

Vilniaus universitetas  
Fizikos fakultetas  
Lazerinių tyrimų centras

Paulius Šlevas

OPTINIŲ BESELIO SŪKURIŲ MATRICOS SU NEPRIKLAUSOMU AŠINIO  
INTENSYVUMO SKIRSTINIŲ FORMAVIMAS ERDVINIŲ ŠVIESOS  
MODULIATORIUMI

Magistrantūros studijų baigiamasis darbas

Lazerinės technologijos  
studijų programa

Studentas	Paulius Šlevas
Leista ginti	2019-05-23
Recenzentas	dr. Eugenijus Gaižauskas
Darbo vadovas	prof. Valerijus Smilgevičius
Konsultantas	dr. Sergėjus Orlovas
Lazerinių tyrimų centro direktorius	doc. dr. Rytis Butkus

Vilnius 2019

# Turinys

1	Įvadas.....	3
2	Literatūros apžvalga .....	4
2.1	Beselio pluoštai .....	4
2.2	Erdvinis šviesos modulatorius .....	8
2.3	Ašinio intensyvumo valdymas .....	9
2.4	Beselio pluoštų matrica .....	11
2.5	Amplitudinės moduliacijos kodavimas fazėje.....	12
3	Eksperimente naudota įranga ir tyrimo metodai.....	14
4	Eksperimento rezultatai .....	18
4.1	Individualių pluoštų ilgio ir topologinio krūvio įtaka skerspjūvio kokybei.....	18
4.2	Lygiagrečių pluoštų matricos formavimas. Pluoštų ilgio, topologinio krūvio bei atstumo tarp pluoštų įtaka skerspjūvio kokybei.....	19
4.3	Lygiagrečių pluoštų su ašinio intensyvumo minimumu formavimas. ....	24
5	Rezultatai ir išvados.....	27
6	Literatūros sąrašas .....	28

# 1 Įvadas

Daugiau nei prieš pusamžį, 1960 m. Maiman sukonstravo pirmąjį lazerį. Šis prietaisas pasižymėjo unikalia savybe spinduliuoti koherentinę šviesą. Lazerio spinduliuote galima lengvai manipuluoti ją nukreipiant veidrodžiais, plečiant ar fokusuojant, o tai skatino galimų lazerio taikymų ieškojimą įvairiose srityse. Per 59 metus lazeriai labai ištobulėjo ir dabar yra naudojami medicinoje, mikroskopijoje, ryšio tinkluose, metrologiniuose matavimuose, pramoniniame mikro bei makro apdirbime ir kitur [1]. Pagrindinis lazerinio apdirbimo privalumas, kad tai yra nekontaktinis procesas, leidžiantis pasiekti gerą apdirbamų detalių tikslumą, atsikartojamumą, o kartais sumažinti apdirbimo etapų skaičių. Priklausomai nuo taikymo svarbu yra parinkti tinkamus lazerio parametrus, tokius kaip bangos ilgis, lazerio veika (impulsinė ar nuolatinė). Paprastai keičiamų lazerio parametrų kiekis yra ribotas ir priklauso nuo lazerio konstrukcijos. Tačiau išėjusios iš lazerio spinduliuotės manipuliavimo laisvė yra paliekama vartotojui.

Labai svarbi yra pluošto skersinė struktūra, nuo kurios gali priklausyti spinduliuotės taikymo sritis. Populiariausias pluošto intensyvumo skirstinys yra Gauso funkcija. Daugumoje aplikacijų toks pluoštas yra tinkamas, tačiau jis nėra idealus, o pakeitus pluošto skirstinį kai kuriuos procesus galima paspartinti arba net atlikti tokias operacijas, kurios būtų sunkiai įgyvendinamos naudojant Gauso pluoštą. Pavyzdžiui, Durnin pirmasis pastebėjo, kad kai kurie Helmholco lygties sprendiniai turėjo įdomių savybių, kaip difrakciškai ribota smailė, kuri sklindant pluoštui nesiplečia [2]. Žinoma, realybė yra šiek kitokia ir Beselio pluoštas tiesiog turi daug kartų ilgesnę nei įprasto Gauso pluošto židinio zoną, o tai gali praversti, pavyzdžiui, abliuojant didelio gylio ir pločio santykio mikro kanalus [3]. Kita įdomi savybė yra ta, kad Beselio pluoštai gali turėti spiralinį bangos frontą. Nors tokie pluoštai buvo teoriškai aprašyti ir eksperimentiškai pademonstruoti gana seniai, tačiau panaudojant erdvinį šviesos moduliatorių [4] ar geometrinės fazės elementus [5] galime sukurti erdvines struktūras su reikiama skersinio ir ašinio intensyvumo skirstiniais. Tai galėtų būti panaudojama lazeriniame apdirbime procesų paspartinimui. Tačiau tokių struktūrų kūrimas turi ribojimų, atsirandančių dėl interferencijos ir difrakcijos. Būtent tokių ribojimų ir kitų pluošto parametrų įtaka ir bus nagrinėjama šiame darbe.

Šio darbo uždaviniai yra: suformuoti stačiakampio formos ašinių skirstinių kvazi Beselio pluoštus, ištirti pluošto ilgio ir topologinio krūvio įtaką pluošto skerspjūviui, suformuoti tokių pluoštų matricą ir ištirti skerspjūvio kokybę priklausomai nuo atstumo tarp pluoštų ir jų ilgių, galiausiai suformuoti pluoštą su keliais intensyvumo minimumais ir maksimumais ant jo ašies.

## 2 Literatūros apžvalga

### 2.1 Beselio pluoštai

Įprastas Gauso pluoštas sklisdamas laisva erdve plinta. Idealiai Beselio pluoštui ši savybė negalioja ir jis priklauso nedifraguojančių pluoštų šeimai. Pirmasis tokio pluošto sprendinį aprašė Durnin 1987 m [2]. Beselio, kaip ir bet kurio kito pluošto aprašymas turi tenkinti bangos lygtį.

$$(\nabla^2 - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2})E(r, t) = 0, \quad (1)$$

čia  $E$  tai elektrinio lauko stipris,  $r$ - radialinė koordinatė,  $t$ - laikas, o  $c$ - šviesos greitis. Vienas iš galimų elektrinio lauko sprendinių yra Beselio pluoštas aprašomas [6]:

$$E(r, \phi, z) = A_0 \exp(ik_z z) J_n(k_r r) \exp(\pm in\phi), \quad (2)$$

čia  $k_z$  ir  $k_r$  yra išilginis ir radialinis bangos vektoriai, o  $k = \sqrt{k_z^2 + k_r^2} = 2\pi/\lambda$  ( $\lambda$  yra bangos ilgis),  $r$ ,  $\phi$  ir  $z$  atitinkamai yra radialinė, azimutinė ir išilginė koordinatės,  $J_n$  yra  $n$ -os eilės, pirmos rūšies Beselio funkcija. Daugiau informacijos apie Beselio funkcijas yra pateikta [7], o nulinės eilės, pirmos rūšies Beselio funkcija yra:

$$J_0(x) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n x^{2n}}{2^{2n} n! \Gamma(1+n)}. \quad (3)$$

Įdomus tokio Helmholtzo lygties sprendinio rezultatas yra tai kad intensyvumas išilginės koordinatės ( $z$ ) kryptimi tenkina lygybę:

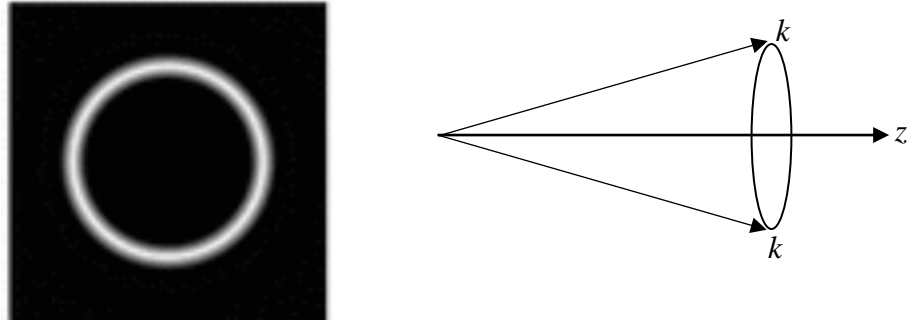
$$I(x, y, z \geq 0) = I(x, y). \quad (4)$$

Tai reiškia kad sklindant pluoštui jo skirstinys nesikeičia ir pluoštas gali būti laikomas nedifraguojančiu. Idealaus Beselio pluošto galia yra begalinė, o erdvinis spektras be galo siauras žiedas. Žinoma, realybė yra kitokia: žiedas yra baigtinių matmenų, o kompleksinė amplitudė aprašoma:

$$A(r, \phi) = a_n J_n(k_r r) \exp(in\phi) \exp\left(-\frac{r^2}{d^2}\right), \quad (5)$$

čia  $a_n$  yra reali amplitudė,  $d$  Gauso pluošto spindulys  $1/e$  intensyvumo aukštyje. Jeigu  $d \rightarrow \infty$  tai lygtis aprašytų idealų Beselio pluoštą. Jeigu  $d$  baigtinis tada ir pluošto galia yra baigtinė, o tokie pluoštai vadinami Beselio-Gauso. Žiedo spindulio ir pločio santykis parodo kiek pluoštas yra panašus į idealų Beselio pluoštą [8]. Kuo šis santykis didesnis, tuo labiau nagrinėjamas pluoštas yra artimesnis idealiam Beselio pluoštui.

Nagrinėjant Beselio pluoštą jį galime įsivaizduoti kaip plokščių bangų, sklindančių ant kūgio paviršiaus, kompleksą. Kiekviena plokščia banga per atstumą  $\Delta z$  patiria tokį patį fazės poslinkį  $k_z \Delta z$ . Toks Beselio pluošto suskaldymas pasireiškia jo kampiniame spektre, kuriame yra matomas žiedas. Kampinis spektras ir plokščių bangų sklidimas kūgio paviršiumi pavaizduoti 1-ame paveikslėlyje. Skaldymas į tokį plokščių bangų pavidalą taip pat leidžia charakterizuoti Beselio pluoštą kūgio kampu kuriuo susikerta plokščios bangos:



1 Pav. Kairėje Beselio pluošto kampinis spektras - Beselio funkcijos Furje transformacija; dešinėje Beselio pluošto banginiai vektoriai sklindantys kūgiu [6].

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{k_r}{k_z}\right). \quad (6)$$

Pasinaudojus šiuo kampu galima rasti pirmos eilės Beselio pluošto centrinės smailės dydį [6]:

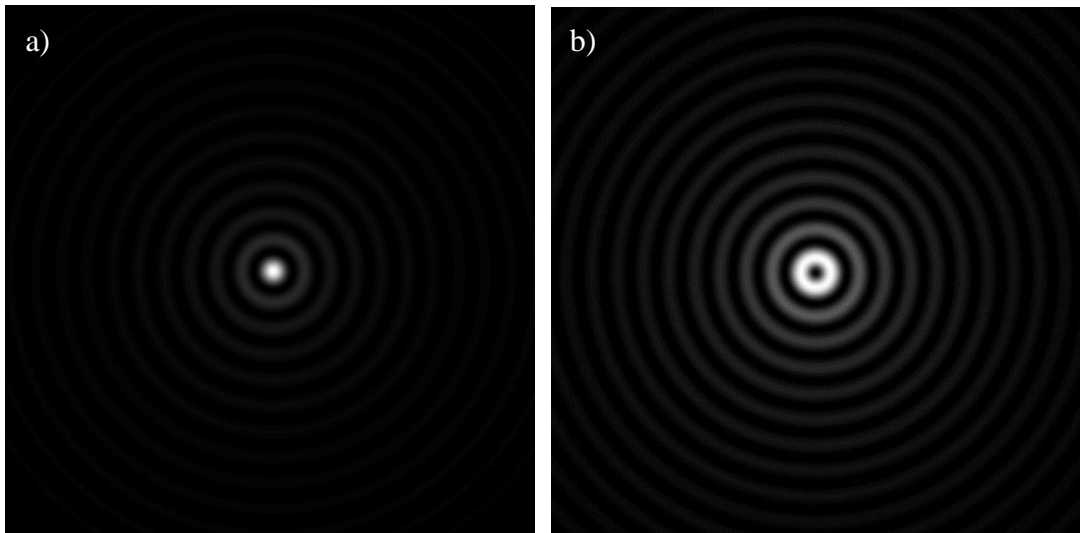
$$r_0 = \frac{2.405}{k_r}. \quad (7)$$

Beselio pluoštas pasižymi dar ir kita įdomia savybe - rekonstrukcija [9]. Tai reiškia, kad pluošto centre pastačius kliūtį, pluoštą sudarančios bangos ją apeina ir pluošte susidaro šešėlis, tačiau, po tam tikro atstumo už kliūties, pluošto intensyvumo skirstinys atsistato. Atstumas už kurio pluoštas atsistato apytiksliai yra:

$$z_{min} \approx \frac{ak}{2k_z} \quad (8)$$

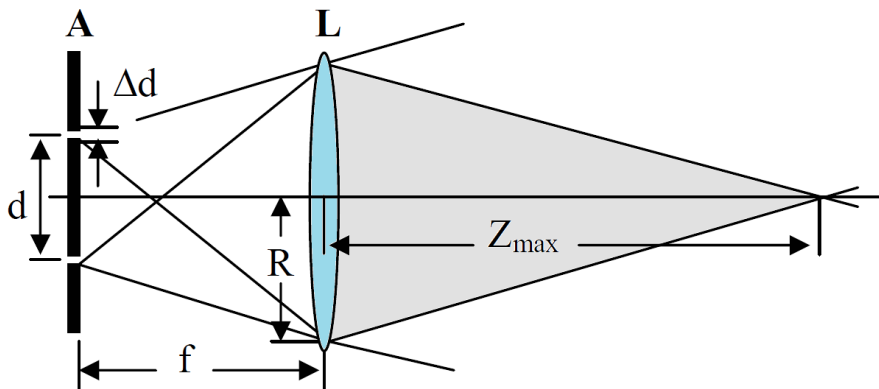
čia  $a$  yra kliūties plotis matuojant nuo pluošto centro. Taip pat verta paminėti, kad Beselio pluošto energija yra tolygiai pasiskirsčiusi jo žieduose. Taigi, kuo daugiau žiedų tuo mažiau energijos yra centre.

