miwa, S. Matsuo, H. Misawa, J. Nishii, Femtosecond laser-assisted three-dimensional microfabrication in silica, *Optics Letters* **26**(5), 277–279 (2001).
- [25] K. C. Vishnubhatla, N. Bellini, R. Ramponi, G. Cerullo, R. Osellame, Shape control of microchannels fabricated in fused silica by femtosecond laser irradiation and chemical etching, *Optics express* **17**(10), 8685–8695 (2009).
- [26] R. Osellame, G. Cerullo, R. Ramponi, *Femtosecond laser micromachining: photonic and microfluidic devices in transparent materials*, volume 123 (Springer Science & Business Media, 2012).
- [27] A. Ródenas, M. Gu, G. Corrielli, P. Paiè, S. John, A. K. Kar, R. Osellame, Three-dimensional femtosecond laser nanolithography of crystals, *Nature Photonics* **13**(2), 105–109 (2019).
- [28] H. Shin, D. Kim, Cutting thin glass by femtosecond laser ablation, *Optics & Laser Technology* **102**, 1–11 (2018).
- [29] L. Rapp, R. Meyer, L. Furfaro, C. Billet, R. Giust, F. Courvoisier, High speed cleaving of crystals with ultrafast bessel beams, *Optics express* **25**(8), 9312–9317 (2017).
- [30] Q. Zhan, Trapping metallic rayleigh particles with radial polarization, *Optics express* **12**(15), 3377–3382 (2004).
- [31] V. Marceau, A. April, M. Piché, Electron acceleration driven by ultrashort and nonparaxial radially polarized laser pulses, *Optics letters* **37**(13), 2442–2444 (2012).
- [32] R. Dorn, S. Quabis, G. Leuchs, Sharper focus for a radially polarized light beam, *Physical review letters* **91**(23), 233901 (2003).
- [33] R. Weber, A. Michalowski, M. Abdou-Ahmed, V. Onuseit, V. Rominger, M. Kraus, T. Graf, Effects of radial and tangential polarization in laser material processing, *Physics Procedia* **12**, 21–30 (2011).
- [34] M. Bashkansky, D. Park, F. K. Fatemi, Azimuthally and radially polarized light with a nematic slm, *Optics express* **18**(1), 212–217 (2010).
- [35] J. Lin, P. Genevet, M. A. Kats, N. Antoniou, F. Capasso, Nanostructured holograms for broadband manipulation of vector beams, *Nano letters* **13**(9), 4269–4274 (2013).

- [36] B. Zhang, X. Liu, J. Qiu, Single femtosecond laser beam induced nanogratings in transparent media-mechanisms and applications, *Journal of Materiomics* (2019).
- [37] A. Matijosius, P. Stanislovaitis, T. Gertus, V. Smilgevičius, Formation of optical vortices with topological charge  $|l|=1$  and  $|l|=1/2$  by use of the s-waveplate, *Optics Communications* **324**, 1–9 (2014).
- [38] J. Durnin, Exact solutions for nondiffracting beams. i. the scalar theory, *JOSA A* **4**(4), 651–654 (1987).
- [39] V. Jarutis, R. Paškauskas, A. Stabinis, Focusing of laguerre–gaussian beams by axicon, *Optics communications* **184**(1-4), 105–112 (2000).
- [40] O. Brzobohatý, T. Čižmár, P. Zemánek, High quality quasi-bessel beam generated by round-tip axicon, *Optics express* **16**(17), 12688–12700 (2008).
- [41] M. K. Bhuyan, P. K. Velpula, M. Somayaji, J.-P. Colombier, R. Stoian, 3D nano-fabrication using controlled bessel-glass interaction in ultra-fast modes, *Journal of Laser Micro Nanoengineering* **12**(3), 274–280 (2017).
- [42] R. Bowman, N. Muller, X. Zambrana-Puyalto, O. Jedrkiewicz, P. Di Trapani, M. Padgett, Efficient generation of bessel beam arrays by means of an slm, *The European Physical Journal Special Topics* **199**(1), 159–166 (2011).
- [43] L. Minkevičius, D. Jokubauskis, I. Kašalynas, S. Orlov, A. Urbas, G. Valušis, Bessel terahertz imaging with enhanced contrast realized by silicon multi-phase diffractive optics, *Optics Express* **27**(25), 36358–36367 (2019).
- [44] R. Drevinskas, P. G. Kazansky, High-performance geometric phase elements in silica glass, *APL Photonics* **2**(6), 066104 (2017).
- [45] A. P. Stabinis, G. Valiulis, *Ultratrumpų šviesos impulsų netiesinė optika* (TEV, 2008).
- [46] J. Baltrukonis, O. Ulčinas, S. Orlov, V. Jukna, Void and micro-crack generation in transparent materials with high energy first order vector bessel beam, *JOSA B Accepted* (2020).

