

Vilniaus universiteto  
Fizikos fakulteto  
Lazerinis tyrimų centras

Julius Serapinas

ABERACIJŲ KOREKCIJA IR LAZERIO PLUOŠTO MODIFIKAVIMAS ERDVINIU ŠVIESOS  
MODULIATORIUMI

Magistrantūros studijų baigiamasis darbas  
Lazerinės technologijos  
studijų programa

Studentas

Julius Serapinas

Leista ginti

2021-06-02

Darbo vadovas

Dr. Domas Paipulas

Instituto/Centro direktorius/atstovas

Prof. Aidas Matijošius

Vilnius 2021

# Turinys

Įvadas.....	3
1 Aberacijų korekcija ir jos panaudojamas lazeriniame mikroapdirbime.....	4
1.1 Optinės aberacijos ir jų kilmė .....	4
1.2 Aberacijų modeliavimas spindulių trasavimo programa ir atvaizdavimas Zernike polinomais.....	5
1.3 Aberacijų korekcijos įvertinimas Strehl koeficientu.....	10
1.4 Erdviniai šviesos modulatoriai.....	11
1.4.1 Erdvinių šviesos moduliatorių veikimo principas .....	11
1.4.2 Erdvinių šviesos moduliatorių taikymas mikroapdirbime.....	13
1.4.3 Hologramų kūrimas erdvinio šviesos moduliatoriumi .....	16
1.4.4 Erdviniu šviesos moduliatoriumi kuriamų pluoštų tipai .....	18
2 Eksperimentas .....	20
2.1.1 Holoeye Pluto 2 modulatorius.....	20
2.1.2 Pluošto centravimas ant erdvinio šviesos moduliatoriaus .....	20
2.1.3 Erdvinio šviesos moduliatoriaus kalibravimas .....	22
2.1.4 Lazerio pluošto poslinkis.....	27
2.1.5 Eksperimento schema .....	30
2.1.6 Aberacijų korekcija.....	32
2.1.7 Plokščios viršūnės pluošto ir butelio formos pluoštų formavimas.....	36
3 Eksperimento rezultatų aptarimas .....	37
3.1 Aberacijų korekcijos efektyvumo matavimas.....	37
3.2 Butelio formos ir plokščios viršūnės pluoštų formavimas.....	40
Pagrindiniai rezultatai ir išvados .....	44
Literatūra .....	45
Santrauka .....	47
Summary.....	48

## Įvadas

Optinėse sistemose sklindant šviesai atsiranda šviesos bangos fronto aberacijų, kurios iškraipo optinės sistemos atvaizdo kūrimą bei mažina optinių sistemų efektyvumą. Praktikoje yra naudojama daug būdų kompensuoti aberacijas - optimizuojant sistemas, įdedant naujus komponentus arba keičiant turimų parametrus. Tačiau kai sistemoje yra kintančių elementų arba šviesa patiria aberacijas už optinės sistemos ribų, kompensuoti aberacijas tradiciniais metodais – optimizuojant optinės sistemos elementus, tampa keblu. Kai lazeriniu mikroapdirbimu apdirbamas medžiagos paviršius, sufokusuoto lazerio pluošto židinyje bangos fronto aberacijos atsiranda tik iš naudojamos optinės sistemos. Todėl jas galima lengvai kompensuoti pačioje optinėje sistemoje. Tačiau kai mikroapdirbimas vykdomas skaidrios medžiagos tūryje, atsiranda kintančios aberacijos, kurios priklauso nuo medžiagos optinio lūžio rodiklio, fokusavimo gylio ir kampo. Dėl atsiradusių pluošto iškraipymų mažėja mikroapdirbimo tikslumas ir efektyvumas. Tokiems atvejams pravartu naudoti erdvinis šviesos modulatorius, kuriais galima kompensuoti šviesos bangos aberacijas anksčiau nei šviesa patenka į fokusuojamą medžiagą bei realiu laiku optimizuoti sistemą bei formuoti įvairaus profilio lazerio pluoštus. Norint atlikti aberacijų kompensavimą pirmiausia reikia žinoti optinėje sistemoje esančias aberacijas ir kokia hologramą pritaikyti moduliatoriuje, kad būtų gaunamas optimalus sistemos veikimas.

Šio darbo tikslas yra įvertinti ar difrakcinės kaukės, sukurtos pasitelkiant spindulių trasavimo programa suskaičiuotais Zernike polinomais, kurie aprašo aberuotus bangos frontus bei optinėje sistemoje naudojamą objektyvą pakeičiant idealiu, yra pakankamai tikslios sukuriant efektyvią difrakcinę kaukę, kuria būtų galima pašalinti aberacijas atsirandančias fokusuojant lazerio pluoštą skaidriose terpėse. Taip pat bus siekiama ištestuoti alternatyvaus dizaino, apertūros formos difrakcinės kaukės skirtas butelio formos ir plokščios viršūnės pluoštų kūrimui.

# 1 Aberacijų korekcija ir jos panaudojamas lazeriniame mikroapdirbime

## 1.1 Optinės aberacijos ir jų kilmė

Fokusuojant šviesą į kitokio lūžio rodiklio skaidrią medžiagą gali pasireikšti šviesos bangos fronto aberacijos. Difrakcijos apribotoje sistemoje, kai nėra papildomų aberacijų šviesa sufokusuojama į Airy diską, tačiau realioje optinėje sistemoje šviesai keliaujant tarp skirtingo lūžio rodiklio terpių gaunamos aberacijos, dėl kurių nesutampa fokusuojamų plūštų optiniai keliai ir gaunamas atvaizdas tampa iškraipytas. [1] Dėl šio reiškinio yra apribojama konfokalinių mikroskopų skiriamoji geba, lazerinio apdirbimo tikslumas bei kitų procesų, kurių metu fokusuojama šviesa į kito optinio tankio medžiagą efektyvumas. Fokusuotas lazerio pluoštas išsiskleidžia lygiagrečia ir statmena sklidimui kryptimis ir dėl to sumažėja intensyvumas. Dėl optinių aberacijų medžiagoje, kurioje fokusuojamas pluoštas, padidėja moda ir dėl to ne tik sumažėja apdirbimo skiriamoji geba, bet dėl mažesnio intensyvumo ilgėja apdirbimo procesas. Taip pat kadangi intensyvumas yra mažesnis reikia didinti lazerio galią arba ilginti apdirbimo laiką, o dėl to terpė apie apdirbamą zona pradeda stipriau kaisti. [2] Aberacijų kompensavimas ypač naudingas, kai naudojami didelės skaitinės apertūros lęšiai ir fokusuojama giliai skaidrioje medžiagoje.

Šias aberacijas galima išreikšti naudojantis radiališkai invariantiškais Zernike polinomis. Aberacijos didžiausią dalį sudaro žemiausios eilės sferinės aberacijos modos, todėl vien tik jas koregavus pasiekiami labai geri rezultatai, net ir fokusuojant į didelį gylį. [3] Sferinė aberacijos korekcijos kiekis reikalingas pasiekti geriausią rezultatą – difrakcijos apribotą atvaizdavimą - priklauso nuo parenkamo fokusavimo gylio tiriamoje arba apdirbamoje terpėje. Ši priklausomybė homogeniškose terpėse dažniausiai būna tiesinė, todėl eksperimentiškai arba modeliavimo metodu gavus tinkama korekcijos modelį, jį galima ekstrapoliuoti įvairiems fokusavimo gyliams terpėje.

Yra keli būdai koreguoti bangos fronto aberacijas. Vienas iš jų yra papildomos optikos naudojimas objektyve, kuriame derinant optiką galima pašalinti atsiradusias aberacijas. Šio metodo trukumas yra tai, kad keičiant pluošto padėtį ar fokusavimo aukštį yra sudėtinga greitai ir tiksliai kompensuoti kintančias aberacijas. [2] Kitas būdas – pasinaudojant erdvinio šviesos modulatoriumi arba deformuojamais veidrodžiais pritaikyti iš anksto paskaičiuotą funkciją bangos prieš atsirandant aberacijos.

## 1.2 Aberacijų modeliavimas spindulių trasavimo programa ir atvaizdavimas

### Zernike polinomais

Šiame darbe optinę sistemą veikiančios aberacijos modeliuojamos sukūrus optinės sistemos modelį spindulių trasavimo programa OSLO (angl. Optics Software for Layout and Optimization). Sukūrus modelį OSLO programa, galima nesunkiai gauti visus sistemos parametrus vėliau naudojamus tyrime. Automatiškai suskaičiuojamas bangos fronto optinių kelių skirtumas OPD (angl. optical path difference) ir Zernike polinomų funkcijos su koeficientų vertėmis. Programa sistemos parametrus randa atlikdama paraksialinį pluoštų trasavimą. Per sistemą leidžiamas  $n$  skaičius diskrečių pluoštų ir skaičiuojamas šviesos pluošto lūžis kertant pluošto kelyje esančius paviršius bei transliaciją pro kiekvieną tarp paviršių esančią terpę. [4]

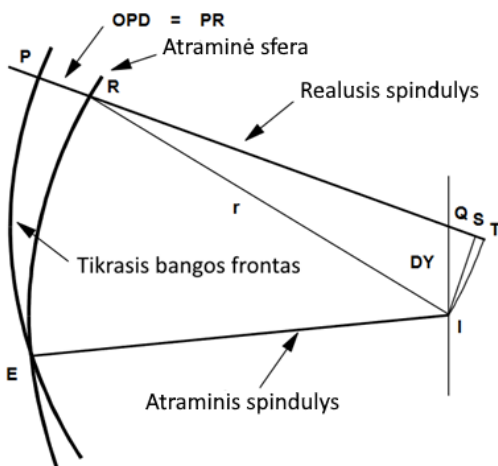
Tokiu būdu suskaičiuojamas kiekvieno pluošto kelias nuo objekto iki atvaizdo pro optinę sistemą. OSLO naudoja  $yui$  pluoštų trasavimo metodą, kurio lūžio ir transliacijos formulės yra [4]:

$$y = y_{-1} + tu, \quad (6)$$

$$i = u + yc, \quad (7)$$

$$u' = u + \left(\frac{n}{n'} - 1\right) i, \quad (8)$$

Bangos frontą galima apibūdinti kaip daugelio taškų esančių, vienodu atstumu nuo taškinio šaltinio junginiu, todėl bangos frontą galima apskaičiuoti iš pluoštų trasavimo informacijos. Bangos fronto aberacijas aprašantis optinis kelių skirtumas yra atstumas tarp atskaitinės sferos plokštumos ir realaus aberuoto bangos fronto. Idealiu atveju bangos frontas būna sferinės formos, tačiau atsiradus aberacijoms tampa iškraipytas ir nebesutampa su idealiu bangos frontu. Skirtumas tarp aberuoto ir idealaus bangos fronto yra sferos radiuso pokytis.



1 pav. Optinio kelių skirtumo matavimo schema.

OSLO programoje OPD skaičiuojamas pagal (1 pav.) schemą. Schemoje  $EI=IR=r$  yra atraminės sferos radiusas. Skaičiuojant OPD lyginama, jeigu šviesa nueina nuo I iki E taško per tą patį laiką kaip nuo objekto iki P taško esančio tikrajame bangos fronte, tuomet atstumas PR ir yra optinių kelių skirtumas. OSLO programoje atskaitinės sferos spindulys yra atstumas nuo išėjimo vyzdžio iki atvaizdo. [4]

Norint pašalinti optinėje sistemoje esančias aberacijas reikia sumažinti optinių kelių skirtumą tarp realaus ir atskaitinio bangos frontų. OPD sumažinamas erdviu šviesos moduliatoriumi vėlinant fazę tam tikrose bangos fronto lokacijose, taip aberuotą bangos frontą padarant artimesniu atraminiam. Taigi atliekant aberacijų korekciją, pirmiausia reikia nustatyti aberuoto bangos fronto OPD, kuris parodys kokį korekcijos modelį naudoti. Šis OPD surandamas pasitelkiant OSLO programa. Sumodeliuojama tokia pat optinė sistema kaip ir naudojama eksperimente. Realus objektyvas yra pakeičiamas idealiu, tuomet galima tarti, kad visos židinio bangos fronto aberacijos yra atsiradusios tik dėl terpių lūžių rodiklių skirtumo. Gautasis OPD išreiškiamas Zernike polinomais (1 lentelė) iš kurių suskaičiuojama erdviniame šviesos moduliatoriuje naudojama difrakcinė aberacijų korekcijos kaukė. Zernike polinomial

Zernike polinomial tai vienas iš metodų aprašyti sistemos bangos frontą ir jo aberacijas pasinaudojant skirtingų polinomų suma. Šis būdas yra labai patogus aprašyti realias aberacijas gaunamas optinėse sistemose. Tačiau ne visas sistemas galima aprašyti Zernike polinomais - pavyzdžiui, oro turbulencijų sukeltų lauko iškraipymų arba gamybos broko sukeltų paviršių nelygumų sukeltos aberacijos yra labai sunkiai aprašomos net ir naudojantis daug aukštesnių eilių polinomais. Todėl prieš naudojantis Zernike polinomais reikia atsižvelgti į tai kokios rūšies aberacijos ir bangos fronto iškrypimai bus aprašomi, nes pasirinkus ne tą bangos frontą aprašantį metodą informacija atvaizduojama netiksliai, su iškrypimais. [5]

Zernike polinomial turi tris savybes, kurie išskiria juos nuo kitų ortogonalinių polinomų. Pirmą - jie yra ortogonalūs ir turi apskritiminę simetriją, dėl kurios polinomas galima užrašyti kaip:

$$R(\rho)G(\theta'), \quad (1)$$

Čia  $G(\theta')$  simetrinė funkcija kintanti nuo 0 iki  $2\pi$ . Kadangi sistema yra apskirtimiškai simetriška, papildomas kampo  $\alpha$  pokytis nedaro jokios įtakos funkcijos vertėms:

$$G(\theta' + \alpha) = G(\theta')(\alpha), \quad (2)$$

Funkcijos  $G(\Theta') = e^{\mp im\Theta'}$ , kur  $m$  yra bet koks sveikas skaičius arba 0 tenkina (2) sąlygą.