Nulinės eilės Beselio pluošto intensyvumo skirstinys pavaizduotas 2-ame (a) paveikslėlyje. Aukštesnės eilės Beselio pluoštai centre vietoje intensyvumo maksimumo turi nedifraguojantį intensyvumo minimumą. Pirmos eilės Beselio pluošto intensyvumo skirstinys pavaizduotas 2-ame (b) paveikslėlyje. Aukštesnės eilės Beselio pluoštai ( $|n| \geq 1$ ) yra sūkuriai. Tai reiškia, kad jų bangos frontai yra spiralinio pavidalo, o centre fazė neapibrėžta [10].



2 Pav. Beselio pluošto intensyvumo skirstiniai: a) nulinės eilės pluoštas ir b) pirmos eilės pluoštas.

Toliau aptarsime Beselio pluošto formavimo būdus. Pirmasis paprasčiausias būdas pavaizduotas 3-iame paveikslėlyje ir seka iš to, kad Beselio pluošto kampinis spektras yra žiedas su pastovia faze. Apšvietus lęšio židinio plokštumoje esančią žiedinę apertūrą plokščia banga ir lęšiu fokusuojant, lęšis atliks Furje transformacijos funkciją ir jo židinyje bus gaunamas Beselio pluoštas, kurio kūgio kampas bus:



3 Pav. Beselio pluošto formavimas naudojant žiedinę apertūrą [6].

$$\tan \theta = \frac{d}{2f} \quad (9)$$

čia  $d$  yra žiedo diametras, o  $f$  lęšio židinio nuotolis. Iš geometrijos galima nustatyti sklidimo atstumą:

$$z_{max} = \frac{R}{\tan(\theta)} \quad (10)$$

čia  $R$  yra atvaizduojančio lęšio spindulys. Toks formavimo metodas yra tinkamas pademonstruoti Beselio pluošto savybėms, tačiau yra labai neefektyvus, nes tik nedidelė dalis energijos praeina pro žiedinę apertūrą, o likusi yra užblokuojama, o norint gauti kuo geresnę pluošto kokybę reikėtų siaurinti žiedinę apertūrą, kas dar labiau mažintų efektyvumą. Daug efektyvesnis ir gan plačiai naudojamas būdas yra formuoti Beselio pluošta kūginiu lęšiu - aksikonu. Beveik visa kritusios plokščios bangos energija yra paverčiama į Beselio pluošto energiją. Aksikonu sklindanti plokščia banga patiria tiesiškai kintantį fazės poslinkį priklausomai nuo atstumo nuo aksikono centro. Šis būdas pavaizduotas 4-ame paveikslėlyje ir gerai iliustruoja idėją, kad Beselio pluoštas yra sudarytas iš daugelio plokščių bangų sklindančių ant kūgio. Kūgio kampas yra:

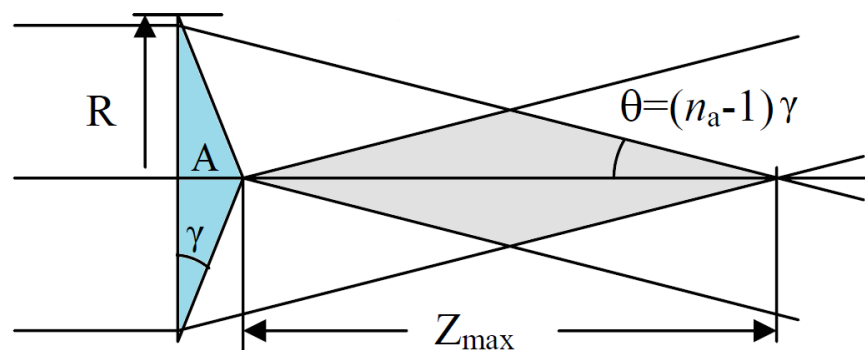
$$\theta = (n - 1)\gamma, \quad (11)$$

čia  $n$  yra aksikono lūžio rodiklis, o  $\gamma$  aksikono kampas. Aksikonu formuojamos Beselio pluošto zonos ilgis yra:

$$z_{max} = \frac{k}{k_r} w_0 \approx \frac{w_0}{\theta}. \quad (12)$$

Aukštesnės eilės Beselio pluoštus galima formuoti apšvietus aksikoną Lagero-Gauso modomis. Priklausomai nuo to, kokio topologinio krūvio bus naudojama Lagero-Gauso moda, už aksikono bus gaunamas tos eilės Beselio pluoštas.

Yra ir kitų Beselio pluošto formavimo metodų. Pavyzdžiui, panaudojant statines



4 Pav. Beselio pluošto formavimas naudojant aksikoną [6]. A – aksikonas.

kompiuteriu sugeneruotas hologramas [11], arba keičiamas hologramas, kurios atvaizduojamos

ant erdvinio šviesos modulatoriaus (SLM) [12]. Erdviniai šviesos modulatoriai aptariami sekančiame skyriuje.

## 2.2 Erdvinis šviesos modulatorius

Šiame darbe pluoštų formavimui buvo naudojamas erdvinis šviesos modulatorius (angl. spatial light modulator, SLM). Tai yra prietaisas leidžiantis valdyti tokius šviesos parametrus kaip fazė ir amplitudė. Amplitudinė šviesos signalo moduliacija gali būti pasiekta keičiant krintančios šviesos poliarizaciją ir po to praleidžiant ją pro tiesinį poliarizatorių. Toks pats principas yra naudojamas skystųjų kristalų televizoriuose. Fazinė moduliacija gali būti pasiekta, pavyzdžiui, elektriškai keičiant medžiagos, kuria sklinda šviesa, lūžio rodiklį. Tai galima padaryti naudojant skystuosius kristalus. Tai organinės medžiagos, kurios yra skystos, bet turi tam tikrą molekulinę tvarką (tarpinė būseną tarp kristalo ir skysčio). Skystiesiems kristalams yra būdingos tokios skysčių savybės kaip takumas, formuojamumas ir tokios kristalų savybės kaip tam tikra orientacinė tvarka, optinių, elektrinių, magnetinių savybių anizotropiškumas. Erdviniuose šviesos modulatoriuose dažniausiai yra naudojami termotropiniai skystieji kristalai. Tai reiškia, kad skystojo kristalo būseną egzistuoja tik tam tikrame temperatūrų intervale [13]. Tuo pačiu termotropiniai skystieji kristalai yra skirstomi į nematinius ir smektinius. Smektiniai skystieji kristalai turi didesnę klampą, jiems išjudinti reikalingos didelės įtampos, o optiniuose prietaisuose tai pasireiškia dideliu atsako laiku. Todėl šie skystieji kristalai nėra naudojami erdvinuose šviesos modulatoriuose [14]. Skirtingai nuo smektinių, nematiniai kristalai pasižymi nedidele klampa ir jiems nereikia didelių išorinių jėgų norint sukelti deformacijas, taigi jie yra tinkami naudoti SLM.

Svarbiausia skystųjų kristalų savybė reikalinga norint gauti fazinę moduliaciją yra dvejetainiškumas ( $\Delta n$ ), kuris yra apibrėžiamas taip [14]:

$$\Delta n = n_e(\theta) - n_o, \quad (13)$$

čia,  $n_o$  yra paprastas lūžio rodiklis kritusiam pluoštui, o  $n_e$  nepaprastas lūžio rodiklis kritusiam pluoštui,  $\theta$  – kristalo pasukimo kampas. Dauguma skystųjų kristalų turi teigiamą dvejetainiškumą ( $\Delta n > 0$ ) nuo 0,05 iki 0,45 [14]. Na, o nepaprastas lūžio rodiklis nuo kristalo pasukimo kampo gali būti aprašomas taip:

$$n_e(\theta) = \left( \frac{\cos^2 \theta}{n_o^2} + \frac{\sin^2 \theta}{n_e^2} \right)^{-1}, \quad (14)$$

čia  $n_e$  nepaprastas lūžio rodiklis kai nėra išorinio lauko. Taigi, matome, jog sukdami kristalą galime keisti  $n_e$  ir  $\Delta n$ , o tai sukuria fazinį vėlinimą kuris aprašomas:



$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} d|\Delta n|, \quad (15)$$

čia  $d$  skystųjų kristalų sluoksnio storis, o  $\lambda$  – bangos ilgis. Kita svarbi nematinių skystųjų kristalų savybė yra dielektrinis anizotropiškumas. Elektrinės savybės aprašomos  $3 \times 3$  dielektriniu tenzoriumi [13]:

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{\perp} \delta_{ij} + \Delta \varepsilon L_i L_j, \quad (16)$$

čia  $\Delta \varepsilon = \varepsilon_{\parallel} - \varepsilon_{\perp}$ , o  $i, j = x, y, z$ .  $\mathbf{L}$  yra skystųjų kristalų direktorius, jis parodo molekulių vidutinę ilgosios ašies kryptį. Būtent dėl dielektrinio anizotropiškumo galima keisti skystųjų kristalų kryptį panaudojus elektrinį lauką. Sukimo momentas veikiant kristalą išoriniu elektriniu lauku  $\mathbf{E}$  bus lygus [13]:

$$\Gamma = \varepsilon_0 \Delta \varepsilon (\mathbf{L} \cdot \mathbf{E}) (\mathbf{L} \times \mathbf{E}). \quad (17)$$

Sukimo momentas bus lygus nuliui kai kampas tarp elektrinio lauko ir direktoriaus yra  $0^\circ$  arba  $90^\circ$ , o maksimalus sukimo momentas bus tada kai šis kampas bus  $45^\circ$  ir kai  $\Delta \varepsilon$  teigiamas elektrinis laukas kreips molekules elektrinio lauko kryptimi. Erdviniuose šviesos modulatoriuose skystieji kristalai yra išdėstyti ant elektriškai valdomų elektrodų matricos. Skystųjų kristalų orientacija gali būti valdoma keičiant elektrodų įtampą, o tai keičia pro kristalą praėjusios šviesos fazinį vėlinimą. Norit gauti reikiamą erdvinę moduliaciją skystieji kristalai erdviniame šviesos modulatoriuje turi būti susukioti pagal tam tikrą fazinį portretą. Keičiant šiuos portretus galima greitai keisti gaunamos spinduliuotės modas [4]. Erdviniai šviesos modulatoriai gali būti naudojami dvifotonėje polimerizacijoje [15], mikroskopijoje [16], lazeriniame apdirbime [12].

### 2.3 Ašinio intensyvumo valdymas

Skaliariniame ir paraksialiniame artiniuose galima išskaidyti bet kokį optinį lauką į plokščių bangų komponentes panaudojus dvidimensę Furje transformaciją  $U(x, y)$  apibrėžiamą vienoje skersinėje plokštumoje Kiekviena plokščia banga yra apibrėžta bangos vektoriumi  $\mathbf{k} = [k_x, k_y, k_z]$ . Jeigu ašinei koordinatei priskirsime nulinę vertę šis išskaidymas bus [17]:

$$S(k_x, k_y, z = 0) = \iint_{-\infty}^{\infty} U(x, y, z = 0) e^{-i(k_x x + k_y y)} dx dy. \quad (18)$$

Toks aprašymas plokščiomis bangomis yra vadinamas erdvinių dažnių spektru. Nuo azimutinės koordinatės nepriklausantiems optiniams laukams  $f(x, y, z) = f(\sqrt{x^2 + y^2}, z) \equiv f(r, z)$  Furje transformacija gali būti užrašyta:

$$S(k_r, z = 0) = \int_0^{\infty} U(r, z = 0) J_0(k_r, r) r dr, \quad (19)$$

čia  $k_r = \sqrt{k_x^2 + k_y^2}$ , o  $J_0$  nulinės eilės Beselio funkcija. Atvirkštinė 19-os lygties transformacija:

$$U(r, z = 0) = \int_0^\infty S(k_r, z = 0) J_0(k_r r) k_r dk_r. \quad (20)$$

Fizikinė tokio aprašymo interpretacija yra ta, kad bet koks azimutiškai nepriklausomas laukas gali būti aprašomas idealiais nulinės eilės Beselio pluoštais. Kiekviena šių Beselio pluoštų komponentių sklis laisva erdve kaip:  $J_0(k_r r) e^{ik_z z}$ , čia  $k_z = \sqrt{k^2 - k_r^2}$  yra ašinė bangos vektoriaus komponentė. Išilginio intensyvumo skirstinys yra šių skirtingų erdvinių spektrų komponentių interferencijos rezultatas. Pasinaudoja atvirkštinė transformacija (20-ta lygtis) gauname toki ašinį lauką:

$$U(r = 0, z) = \int_0^k k_z S(\sqrt{k^2 - k_z^2}, z = 0) e^{ik_z z} dk_z. \quad (21)$$

Tai parodo, kad bet kokio azimutiškai nepriklausomo lauko ašinis intensyvumo skirstinys yra susijęs su erdviniu spektru per viendimensę Furje transformaciją. Tai leidžia suformuoti pluoštą su nepriklausomu ašiniu skirstiniu erdvinių dažnių intervale nuo 0 iki  $k$ . Kaip buvo minėta anksčiau idealus Beselio pluoštas yra be galo siauras, t.y. atitinką delta funkciją  $k_r = \delta(k_{r0})$ .