## AUKŠTESNIŲJŲ EILIŲ VEKTORINIŲ BESELIO-GAUSO PLUOŠTŲ GENERAVIMAS IR JAIS SUKURTŲ TŪRINIŲ MODIFIKACIJŲ STIKLUOSE CHEMINIS ĖSDINIMAS

### Santrauka

Beselio-Gauso pluoštai vis plačiau naudojami skaidrių terpių mikroapdirbimui dėl savo unikalių savybių - sklidimo erdvėje nepatiriant difrakcijos ir itin didelio židinio ilgio/pločio santykio. Dėl šių savybių plačiai naudojami procesų esamų tobulinimui [1, 2], o plačiausiai paplitęs - stiklo pjovimas [5–8] Beselio-Gauso pluoštais. Egzistuoja ir egzotiškesnių variacijų su sudėtingesniais skersinio intensyvumo skirstiniais, potencialiai atveriant dar daugiau pritaikymo galimybių mikroapdirbime. Pavyzdžiui, aukštesnės eilės  $n$  vektoriniai ar sūkuriniai Beselio-Gauso pluoštai, pasižymintys žiedo formos skersiniu intensyvumo skirstiniu jau dabar pritaikomi žiedinių struktūrų gavimui dvifotonės polimerizacijos būdu [10] ar netgi grafeno mikro ir nano diskų gamybai [11]. Dažnai procesų vystymui pasitelkiami ir pagalbinių procesai, tokie kaip selektyvus cheminis ėsdinimas [12–14] - ryškus medžiagos ėsdinimo spartos padidėjimas lazeriu modifikuotose zonose leidžia formuoti įvairius mikromechaninius prietaisus stiklo tūryje [15, 16] ar formuoti ilgus ir siaurus kanalus ėsdinant Beselio-Gauso pluoštais padarytas pažaidas [17]. Taigi, selektyvaus cheminio ėsdinimo ir aukštesnių eilių  $n$  vektorinių ir sūkurinių Beselio-Gauso pluoštų kombinacija galėtų tapti puikiu įrankiu mikroapdirbimo procesų tobulinimui, pavyzdžiui, gaminat kiek didesnio skersmens kiaurymes ar galbūt siekiant spartesnio ir/ar geresnės kokybės rezultato.

Šio darbo tikslas - efektyviai realizuoti kokybiškus aukštesnės eilės vektorinius Beselio-Gauso pluoštus bei ištirti jais sukurtų modifikacijų stiklo pritaikomumą kiaurymių gavimui pasitelkiant selektyvų cheminį ėsdinimą.

Šiame darbe aukštesniųjų eilių ( $n = 1$ ,  $n = 4$  ir  $n = 6$ ) vektoriniai ir sūkuriniai Beselio-Gauso pluoštai efektyviai realizuojami pasitelkiant atitinkamos struktūros S-bangos plokštelę (Workshop of Photonics) - erdviškai moduliuotą banginę plokštelę [18], bei aksikoną, kuris iš gauto pluošto sukuria nedifraguojančius vektorinius Beselio-Gauso pluoštus, o poliarizacinės komponentės atskirtos poliarizatoriumi. Darbo metu surinktos ir išbandytos dvi sistemos kokybiškų pluoštų generacijai - panaudojant erdvinį filtrą, bei difrakcinį aksikoną. Abiem atvejais išmatuoti pluoštų intensyvumo skirstiniai glaudžiai sutapo su skaitmeninio modeliavimo rezultatais, tačiau nebuvo idealūs - centrinis žiedas pasižymėjo intensyvumo variacijomis iki 20 %. Gauti vektoriniai pluoštai pasižymi tuščiavidurio cilindro formos erdviiniu intensyvumo skirstiniu, kurio skersmuo priklauso nuo eilės  $n$ . Atskiros pluošto komponentės taip pat žiedinės struktūros, tačiau sudarytos iš  $2n$  intensyvumo smailių išdėstytų ratu. Panaudojant sugeneruotus pluoštus SCHOTT D263T stiklo tūryje sėkmingai įrašytos  $\sim 3 \mu\text{m}$  (kai  $n = 1$ ),  $\sim 7$