Antroji savybė – radialinė funkcija turi būti polinomas  $\rho$  pakeltas laipsniu  $n$ . Trečioji savybė –  $R(\rho)$  funkcija turi būti lyginė jeigu  $m$  lyginis ir nelyginė, jeigu  $m$  nelyginis. Radialiniai polinomai gali būti išvesti iš Jacobi polinomų, kurių normalizacijos ir ortogonalumo savybės aprašomos:

$$\int_0^1 R_n^m(\rho) R_n^m(\rho) \rho d\rho = \frac{1}{2(n+1)} \delta_{mn} \text{ bei } R_n^m(1) = 1, \quad (3)$$

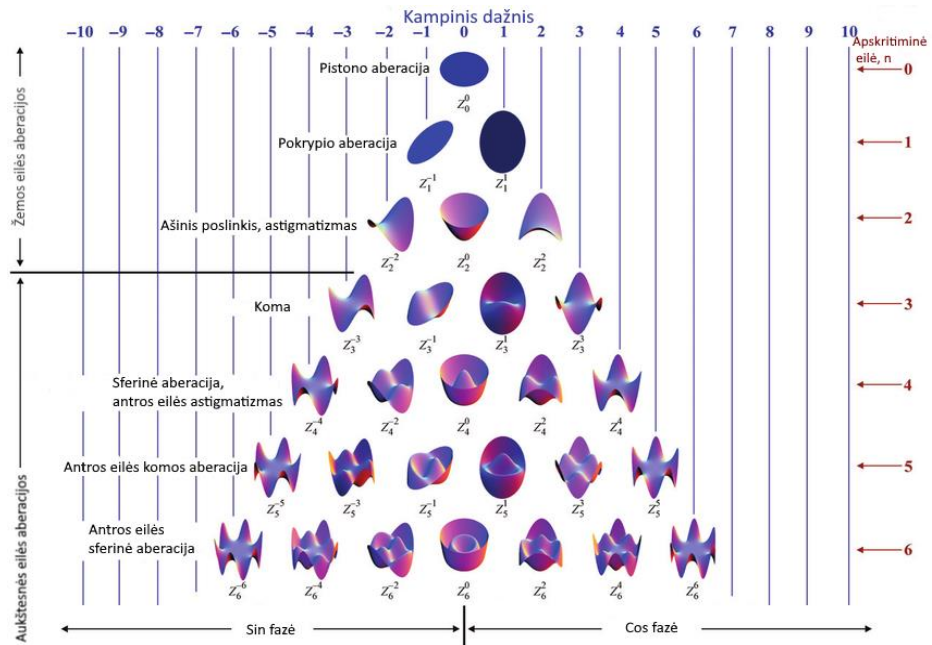
Šiuos radialinius polinomus galima užrašyti kaip:

$$R_{2n-m}^m(\rho) = Q_n^m(\rho) \rho^m, \quad (4)$$

Galiausiai Zernike polinomų serija bangos fronto optinio kelio skirtumui OPD (angl. optical path difference) aprašoma:

$$W = \overline{\Delta W} + \sum_{n=1}^{\infty} [A_n Q_n^0(\rho) + \sum_{m=1}^n Q_n^m(\rho) \rho^m (B_{nm} \cos m\Theta' + C_{nm} \sin m\Theta')], \quad (5)$$

Čia  $\overline{\Delta W}$  yra optinio kelio skirtumo OPD vidurkis,  $A_n$ ,  $B_{nm}$ ,  $C_{nm}$  yra Zernike polinomų koeficientai. Jeigu optinė sistema yra simetrinė, tuomet aberacijos yra simetrinės vertikaliai tangentinei plokštumai ir naudojamos tik funkcijos priklausomos nuo  $\Theta'$ . Praktikoje, dažniausiai bangos frontas nebūna simetrinis, dėl to naudojamos visų rūšių funkcijos aprašančios  $W$  frontą pavaizduotos (2 pav.) paveikslėlyje. [5]



2 pav. Skirtingų eilės numerių Zernike polinomų bangos frontai.[6]

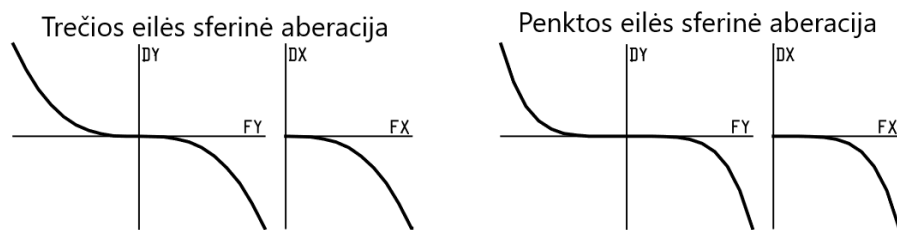
Zernike polinomiali žymimi polinomo numeriu arba dažniau nurodomi  $n$  eilės numeriu ir  $m$  indeksu, pavyzdžiui  $Z_1^0, Z_2^1$ . Žemiausių eilių Zernike polinomiali aprašo šias bangos fronto aberacijas:

$Z_0^0$  Zernike polinomas aprašo pistono aberaciją. Tai nėra tikrai aberacija, nes ji yra konstanta ir atspindi visų Zernike polinomų vidurkį.

$Z_1^1$  Polinomas yra skersinis židinio poslinkis arba bangos fronto  $45^\circ$  pokrypis  $x$  koordinačių ašimi:  $z_1 = \rho \cos \theta$  ir  $y$  ašimi:  $z_2 = \rho \sin \theta$ . Dėl pokrypio bangos frontas išlieka nepasitęs, tik pakreiptas viena iš koordinačių ašių.[7] Čia aberaciją galima nesunkiai kompensuoti pakreipus ekraną ant kurio fokusuojamas vaizdas.

$Z_1^0$  – Ašinis poslinkis (*angl.* defocus), aprašomas funkcija  $z_3 = -1 + 2 \rho^2$ . Šis polinomas. Ašinis poslinkis gali būti kompensuojamas tiesiog pastūmus židinio plokštumą. [7] Jeigu sistemoje yra sferinė aberacija arba astigmatizmas, tai optimali ekrano pozicija bus tokia kai ašinis poslinkis nelygus 0.

$Z_2^0, Z_3^0, Z_4^0, Z_5^0, Z_6^0$  - Zernike polinomiali aprašo įvairių eilių sferines aberacijas. Sferinės aberacijos yra viena paprasčiausių aberacijos rūšių atsirandanti kai objektas būna patalpintas ant optinės ašies. Sferinė aberacija yra apskritimiškai simetriška optinei ašiai. Sferinės aberacijos gali būti sumažintos pridėdant nedidelį kiekį ašinio poslinkio. [4]. Skirtingos eilės sferinės aberacijos skiriasi savo forma ir išgaubtumu. Paveikslėlyje (3 pav.) pavaizduotos pirmos ir antros eilės sferinės aberacijos, kurių abu bangos frontai yra centruoti, tačiau skirtingo išgaubtumo. Kuo aukštesnė sferinės aberacijos eilė, tuo plokštesnė ray-intercept kreivė (3 pav.) ties optine ašimi. Ray intercept kreivės parodo kurioje vietoje pluoštai kerta paraksialinę plokštumą. Kai kreivė yra plokščia, tai visi pluoštai kerta paraksialinę plokštumą ties optine ašimi. Kadangi penktos eilės sferinės aberacijos ray-intercept kreivė centre yra plokštesnė, tai galima teigti, kad aukštesnių eilių sferinės aberacijos daro mažesnę įtaką bangos frontui, ypač spinduliams sklindantiems mažu kampu nuo optinės ašies.



3 pav. Trečios ir penktos eilės sferinių aberacijų ray-intercept kreivės. [4]

$Z_2^2, Z_3^2, Z_4^2$  - Astigmatizmas yra cilindrinė deformacija bandos fronto kuris turi du židinio taškus. Dėl dviejų židinio taškų gaunamos dvi židinio plokštumos. Atstume tarp dviejų židinio taškų yra zona

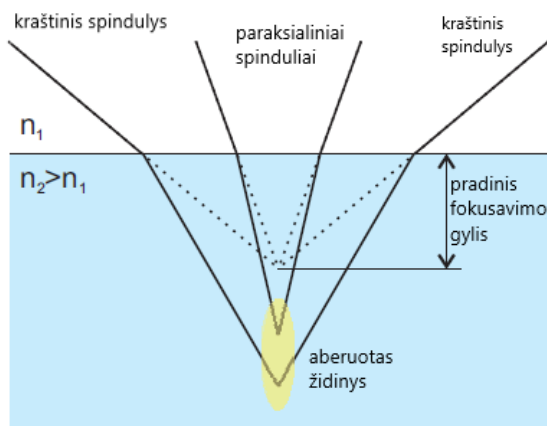


kurioje mažiausiai veikia astigmatizmo aberacija. Kombinuojant su ašinio poslinkio aberacija galima keisti bangos fronto židinio plokštumą [7].

$Z_2^1, Z_3^1, Z_4^1$  - Komos aberacija. Vaizdas paveiktas komos aberacijos įgauna išvaizdą panašią į kometos. Koma nepasireiškia kai objektas yra prie optinės ašies. Jos dydis tiesiogiai priklauso nuo objekto aukščio arba patenkančių į sistemą pluoštų kampo.

Šio darbo metu darytame modeliavime, optinėje sistemoje labiausiai pastebimos sferinė aberacija kartu su ašiniu poslinkiu ir pistono aberacija. Kadangi pistono aberacija yra tik konstanta, o ašinį poslinkį galima kompensuoti pakeičiant atvaizdo plokštumos atstumą, tuomet bangos frontui labiausiai įtaką daro sferinė aberacija.

Sferinės aberacijos pasireiškia dėl lūžio rodiklio nesuderinimo tarp skirtingų skaidrių terpių. Dėl šios priežasties taip pat pasikeičia lazerio fokusavimo geometrija (4 pav.).[2] Didinant fokusavimo gylį medžiagoje dėl nesuderintų lūžio rodiklių tarp apdirbamos terpės ir oro ar skysčio, kuriame panardinta padirbama medžiaga proporcingai didėja atstumas tarp židinio nuotolio ore ir židinio nuotolio didelio lūžio rodiklio medžiagoje, (4 pav.) pažymėta taškine ir paprasta linijomis. Šis reiškinys nėra labai kritinis mikroapdirbimui, nes keičiant fokusavimo gylį, galima suskaičiuoti židinio nuotolio pokytį ir atitinkamai koreguoti fokusavimo aukštį.



4 pav. Fokusavimo geometrija lūžtant lazerio pluoštams tarp skirtingo lūžio rodiklio terpių. [8]

Erdviniai šviesos modulatoriais kompensuoja bangos fronto aberacijas naudodami fazės vėlinimą. Bangos fronto aberacijos atsiranda dėl nevienodo skirtingų fokusuojamų pluoštų optinio kelio. Aberacijų kompensavimas vyksta šviesai atsispindėjus nuo individualių modulatoriaus taškų ir kurių kiekvienas skirtingai pavėlina fazę. SLM fazės vėlinimą kontroliuoja valdiklis pagal kompiuterio nurodytą hologramos kaukę. Parinkus tinkamą kaukę taškai pavėlina tam tikras bangos fronto vietas taip kompensuojant optinio kelio skirtumus.

### 1.3 Aberacijų korekcijos įvertinimas Strehl koeficientu

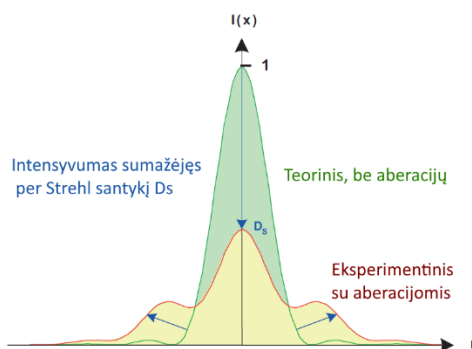
Strehl koeficientas vienas populiariausių matmenų apibūdinančių adaptyvines optikos veikimo efektyvumą. Juo taip pat galima išmatuoti ir paveikslėlio ar nuotraukos atkūrimo tikslumą. Šis koeficientas yra patogus tuo, kad galima viena verte apibūdinti sudėtingą sistemos taško sklaidos funkcijos intensyvumo pasiskirstymą.[9] Dažniausiai naudojamas supaprastintas Strehl koeficiento apibrėžimas. Koeficientas nusako matuojamos sistemos taško sklaidos funkcijos centrinio smailinio intensyvumo ir aberacijų neturinčios difrakcijos apribotos sistemos taško smailinio intensyvumo santykį. Strehl santykio formulė[10]:

$$D_s = \frac{I_{PSF}^{real}(0,0)}{I_{PSF}^{teor}(0,0)}, \quad (9)$$

Strehl santykis gali būti naudojamas apibrėžti Strehl koeficientą, kai sistemoje nėra daug aberacijų ar kai Strehl santykis būna daugiau nei 0,6. Kadangi matuojami tik centiniai smailiniai intensyvumai, esant didelei komos aberacijai smailinis intensyvumas nebus pluošto profilio centre, tuomet būtų korektiškai pilnai aprašyti Strehl koeficientą naudojantis (10) formule[10]:

$$D_s = \frac{\left| \iint A(x_p, y_p) \cdot e^{\frac{2\delta i}{\omega} W(x_p, y_p)} dx_p dy_p \right|^2}{\iint A(x_p, y_p) dx_p dy_p}, \quad (10)$$

Čia  $A(x_p, y_p)$  yra taško sklaidos funkcijos amplitudė,  $W(x_p, y_p)$  – aberacijų bangos frontas. Esant mažam Strehl santykiui smailinis intensyvumas būna mažesnis proporcingai santykiui, taško sklaidos funkcija deformuojasi ir išsiplėčia (5 pav.). Šia deformaciją nusako sistemoje esančios skirtingų tipų aberacijos. Strehl santykis yra normuotas dydis, kuris įgauna reikšmes nuo 0 iki 1. Jeigu santykis 1, tuomet tiriamoji taško sklaidos funkcija atitinka teorinę.[9]



5 pav. Aberacijų sukelta taško sklaidos funkcijos deformacija.[10]

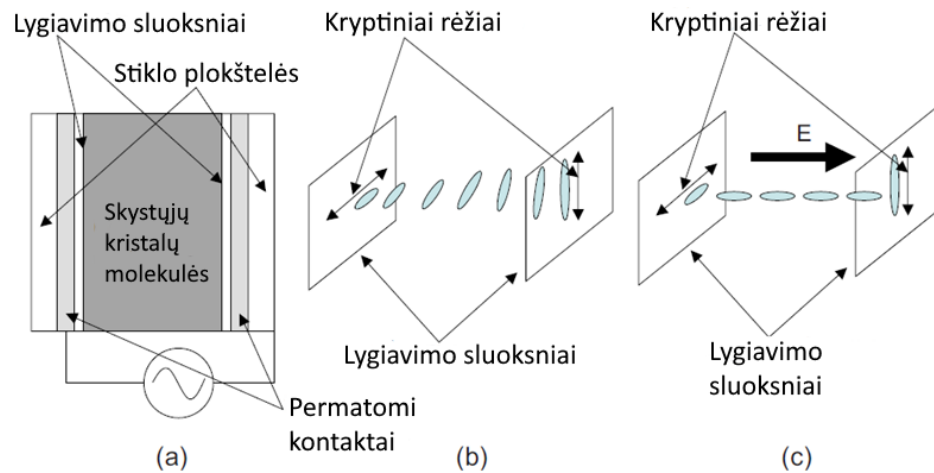
## 1.4 Erdviniai šviesos modulatoriai

### 1.4.1 Erdvinių šviesos moduliatorių veikimo principas

Erdviniai šviesos modulatoriai (SLM) - tai prietaisai, kuriais galima keisti šviesos bangos fronto parametrus, tokius kaip intensyvumas, fazė ir poliarizacija. Vienas iš plačiai naudojamų tipų – skystųjų kristalų erdviniai šviesos modulatoriai (angl. liquid crystal spatial light modulator). Erdviniai šviesos modulatoriai gali būti naudojami kaip alternatyva deformuojamiems veidrodžiams adaptyvioje optikoje, nes yra pranašesni skiriamąja geba ir reakcijos laiku. Skystųjų kristalų erdviniai šviesos modulatoriai pasižymi nedidele kaina, patikimumu, nedideliais matmenimis ir mažu energijos suvartojimu. Juos lengva tiesiogiai kontroliuoti kompiuteriu, siunčiant vaizdo išvestį tiesiai į prietaisą. Taip pat erdviniai šviesos modulatoriai yra dviejų tipų: veikiantys atspindžio ir pralaidumo principu, taip padidinant pritaikymo būdus. [11] Vienas iš skystųjų kristalų erdvinių šviesos moduliatorių trūkumų yra tai, kad norint gauti pakankamai gerą kontrastą, būtina naudoti poliarizuotą šviesą. Taip pat SLM veikiantys atspindžio principu neturi labai didelio atspindžio koeficiento. Priklausomai nuo bangos ilgio atspindima tik apie 60 - 90% šviesos. Dėl šių dviejų trūkumų skystųjų kristalų erdviniai šviesos modulatoriai dėl didelių nuostolių gali būti netinkami naudoti kai kuriems taikymams, pavyzdžiui adaptyviai optikai astronomijos sistemose. Skystųjų kristalų modulatoriai sudaryti iš didelės skiriamosios gebos (iki  $4160 \times 2464$  taškų 17,78 mm įstrižainės stačiakampyje). [12] SLM kiekvienas atskiras taškas gali būti kontroliuojamas kompiuteriu prijungus vaizdo išvesties jungtimi ir veikia kaip išorinis monitorius. Modulatoriaus taškų atnaujinimo dažnis prilygsta vaizdo monitoriaus atnaujinimo dažniui – 60Hz. Kiekvienas kompiuterio sugeneruotas taškas atvaizduoja skirtingą fazės poslinkį kiekviename SLM taške. Šio tipo modulatoriai yra universalūs ir patogūs taikyti įvairiems tikslams – lazerinei stereolitografijai, kintančių židinių lęšiams bei lazeriniam mikroapdirbimui. Parinkus tinkamą hologramos formą galima gauti tokį pluošto profilį, kuris yra tinkamas naudoti ir mikro dalelių manipuliacijai. [13]