Tarkime, kad kvazi Beselio pluoštas su pasirinka ašinio intensyvumo gaubtine  $A(z)$  ant optinės ašies yra apibrėžiamas taip:

$$U(r = 0, z) = A(z) e^{ik_{z0} z}, \quad (22)$$

čia  $k_{z0} = \sqrt{k^2 - k_{r0}^2}$ . Kadangi erdvinis spektras su ašiniu lauku yra susijęs per Furje transformaciją (21) pasinaudoję šiuo sąryšiu gauname kvazi Beselio pluošto su norimu ašiniu intensyvumu spektrą:

$$S(\sqrt{k^2 - k_z^2}, z = 0) = \frac{1}{2\pi k_z} \int_{-\infty}^{\infty} A(z) e^{ik_{z0} z} e^{-ik_z z} dz. \quad (23)$$

Tarkime, kad 23-ios lygties funkcija  $A(z)$  yra laiptelio funkcija apibrėžiama taip:

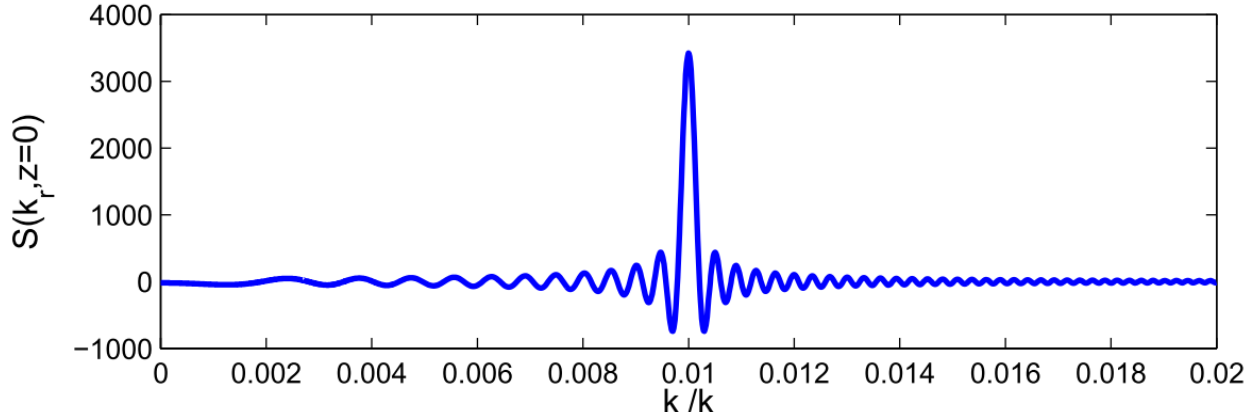
$$A(z) = \begin{cases} 1, & \text{kai } |z| \leq z_{max} \\ 0, & \text{kai } |z| > z_{max} \end{cases}, \quad (24)$$

Šiuo atveju erdvinio spektro analitinė išraiška bus [17]:

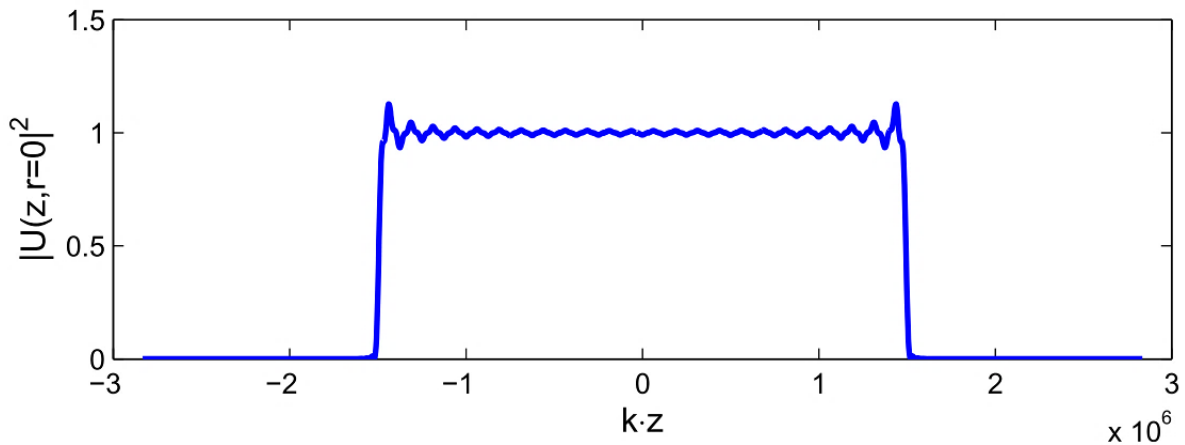
$$S(k_r, z = 0) = \frac{\sin(z_{max}(k_z - k_{z0}))}{\pi k_z (k_z - k_{z0})}. \quad (25)$$

Tokio erdvinio spektro pavyzdys parodytas 5-ame paveikslėlyje. Ši funkcija yra apibrėžta visame verčių intervale  $[-\infty; \infty]$ , bet maksimumas yra ties verte  $k_{r0}$ . Paprastai realybėje negalime išnaudoti erdvinių dažnių esančių intervale  $k_r \in [0; k]$ , nes tai riboja optikos apertūrų dydžiai. Be to, 21-a lygtis parodo kokį ašinio intensyvumo profilį įmanoma gauti apribojus erdvinių dažnių intervalą.

Ašinio intensyvumo pasiskirstymas, paskaičiuotas naudojant 21-ą lygtį ir 5-ame paveikslėlyje pavaizduotas spektro vertes, parodytas 6-ame paveikslėlyje. Jame matomos osciliacijos, kurios atsiranda dėl erdvinio spektro apkarpymo.



5 Pav. Erdvinio spektro, gauto panaudojus 25 lygtį pavidys, kai  $k_{r0}/k=0.01$  ir  $k \cdot z_{max}=1.5 \cdot 10^6$  [17].



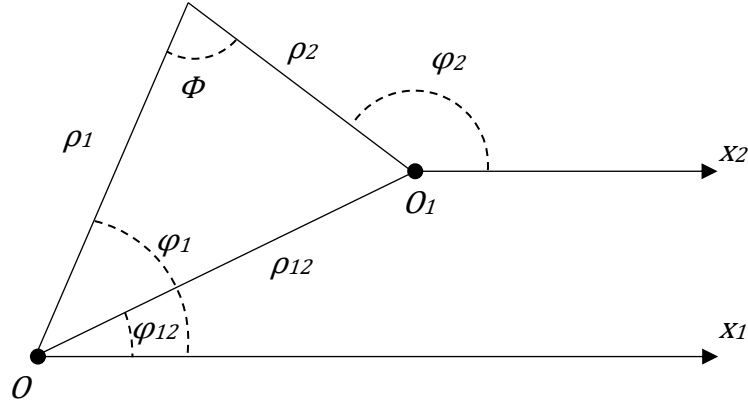
6 Pav. Iš 10 lygtyje aprašyto spektro gautas ašinis intensyvumas naudojant spektro vertes esančias intervale  $k_r/k \in [0; 0.02]$  [17].

## 2.4 Beselio pluoštų matrica

Kai kuriuose lazerių taikymuose gali būti pravartu vienu metu naudoti keletą pluoštų, pavyzdžiui, mikro apdirbime tai leidžia paspartinti procesus [12]. Kuriant Beselio pluoštų matricą pirmiausiai yra aprašomi koordinačių sistemoje perstumti pluoštai, panaudojant apskritiminių cilindrinų bangų sudėties teoremą, kuri plačiau yra aprašoma [18].

$$J_n(k_\rho \rho_2) e^{in\Phi} = \sum_{m=-\infty}^{\infty} J_m(k_\rho \rho_{12}) J_{n+m}(k_\rho \rho_1) e^{im(\varphi_1 - \varphi_{12})}, \quad (26)$$

čia  $\varphi_{12}$  ir  $\rho_{12}$  atitinkamai yra kampas ir atstumas, kuriuo pastumiamas pluoštas. Kintamieji parinkti taip, kad atitiktų 7-ame paveikslėlyje vaizduojamus kintamuosius.



7 Pav. Atskaitos sistemos translacija [18]

Tada pastumto Beselio pluošto erdvinis spektras gali būti užrašomas taip [19]:

$$S(k_\rho, \varphi_k) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} J_m(k_\rho \rho_{12}) e^{-im\varphi_{12}} \frac{i^m e^{im\varphi_k} \delta(k \sin \theta - k_\rho)}{k_\rho}, \quad (27)$$

Suskaičiavę pastumto pluošto skerspjūvio erdvinį spektrą ir sudauginę jį su ašiniu spektru gautume Beselio pluoštą su valdomu postūmiu ir ašiniu intensyvumu. Sudėję kelis tokių pluoštų spektrus su skirtingais postūmiais ar ašiniais intensyvumais gauname pluoštų masyvą.

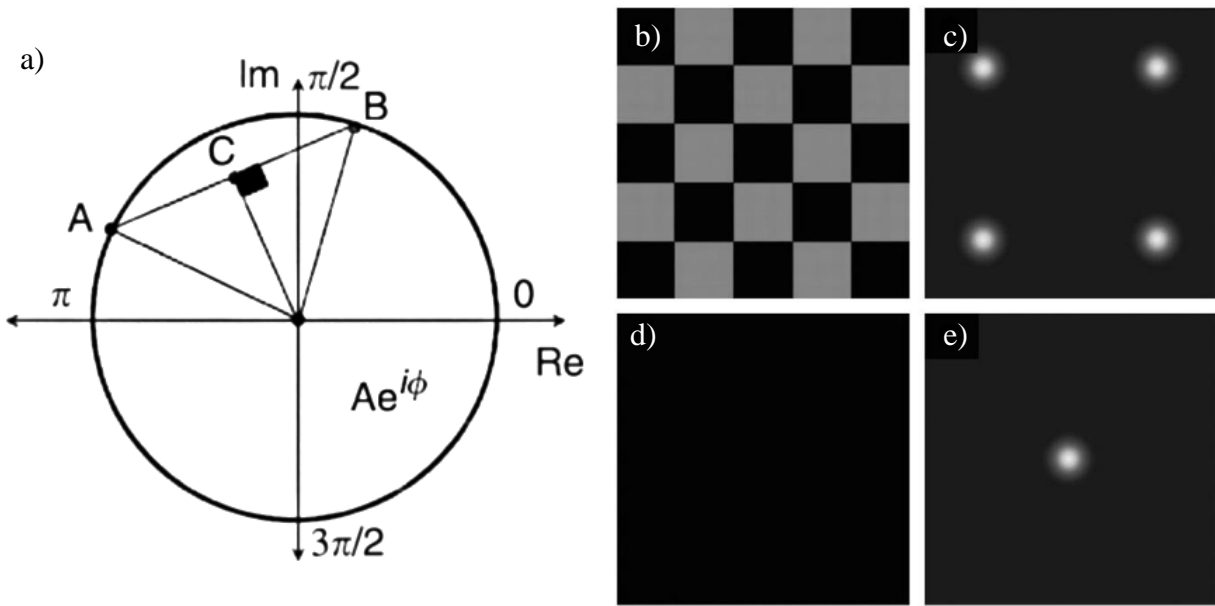
## 2.5 Amplitudinės moduliacijos kodavimas fazėje

Ekspirimente naudotas erdvinis šviesos modulatorius galėjo moduluoti tik fazę. Šiame darbe naudotų Beselio pluoštų matricos spektrinėse funkcijose kinta ne tik fazė, bet ir amplitudė. Tai nėra problema, nes įmanoma amplitudinę moduliaciją aprašyti tik fazės moduliacija. Šiam tikslui pasitelkiamas šachmatų lentos metodas [20], [21]. Kaip buvo minėta erdvinis šviesos modulatorius yra sudarytas iš taškų, kurių kiekvieno fazę galime keisti. Naudojant šachmatų lentos metodą amplitudės narys yra užkoduojamas gretimų taškų fazes parenkant taip, kad jų vidutinė vertė būtų lygi norimai kompleksinei vertei:

$$Ae^{i\phi} = \frac{e^{iA\phi} + e^{iB\phi}}{2}, \quad (28)$$

Fazes reikia parinkti taip, kad gautume reikiamą amplitudę. Pavyzdžiui, norimas laukas aprašomas  $u(x, y) = u_0 \exp(i\phi)$  čia  $u_0$  yra reali amplitudė, o  $\phi$  yra fazė. Jeigu, dvi fazės vertės yra  $A_\phi = \exp(i\phi + i\alpha)$  ir  $B_\phi = \exp(i\phi - i\alpha)$  tada reali amplitudė  $u_0$  gali būti išreikšta  $u_0 =$