$\mu\text{m}$  (kai  $n = 4$ ) ir  $\sim 10 \mu\text{m}$  (kai  $n = 6$ ) skersmens struktūros, o jų tolygumas vėliau stipriai pagerintas veikiant medžiagą daugeliu impulsų vienoje vietoje. Struktūros įrašytos  $n = 6$  pluoštu bei atskira poliarizacine komponente buvo panaudotos cheminio ėsdinimo ( $80 \text{ }^\circ\text{C}$  ir  $30 \%$  koncentracijos KOH tirpale, ėsdinimo laikas  $\sim 60 \text{ h}$ ) siekiant gauti kiaurymes stikle ir ištirti įrašymo parametrų įtaką ėsdinimui. Didžiausias pasiektas ėsdinimo greitis ( $3.23 \mu\text{m/h}$ ) ir selektyvumas (4.07) pasiekti struktūras įrašant  $500000$ ,  $1 \text{ ps}$ ,  $52.5 \mu\text{J}$  impulsais, kai atskira pluošto poliarizacine komponente bandinio tūryje suformuojamos II tipo modifikacijos (mikroertmės ir mikrojskilimai).



GENERATION OF HIGHER ORDER VECTOR BESSEL-GAUSS BEAMS AND  
APPLICATION FOR CHEMICAL ETCHING OF MODIFIED GLASS VOLUME

**Summary**

Bessel-Gaussian beams are increasingly used in micro-processing of transparent media due to their unique properties of diffraction-free spreading space and extremely high focal length/width ratios, which are commonly used to speed up or improve existing processes [1,3], while the most common application is glass cutting with [7,8] Bessel-Gaussian beams. But there are also more exotic variations with more complex transverse intensity distributions, potentially opening up even more applications in micromachining, like higher-order  $n$  vector or vortex Bessel-Gaussian fibers with a doughnut shaped transverse intensity distribution. Bessel-Gaussian beams of order  $n$  are already being used to obtain ring structures by two-photon polymerization [10] or even to produce graphene micro and nano-disks [11]. Auxiliary processes, such as selective chemical etching [13,14], are also often used for process development and improvement. The significant increase in the etching rate of the material in the laser-modified zones allows the formation of various micromechanical devices [15,16] or forming long and narrow channels by etching arrays of holes. Thus, the combination of selective chemical etching and higher order  $n$  vector and vortex Bessel-Gaussian fibers with could become an excellent tool for improving micromachining processes, for example by making holes of a slightly larger diameter or perhaps for a faster and/or better quality result.

The aim of this work is to efficiently realize high-quality higher-order vector Bessel-Gaussian beams and to investigate the applicability for efficient thorough hole fabrication using selective chemical etching.

In this work, quality vector Bessel-Gaussian beams ( $n = 1$ ,  $n = 4$  and  $n = 6$ ) were efficiently realized with S-wave plates of an order of  $n$  (Workshop of Photonics) and an axicon which produces non-diffracting vector Bessel beams from the resulting beam. Polarizer is used if individual beam components are formed. Two optical systems for high-quality fiber generation have been tested: involving spatial filtering and diffractive axicon. In both cases the results were in close agreement with the results obtained from modeling beam propagation in such systems. The generated vector beams of the order  $n$  form tubular beam in space whose diameter depends on the order  $n$ . The individual perpendicular components separated by the polarizer are also ring structures, but consist of  $2n$  intensity peaks. The measured intensity distributions were not ideal: the central ring intensity variations up to  $\sim 20\%$ . Tubular structures of  $\sim 3\ \mu\text{m}$  (when  $n = 1$ ),  $\sim 7\ \mu\text{m}$  (when  $n = 4$ ) and  $\sim 10\ \mu\text{m}$  (when  $n = 6$ ) diameter in SCHOTT D263T glass sample were successfully written using generated beams. Quality of the structures were highly

improved by multi-pulse laser exposure. Structures written with  $n = 6$  beam and separate component were chemical etched in 80 °C and 30 % concentration aquatic KOH for 60 h in an effort to obtain thorough holes and test different writing parameters. Maximum etching speed of 3.23  $\mu\text{m}/\text{h}$  and selectivity of 4.07 were obtained by using 500000, 1 ps, 52.5  $\mu\text{J}$  energy pulses with separate polarization component of generated beam, when type II modifications (microcracks and micro-voids) were formed in the volume of the sample.