Skystųjų kristalų erdvinį šviesos moduliatorių sudaro centrinis sluoksnis, pripildytas skystųjų kristalų molekulėmis, jį dengiantis lygiavimo sluoksnis ir permatomi elektrai laidūs kontaktai su apsauginiu stiklo ar plastiko sluoksniu. Centriniam sluoksnyje patalpintos skystųjų kristalų molekulės gali keisti poziciją priklausomai nuo to kaip jas veikia išorinis elektrinis laukas. Kai nėra elektrinio lauko kristalų molekulės išsidėsto pagal lygiavimo sluoksnyje esančius rėžius. Dviejuose sluoksniuose, kiekviename taške stačiu kampu išdėstyti rėžiai, pagal kuriuos išsidėsto skystųjų kristalų molekulės sudarydamos spiralės formą (6 pav. b). Jeigu poliarizuotos šviesos kryptis yra lygiagreti įėjime esančioms molekulėms, šviesos poliarizacija sukasi kartu su skystųjų kristalų stiebelių kryptimi ir iš modulatoriaus

išeina tokia pat kryptimi kaip ir išėjimo lygiavimo plokštumoje esantis režis. Prie kontaktų prijungus įtampą, skystųjų kristalų molekulės išsidėsto elektrinio lauko sklaidimo kryptimi. Tuomet šviesa praeina pro moduliatorių išlaikiusi tos pačios krypties poliarizaciją.



6 pav. Skystųjų kristalų erdvinio šviesos moduliatoriaus sandara ir veikimo principas. [14]

Erdvinius šviesos moduliatorius galima naudoti ne tik fazės, bet ir amplitudės moduliacijai. Tam reikia naudoti papildomą analizatorių atspindėtai arba praėjusiai pro moduliatorių šviesai. Analizatorių pastačius statmenai į moduliatorių patenkančiai praeina tik ta šviesa, kuri kurios poliarizacija yra pasukta SLM taškų, kai įjungtas elektrinis laukas. Kitą šviesą blokuoja analizatorius. Šiuo metodu galima kontroliuoti praėjusios arba atsispindėjusios šviesos amplitudę.

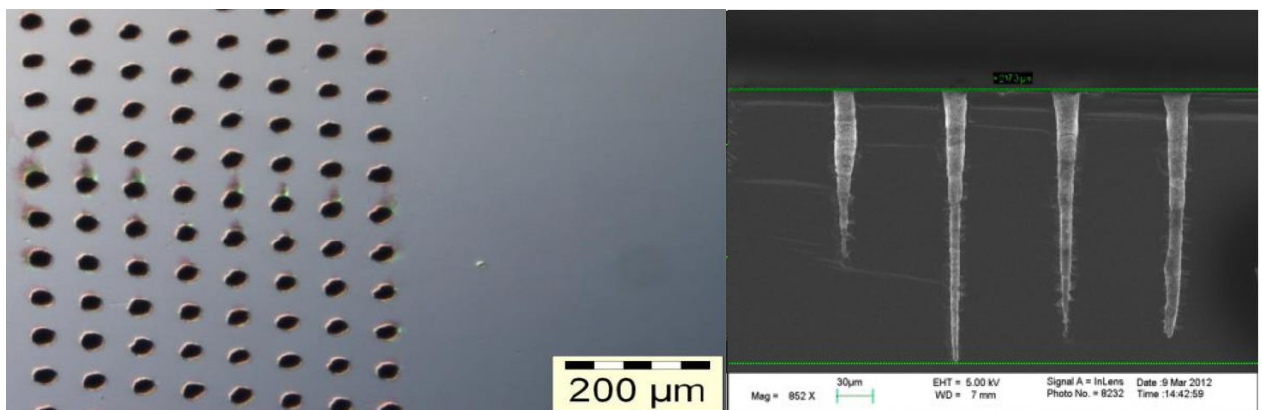
Vienas iš erdviųjų šviesos moduliatorių panaudojimo būdų yra lęšio funkcijos atkartojimas. Su SLM galima atvaizduoti lęšius, kurių židinio nuotolis gali būti kontroliuojamas kompiuterio sugeneruoto geometrinio modelio. SLM yra sudarytas iš atskirų taškų ir ši skiriamoji geba apribojimą kokį galima gauti trumpiausią lęšio židinio nuotolį. [15] Tokios sistemos privalumas yra tai, kad joje nenaudojama judančių dalių ir yra galimybė realiu laiku keisti lęšių židinio nuotolį, sujungti kelių skirtingų lęšių funkcijas, kurti hologramos funkcijas ir kompensuoti aberacijas. Tokiomis ypatybėmis nepasižymi jokios kitos adaptyvesnės optikos sistemos.

Skaitmeninės hologramos moduliatoriais sukuriamos atsispindėjus šviesai nuo kompiuteriu sugeneruoto hologramos difrakcinio paveikslas. Šis paveikslas yra sudėtingesnė versija paprastų difrakcinių gardelių. Tradicinės hologramos kuriamos ant foto juostelės arba fotojautraus padėklo įrašant perklotą dviejų koherentinių bangų interferencinį vaizdą. Paprasčiausiu atveju susiduriant dviem plokščios viršūnės fronto pluoštams, gaunamas interferencinis vaizdas susidedantis iš besikeičiančių minimumų ir maksimumų, kurių kitimą galima aprašyti sinusoidės funkcija. Jei į hologramą įrašoma

informacija, bangos frontai nebūna visiškai plokšti. Tuomet gautas interferencinis vaizdas yra sudarytas iš daugelio skirtingų funkcijų superpozicijos. Šviečiant į sukurtą hologramą ta pačia šviesa, pluoštas difraguoja ir gaunamas pradinis prieš hologramą turėtas atvaizdas. Kaip ir tradicinės hologramos, erdviniai šviesos modulatoriai veikia tuo pačiu principu. Hologramos pagrindas pakeičiamas erdvinio šviesos modulatoriumi, kuris kompiuteriu sukurtą hologramą atkuria ant modulatoriaus paviršiaus. Tuomet priklausomai nuo SLM tipo, šviesa praeina arba atsisprendi nuo modulatoriaus ir difraguodama sukuriama skaitmeninė holograma. [14]

#### 1.4.2 Erdvinių šviesos moduliatorių taikymas mikroapdirbime

Erdvinio šviesos modulatoriaus pagalba galima paspartinti ir padidinti apdirbimo kokybę keliais būdais: kompensuojant aberacijas susidariusias fokusuojant pluoštą medžiagoje bei naudojant lygiagrečių apdirbimą - vietoj vieno gausinio pluošto suskaidant jį į daug mažų židinių. Mikroapdirbime didelį plotą užimančius periodinius pažeidimus atlikti galima keliais būdais - skanavimo arba lygiagrečiu apdirbimu. Skenuojant būtina naudoti aukšto pasikartojimo dažnio lazerius, bet net ir turint didelės energijos impulsus ir aukšto pasikartojimo dažnio impulsus apdirbimas gali užimti daug laiko, kadangi apdirbant medžiagas femtosekundinės impulso trukmės lazeriu paviršiaus abliavimui reikalinga tik nedidelė dalis visos lazerio energijos.[16] Lazerio pluoštą galima išskaidyti į daugelį mažesnės energijos pluoštų naudojantis erdvinis šviesos modulatorius ir kartu su kompiuteriu sugeneruotomis hologramomis ir lygiagrečiai apdirbti skirtingas paviršiaus vietas vienu metu. Lygiagreti abliacija stipriai paspartina pasikartojančių formų ir raštų apdirbimą. Tokiu būdu silicio 150 $\mu$ m plokštelėje (7 pav.) naudojant 8 $\times$ 16 skirtingų židinių matricą galima pasiekti 100 skylių per sekundę greitį, vienai skylėi skiriant 1500 impulsų.[5]



7 pav. Silicio plokštelėje lygiagrečios abliacijos metodu išgręžtos skylės ir jų skerspjūvio nuotrauka.

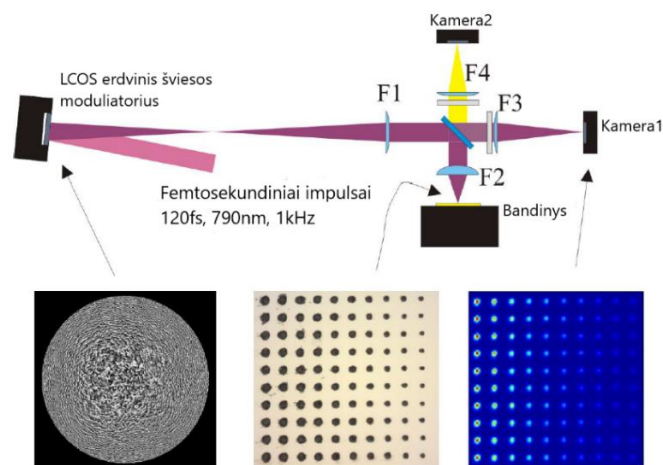
Svarbu, kad kiekvieno individualaus pluoštelio energija viršytų slenkstinę abliacijos energijos ribą. Lygiagretaus apdirbimo būdas nepagerina apdirbimo kokybės ir tikslumo, tačiau stipriai pagreitina pasikartojančius periodinius apdirbimo procesus, kas yra labai svarbu taikant lazerinį apdirbimą industrinės gamybos metu arba norint apdirbti didelių matmenų objektus. Lazerio pluoštas hologramomis gali būti išskaidomas į šimtus ar tūkstančius mažesnių pluoštų. Toks abliacijos būdas paspartina apdirbimo greitį, nepaisant to kokiam tikslui jis yra naudojamas. Lygiagrečios abliacijos metu galima parinkti kiekvieno židinio intensyvumą ir nuo intensyvumo tiesiogiai priklausantį pažeidimo dydį. Toks intensyvumo variavimas gali būti naudojamas spausdinant rastrinius paveikslus ar kuriant trijų dimensijų mikroreljefus. [17] Kiekvienas skirtingo intensyvumo pažeidimas atspindi tam tikrą pilkumo vertės tašką iš kurių gali būti formuojami vaizdai.

Viena iš problemų naudojant difrakcinius elementus yra chromatinė aberacija. Jeigu apdirbimui naudojami ultratrumpų impulsų femtosekundiniai lazeriai, dėl jų platus spektro gali atsirasti nemaža chromatinė aberacija. 100fs impulso trukmės titano safyro lazeris turi apie 15nm spektro plotį, tokį impulsą sufokusavus toli nuo optinės ašies dėl chromatinės aberacijos sumažės smailinė galia. Naudojantis erdviniais šviesos modulatoriais, kuriais sukurama holograma chromatinių aberacijų kompensuoti nepavyks, tačiau galima būtų naudoti papildomus difrakcinius elementus, bet tai į sistemą įneštų nemažai nuostolių. [8] Hologramos optimaliau veikia ir mažiau chromatinės aberacijos patiria je jos formuojamos mažesniu kampu nuo nedifragavusio lazerio pluošto. Tai apriboja sukuriamų hologramų dydį, nes didelio plotų hologramų kraštai bus labiau paveikti chromatinės aberacijos. Atliekant medžiagų apdirbimą netoli optinės ašies reikia pašalinti nulinę difrakcijos eilę. Tai galima padaryti pravedant aukštesnės eilės difrakcijos šviesą pro apertūrą arba pasinaudojant sudėtingesniais algoritmais, kurie pasinaudojant destruktvyvia interferencija pašalintų nulinės eilės difrakcijos atvaizdą. [8][18] Lazerinio mikroapdirbimo su erdvinio šviesos modulatoriumi schema

Abliacijos mikroapdirbimo procesui naudojamas ultratrumpų signalų femtosekundinis lazeris (8 pav.), optinė vaizdavimo sistema (F1-F4) ir papildomai gali būti naudojamos kameros proceso ir hologramos stebėjimui. Kadangi suskaldyto pluošto židiniai kuriami difrakcijos principu, apdirbimui naudojama nuo SLM difragavusi šviesa. Pašalinti pirmos eilės nedifragavusį pluošta galima naudojant Frenelio lęšius, apertūra arba su erdvinio šviesos modulatoriumi papildomai naudojant kaukę su kuria sukurama destruktvyvi interferenciją nulinės difrakcijos eilės pluoštui. Naudojant didesnės galios lazerius modulatoriui reikia papildomo šilumos pašalinimo. Modulatorius neturi labai didelio atspindžio koeficiento, todėl dalis energijos yra sugerama. Dėl šios priežasties erdvinis šviesos modulatorius

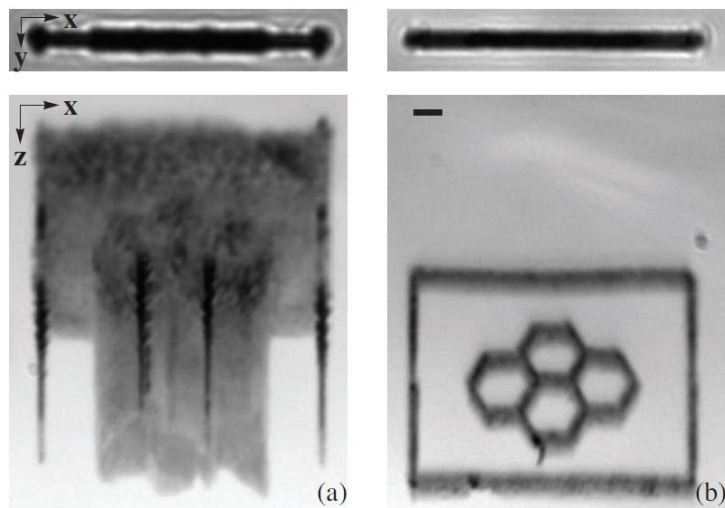
tvirtinamas prie radiatorių – vėsinimo vandeniu arba radiatoriaus vėsinimui oru. Dėl sugertos šilumos paviršiais plečiasi ir išsikreipia, o modulatoriaus aktyviojoje srityje iškreipimai sukels papildomas aberacijas. Jeigu naudojamas labai didelės energijos lazerio pluoštas, modulatorius gali būti pažeistas. [17] Didelei galiai skirtiems skystųjų kristalų erdviniams šviesos modulatoriams (Hamamatsu X10468), atspindintiems >99% šviesos, pažeidos slenkstis yra  $39 \text{ mJ/cm}^2$ . [19] Šiame darbe naudojamo Holoeye Pluto 2 erdvinio šviesos modulatoriaus pažeidos slenkstis bus mažesnis, nes jo sugertis ženkliai didesnė. Net ir naudojant nedidelės galios lazerio pluoštą reikia išplėsti, kad sumažėtų šviesos intensyvumas ant modulatoriaus ir kad šviesos pluoštas dengtų kuo didesnę SLM plotą. [17] Taip išnaudojama daugiau modulatoriaus taškų ir gaunama geresnė atvaizdo hologramos skiriamąją gebą. Pluoštas gali būti išplečiamas iki 5-10mm skersmens.