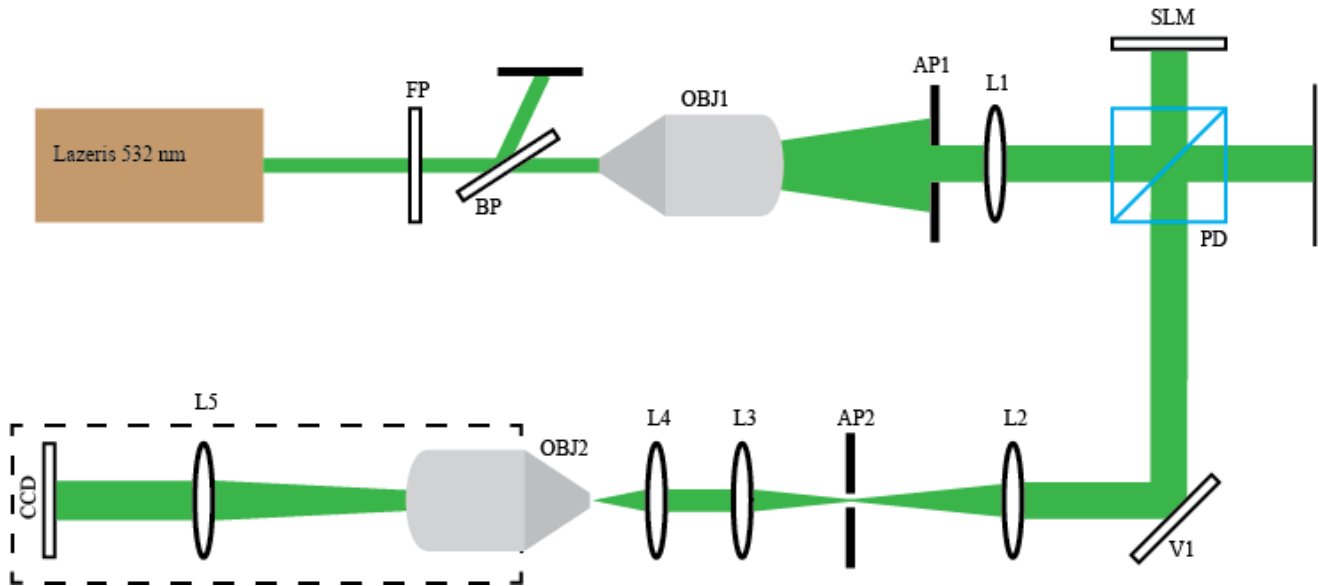
$\cos \alpha$ . Tokia šachmatinė kaukė gali būti varijuojama erdvėje norint sukurti amplitudinės moduliacijos priklausomybę nuo koordinatės. Grafinė tokio proceso interpretacija pavaizduota 8-ame (a) paveikslėlyje, kuriame tik dviejų fazės verčių (A ir B) moduliacija leidžia keisti jų vidurkį C, kuris reprezentuoja amplitudinę moduliaciją. Fazių šachmatų lenta pavaizduota 8-ame (b) paveikslėlyje. Gaunamą amplitudinę moduliaciją galime suprasti pažvelgę iš difrakcinės teorijos pusės. Dalis į šachmatų gardelę krintančios šviesos difraguoja į aukštesnių eilių maksimumus, o stebimo maksimumo intensyvumas sumažėja. Vienas iš šio metodo trūkumų yra tai, kad vienam kaukės taškui užkoduoti yra panaudojami taškai, tad efektinė erdvinio spektro raiška sumažėja.



8 pav. a) Kompleksinės plokštumos schema, parodanti, kad dvi fazės A ir B yra ant vienetinio apskritimo, o jų vidurkis yra vektorius C, kuris reprezentuoja amplitudės moduliaciją. b) Šachmatų lentos fazinė kaukė ir c) jos Furje plokštuma. d) Juoda vienos fazės kaukė ir e) jos Furje plokštuma [20].

### 3 Eksperimente naudota įranga ir tyrimo metodai.

Eksperimento metu buvo formuojami kelių eilių Beselio pluoštai ir šių pluoštų matricos. Šiam tikslui pasiekti buvo naudotas erdvinis šviesos moduliatorius. Naudota optinė schema pateikta 9-ame paveikslėlyje.



9 Pav. Eksperimento principinė schema. Atskirų elementų paaiškinimą žiūrėti tekste.

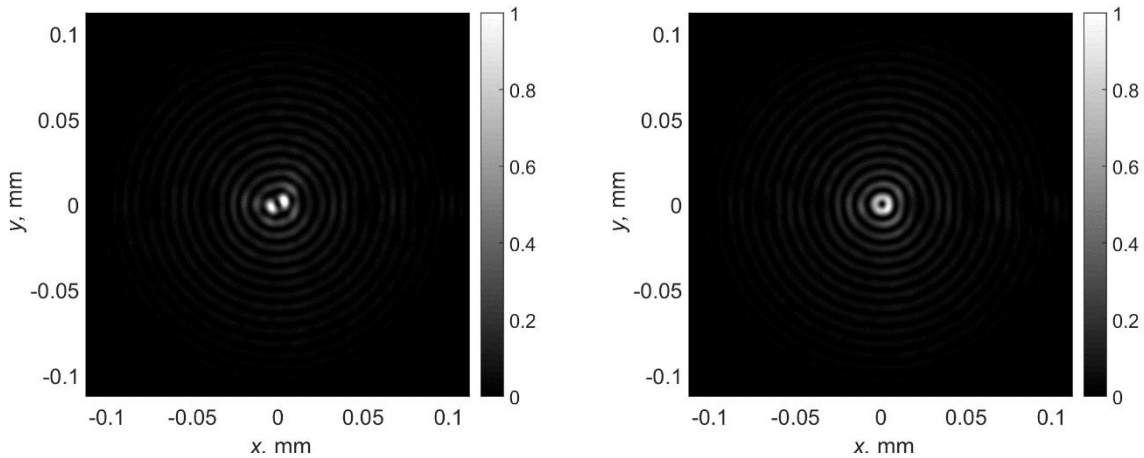
Eksperimento metu naudotas nuolatinės veikos DPSS lazeris (MGL-III-532-100mw, Changchun New Industries Optoelectronics Technology Co., Ltd.), kurio bangos ilgis  $\lambda=532$  nm, maksimali galia 100 mW. Iš kart už lazerio buvo pastatyta  $\lambda/2$  fazinė plokštelė (FP) ir Briusterio polarizatoriaus (BP). Šie du komponentai leidžia valdyti spinduliuotės intensyvumą. Sukant fazinę plokštelę sukama šviesos poliarizacijos kryptis, o poliarizatoriumi atskiriamos dvi x ir y poliarizacijos komponentės ir vieną iš jų išmetama iš pagrindinio spinduliuotės kanalo. Toliau spinduliuotė buvo išplėsta objektyvu OBJ1 (Olympus 40x, NA=0.65). Išplėstas pluoštas yra apribojamas apertūra. Tokiu būdu už apertūros gaunama plokščios bangos aproksimacija. Tada pluoštas buvo kolimuojamas 125 mm židinio nuotolio lęšiu L1. Apertūra buvo pridaryta tiek, kad pluoštas pilnai užpildytų SLM ekraną. Toliau pluoštas dalikliu (PD) nukreipiamas į erdvinį šviesos moduliatorių. Pluošto daliklis čia padeda išgauti mažą kritimo kampą į šviesos moduliatorių. Darbe naudotas tik fazę moduliuojantis ir atspindžio režime veikiantis SLM (PLUTOVIS-006-A, HOLOEYE Photonics AG) turintis 1920x1080 raišką su 8  $\mu$ m dydžio taškais, matricos dydis buvo 15,36x8,64 mm ir jis skirtas 420-700 nm bangos ilgių diapazone. Už erdvinio šviesos moduliatoriaus pluoštas veidrodėliu (V1) nukreipiamas į  $4f$  optinę sistemą sudarytą iš lęšių L2 ir

L3, kurių židinio nuotoliai atitinkamai buvo 150 mm ir 50 mm, tad ši sistema mažina pluošto skersinius matmenis 3 kartus. Taip pat viduryje  $4f$  sistemos yra apertūra AP2, kuria uždengiamas centrinis ir aukštesnių eilių difrakcijos maksimumai. Galiausiai sumažintas pluoštas fokusuojamas 24,5 mm židinio nuotolio lęšiu L4, ir židinyje stebimas atvaizdavimo sistema, kuri susideda iš objektyvo OBJ2 (Olympus x10), kolimuojančio lęšio L5 ( $f=200$  mm) ir kameros. Ši atvaizdavimo sistema yra sumontuota ant motorizuoto staliuko, kad būtų galima registruoti vaizdus skirtingose optinės ašies koordinatėse.

Prieš atliekant matavimus yra svarbu įsitikinti, kad erdvinis šviesos modulatorius veikia teisingai. Optinėse sistemose gali atsirasti įvairių pluošto iškreipimų dėl necentruotų ar kreivai pastatytų elementų, o tai gali iškreipti plokščią bangos frontą. Be to, pats erdvinio šviesos modulatoriaus ekranas nėra tobulas ir taip pat gali iškreipti bangos frontą. Šią problemą galima išspręsti panaudojant fazės korekcijos kaukę. Modulatoriaus programinė įranga leidžia pasigaminti tokią kaukę parenkant įvairių Zernikės polinomų koeficientus. Šiame darbe buvo naudojama korekcinė kaukė pavaizduota 10-ame paveikslėlyje. Šiuo atveju užteko teisingai parinkti su astigmatizmu susijusių koeficientų vertes. Korekcinė kaukė vėliau gali būti sudedama su kitomis pluoštus formuojančiomis fazinėmis kaukėmis. Suformuoto pirmos eilės Beselio pluošto pavyzdys su korekcinė kauke ir be jos parodytas 11-ame paveikslėlyje.



10 pav. Eksperimentų metu naudota fazės korekcijos kaukė. Juoda spalva atitinka nulinių fazinių vėlinimą, kuris tiesiškai didėja iki baltos spalvos arba  $2\pi$  fazinio vėlinimo.



11 Pav. Pirmos eilės Beselio pluošto intensyvumo skirstiniai kai korekcinė kaukė nebuvo naudojama (kairėje) ir naudojant korekcinę kaukę (dešinėje).

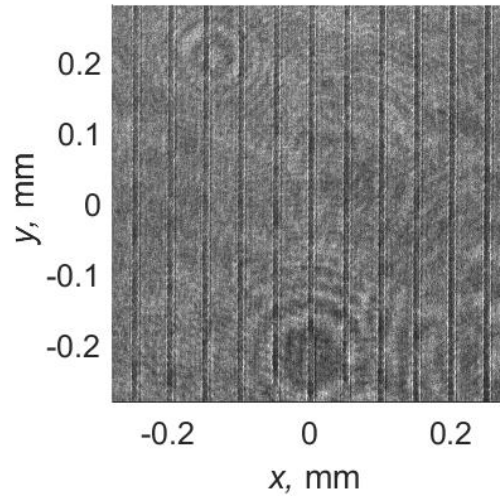
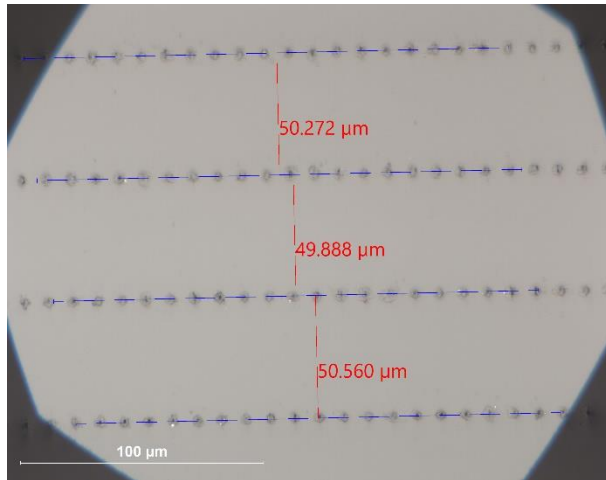
Fazinių kaukių skaičiavimai bei eksperimentinių duomenų gavimas buvo vykdomi *Matlab* kompiuterine programa. Modeliuojant kaukes skersinis ir išilginis spektrai buvo skaičiuojami atskirai ir vėliau sudauginami. Kaip ašinio skirstinio funkcija buvo pasirinkta super-Gauso funkcija aprašoma:

$$f(z) = \exp\left(-\left(\frac{z-z_0}{z_0}\right)^{2N}\right) \quad (29)$$

čia  $z_0 = L/(2 \log 2 / 2^{1/2N})$  aprašo išilginio skirstinio matmenis pusės intensyvumo aukštyje,  $N$  super-Gauso funkcijos eilė. Toks aprašymas leidžia formuoti tokį ašinio intensyvumo profilį, koks buvo aprašytas 2.3 skyriuje. Eksperimentų metu  $N$  parametras buvo 7. Skaičiuojant kaukes ir modeliuojant pluošto intensyvumus reikia nepamiršti įskaityti, kad už erdvinio šviesos modulatoriaus yra 3 kartus mažinanti  $4f$  sistema. Tai įskaityti galime, pavyzdžiui, skaičiavimuose panaudoję 3 kartus mažesnę erdvinio šviesos modulatoriaus taško dydį.