Schemoje (8 pav.) pavaizduota femtosekundinio lazerio mikroapdirbimo schema, kurioje naudojamas skystųjų kristalų erdvinis šviesos modulatorius pluošto formavimui. Nuo erdvinio šviesos modulatoriaus atsispindėjusi šviesa turi sudaryti kuo mažesnę kampą su krintančiu šviesos pluoštu. Optimalu, kad pluoštas atsispindėtų statmenai SLM plokštumos, todėl pravartu naudoti pluošto daliklį, statmenus prizminius veidrodžius (*angl.* right-angle prism mirrors), tačiau naudojant juos prarandama pusę viso pluošto intensyvumo. Taip ant SLM lazerio pluoštą galima veidrodžiais užvesti labai mažu kampu. Schemoje pluošto dalikliu difragavęs lazerio pluoštas nukreipiamas į apdirbamą paviršių ir taip pat naudojamas nuvesti šviesą į dvi kameras. Kameros schemoje naudojamos nustatyti apdirbamo paviršiaus lokaciją bei stebėti mikroapdirbimo procesus. Pirmoji kamera schemoje naudojama stebėti erdvinio šviesos modulatoriaus sukurtą skaitmeninės hologramos atvaizdą, o antroji nukreipta į apdirbamą paviršių ir su ja stebimi paviršiuje atlikti apdirbimo pažeidimai. Taip pat kameros reikalingos jeigu SLM difrakcinės kaukės yra optimizuojamos realiu laiku naudojant grįžtamąjį ryšį iš jau apdirbto paviršiaus.



8 pav. Femtosekundinio lazerio ir erdvinio šviesos modulatoriaus abliacijos schema. [17]

Erdviniai šviesos modulatoriai mikroapdirbime taip pat naudingi apdirbant skaidrias didelio lūžio rodiklio medžiagas, kuriose atsiranda sferinės aberacijos, dėl lūžio rodiklio skirtumo (4 pav.). Jeigu medžiaga apdirbama vandenyje arba kitoje skystoje medžiagoje, turinčioje lūžio rodiklį artimesnį apdirbamai medžiagai nei oras, aberacijos tampa mažesnės, tačiau šiuo metodu pilnai pašalinti aberacijų negalima. [20] Aberacijų poveikį padidina ir naudojami didelės skaitinės apertūros lęšiai, kuriais siekiama gauti geresnę skyrą. Net ir turint difrakcijos apribotą sistemą negalima pasiekti geros skiriamosios raiškos dėl atsirandančių aberacijų, kurios sumažina apdirbimo efektyvumą ir skiriamąją gebą. Sferinės aberacijos poveikis stipriai pastebimas trimatėse erdvinėse struktūrose, kurios kuriamos mikroapdirbimo metu (9 pav.). Nors ir iš viršaus žiūrint plokštumoje vaizdas atrodo panašus, dėl didelių sferinių aberacijų erdvinis vaizdas yra stipriai iškraipytas turi dėl pluošto kritimo (z) ašyje veikiančių aberacijų. (9 pav. a). [20] Pažeidimo srities ilgį z ašyje iki tam tikros ribos galima reguliuoti, keičiant lazerio impulsų energiją, tačiau dėl sferinių aberacijų yra limitas kokio dydžio poveikio zoną galima sukurti nesukompensavus sferinių aberacijų medžiagoje net ir naudojant minimalią slenkstinę energiją.



9 pav. (xy) Vaizdas iš viršaus ir (xy) iš šono erdvinės struktūros sukurtos deimante. Struktūros vidurio taškas yra 80  $\mu\text{m}$  gylyje. [20]

### 1.4.3 Hologramų kūrimas erdviniu šviesos modulatoriumi

Lygiagretaus apdirbimo hologramos formos ir modeliai gali būti kuriami keliais būdais. Jeigu norima sukurti hologramą lygiagrečiam taškų matricos gamybai (8 pav.) reikia pirmiausia sukurti hologramos atvaizdo modelį. Kai kurie erdviniai modulatoriai hologramų atvaizdus gauna vaizdo išvestimi iš kompiuterio ir turi programas leidžiančias hologramas įkelti vaizdo formatu. [12] Tuomet erdvinių šviesos moduliatorių hologramas galima sukurti kaip įprastu atvaizdus vaizdo redagavimo programomis, kurios programa konvertuos į difrakcinį atvaizdą ir nusiųs erdviniam šviesos



moduliatoriui. Kitas sudėtingesnis būdas, suteikiantis daugiau kontrolės, ypač kai mikroapdirbimo hologramą sumuojama kartu su aberacijų kompensavimo holograma, yra taškų matricos atvaizdą transformuoti į difrakcinio atvaizdo funkciją naudojantis iteraciniu algoritmu. Vaizdo transformavimui yra naudojami įvairūs algoritmai, tokie kaip:

Atsitiktinis kaukių kodavimo algoritmas (angl. random mask encoding) vienas greičiausių būdų sukurti difrakcinę kaukę. Gaunamas gana geras kaukės vientisumas, tačiau kaukės efektyvumas gali būti nedidelis, nes kai kurie modulatoriaus taškų poros gali sukelti destruktivią interferenciją sumažinant hologramos intensyvumą.

Prizmių ir lęšių superpozicijos algoritmas (angl. superposition of prisms and lenses). Lėtesnis nei atsitiktinis kaukių kodavimo algoritmas. Kuria gerą efektyvumą tačiau gaunamas mažas kaukės vientisumas.

Atsitiktinės superpozicijos algoritmas (angl. random superposition). Jo skaičiavimo greitis toks pat kaip ir prizmių ir lęšių superpozicijos, bet gaunami daug geresnių parametrų rezultatai.

Gerchberg–Saxton algoritmas – tai modifikuotas atsitiktinės superpozicijos algoritmas papildomai naudojantis iteracinio skaičiavimo procedūras. Gaunamas geresnis efektyvumas, tačiau užima daugiau laiko.

Apibendrintasis adaptiviųjų priedų algoritmas (angl. Generalized adaptive additive algorithm). Šiuo algoritmu gaunamas dar geresnis hologramos vientisumas, o intensyvumas lieka toks pat kaip Gerchberg–Saxton algoritmo.

Tiesioginės paieškos (angl. direct search algorithm) Gaunamas beveik tobulas hologramos efektyvumas, bet užtrunka labai ilgai dėl didelio iteracijų skaičiaus.

Kiekvienas iš jų turi privalumų ir trūkumų ir skirtingas metodais pritaikomas priklausomai nuo to kokia difrakcinė kaukė yra generuojama. [21] Pagal situaciją parinkus optimalesnį algoritmą vaizdo transformavimui, galima susumuoti kelias skirtingas funkcijas ir transformavus vaizdą į hologramos kaukę, tiesiogiai atvaizduoti hologramos difrakcinį atvaizdą erdviniam šviesos moduliatoriuje.

Taškų matricos (10 pav.) formavimą su pasinaudojant hologramomis paprastesniam paaiškinimui galima įsivaizduoti kaip daugelį persidengiančių Frenelio lęšių superpoziciją. Kadangi erdviniai šviesos modulatoriai gali atkurti pasirenkamo židinio nuotolio lęšio veikimą[14], perdengiant  $n$  skaičių lęšio funkcijas gaunamas tas pats  $n$  kiekis mažų identiškų židinių. (10 pav.) pavaizduota periodiškai pasikartojančių taškų difrakcinis hologramos paveikslas ir apačioje nurodytas gaunamas vaizdinys.[16] Taškinė matrica gaunama lygiagrečiai perklojant sustačius daug periodiškai pasikartojančių taškų funkcijų. Tuomet gaunamas vaizdas parodytas (8 pav.)

#### 1.4.4 Erdviniu šviesos modulatoriumi kuriamų pluoštų tipai

Erdvinių šviesos moduliatorių galima naudoti ir formuojant įvairių tipų lazerio pluoštus. Vienas iš jų plokščios viršūnės pluoštas. Plokščios viršūnės pluoštas (*angl.* flat-top arba top-hat) yra plokščio tolygaus bangos fronto pluoštas turinti staigų intensyvumo kritimą ties pluošto briaunomis. Pagrindinė pluošto savybė yra tolygus intensyvumo pasiskirstymas visame pluošto plote. Dėl šios charakteristikos plokščios viršūnės pluoštas yra pravartus naudoti terminiaame atkaitinime, medžiagų apdirbime, holografijoje, optiniame informacijos įrašyme ar medicinoje.

Plokščios viršūnės pluoštą galima suformuoti keliais skirtingais metodais: pasitelkiant pralaidžias kaukes, transparentus, lęšius arba difrakcinius elementus.[22] Idealus plokščios viršūnės pluoštas turi plokščią frontą ir labai statų intensyvumo kritimą ties pluošto briauna. Tačiau tokie pluoštai turi itin trumpą fokusavimo gylį dėl pluoštą veikiančios difrakcijos. Tai reiškia, kad pluoštas tik trumpą atstumą būna aštraus kampo briaunomis. Realybėje daugelis plokščios viršūnės pluoštų yra apvalesnėmis briaunomis. Tokius pluoštus galima aprašyti aukštesnių eilių Gauso funkcija- super-Gauso funkcija:[22]

$$E(x, y) = E_0 e^{-\left(\frac{\sqrt{x^2 - y^2}}{\omega_0}\right)^n}, \quad (11)$$

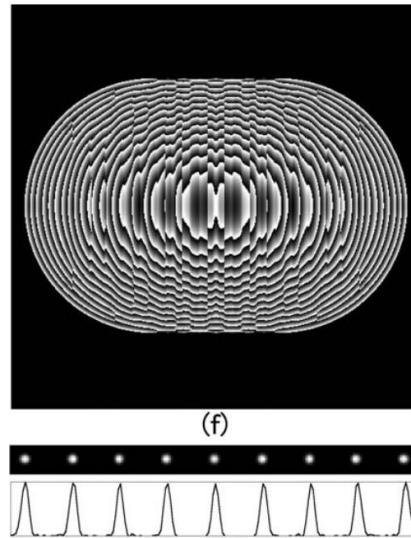
$E_0$ - Pluošto amplitudė.  $x$  ir  $y$ - skersinės pluošto intensyvumo kreivės koordinatės,  $n$  – Gauso funkcijos eilė. Kai  $n=2$  turimas standartinis Gauso pasiskirstymas, Kai  $n>2$  gaunamas super-Gauso pasiskirstymas. Kuo didesnis  $n$ , tuo greičiau sunyksta plokščios viršūnės pluošto profilis, todėl didėjant  $n$ , mažėja pluošto fokusavimo gylis. Kai  $n$  siekia 50, tuomet fokusavimo gylis tampa beveik 0. [22]

Super-Gauso funkcija aprašomas pluoštas nėra laisvos erdvės skersinė moda. Tai reiškia sklindant erdvėje kinta jos skersinė moda ir intensyvumo profilis, skirtingai nei idealiam Gauso pluoštui. Kuo statesnės pluošto briaunos tuo trumpiau erdvėje egzistuoja plokščias plokščios viršūnės pluoštas.

Kitas pluoštas, kurį galima formuoti erdvinio šviesos modulatoriumi yra butelio formos pluoštas. Tai pluoštas kuris centre turi nulinių arba mažesnę už vidutinį intensyvumą, o aplink šį minimumą aplinkui seka didesnio intensyvumo žiedas. Šis pluoštas pavadintas butelio formos pluoštu, nes dažnai yra naudojamas kaip optinis pincetas. Didelio intensyvumo žiedas su tamsiu centru sugeba sugauti pavienes daleles, turinčias mažesnę lūžio rodiklį negu ją supanti aplinka.[23]

Keičiant fazės vėlinimo apertūros radiusą galima keisti suformuojamo butelio formos pluošto formą. Suradus tinkamą radiusą gaunamas plokščios viršūnės pluoštą primenantis pluoštas. Šį metodą galima taikyti ne tik naudojantis erdvinio šviesos moduliatorių, bet ir pagaminus difrakcinius optinius elementus iš stiklo ar kitų skaidrių medžiagų. Pagal skaidrios medžiagos lūžio rodiklį parenkamas storis,

kad būtų gaunamas norimas fazės vėlinimas ir stiklo centre išpjaunama reikiamo radiuso apertūra. Tokio metodo difrakciniai optiniai elementai būtų itin pigūs ir lengvai pagaminami lyginant su sudėtingesnius algoritmus naudojantys difrakciniai optiniai elementai.



10 pav. periodiškai pasikartojančių taškų linijos formavimas naudojant persiklojančių Frenelio lęšių holografinį vaizdą. [16]

Aberacijoms kompensuoti su erdvinio šviesos modulatoriumi reikalingas hologramos modelis, kuris galėtų būti pritaikytas iškraipytam bangos frontui. Šis modelis nėra trivialus ir skiriasi kiekvienai situacijai, todėl reikia arba išmatuoti gautas aberacijas, arba pasinaudoti kompiuteriniu modeliu. Aberacijų korekcijos modelį galima paskaičiuoti trasuojant spindulius ir apskaičiuojant funkciją buvusią prieš aberacijas arba taikant modelį kuriame aberacijų korekcijos modelis gaunamas vizualiai stebint aberuotą pluoštą židinyje ir iš jo atkuriant korekcijos modelį.[2]

Pažangesnėse sistemose galima naudoti atgalinio ryšio sistemas, kurios nuolat tobulina modulatoriaus kuriamą hologramą ir keičiant lazerio pluošto poziciją. Stebint lazeriu apdirbtą lokaciją mikroskopu nustatomi pažeidimų asimetriškumai ir iškraipymai ir pagal juos nustatoma kurias aberacijas reikia kompensuoti kartojant apdirbimo ciklą.[14]

## 2 Eksperimentas

### 2.1.1 Holoeye Pluto 2 modulatorius

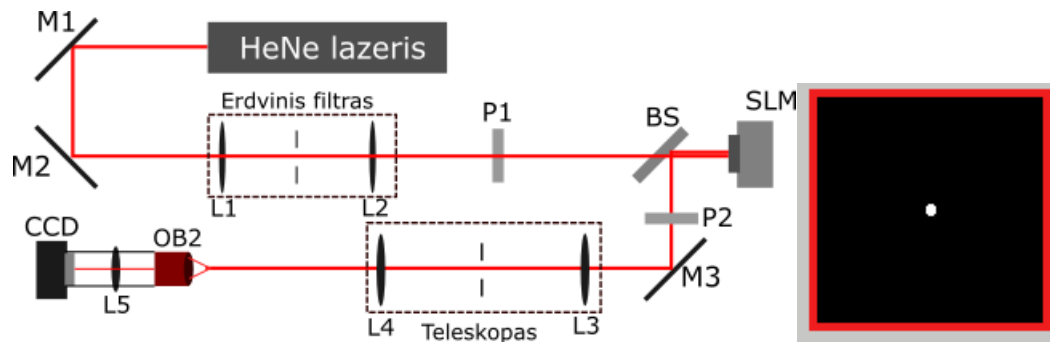
Šiame darbe naudojamas skystųjų kristalų ant silicio pagrindo LCOS (angl. liquid crystal on silicon) Holoeye Pluto-2.1 erdvinis šviesos modulatorius. Šis modulatorius veikia atspindžio režimu, jo aktyvioji zona yra  $15,36 \text{ mm} \times [19]8,64 \text{ mm}$  dydžio ir turi FullHD  $1920 \times 1080$  raišką su 60 Hz taškų atnaujinimo dažniu. Taškų fazės vėlinimo kontrolė yra 8 bitų – kiekvienas modulatoriaus taškas gali atkurti 256 skirtingus pilkumo lygius. Šie pilkumo lygiai atspinti fazės vėlinimą nuo 0 iki maksimalios vertės, kuri šiame modelyje yra  $5,4\pi$  prie 632 nm spinduliuotės. Modulatoriaus aktyvioji zona yra padengta dielektrine didelio atspindžio danga, tačiau dėl skystųjų kristalų modulio sugerties erdvinis šviesos modulatorius atspindi tik 65-73% krintančios šviesos. Modulatoriaus difrakcinis specifikuojamas kaip 80%.