Atvaizdavimo sistemos didinimas buvo surastas panaudojant stiklo plokštelę ant kurios lazeriu buvo padarytos linijos, tarp kurių atstumas  $50 \mu\text{m}$ . Šios plokštelės optinio mikroskopo nuotrauka parodyta 12-ame paveikslėlyje. Įstačius plokštelę į pluošto kelią vietoj lęšio L4 ir apšvietus lazerio spinduliuote buvo užregistruotas vaizdas 12-o paveikslėlio dešinėje. Nuotraukoje atstumas tarp 10 linijų atitiko 890 taškų, taigi vienas taškas atitinka  $500\mu\text{m}/890=56.2\mu\text{m}$ . Šis skaičius buvo naudojamas pluošto nuotraukų ašims sudaryti.



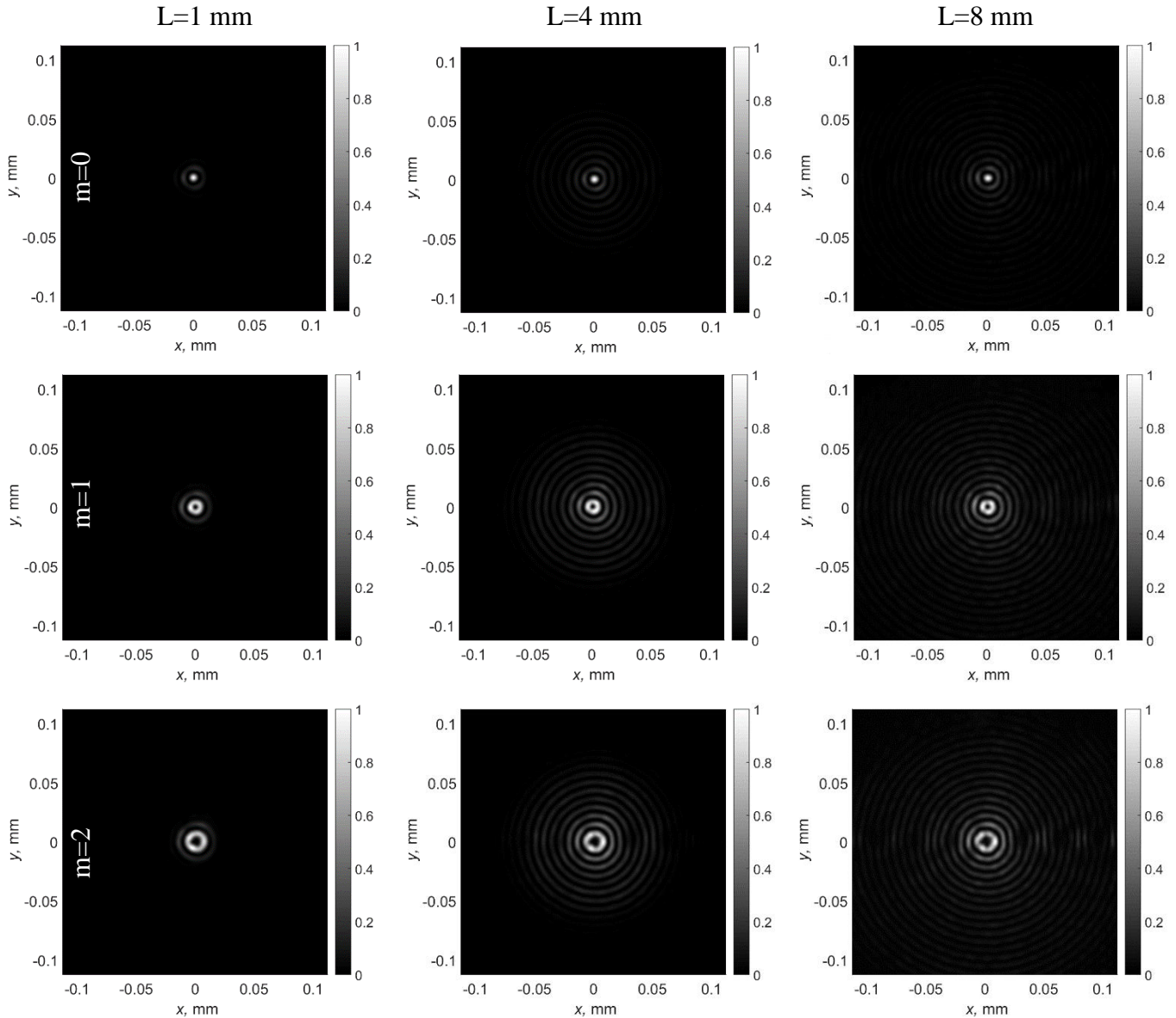


12 Pav. Atvaizdavimo sistemos didinimo nustatymas. Kairėje - stikliuko su žinomo periodo rėžiais nuotrauka daryta optiniu mikroskopu. Dešinėje to paties stikliukio nuotrauka daryta atvaizdavimo sistema.

## 4 Eksperimento rezultatai

### 4.1 Individualių pluoštų ilgio ir topologinio krūvio įtaka skerspjūvio kokybei

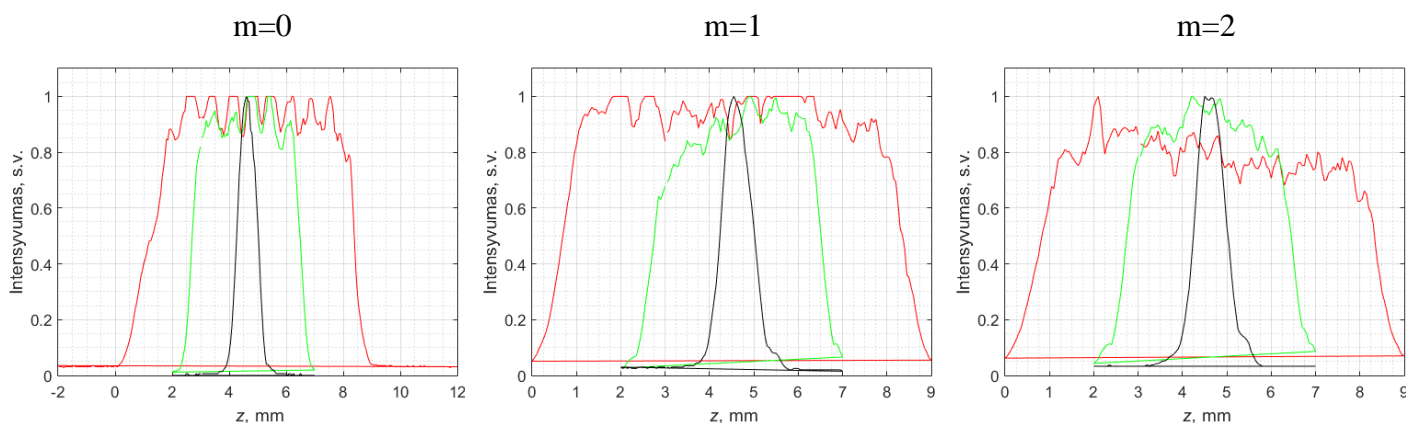
Šiame eksperimente erdviu šviesos moduliatoriumi buvo formuojami sumodeliuoti kvazi Beselio pluoštai ir tirta jų skerspjūvio kokybė keičiant pluošto ilgį ir topologinį krūvį. Iš viso buvo pamatuoti 3 skirtingi topologiniai krūviai: 0, 1, ir 2, o pluošto ilgiai varijuojami nuo 1 mm iki 8 mm, kas 1 mm. Skerspjūvių nuotraukos buvo nuskaitomos judinant staliuką 50  $\mu\text{m}$  žingsniu.



13 pav. Pluoštų skerspjūviai keičiant individualaus Beselio pluošto ilgius ir topologinius krūvius. Nuotraukos iš kairės į dešinę darytos kai pluošto ilgiai buvo 1 mm, 4 mm, 8 mm. Iš viršaus į apačią topologiniai krūviai atitinkamai buvo 0, 1, 2.

Keletas pluošto skerspjūvių rezultatų pateikta 13-ame paveikslėlyje. Čia galime matyti, kad didinant pluošto ilgį pradėdame matyti vis daugiau kvazi Beselio pluošto žiedų. Didinant topologinį krūvį matomas centrinio pluošto minimumo didėjimas, bei pradėdame matyti vis daugiau žiedų aplink centrinį minimumą. Skersai žiedų struktūrai kai kuriuose paveikslėliuose matomos mažesnio intensyvumo linijos. Jos galėjo atsirasti dėl interferencijos su centrinio maksimumo spinduliuote dalinai praėjusia pro apertūrą AP2 (žr. 9-tą paveikslėlį). Iš šių rezultatų galime kelti hipotezę, kad formuojant pluoštų matricą, ilgus pluoštus bus sunku priartinti šalia vienas kito dėl platesnės žiedų struktūros.

Išilginių intensyvumų maksimumai keičiant pluošto topologinį krūvį pateikti 14-ame paveikslėlyje. Visais atvejais buvo stebimos ašinio intensyvumo osciliacijos galimai atsirandančios dėl ribotų optikos apertūrų, kaip buvo rašoma 2.3 skyriuje. Taip pat matome, kad plokščią ašinio intensyvumo skirstinį yra sunkiau sukurti, kai formuojamo pluošto ilgis yra mažas, pavyzdžiui, 1 mm.

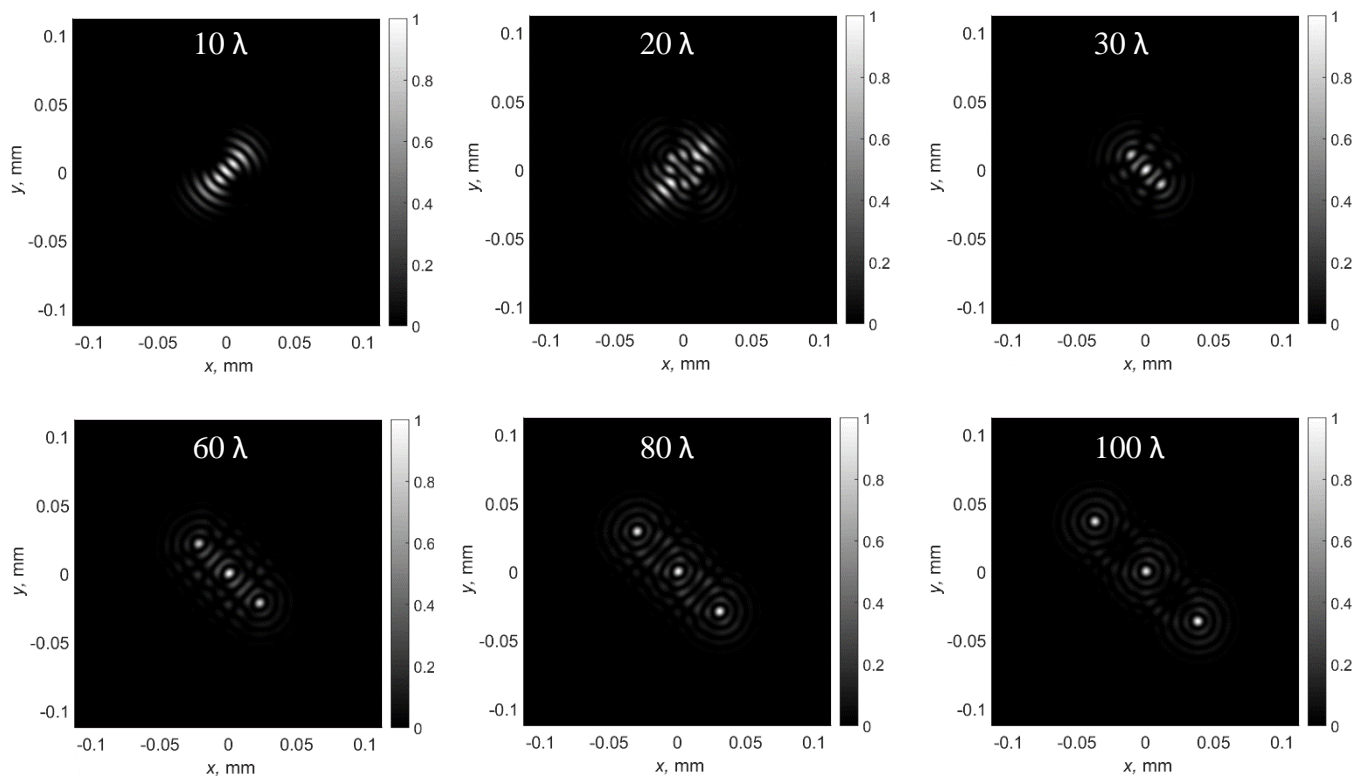


14 pav. Ašinių intensyvumų maksimumai keičiant individualaus Beselio pluošto ilgį ir topologinius krūvius. Iš kairės į dešinę topologiniai krūviai  $m$  yra 0, 1, 2. Raudona linija atitinka rezultatus kai pluošto ilgis buvo 8 mm, žalia – 4 mm, o juoda – 1 mm.

#### 4.2 Lygiagrečių pluoštų matricos formavimas. Pluoštų ilgio, topologinio krūvio bei atstumo tarp pluoštų įtaka skerspjūvio kokybei.