### 2.1.2 Pluošto centravimas ant erdvinio šviesos modulatoriaus

Erdviniu šviesos modulatoriumi kuriant periodišką hologramą, difrakcinė kaukė yra visoje skystųjų kristalų modulatoriaus aktyvioje zonoje ir pluošto kritimo vieta nedaro didelės įtakos kuriamam atvaizdui. Kitu atveju kompensuojant aberacijas arba atkuriant kintamo dydžio lęšius difrakcinė kaukė yra sumodeliuota taip kad jos visas plotas atvaizduotų į jį krintančio pluošto bangos frontą. Kadangi aberacijų korekcija veikia keičiant bangos fronto optinio kelio ilgį kiekviename SLM taške, pluoštui pataikius kampu į moduliatorių dėl geometrijos šviesa bus nukeliavusi skirtingus atstumus vienoje ir kitoje SLM pusėje. Taip pat kai kurios neperiodinės kaukės turi ribotą plotą. Į jį nepataikius, nesusidaro holograma arba stipriai sumažėja jos intensyvumas. Dėl to svarbu tiksliai ir statmenai užvesti lazerio pluoštą ant kaukės erdviniame šviesos modulatoriuje.

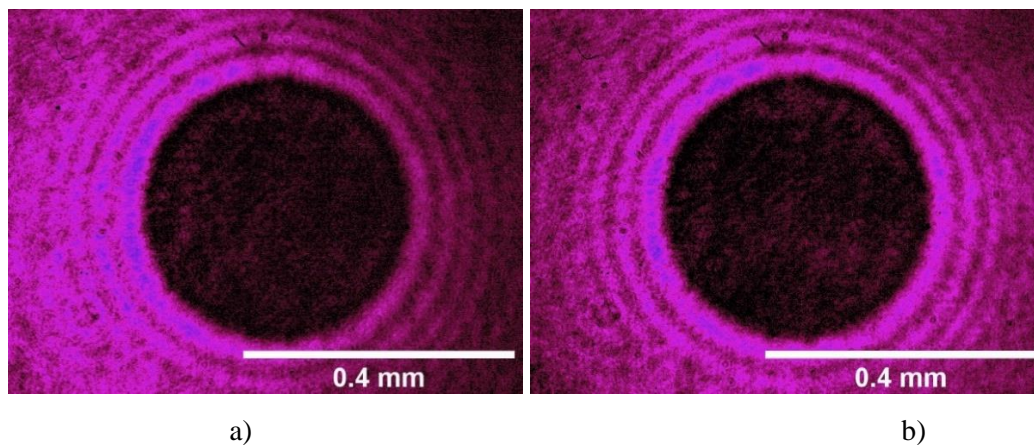
Eksperimento schemoje pasirinktas centravimas naudojantis amplitudiniu SLM veikimo režimu (11 pav. a). Tai yra vienas paprastesnių būdų reikalaujantis schemoje naudoti tik papildomą poliarizatorių (P2). Šis metodas patogus kai reikia ne tik sujustruoti pluošto centravimą, bet Erdvinis šviesos modulatorius veikia amplitudiniu režimu kai už SLM pastatomas papildomas poliarizatorius. Poliarizuotai šviesai atspindint nuo erdvinio šviesos modulatoriaus, kiekviename taške poliarizacija pasisuka pagal taškui paduodamo signalo amplitudę. Antrasis poliarizatorius pasuktas taip, kad nepraleistų pasuktos poliarizacijos šviesą. Centravime naudojama kaukė (11 pav. b) sudaro juodas fonas ir baltas skritulys centre. Skritulio skersmenį galima parinkti pagal naudojamo lazerio pluošto skersmenį. Kaukėje naudojamo skritulio skersmuo 0,4 mm arba 50 taškų. Jo balta spalva rodo, taško maksimalų fazės vėlinimą ir poliarizacijos pasukimą, o juoda – minimalų. Esant šiai konfigūracijai amplitudiniame

rėžime poliarizatorius (P2) pastatytas taip kad pro jį praeina tik nuo juodų taškų atsispindėjusi šviesa, balta spalva pažymėtų taškų šviesa blokuojama poliarizatoriaus (P2).



11 pav. a) Erdvinio šviesos modulatoriaus amplitudinio rėžimo schema. b) Kaukė naudojama pluošto centravimui. Kaukėje 50 px skersmens baltas skritulys.

Centravimas vyksta su CCD kamera ir objektyvu žiūrint į teleskopo sukurtą erdvinio šviesos modulatoriaus aktyvios zonos plokštumą (12 pav.) Centre matomas tamsus skritulys poliarizatoriaus užblokuotos šviesos ir lazerio pluoštas atsispindintis nuo SLM. Pluošto pozicija derinama taip, kad juodas skritulys pilnai uždengtų lazerio pluoštą arba aplink skritulį matytųsi tolygus šviesos žiedas (12 pav. b). Nuotraukoje (12 pav. a) pluoštas netolygiai apšviečia centre esantį skritulį, todėl pluoštas yra ne aktyviosios zonos centre. Pajustavus lazerio pluošto poziciją(12 pav. b) nuotraukoje matomas centruotas lazerio pluoštas iš visų kraštų tolygiai apšviečia juodą skritulį. Pasiekus tokį rezultatą galima teigti, kad lazerio pluoštas yra erdvinio šviesos modulatoriaus centre.



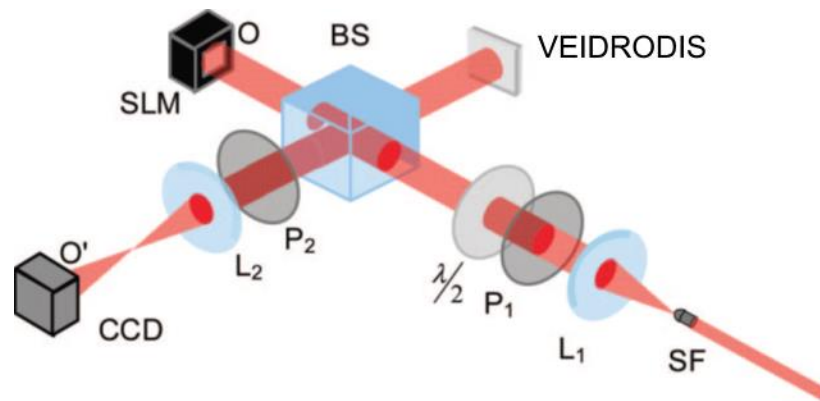
12 pav. Lazerio pluošto centravimas. a) Pluoštas pataiko ne per centrą – apšveista viena pusė. b) Pluoštas pataiko į SLM centrą – skritulys apšviestas tolygiai.

Taip pat pluošto centravimui galima naudoti kitus centravimus metodus, kurie priklausomai nuo situacijos kai kuriose sistemose gali būt patogesni. Vienas iš jų apertūrų naudojimas. Viena apertūra

pastatoma kuo arčiau SLM, o kita didesniu atstumu nuo modulatoriaus. Pravedus pluošta pro abi apertūras, pluoštas pataiko į modulatoriaus centrą. Kitas būdas yra naudoti difrakcinę kaukę skirtą sukurti Lagero-Gauso (*angl.* Laguerre-Gaussian) modų hologramas – šviesos sūkurius. Šių difrakcinių kaukių efektyvumas priklauso nuo lazerio pluošto taiklumo į centrą ir pluošto kritimo kampo. Jeigu lazerio pluoštas krinta ne  $90^\circ$  kampų į SLM plokštumą arba nepataiko į kaukės centrą, mažėja šviesos sūkurio intensyvumas. Tokiu būdu ieškant hologramos intensyvumo maksimumo galima optimizuoti pluošto centravimą ir kritimo kampą.

### **2.1.3 Erdvinio šviesos modulatoriaus kalibravimas**

Kadangi nagrinėjami atspindintys skystųjų kristalų erdviniai šviesos modulatoriai keičią šviesos fazę skystųjų kristalų principu, jų gamybos proceso metu gaunamas modulatoriaus pagrindo kreivumas bei kristalų matricos storio netolygumai. Dėl pagrindo išgaubtumo ir kristalų sluoksnio kitimo atspindėtos šviesos bangos frontas yra iškreipiamas. Pralaidumo principu veikiantiems SLM pagrindo išgaubtumas nedaro didelės įtakos, tačiau atspindintiems SLM pasireiškia dideli nukrypimai. [24] Šiuos iškreipimus galima kompensuoti kombinuojant skirtingas aberacijas atitinkančias aberacijų kompensavimo kaukes. Pagrindo išgaubtumas atsiranda gamybos proceso metu dėl apribojimų kiek lygiai galima nupoliruoti modulatoriaus silicio pagrindą. Silicio pagrindas gaminamas komerciniais CMOS gamybos metodais, kurie nėra optimizuoti ir pritaikyti optinių paviršių gamybai. Nors paviršius padaromas pakankamai lygus SLM taškų matmenų lygmenyje, taip išvengiant šviesos išskaidymo, per visą modulatoriaus paviršių yra pakankamai didelis gaubtumas, kuris iškreipia atsispindėjusios šviesos frontą ir sukelia nemažas aberacijas. SLM pagrindo tiesumą reikia išmatuoti kiekvienam individualiam modulatoriui bent kartą, bei permontuojant tą patį modulatorių į kitą lokaciją. Modulatoriaus tvirtinimo būdai taip pat daro įtaką jo paviršiaus lygumui. Reikalingas tvirtinimo būdas, kuris nesukeltų papildomų pagrindo lenkimų ir įtempimų. [24] SLM lygumą galima išmatuoti naudojantis Maiklsono interferometru (13 pav.). Išmatavus prietaiso paviršiaus gaubtumą reikalinga sukurti paviršiaus nelygumų kompensacijos funkciją ir kaukę, kuri bus pridedamas prie pagrindinės modulatoriaus hologramos kaukės.



13 pav. Maiklsono interferometro schema skyra išmatuoti erdvinio šviesos modulatoriaus pagrindo nelygumą bei fazinės moduliacijos galimybes. [24]

Prieš naudojimą reikia kalibruoti SLM taškų fazės vėlinimo kontrastą. Ypač svarbu tai atlikti erdviniam šviesos moduliatoriui, kurių fazės moduliacija nesiekia  $2\pi$ , kad gautumėme pakankamą dinaminį diapazoną ir galėtumėme koreguoti netiesišką fazės moduliacijos priklausomybę nuo pilkumo lygio arba įtampos. Kadangi skystųjų kristalų modulatoriai informaciją gauna per kompiuterio vaizdo išvestį, kiekvienas modulatoriaus aktyviosios srities taško fazės vėlinimo dydis atitinka atvaizduojamos kaukės vaizdo failo taško pilkumo vertės. Ši priklausomybė tarp pilkumo tonų intensyvumo vertės ir SLM fazės vėlinimo ne visada būna tiesinė. Dėl priklausomybės netiesiškumo sumažėja atkuriamų hologramų kontrastas, nes pilnai nėra išnaudojamas visas fazės vėlinimo diapazonas, o dėl sumažėjusio kontrasto gali suprastėti hologramų skiriamoji geba. [24].

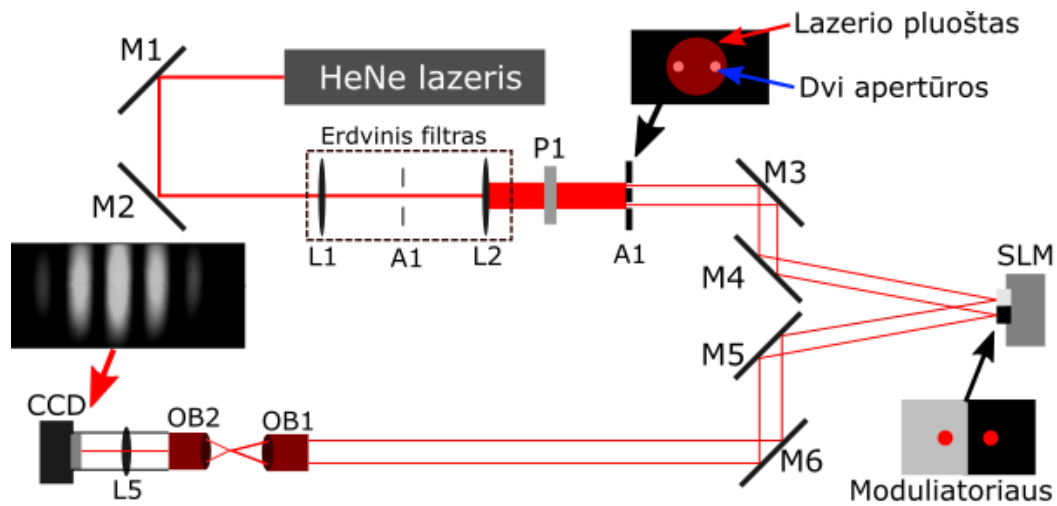
Holoeye modulatorius gamykliškai paruoštas skirtas dirbti  $2\pi$  ir  $4\pi$  režimuose, tačiau modifikavus jį, padidinant taškams paduodamas įtampas galima pasiekti  $5,4\pi$  fazės vėlinimą prie 632 nm lazerio bangos ilgio. Deja, dirbant tokiame režime pasireiškia didelis fazės mirgėjimas (angl. phase flicker) dėl kurio mažėja kuriamų hologramų efektyvumas ir skiriamoji geba. Fazės mirgėjimas pasireiškia nestabiliu fazės vėlinimu tam tikrame taške. Kai kiekviename taške fazės vėlinimas kinta skirtingai ir yra nepastovus laike, tuomet bangos frontas yra iškraipomas.

Dėl fazės mirgėjimo priklausomybės nuo įtampos SLM hologramų efektyvumas prastėja didinant maksimalų fazės vėlinimą. Dėl šios priežasties tolimesniuose bandymuose pasirinkta atlikti matavimus moduliatorių naudojant mažesnio fazės vėlinimo  $2\pi$  režime. Nors naudojant mažą fazės pokytį difrakcinėse kaukėse yra naudojamas didesnis fazės kėlimas (angl. phase wrapping) gaunami daug geresni rezultatai negu didelio fazės vėlinimo režimuose.

Gamykliškai erdviniam šviesos moduliatoriui yra atlikta tiesiškumo bei kontrasto kalibracija keliems fazės vėlinimo režimams, tačiau esant specifinio fazės poslinkio poreikiui arba norint išmatuoti

realų modulatoriaus sukuriamą fazės vėlinimą, kontrasto ir tiesiškumo kalibraciją galima pakartotinai atlikti pasitelkiant keliais papildomais prietaisais. Taip pat keičiantis aplinkos sąlygoms ir ilgai naudojant moduliatorių dėl pastovios įtampos prietaisas gali išsikalibruoti, dėl to kalibracijos procesą gali reikėti kartoti periodiškai.