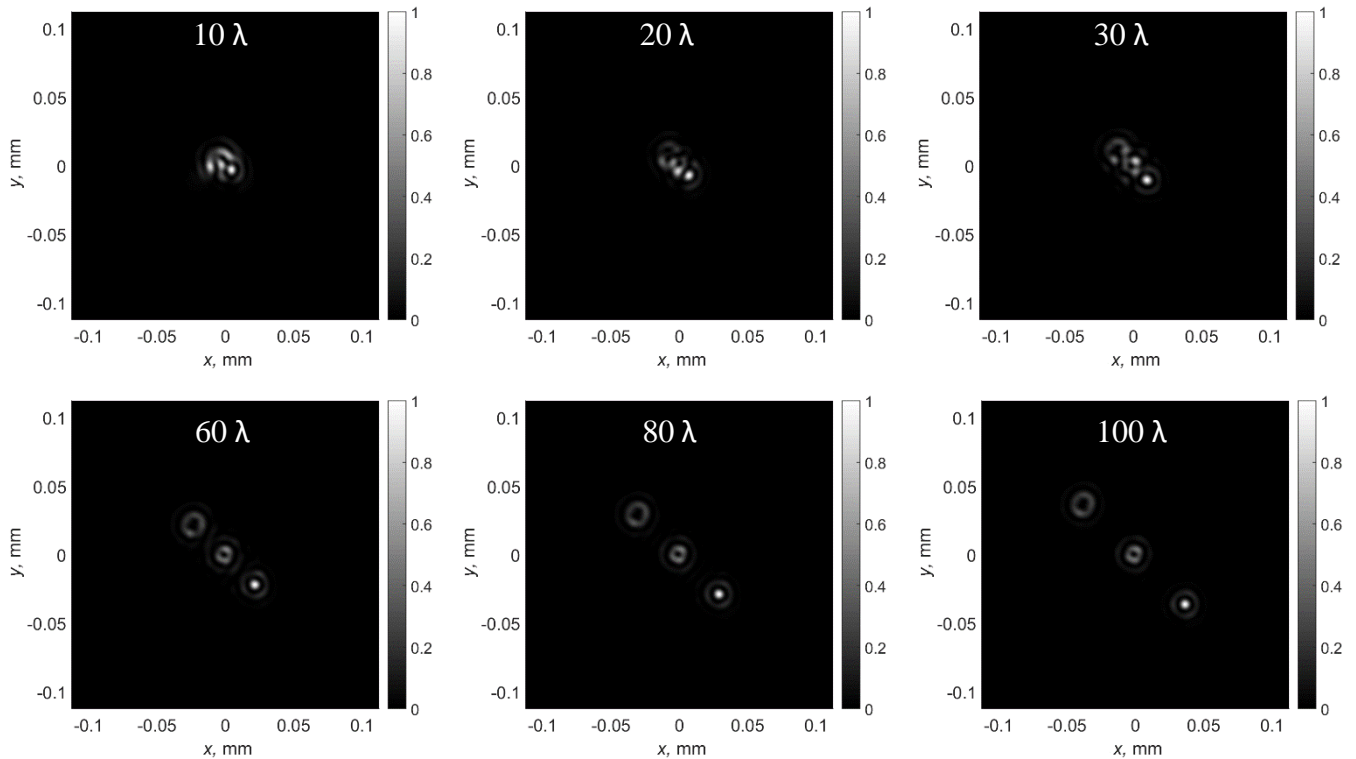
Galvojant apie Beselio pluoštų matricą ko gero pirma mintis yra daugelis viena šalia kitos esančių centrinių smailių. Tačiau realybėje yra tam tikrų ribojimų kaip arti vienas kito šiuos pluošteliuos galime išdėlioti. Vienas iš ribojančių veiksnių yra šių pluoštų interferencija, tad šioje darbo dalyje buvo nagrinėjama kokią įtaką kvazi Beselio pluoštų matricų formavimui turi ivairūs parametrai, pavyzdžiui, topologinis krūvis ( $m$ ), pluoštų ilgis ( $L$ ) bei atstumas tarp pluoštų ( $r$ ).

Šiame eksperimente buvo suformuota 3-jų pluoštų matrica pluoštus išdėstant  $45^\circ$  kampu lyginant su  $x$  ašimi. Toks išdėstymas buvo pasirinktas dėl to, kad šviesa nuo centrinio maksimumo mažiau įtakotų kraštinio pluoštelio formavimąsi. Be to tokiu būdu nuotraukose galima atvaizduoti didesnius atstumus. Buvo matuoti 3 pluoštų ilgiai: 1 mm, 2 mm, 4 mm. Pluoštų topologiniai krūviai buvo keičiami matricoje priklausomai nuo pozicijos ir kadangi galimybių išdėstyti 3 skirtingų topologinių pluoštus vienas šalia kito yra gana nemažai, tad šiame darbe bus aptarti tik keli variantai. Pradėkime nuo to, kai visi trys pluoštai yra 0 topologinio krūvio Beselio pluoštai. Kaip kinta pluošto skerspjūvis keičiant atstumą tarp pluoštų parodyta 15-ame paveikslėlyje. Čia buvo pasirinktas 2 mm ilgis. Pirmiausiai matome, jog kai atstumas tarp pluoštų itin mažas negalime išskirti atskirų intensyvumo smailių, centras yra išilgėjęs, panašus į eliptinį. Nuo  $\sim 30 \lambda$  pradėdame įžiūrėti atskiras intensyvumo smailes. Nuo  $\sim 60 \lambda$  smailės nebėra išdankomos o padidinus atstumą iki  $100 \lambda$  pagerėja smailės kontrastas lyginant su aplinkui esančiu interferencijos vaizdu.

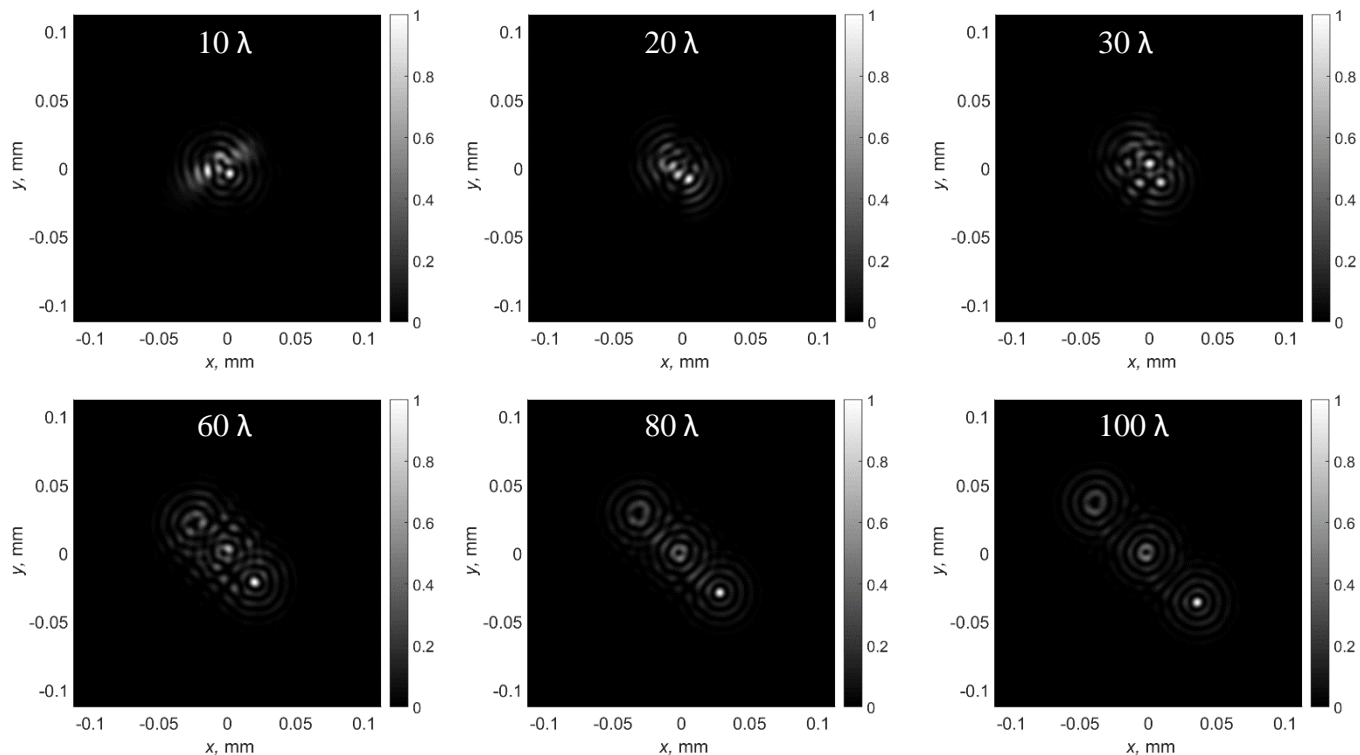


15 pav. Trijų Beselio pluoštų matricos intensyvumo skirstiniai priklausomai nuo atstumo tarp pluoštų. Pluoštų ilgiai buvo 2 mm. Nuotraukų viršuje pažymėtas atstumas tarp pluoštų bangos ilgiais (1 bangos ilgis 532 nm).

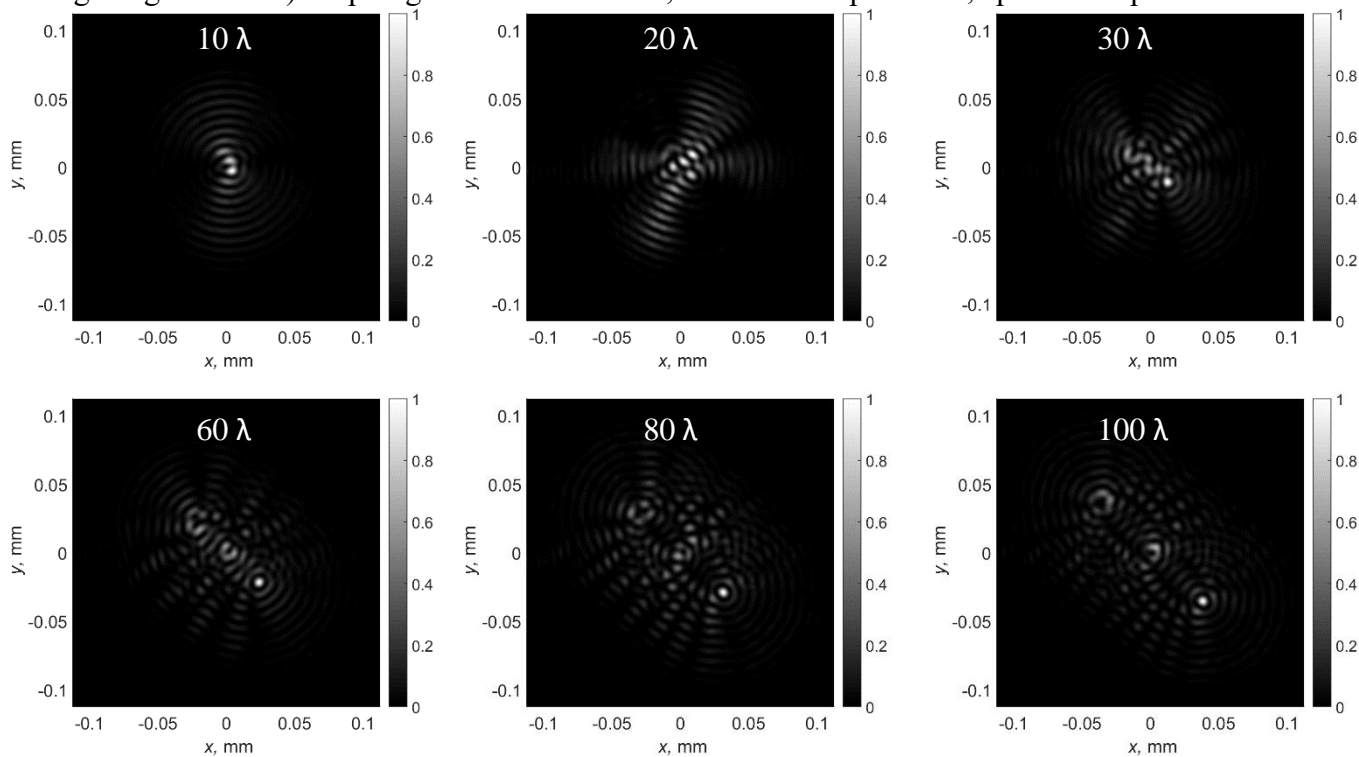
Toliau darbe buvo keičiami kvazi Beselio pluoštų topologiniai krūviai. Centrinio pluošto topologiniai krūviai buvo parinkti  $m=1$  ir  $m=2$ , o aplink juos išdėstomi likusieji. Situacijos kai centrinio pluošto topologinis krūvis  $m=1$ , o pluoštų ilgiai 1 mm, 2 mm ir 4 mm atitinkamai pavaizduotos 16-ame, 17-ame ir 18-ame paveikslėliuose. Kai parinktas ilgis buvo  $L=1$  mm visus tris pluoštus beveik galime išskirti tarp jų centrų esant  $\sim 30\lambda$  atstumui. Kai pluoštų ilgis yra didesnis ir jie bandomi formuoti tokiu pačiuo atstumu vienas nuo kito, stebimas matricos iškraipymas dėl interferencijos, kaip pavyzdžiui,  $L=2$ ,  $30\lambda$  atveju pavaizduotu 17-ame paveiksle. Be to, esant didesniai  $L$  tarp pluoštų esančios interferencinės linijos yra intensyvesnės. Be to, palyginę įvairių topologinių krūvių pluoštų matricos vaizdus su 15-o paveikslėlio vaizdais, kai visi topologiniai krūviai yra 0, galime pastebėti, jog bendras interferencijos rezultatas, naudojant aukštesnės eilės kvazi Beselio pluoštus, yra nesimetrinis. Tai gan gerai matosi kai formuojami trumpesni pluoštai.



16 pav. Trijų kvazi Beselio pluoštų matricos intensyvumo skirstiniai priklausomai nuo atstumo tarp pluoštų. Pluoštų ilgiai buvo 1 mm. Nuotraukų viršuje pažymėtas atstumas tarp pluoštų bangos ilgiais (1 bangos ilgis 532 nm). Topologinis krūvis centre 1, viršutiniame pluošte 2, apatiniame pluošte 0.

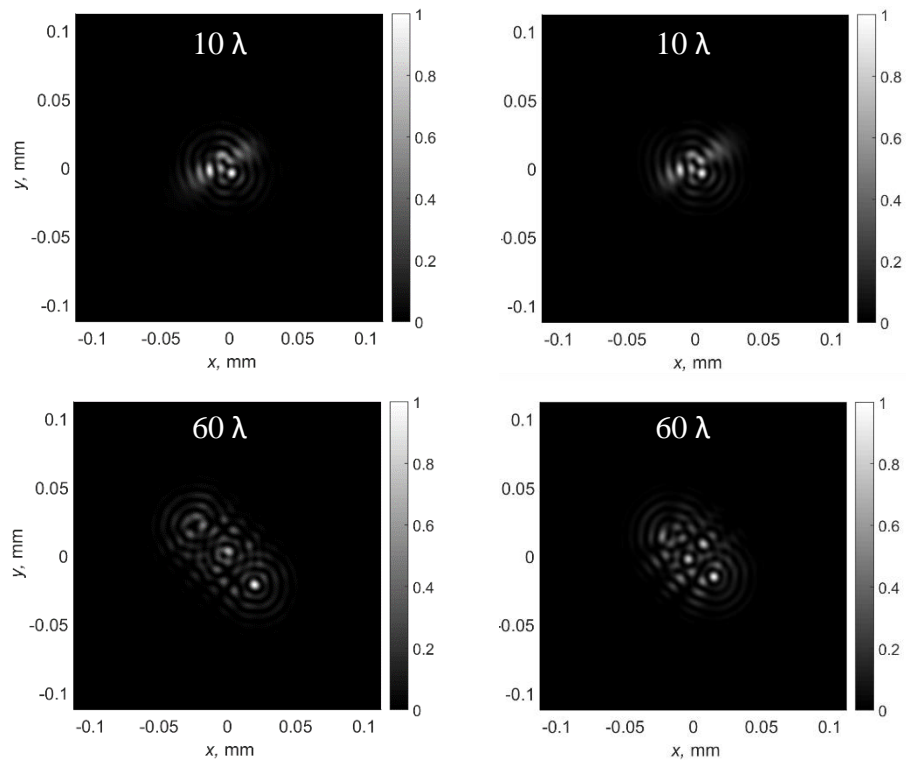


17 pav. Trijų kvazi Beselio pluoštų matricos intensyvumo skirstiniai priklausomai nuo atstumo tarp pluoštų. Pluoštų ilgiai buvo 2 mm. Nuotraukų viršuje pažymėtas atstumas tarp pluoštų bangos ilgiais (1 bangos ilgis 532 nm). Topologinis krūvis centre 1, viršutiniame pluošte 2, apatiniame pluošte 0.



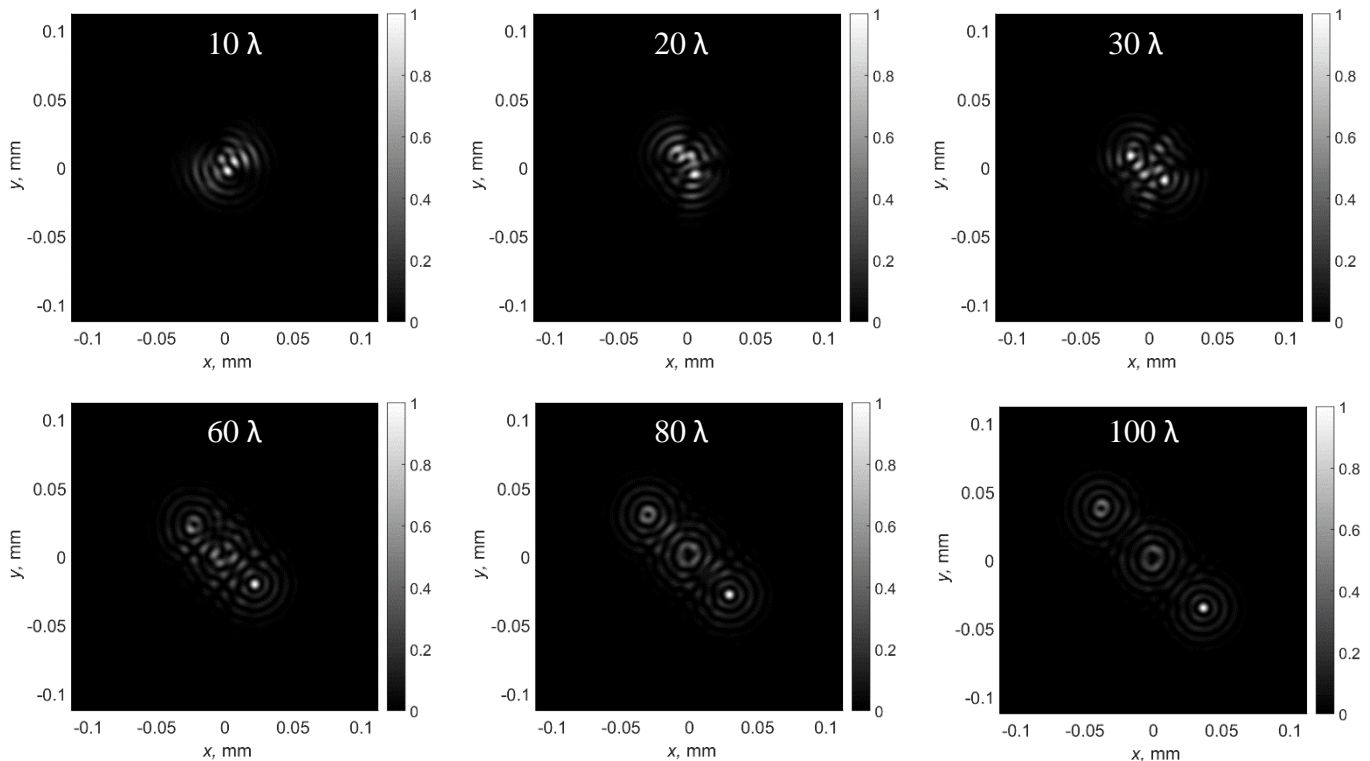
18 pav. Trijų kvazi Beselio pluoštų matricos intensyvumo skirstiniai priklausomai nuo atstumo tarp pluoštų. Pluoštų ilgiai buvo 4 mm. Nuotraukų viršuje pažymėtas atstumas tarp pluoštų bangos ilgiais (1 bangos ilgis 532 nm). Topologinis krūvis centre 1, viršutiniame pluošte 2, apatiniame pluošte 0.

Tam kad įsitikinti jog stebimi kvazi Beselio pluoštų matricos iškreipymai neatsiranda dėl optinės sistemos netobulumų galime palyginti eksperimentinius rezultatus su skaitmeninio modeliavimo rezultatais. 2 mm ilgio masyvų palyginimas pateiktas 19-ame paveikslėlyje. Kai atstumas tarp pluoštų buvo  $10 \lambda$  eksperimento rezultatai labai gerai sutampa su skaitmeninio modeliavimo rezultatais. Kai atstumas tarp pluoštų buvo  $60 \lambda$  rezultatai šiek tiek skiriasi. Eksperimento metu gautame skerspjūvyje geriau matosi pagrindiniai 1-o ir 2-o topologinių krūvių pluoštų žiedai. Neatitikimas galėjo atsirasti dėl ne idealiai sutampančios ašinės koordinatės, kurioje buvo daroma nuotrauka.



19 pav. Eksperimentais gautų pluoštų (kairėje) ir skaitmeninio modeliavimo (dešinėje) palyginimas. Pluoštų ilgiai buvo 2 mm. Nuotraukų viršuje pažymėtas atstumas tarp pluoštų bangos ilgiais (1 bangos ilgis 532 nm). Topologinis krūvis centre 1, viršutiniame pluošte 2, apatiniame pluošte 0.

Toliau tokie patys pluoštų skerspjūviai buvo gauti pakeitus centrinio pluošto topologinį krūvį į 2. Matavimų rezultatai pateikti 20-ame paveikslėlyje. Lyginant su 17-ame paveiksle pavaizduotu atveju, kai topologiniai krūviai išdėstyti kita tvarka sunku pastebėti skirtumus.

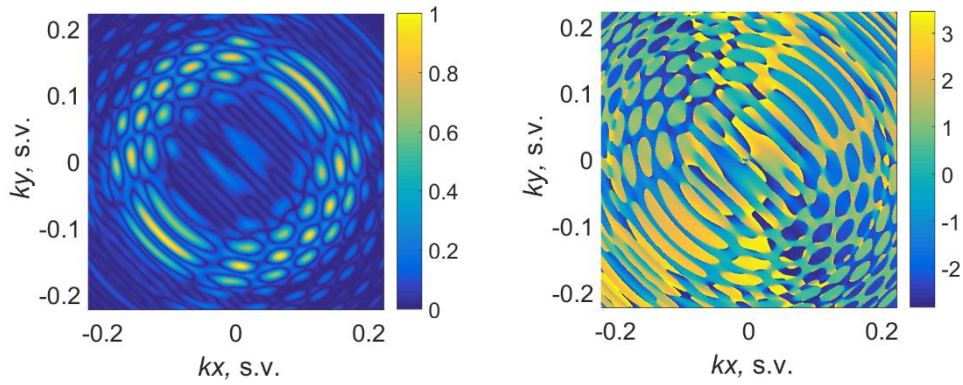


20 pav. Trijų kvazi Beselio pluoštų matricos intensyvumo skirstiniai priklausomai nuo atstumo tarp pluoštų. Pluoštų ilgiai buvo 2 mm. Nuotraukų viršuje pažymėtas atstumas tarp pluoštų bangos ilgiais (1 bangos ilgis 532 nm). Topologinis krūvis centre 2, viršutiniame pluošte 1, apatiniame pluošte 0.

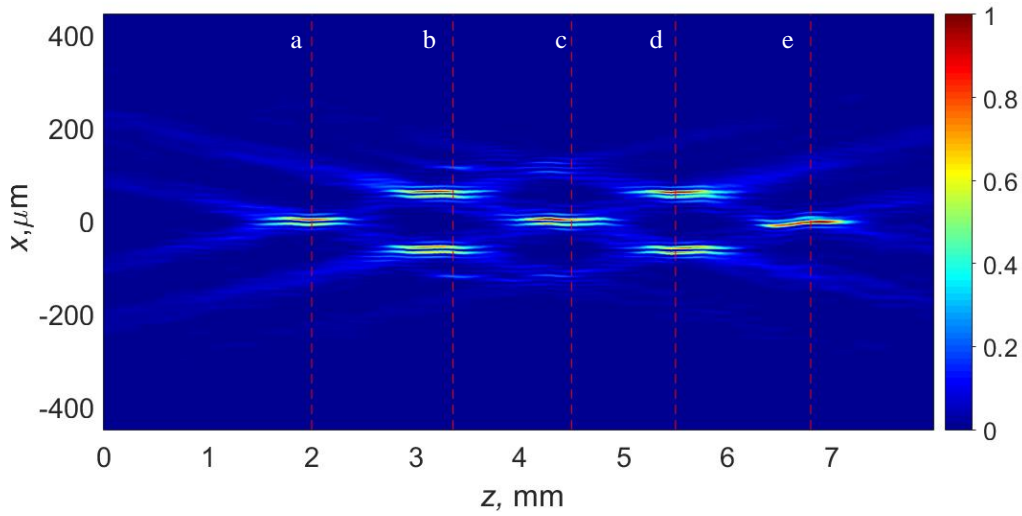
### 4.3 Lygiagrečių pluoštų su ašinio intensyvumo minimumu formavimas.

Galiausiai buvo bandoma suformuoti erdvinę pluoštų struktūrą su sudėtingesniu ašinio intensyvumo profiliu, turinčiu kelis intensyvumo minimumus ir maksimumus. Buvo pasirinkta suformuoti struktūrą su 1-os ir 0-ės eilės kvazi Beselio pluoštais, kai centre yra 2 intensyvumo minimumai, pluoštų  $m=1$ , jo šonuose  $m=1$  pluoštai su vienu intensyvumo minimumu, o dar toliau 0-ės eilės pluoštas. Atstumas tarp pluoštų buvo parinktas  $80 \lambda$ . Suskaičiuoti tokio darinio amplitudės ir fazės skirstiniai parodyti 21-ame paveiksle. Ašinis gautos struktūros skirstinys pavaizduotas 22-ame paveikslėlyje, o tam tikrose vietose esantys pluošto skerspjūviai pavaizduoti 23-iame paveikslėlyje. Rezultatai parodo, kad žinant reikiamus pluoštų ilgius ir atstumus tarp jų galima sukurti norimą struktūrą su nedideliais iškreipymais.