Šis fazės vėlinimo kalibravimas yra atliekamas stebint interferencines linijas sukurtas dviejų pluoštų atsispindėjusių nuo kairiojo ir dešiniojo SLM paviršiaus pavaizduoto (14 pav.) Kalibracijai atlikti naudojama dviejų skylių apertūra sukurianti du pluoštus ant skirtingų modulatoriaus matricos pusių, kuriose matavimo metu keičiamas fazės poslinkis vienam iš atsispindėjusių ir taip sukuriamas interferencinis vaizdas.



14 pav. Erdvinio šviesos modulatoriaus taškų įtampų nustatymo ir netiesiškumo tyrimo schema.

Interferencinių linijų atvaizdas stebimas kamera ir ši informacija naudojama sukurti (15-16 pav.) grafikus, skirtus nustatyti fazės poslinkį pasirinktų įtampų intervale. Apertūroms apšviesti naudojamas plokščios viršūnės fronto pluoštas. Bangos frontas turi būti plokščias, jog tolygiai apšviestus 2 mm apertūras esančias 3mm atstumu viena nuo kitos ir būtų gaunami du vienodo intensyvumo pluoštai. Kiekviena (15 pav.) nuotraukos taškų eilė atitinka interferencinių linijų nuotraukos 1 px storio iškarpaties skirtinomis vėlinimo vertėmis (0-255). Iš gautų interferencinių linijų galima nustatyti modulatoriaus fazės vėlinimas prie nustatytų maksimalios įtampos verčių.

Šis kalibracijos metodas padeda nustatyti erdvinio modulatoriaus maksimalų fazės vėlinimą, surasti įtampos vertes su kuriomis galima moduliatorių naudoti  $2\pi$  arba  $4\pi$  režimuose bei gauti tiesiškumo korekcijos kreivę iš kurios taip pat galima rasti taškų pilkumo vertes tikslesniam fazės vėlinimo nustatymui. Erdvinio šviesos modulatoriaus fazės vėlinimo netiesiškumas ir kalibracija.



Norint išgauti efektyvesnę erdvinio šviesos modulatoriaus veikimą ir gauti didesnę aberacijų korekcijos veiksmingumą reikia ištirti ir įsigilinti į SLM taškų veikimą ir išsiaiškinti ar praktikoje SLM sugeba atvaizduoti difrakcinėje kaukėje apibrėžtas fazės vėlinimo vertes. Tiriamasis Holoeye Erdvinis šviesos modulatorius atvaizduoja difrakcinės kaukės 8 bitų pilkumo atspalvių signalą skirtingo stiprumo fazės vėlinimu. Taigi galima atkurti 256 skirtingas fazės vėlinimo vertes kiekviename modulatoriaus taške. Šios vertės pasiekiamos tiekiant įvairią įtampą kiekvienam modulatoriaus taškui. Taške įtampa sukuria elektrinį lauką, kuris pasuka skystąjį kristalą taip sukdamas poliarizaciją ir vėlindamas fazę. Įtampos ir taško sukuriama fazės vėlinimo santykis yra netiesinis, todėl naudojant SLM be kalibracijos gaunamas netiesinis fazės kitimas visose įtampos ribose. Šis netiesiškumas trukdo kurti judančias hologramas, kai reikalingas tolygus fazės kitimas. Taip pat dėl netiesiškumo negalima lengvai paskaičiuoti tikslų difrakcinių kaukių pilkumo verčių esančių tarp minimalios ir maksimalios, kurios sukurtų reikiamą fazės vėlinimą. Esant netiesinei priklausomybei erdvinis šviesos modulatorius funkcionuos efektyviai, tačiau gautieji rezultatai skirsis nuo sumodeliuotų ir difrakcinėje kaukėje užfiksuotų hologramų.

Modulatoriaus maksimalų fazės vėlinimą nusako dvi įtampos ir jų skirtumas: minimalaus fazės vėlinimo įtampa kuomet difrakcinėje kaukėje atvaizduotas juodas atspalvis ir įtampa kai pasiekiamas maksimalus fazės vėlinimas, kuria atspindi balta spalva pažymėti taškai kaukėje. Apatinė įtampų intervalo vertė gali būti nuo 0 V iki maksimalios pasiekiamos įtampos. Didinant tamsaus taško įtampą didėja ir fazės virpėjimas, tačiau koreguojant šia vertę galima išvengti fazės vėlinimo netiesiškumo nesinaudojant gama kreivės.

Minimalios ir maksimalios įtampos vertės turi būti nustatomos eksperimentiškai, nes erdvinio šviesos moduliatorių taškų skystieji kristalai prie kai kurių įtampos verčių turi lūžių ir šuolių fazės vėlinimo kitimo kreivėje. Keičiant įtampas, pasislenka veikimo ribos toliau nuo fazės vėlinimo šuolio ir taip išsaugomas tiesiškumas. Nors ir vėliau pritaikoma gama kreivė kuri atlieka tiesiškumo korekciją, optimaliau yra išgauti nuo tiesesnę fazės vėlinimą iki gama kreivės sukūrimo.

Kuo didesnis įtampų intervalas ir kuo didesnė tamsios vertės įtampa, tuo didesnis fazės vėlinimo netiesiškumas. Modulatoriaus taškų maksimalios įtampos didinimas sukuria didesnę kontrastą ir tuo pačiu didesnę fazės vėlinimą, tačiau kartu stipriai išauga fazės mirgėjimas ir netiesiškumas, dėl kurios matavime naudojamos interferencinės linijos tampa neryškios. Paveiksle (15 pav.) matyti, kad prie mažų erdvinio šviesos modulatoriaus taškų paveikslo viršuje interferencinės linijos ryškios ir kontrastingos tačiau pasiekus maksimalią įtampą virš 4 V kontrastas mažėja ir interferencinės linijos tampa susiliejusios,

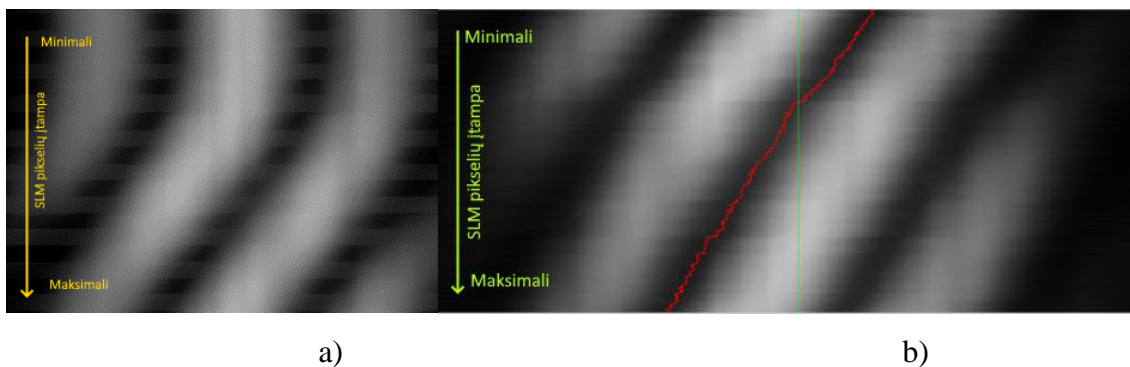
sunku atskirti interferencinių linijų minimumus nuo maksimumų. Taip nutinka dėl fazės mirgėjimo atsiradusio dėl per didelių SLM taškų įtampų.



15 pav. SLM fazės vėlinimo kalibravimo paveikslas, kuriame matomas nedidelis netiesiškumas ir stiprus fazės mirgėjimas poveikis prie maksimalios įtampos.

Norint pasiekti maksimalų modulatoriaus kuriamą fazės vėlinimą, gaunamas didelis netiesiškumas minimalios vertės keitimas nėra įmanomas nes keliant įtampą mažėja kontrastas ir fazės vėlinimas. Tuomet tiesiškumas išgaunamas tik pritaikius gama kreivę.

Paveiksle (16 pav.) pavaizduotai kalibravimo metu gauti paveikslai. Dalyje a) pasiektas  $2\pi$  vėlinimas tačiau iš juodos spalvos linijos – interferencinio minimumo, matyti, kad kitimas nėra tiesiškas. Moduliatoriui veikiant prie žemesnių įtampų ir pasiekiant  $2\pi$  fazės vėlinimą susidaro daug mažesnis fazės mirgėjimas, ką galima pamatyti (pav. a), jog prie maksimalios įtampos interferencinės linijos yra tokios pat ryškios kaip ir prie minimalios įtampos.



16 pav. Erdvinio šviesos modulatoriaus fazės vėlinimo verčių ir tiesiškumo kalibravimas. a) Nesukalibruotas, turintis netiesišką fazės vėlinimo ir įtampos priklausomybę b) Atlikta kalibracija  $2\pi$  vėlinimui bei tiesiškumo kompensacija.

Kadangi SLM skystųjų kristalų taškų fazės vėlinimas yra netiesiškas (16 pav. a), atlikus kelis pasikartojančius matavimus, gaunama fazės vėlinimo tiesiškumo korekcijos gama kreivė. Ši tiesiškumo korekcijos kreivė apskaičiuojama iš (16 pav. a) interferencinių linijų minimumo išlinkimo. Kreivės

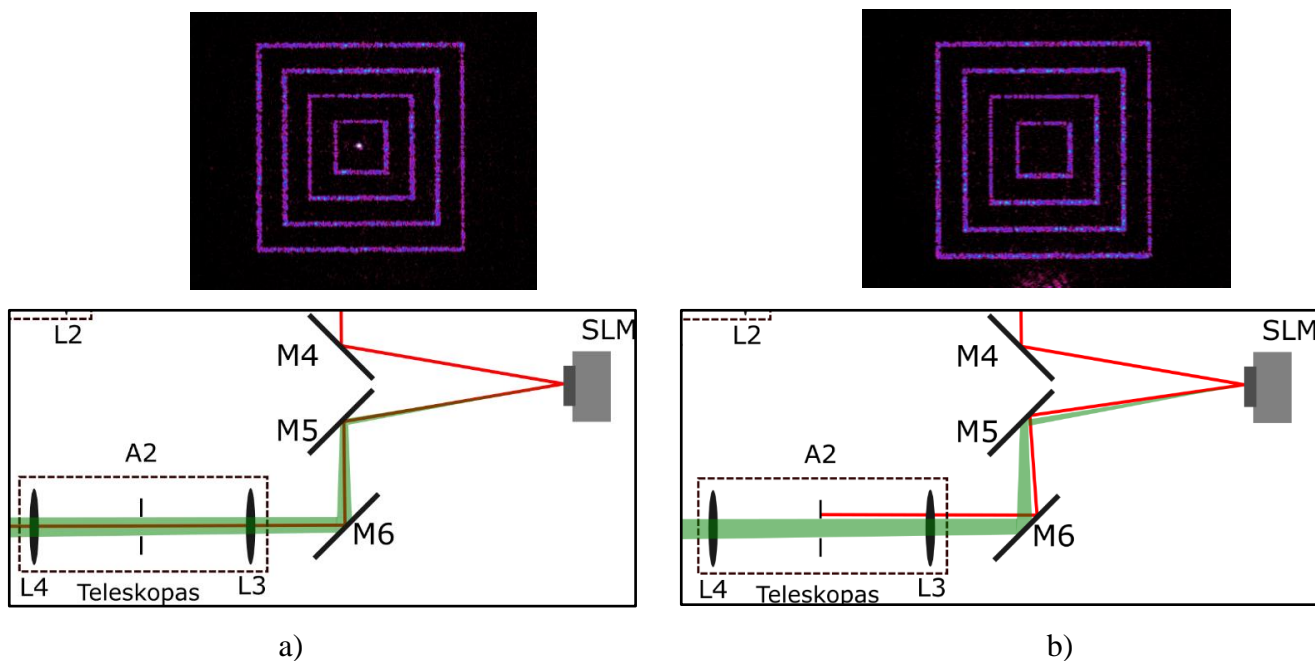
duomenys yra išsaugoti duomenų lentelės (angl. look up table) pavidalu, kuriame kiekviena taško pilkumo vertė atitinka koreguotą įtampos vertę. Paveikslėlyje (16 pav. b) pavaizduotas jau sukalibruoto modulatoriaus nustatyto dirbti  $2\pi$  fazės vėlinimo režime, matavimas, kuriam pritaikyta tiesiškumo korekcija. Atskirai didinant taškų įtampą ir siekiant išgauti didesnę vėlinimą be gama kreivės bus gaunamas didelis netiesiškumas ir bus ypač sunku surasti tarpines fazes vėlinimo vertes tarp minimalios ir maksimalios, todėl būtina tiesiškumo kalibraciją atlikti kai keičiamos skystųjų kristalų taško maksimalaus fazės vėlinimo įtampos vertės.

Taigi ištyrus erdvinio šviesos modulatoriaus fazės poslinkio nuo SLM taškų įtampos priklausomybę, matyti, kad didėjant taškų įtampos vertėms SLM sugeba pasiekti didesnę fazės vėlinimą, tačiau kartu ir padidėja netiesiškumas ir fazės mirgėjimas, dėl kurio sumažėja kuriamų hologramų efektyvumas bei tampa sunku nustatyti tikslią taško fazės vėlinimo vertę. Šioms problemom išspręsti SLM naudojamas mažos fazės poslinkio režimuose bei taikoma tiesiškumo korekcija.

#### **2.1.4 Lazerio pluošto poslinkis**

Erdviniu šviesos modulatoriumi kuriant hologramas į SLM krentantis ir atsispindėjęs pluoštas sklinda toje pačioje ašyje. Bangos frontą modulatoriumi galima formuoti tik naudojantis difragavusiais lazerio pluoštais, todėl būtina pašalinti nedifragavusį pluoštą, todėl naudojama papildoma pluošto poslinkio funkcija, kuri padeda atskirti formuojamą hologramą nuo nedifragavusio Gauso pluošto. SLM formuojamų hologramų efektyvumas nėra tobulas, todėl dalis kritusio pluošto atsispindi kaip nuo paprasto veidrodžio. Šis nedifragavusios šviesos atspindžio pluoštas matomas hologramos, kuria sudaro keli įcentriniai kvadratai centre (17 pav. a). Norint pašalinti nedifragavusį pluoštą pirmiausia reikia atskirti nuo hologramos lazerio pluošto, kadangi paprastai abu pluoštai sklinda vienoje ašyje (17 pav. a). Pluošto atskyrimui naudojama pluošto poslinkio funkcija.

Pluošto poslinkis vykdomas sukuriant nesimetrišką difrakcinę gardelę, kurios didžioji dalis difragavusios šviesos energijos nukreipiama į pirmą difrakcinį maksimumą. Šis maksimumas pravedamas pro apertūrą. Nedifragavęs Gauso pluoštas ir kiti difrakciniai taškai uždengiami apertūra. Paveikslėlyje (17 pav. b) pavaizduotas sėkmingas pluošto poslinkio funkcijos panaudojimas nedifragavusį pluoštą uždengiant apertūra.