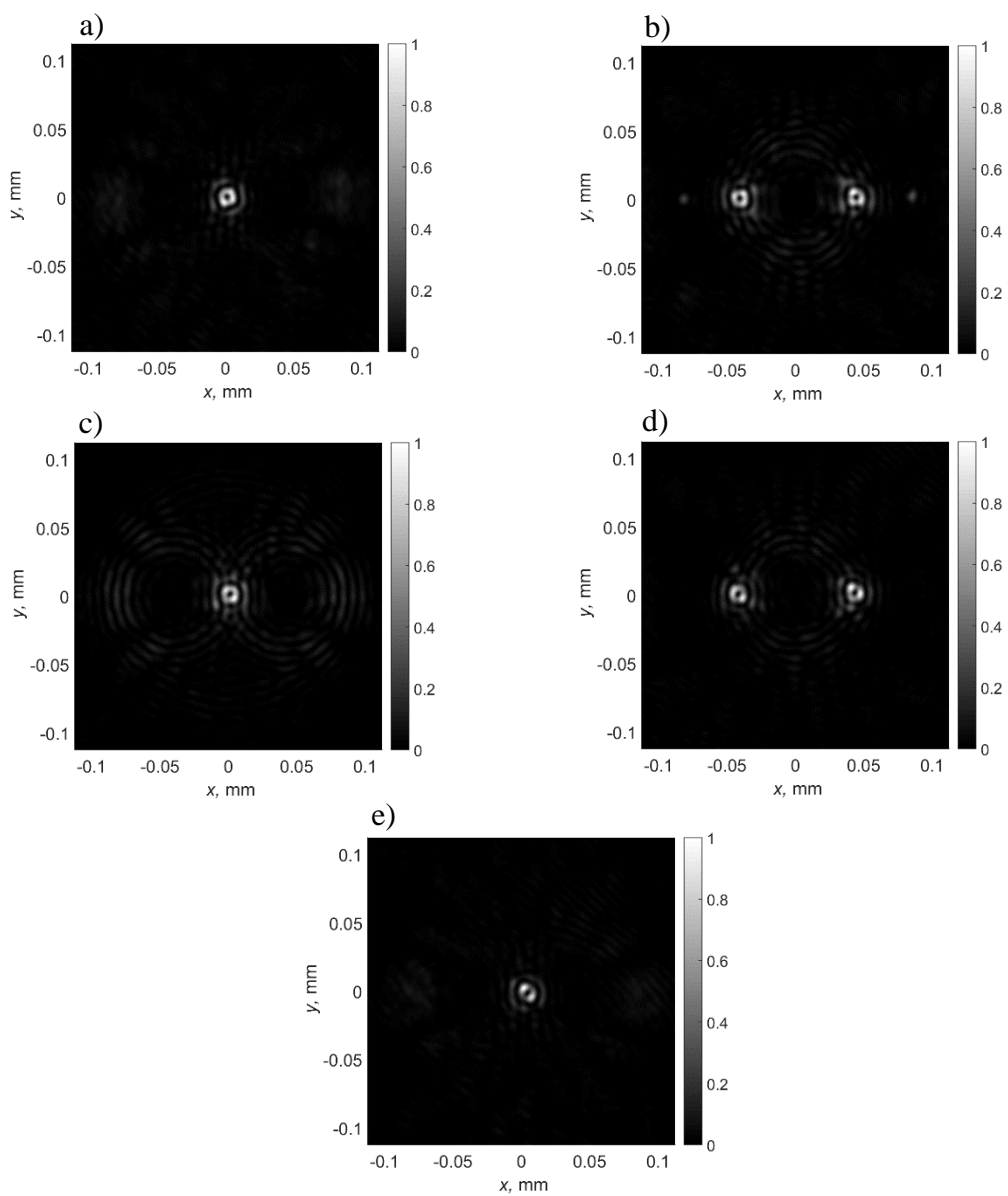




21 pav. Kairėje amplitudės, o dešinėje erdvinio spektro fazės skirstiniai naudoti pluošto struktūrai ant ašies sukurti..



22 pav. Suformuotos ašinės struktūros ašinis intensyvumo skirstinys. Raidėmis pažymėti skerspjūviai pavaizduoti 23 paveikslėlyje.



23 pav. 22 paveikslėlyje pavaizduotos ašinės struktūros skerspjūviai.

## 5 Rezultatai ir išvados

1. Tiriant ašinius pavienių kvazi Beselio pluoštų intensyvumo skirstinius buvo nustatyta, kad formuojant ilgesnius pluoštus gaunama platesnė žiedinė struktūra. Didinant pluošto topologinį krūvį centrinio minimumo skersmuo didėja, o su juo plėtėja ir žiedinė struktūra.
2. Keičiant atstumą tarp šalia vienas kito išdėstytų pluoštų nustatyta, kad esant mažiems atstumams ( $10 \lambda$  iki  $30 \lambda$ ) dėl interferencijos gretimų pluoštus išskirti yra sunku. Padidinus šį atstumą (nuo  $60 \lambda$ ) pluoštus galime nesunkiai išskirti, o toliau didinant atstumą iki  $100 \lambda$  pagerėja centrinės smailės ir žiedų struktūros kontrastas. Formuojant matricą iš skirtingų topologinių krūvių reikalingas didesnis atstumas tarp pluoštų norint juos išskirti, nes aukštesnių topologinių krūvių pluoštų žiedų struktūra yra platesnė.
3. Keičiant kvazi Beselio pluoštų matricos ilgį  $L$  didesnis jos iškraipymas matomas kai formuojami ilgesni pluoštai. Kai  $L=1$  mm interferencinės juostos yra neryškios, o kai  $L=4$ mm jos yra ryškesnės. Norint išskirti atskirus pluoštus ilgesnėje matricoje reikalingi didesni atstumai tarp pluoštų.
4. Parinkus tinkamus atstumus tarp pluoštų matricoje, galima sukuti norimo ašinio intensyvumo skirstinio struktūrą išvengiant didelių iškraipymų.

## 6 Literatūros sąrašas

- [1] H. Rubinsztein-Dunlop, A. Forbes, M. V Berry, M. R. Dennis, D. L. Andrews, M. Mansuripur, C. Denz, C. Alpmann, P. Banzer, and T. Bauer, “Roadmap on structured light,” *J. Opt.*, **19**, 1, (2017).
- [2] J. Durnin, “Exact solutions for nondiffracting beams I The scalar theory,” *J. Opt. Soc. Am. A*, **4**, 4, 651, (1987).
- [3] M. K. Bhuyan, F. Courvoisier, P. Lacourt, M. Jacquot, and L. Furfaro, “High aspect ratio taper-free microchannel fabrication using femtosecond Bessel beams,” *Opt. Express*, **18**, 2, 566–574, (2010).
- [4] S. Ngcobo, I. Litvin, L. Burger, and A. Forbes, “A digital laser for on-demand laser modes,” *Nat. Commun.*, **4**, May, 1–6, (2013).
- [5] R. Drevinskas and P. G. Kazansky, “High-performance geometric phase elements in silica glass,” *APL Photonics*, **2**, 6, 066104, (2017).
- [6] K. Dholakia and N. Haugh, “Bessel beams : diffraction in a new light,” *Contemp. Phys.*, **46**, 1, 15–28, (2005).
- [7] K. F. Riley, M. P. Hobson, and S. J. Bence, *Mathematical Methods for Physics and Engineering The*, 3-ias leid. 602-616, Cambridge University Press, 2006.
- [8] K. Regelskis, “Sudėtingų erdvinių šviesos darinių netiesinių virsmų tyrimas,” Vilniaus Universitetas, 2005.
- [9] S. H. Tao and X. Yuan, “Self-reconstruction property of fractional Bessel beams,” *Opt. Soc. Am.*, **21**, 7, 1192–1197, (2004).
- [10] S. Orlov, K. Regelskis, V. Smilgevicius, and A. Stabinis, “Propagation of Bessel beams carrying optical vortices,” *Opt. Commun.*, **209**, August, 155–165, (2002).
- [11] A. Vasara, J. Turunen, and A. T. Friberg, “Realization of general nondiffracting beams with computer-generated holograms,” *Opt. Soc. Am.*, **6**, 11, 1748–1754, (1989).
- [12] Z. Kuang, W. Perrie, S. P. Edwardson, E. Fearon, and G. Dearden, “Ultrafast laser parallel microdrilling using multiple annular beams generated by a spatial light modulator,” *J. Phys. D. Appl. Phys.*, **47**, 11, 115501, (2014).
- [13] J. Beeckman, “Liquid-crystal photonic applications,” *Opt. Eng.*, **50**, 8, 081202, (2011).
- [14] Z. Zhang, Z. You, and D. Chu, “Fundamentals of phase-only liquid crystal on silicon (LCOS) devices,” *Light Sci. Appl.*, **3**, 10, 213, (2014).

- [15] L. Yang, A. El-Tamer, U. Hinze, J. Li, Y. Hu, W. Huang, J. Chu, and B. N. Chichkov, “Two-photon polymerization of cylinder microstructures by femtosecond Bessel beams,” *Appl. Phys. Lett.*, **105**, 4, (2014).
- [16] A. Hussain, J. L. Martinez, and J. Campos, “Holographic superresolution using spatial light modulator,” *J. Eur. Opt. Soc. Rapid Publ.*, **8**, 13007, (2013).
- [17] K. Dholakia and Čižmar, “Tunable Bessel light modes : engineering the axial propagation,” *Opt. Express*, **17**, 18, 12688–12700, (2009).
- [18] A. J. Stratton, *Electromagnetic theory*. McGRAW-HILL BOOK COMPANY, INC., 372-375, 1941.
- [19] S. Orlov, J. Alfonsas, J. Baltrukonis, and V. Jukna, “Controllable Spatial Array of Bessel-like Beams with Independent Axial Intensity Distributions for Laser Microprocessing,” *J. Laser Micro/Nanoengineering*, **13**, 3, 324–329, (2018).
- [20] A. Dudley, R. Vasilyeu, V. Belyi, N. Khilo, P. Ropot, and A. Forbes, “Controlling the evolution of nondiffracting speckle by complex amplitude modulation on a phase-only spatial light modulator,” *Opt. Commun.*, **285**, 1, 5–12, (2012).
- [21] V. Arrizón, “Optimum on-axis computer-generated hologram encoded into low-resolution phase-modulation devices,” *Opt. Lett.*, **28**, 24, 2521, (2007).

Paulius Šlevas

OPTINIŲ BESELIO SŪKURIŲ MATRICOS SU NEPRIKLAUSOMU AŠINIO  
INTENSYVUMO SKIRSTINIŲ FORMAVIMAS ERDVINIŲ ŠVIESOS MODULIATORIUMI

**Santrauka**

Lazerio pluošto skersinė struktūra yra vienas svarbiausių parametru, nuo kurio gali priklausyti lazerinės spinduliuotės taikymo sritis. Lazeriniame mikro apdirbime be įprasto Gauso pluošto plačiai yra naudojami Beselio-Gauso pluoštai, kurie pasižymi ilga Reilėjaus zona ir kuriais vienu lazeriniu impulsu galima paveikti didesnę skaidrių medžiagų tūrį. Tai leidžia paspartinti kai kuriuos lazerinio apdirbimo procesus. Norint kuo tolygiau paveikti apdirbamas skaidrias medžiagas yra naudinga valdyti ne tik skersinį bet ir išilginį pluošto intensyvumo skirstinį. Šiame darbe yra nagrinėjama Beselio pluoštų ašinio intensyvumo skirstinio valdymo metodika, o taip pat ir tokių pluoštų matricos formavimas erdviniu šviesos moduliatoriumi. Darbe buvo tirta kvazi Beselio pluošto ilgio ir topologinio krūvio įtaką individualaus pluošto skerspjūviui, suformavus tokių pluoštų matricą buvo tirta jos skersinio intensyvumo skirstinio kokybė priklausomai nuo atstumo tarp pluoštų ir jų ilgių. Buvo nustatyta, kad topologinio krūvio ir pluošto ilgio didinimas pasireiškia stipresne interferencija tarp pluoštų ir tai neleidžia jų išdėstyti kiek norima arti vienas kito. Galiausiai, radus tinkamus parametrus, kuriuos naudojant galima išvengti dėl interferencijos atsirandančių iškraipymų, buvo pademonstruota galimybė suformuoti norimo ašinio intensyvumo skirstinio struktūrą.

Paulius Šlevas

FORMATION OF SPATIAL ARRAY OF OPTICAL BESSEL VORTICES WITH  
INDEPENDENT AXIAL INTENSITY DISTRIBUTIONS USING SPATIAL LIGHT  
MODULATOR

**Summary**

One of the most important characteristics considering application of the laser beam is its transverse beam profile. Most widely used profile is a Gaussian beam. However, in some applications Bessel-Gauss beam can be more beneficial due to its long Rayleigh zone. For example, in fabrication of transparent materials one can modify larger volume with a single pulse using Bessel beam instead of a Gauss beam. To achieve a more homogeneous on axis modification an ability to control axial beam intensity profile is required. In this work I present a method for generation of a quasi-Bessel vortex beam which in contrary to a Bessel vortex beam has an arbitrary intensity distribution. I analyze influence of topological charge and beam length to transverse intensity distribution. Next, I introduce a spatial array of independent quasi-Bessel vortices and report on physical limitations for a formation of this array due to mutual interference of individual beams. Main results show that increase in topological charge or beam length leads to a more pronounced interference pattern and longer distances between individual beams are needed to distinguish these beams. Finally, I show, that by choosing right parameters it is possible to minimize effects due to the harmful interference and form various spatial structures from parallel displaced quasi-Bessel vortex beams.