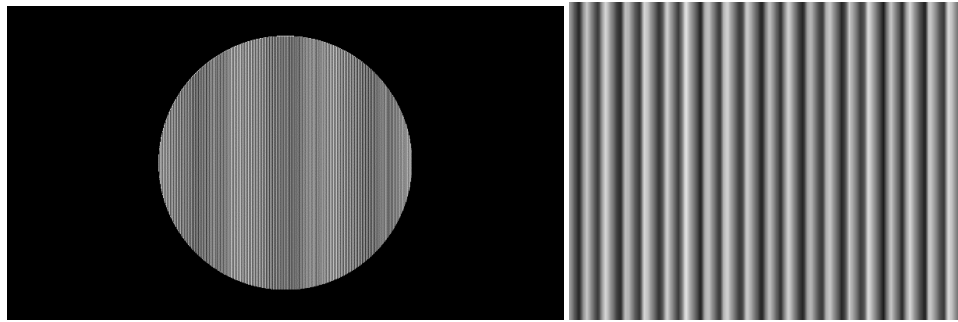


17 pav. a) Holograma sukurta nenaudojant pluošto poslinkio funkcijos ir pluošto praeinančio pro apertūrą schema. b) Holograma sukurta prie difrakcinės kaukės papildomai pridedant pluošto poslinkio funkciją. Žalios spalvos pluoštas difragavęs hologramos pluoštas. Raudona spalva- nedifragavęs Gauso pluoštas.

Pluošto poslinkio difrakcinė kaukė sugeneruojama Matlab programa. Pirmiausia sukuriamas lazerio pluošto horizontalaus x ašies pokrypio bangos frontas – pakrypusi lygi plokštuma, kuri aprašoma funkcija:

$$W(\rho, \theta) = Z_1 \rho \cos \theta \quad (9)$$

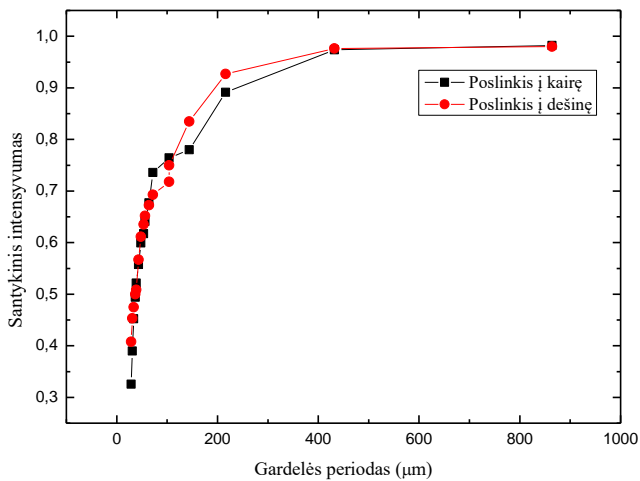
Sumodeliavus (9) lygties modelį iš jo projekcijos sukuriamas erdvinio šviesos modulatoriaus difrakcinės kaukės (18 pav.) paveikslas. Naudojant teigiamą postūmį (į dešinę pusę pluošto sklaidimo kryptimi) metodu gaunasi prastesnės kokybės skaitmeninės hologramos. Išmėginus pluošto pokrypį į kairę pusę gauti geresni rezultatai. Vizualiai ir intensyvumą matuojant CCD kamera gautas didesnis intensyvumas ir didesnis sferinės aberacijos korekcijos poveikis. Taip galėjo įvykti dėl naudojamos optinės sistemos, nes lazerio pluoštas atsispindi į kairę pusę nuo ateinančio lazerio pluošto.



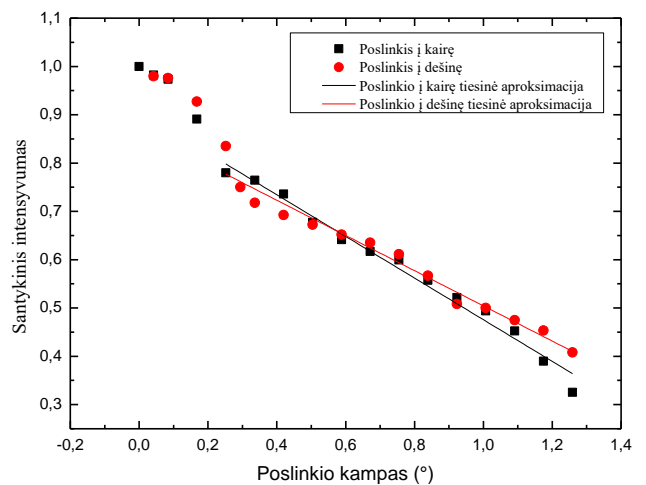
18 pav. a) difrakcinė kaukė naudojama atskirti difragavusi pluoštą nuo nedifragavusio pluošto pastumiant į kairę pusę  $4,57^\circ$  pluošto sklidimo kryptimi. b) priartintas difrakcinės kaukės vaizdas

Kadangi difragavusio pluošto poslinkio funkciją veikia kaip difrakcinė gardelė, kurios periodas nurodo nuokrypio kampą. Didinant šios gardelės periodą kartu didėja ir hologramos intensyvumas. Grafike (19 pav. b) matyti, kad hologramos intensyvumas tiesiškai priklauso nuo poslinkio kampo. Į tiesinę priklausomybę neįskaityti  $0-0,252^\circ$  poslinkio kampų taškai, nes tuose taškuose difragavęs ir nedifragavęs pluoštai persikloja ir kartu praeina pro apertūra, dėl to negalima tiksliai išmatuoti difragavusio pluošto intensyvumo, todėl šiose reikšmėse matomas netiesiškas intensyvumo kitimas.

Kadangi intensyvumas yra tiesiškai proporcingas kampui tarp difragavusio ir nedifragavusio pluošto, kuriant hologramas poslinkis turėtų būti kuo mažesnis, siekiant išsaugoti didesnę hologramos intensyvumą. Minimalų nuokrypio kampą nusako nedifragavusio pluošto bei sukurtos hologramos persiklojimas. Norint pašalinti nedifragavusį pluoštą jį reikia atskirti nuo hologramos, taigi poslinkio kampas turi būti pakankamai didelis, jog apertūros plokštumoje tarp hologramos ir nedifragavusio pluošto būtų tarpas. Minimalus poslinkio kampas taip pat priklauso nuo formuojamos hologramos dydžio. Kuo didesnio skersmens holograma, tuo reikia didesnio poslinkio nuo nedifragavusio pluošto, kad susidarytų tarpas.



a)



b)

19 pav. a) Hologramos intensyvumo priklausomybė nuo formuojamos difrakcinės gardelės periodo. b) Hologramos intensyvumo priklausomybė nuo poslinkio kampo.

Didinant poslinkio kampą mažėja gardelės periodas ir dėl to mažėja difrakcinis efektyvumas, dėl ko sumažėja ir hologramų intensyvumas. Intensyvumo mažėjimas gali būti paaiškintas ribota skiriamąja gebą. Didėjant poslinkio kampui mažėja sukurtos difrakcinės gardelės periodas. Fazės vėlinimo pokytis gardelėje tampa nebe tolygus, o diskretus, laiptuotas, dėl to stipriai sumažėja hologramų intensyvumas. (19 pav. a) Intensyvumas sumažėja iki 30% viso nuo SLM atsispindėjusio intensyvumo, kai gardelės periodas yra 29  $\mu\text{m}$  ir vieną periodą sudaro tik 4 skirtingos fazės vėlinimo vertės. Dėl šio diskretumo difrakcinė gardelė praranda efektyvumą ir mažiau šviesos difraguoja į pirmąjį difrakcijos maksimumą.

Poslinkio funkciją galima naudoti ir lazerio pluošto pozicijos keitimui. Naudojant erdvinį šviesos moduliatorių pluošto pozicijos keitime, matyti, kad pluošto poziciją galima keisti tik nedideliame plote. Jeigu sistema naudojama mikroapdirbimui ir reikalingas pluošto manipuliavimas dideliame plote, papildomai naudojamas transliacinis staliukas arba galvanoskaneris.

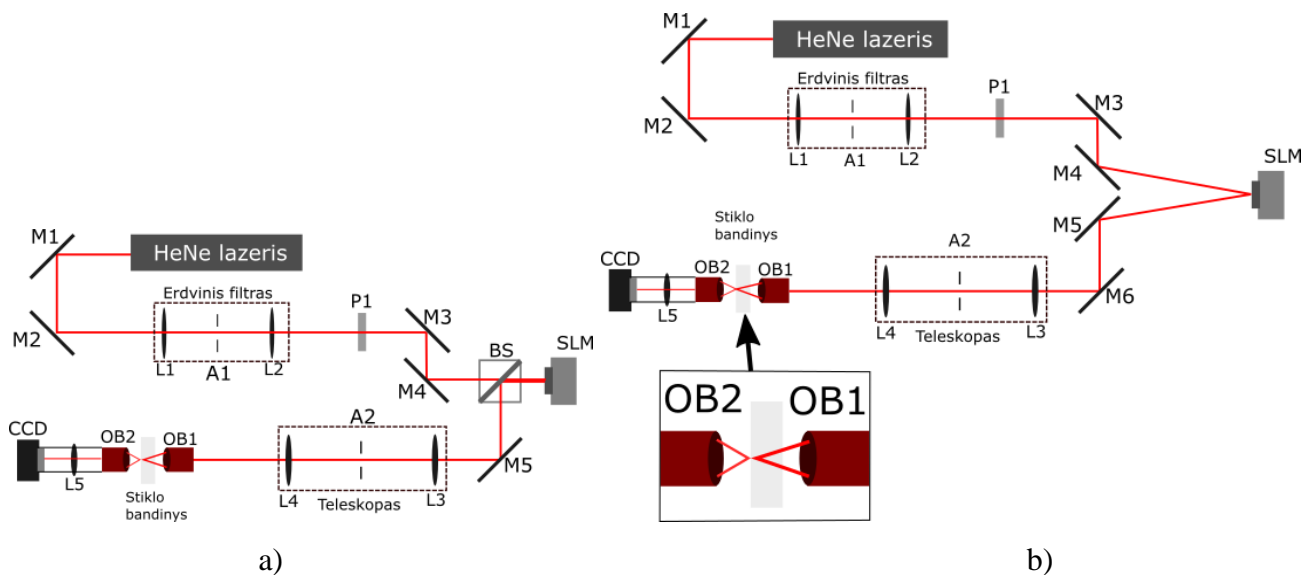
### 2.1.5 Eksperimento schema

Eksperimento schema pavaizduota (20 pav.). Visiems eksperimentams naudojama ta pati optinės sistemos schema. Vienintelis skirtumas, jog aberacijų korekcijai naudojama (20 pav. b) A1 apertūra, o butelio formos ir plokščios viršūnės pluoštų formavimo eksperimentams nenaudojama.

Bandymams atlikti naudojamas 632 nm bangos ilgio Helio-Neono lazeris, kurio pluoštas praleidžiamas pro pluošto plėstuvą, kuris aberacijų korekcijos, kad būtų gaunamas geresnis pluoštas be nepageidaujamų dažninių komponentų. Kadangi šviesa naudojama su moduliatoriumi turi būti

poliarizuota, naudojamas poliarizatorius (P1). Iš erdvinio filtro pro poliarizatorių šviesos pluoštas tolygiai apšviečia erdvinio šviesos modulatoriaus aktyviąją zona. Nuo SLM lazerio pluoštas atsispindi nuo kubo pluošto daliklio BS ir praeina pro teleskopą, kur pluošto skersmuo sumažinamas du kartus iki 3,5 mm skersmens. Teleskopas atvaizduoja SLM aktyvios zonos kaukės sumažintą atvaizdą ant (OB1) fokusuojamo objektyvo įėjimo vyzdžio. Eksperimente naudojami du objektyvai (OB1) Mitutoyo M Plan Apo NUV 50× NA = 0.42 pluošto fokusavimui. Ir (OB2) Olympus 10x NA = 0,25 objektyvu ir 150 mm lęšiu (L5) skirtas stebėti susidariusioms aberacijoms ir butelio formos bei plokščios viršūnės pluošto stebėjimui per CCD kamerą.

Dėl mažo erdvinio šviesos modulatoriaus atspindžio koeficiento ir pluošto daliklio naudojimo eksperimento schemoje, tik dalis visos šviesos naudojama hologramos kūrimui. Likusi dalis šviesos sugerama modulatoriaus arba atspindima pluošto dalikliu.



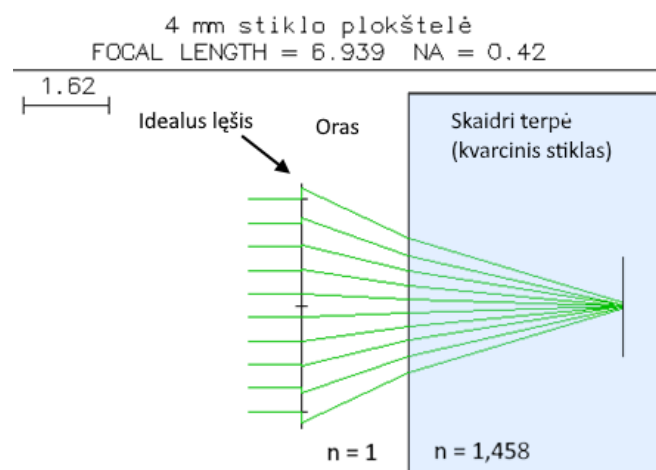
20 pav. Eksperimento schemas. a) Su kubo pluoštu dalikliu, lazeris nuo SLM atsispindi statmenai. b) Be pluošto daliklio. Lazeris nuo SLM atsispindi nedideliu kampu. M1-M6 veidrodžiai, L1-L5 lęšiai, P1 poliarizatorius, BS kubo pluošto daliklis, OB1-OB2 objektyvai, A1-A2 apertūros.

Tolimesniuose bandymuose naudota schema be pluošto daliklio, pluoštas nuo SLM atsispindi ne statmenai, o nedideliu kampu. Šviesai atsispindint kampų skirtingose modulatoriaus vietoje fazės vėlinimas turėtų skirtis ir dėl to mažėti SLM efektyvumas, tačiau atliktų eksperimentų metu nepastebėta jokių hologramų anomalijų. Tokia schema pasirinkta norint išvengti nepageidaujamų interferencinių raštų, atsirandančių dėl naudojamo pluošto daliklio kubo bei siekiant gauti didesnę formuojamos hologramos intensyvumą. Jeigu schemoje naudojamas kubo pluošto daliklis, prarandama puse visos pluošto energijos.

Erdvinį šviesos moduliatorių apšviečiant plokščios bangos fronto lazerio pluoštu, geresni rezultatai gaunami neapribojant pluošto skersmens, o apšviečiant visą SLM aktyviają dalį pluoštu. Tokiu atveju gaunamas geresnis efektyvumas ir reikia mažiau tikslumo, pati difrakcinė kaukė veikia kaip apertūra apribodama pluoštą. Taip pat nenaudojant apertūros išvengiama difrakcinių žiedų susidarymo. Kai naudojamas Gauso pluoštas, pluošto skersmuo pradeda daryt nemažą įtaką hologramų formavimui, todėl tokiu atveju reikia išmatuoti turimą lazerio pluoštą ir tiksliai užvesti ant erdvinio šviesos modulatoriaus kaukės centro.

### 2.1.6 Aberacijų korekcija

Aberacijos korekcijai naudojamos difrakcinės kaukės modeliavimui pirmiausia reikia apskaičiuoti aberacijų paveikto pluošto bangos frontą aprašančius Zernike polinomų koeficientus. Šie polinomai apskaičiuojami pasinaudojus OSLO (angl. Optics Software for Layout and Optimization) programine įranga. Programa sumodeliuojama tiriamo eksperimento supaprastinta optinė schema (21 pav.), kuri sudaryta iš idealaus lęšio iš aukšto lūžio rodiklio terpės. Lęšis parenkamas toks, kad jo skaitinė apertūra atitiktų realiame bandyme naudojamo lęšio. Šiuo atveju  $NA = 0.42$ . Aukšto lūžio rodiklio terpė ir gylis kuriame fokusuojamas pluoštas parenkami pagal atliekamą eksperimentą. Sumodeliavus šią sistemą OSLO programa sumodeliuoja židinio taške esantį bangos frontą ir pateikia šį frontą aprašančius Zernike polinomų koeficientus.



21 pav. OSLO programa sumodeliuota optinė bandymų sistema skirta bangos fronto Zernike polinomų generavimui. a) Fokusuojant į 4 mm stiklinę plokštelę.

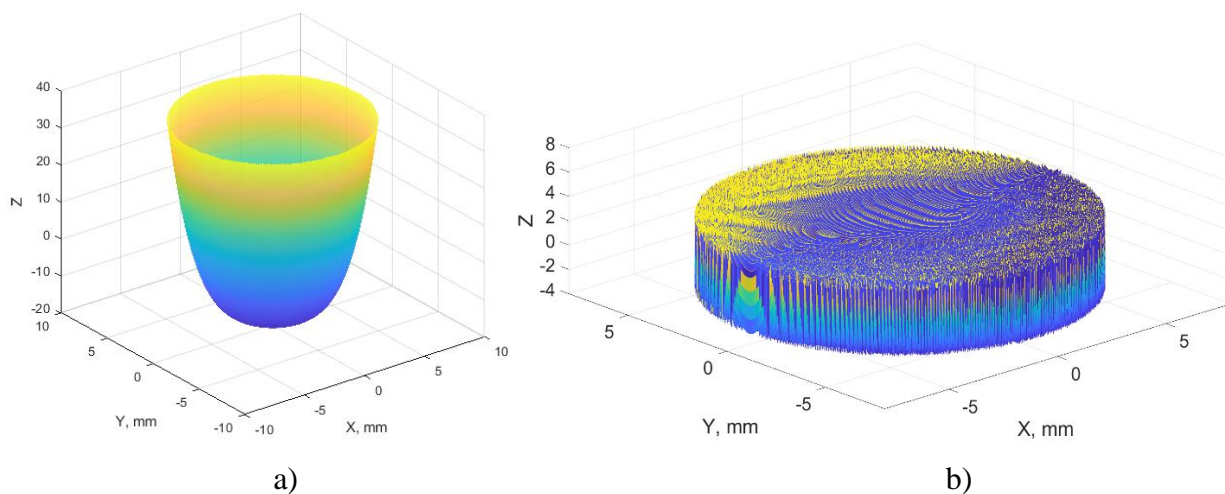


Kadangi spindulių trasavimo programoje vietoj objektyvo naudojamas idealus lęšis, kuris į sistemą neįneša papildomų aberacijų, galima teigti, kad židinyje esančio bangos fronto aberacijos yra tik sferinės aberacijos, atsiradusios dėl lūžio rodiklių skirtumo tarp skaidrios terpės ir oro. Difrakcinė kaukė gauta iš šio modeliavimo kompensuos tik aberacijas susidariusias tik dėl lūžio rodiklio skirtumo, todėl korekciją pritaikius realioje sistemoje išliks aberacijos atsiradusios dėl pluoštą fokusuojančio objektyvo ar kitų optinių elementų.

2 Lentelė. Eksperimentuose naudojamų aberuotus bangos frontus aprašančių Zernike polinomų koeficientai.

Zernike polinomų numeriai	4 mm stiklo plokštelės Zernike polinomų koeficientai
$Z_1^0$	-3,56534
$Z_2^0$	-5,41393
$Z_3^0$	-1,89353
$Z_4^0$	-0,04570
$Z_5^0$	-0,00076
$Z_6^0$	-0,00001

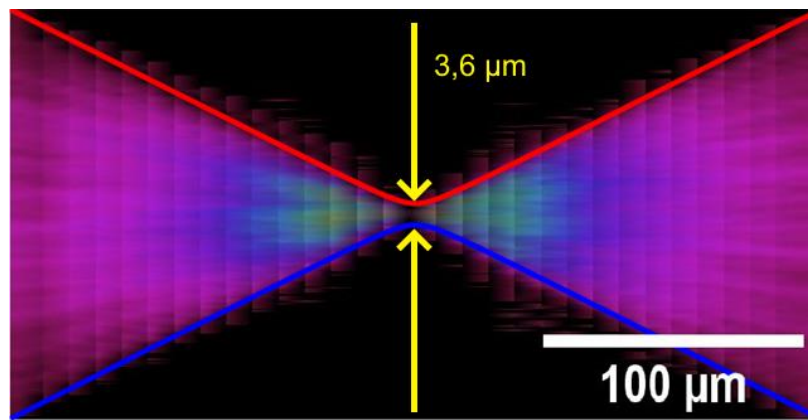
Lentelėje esančios vertės (2 lentelė) suvedamos į Matlab parašytą programą. Norinti kompensuoti atsiradusias aberacijas reikia aberacijų paveiktą bangos frontą paversti plokščiu, todėl jį aprašančio Zernike koeficientų vertės prieš įkeliant į Matlab programą padauginamos iš -1. Programoje iš gautų duomenų sumodeliuojamas aberacijų korekcijos funkcijos erdvinis bangos fronto modelis (22 pav.). Prie šio modelio pridedamas pluošto poslinkio funkcijos modelis (18 pav. a) ir iš grafiko projekcijos (22 pav. b) sukuriamas galutinis difrakcinės kaukės paveikslas. Difrakcinė kaukė atvaizduojama Holoeye erdviniame šviesos moduliatoriuje, kuris transformuoja bangos frontą reikiuose vietose pakeičiant šviesos nueitą kelią, taip sulygindamas optinius kelių skirtumus bangos fronte. Išlyginus aberuotą bangos frontą kompensuojamos pluošto aberacijos. ir taip kompensuoja aberacijas. Visą difrakcinės kaukės modeliavimo procesą reikia atlikti prieš kiekvieną bandymą, jeigu pakeičiami eksperimento parametrai – skaidrios terpės lūžio rodiklis ar gylis į terpėje į kurį fokusuojama šviesa.



22 pav. a) Sumodeliuotas bangos fronto modelis fokusuojant lazerio pluoštą į 4 mm stiklo plokštelę. b) Aberacijų korekcijos erdvinis modelis su pritaikytu fazės kėlimu, skirtas kompensuoti aberacijas fokusuojant pluoštą į 4 mm storio stiklo plokštelę.

Iš (22 pav. a) bangos fronto sukuriamas aberacijų korekcijos modelis pavaizduotas (22 pav. b). Šį modelį sudaro aberacijų korekcijos funkcija ir poslinkio funkcija skirta atskirti nedifragavusį pluoštą. Modeliui pritaikytas fazės keitimas (*angl.* phase wrapping) kas  $5,4\pi$ , nes tai maksimalus SLM fazės vėlinimas. Iš šio erdvinio modelio projekcijos daroma difrakcinė kaukė. Difrakcinės kaukės pilkumo lygiai parenkami pagal modelyje esančių taškų vertes. Didžiausia vertė – balta, rodo stipriausią fazės vėlinimą, mažiausia- juoda, kai fazė nėra vėlinama.

Prieš atliekant aberacijų korekcijos bandymus safyre ir stikle, buvo išmatuotas šviesos sklidimas fokusuojant pluoštą ore. Gautas pluošto projekcijos skerspjūvis pluošto sklidimo kryptimi pavaizduotas (23 pav.) paveiksle. Paveiksle matosi, kad nesant skirtingo lūžio rodiklių terpių skirtumui pluoštas fokusuojasi ir išsisklaido simetriškai. Raudona ir mėlyna linijomis pavaizduotas teorinės kreivė parodančios kaip fokusuojasi Gauso pluoštas 0,42 NA objektyvu. Iš rezultatų galima pamatyti, kad sutampa gauti rezultatai ir teoriniai skaičiavimai. Tai parodo, kad ore fokusuojamas pluoštas neturi didelę įtaką darančių aberacijų bei reiškia kad pluošto skerspjūvio projekcijos matavimas tiksliai apibūdina tiriamus pluoštus.



23 pav. Pluošto projekcijos skerspjūvis pluošto sklidimo kryptimi, fokusuojant šviesą ore.

Aberacijos korekcijos testavimas atliktas su 4 mm lydyto kvarco stiklo, kurio lūžio rodiklis lūžio rodiklis  $n_q = 1,458$  plokštelėje. Lazero pluoštas mikroskopo objektyvu su  $NA = 0,4$  fokusuojamas į galinę stiklo plokštelės sienelę. Su CCD kamera fiksuojamas pluošto profilis ir jo smailinis intensyvumas židinyje.

Pritaikius aberacijų korekciją gali atsirasti nedidelis židinio poslinkis dėl vienos iš korekcijos polinomų - defokuso netikslaus nustatymo arba dėl netikslų atstumų tarp optinės sistemos elementų. Netikslūs atstumai tarp (20 pav. b) lęšių L3 ir L4 gali pakeisti formuojamos lęšio funkcijos ar defokuso židinio atstumą. Jeigu atstumai nėra tikslūs, už teleskopo gali susidaryti lęšis, kuris pakeistų suformuoto židinio poziciją. Židinio poslinkis korekcijos metu yra nepageidaujamas šalutinis efektas, kurį turėtų būti galima pašalinti tiksliau suvedant teleskopo atstumus. Korekcijos metu atsirandantis židinio nuotolio pokytis yra mažesnis nei puse minimalios kameros transliacinio staliuko skalės vertės  $< 5 \mu\text{m}$ .

Šiame darbe aberacijų korekcijos efektyvumui naudojamas Strehl\* koeficientas. Jis skiriasi nuo literatūroje aprašytos sąvokos. Koeficientas turėtų būti matuojamo pluošto intensyvumo santykis su teorine difrakcijos apriboto Gauso pluošto intensyvumo verte, o tyrime šis koeficientas aprašo santykį tarp išmatuoto intensyvumo fokusuojant pluoštą stiklo ir intensyvumo fokusuojant šviesą ore. Didelio lūžio rodiklio skaidrios terpės įnešamos sferinės aberacijos yra pakankamai didelės, kad būtų galima teigti, jog eksperimento schemoje parinkus kokybiškiausią objektyvą ir ore fokusuojant lazero pluoštą, židinyje Gauso pluoštas atitinka teorinį difrakcijos apribotą modelį. Tokį koeficientą galima vadinti modifikuotu Strehl koeficientu ir darbe žymėsime Strehl\* koeficientu su žvaigždute.

Trasavimo metodu kuriant difrakcines kaukes, reikia žinoti skaidrios terpės lūžio rodiklį, lazero bangos ilgį ir gylį kuriame fokusuojama šviesa. Lūžio rodiklis ir bangos ilgis yra lengvai parenkami ir nekintantys dydžiai, o fokusavimo gylis yra kintamasis, kuris kinta kai keičiama lazero pluošto židinio pozicija. Netinkamai nustačius fokusavimo gylį, sugeneruojamas prasta difrakcinė kaukė, kuri gali ne tik

nekompensuoti aberacijų, bet ir įnešti naujų nuostolių. Norint įvertinti ar modeliavimo rezultatai yra teisingi ir ar sukuriama efektyvi difrakcinė kaukė, buvo keičiami Zernike polinomiali atitinkantys skirtingas aberacijas: defokuso ir sferinė aberacijas. Keičiant difrakcinės kaukės parametrus kas 10%, išmatuoti daugelio Zernike polinomų koeficientų kombinacijų smailiniai pluošto intensyvumai. Pasirinkta testuoti tik su židinio poslinkio polinomu, kuris kompensuoja Sferinių aberacijų įvesta defokusą, ir su pirmuoju Sferinės aberacijos Zernike polinomu. Aukštesniųjų eilių sferinės aberacijos Zernike polinomiali daro labai nežymią įtaką bangos frontui, tai parodo ir keliomis eilėmis mažesni Zernike polinomų koeficientai, todėl matavime nesimatytų reikšmingų pluošto profilio pokyčių.

### **2.1.7 Plokščios viršūnės pluošto ir butelio formos pluoštų formavimas.**

Plokščios viršūnės pluoštai eksperimente buvo formuojami dviem metodais. Pirmasis metodas yra butelio formos pluošto kūrimas apertūros formos difrakcine funkcija. Difrakcine kauke sudaryta iš juodo fono ir centre esančios apertūros. Paveiksluose (26-28 pav.) pavaizduotos difrakcinės kaukės fazės pasiskirstymo schemos nurodančios, kurioje vietoje vykdomas fazės vėlinimas – apertūros centre ar aplink centrinę apertūrą. Kuriant butelio formos pluoštus, apertūros skersmuo buvo keičiamas nuo 0,4-5,2 mm. Ši difrakcinė kaukė veikia vėlindama Gauso pluošto išorinio perimetro dalį. Atsispindėjęs nuo difrakcinės kaukės išorinė pluošto dalis difraguoja ir interferuoja su centriniu pluošto maksimumu sudarydama butelio formos pluoštą. Parinkus tinkamą apertūros skersmenį galima išgauti butelio formos pluoštą, kuris būtų labai panašus į plokščios viršūnės pluoštą.

Antruoju metodu plokščios viršūnės bangos frontai buvo kuriami naudojantis difrakcines kaukes sugeneruotas Holoeye Patern Generator programine įranga. Šios programos plokščios viršūnės pluošto algoritmas veikia sukurdamas sinc funkcijos difrakcinę kaukę. Generuojant plokščios viršūnės pluoštus algoritme nurodomas į SLM krintančio lazerio pluošto plotis, kuris šio eksperimento metu buvo 3,19 mm skersmens  $1/e^2$  Gauso pluoštas. Algoritmas taip pat leidžia pasirinkti kitus parametrus: pluošto profilio funkcijos eilės numerį bei galutinio pluošto plotį. Pasirinkus super-Gauso aukštesnę eilę gaunamas plokštesnis pluoštas su statesnėmis briaunomis, tačiau toks pluoštas dėl difrakcijos trumpiau išsilaiko erdvėje, greičiau apvalėja briaunos.[22] Galutinio pluošto plotį buvo stengiamasi parinkti kuo mažesni, nes apertūros difrakcinės kaukės metodu sukurti plokščios viršūnės pluoštais turi daug mažesni skersmenį, o klasikini metodu kuriant minimalų pluošto plotį riboja SLM skiriamoji geba.

Prie abiejų plokščio profilio pluošto formavimo funkcijų papildomai pridedama pluošto poslinkio funkcija. Optinėje schemeje (20 pav. b) vietoj objektyvo OB1 naudojamas 100 mm sferinis lęšis.

### 3 Eksperimento rezultatų aptarimas

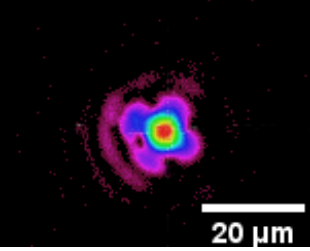
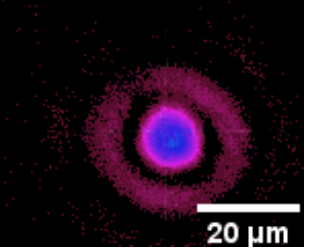
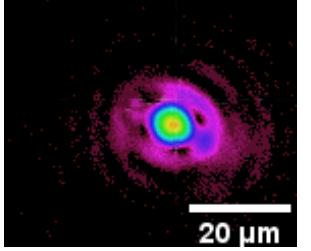
#### 3.1 Aberacijų korekcijos efektyvumo matavimas

Pritaikius aberacijų korekciją matomas didelis smailinio intensyvumo padidėjimas. Po korekcijos papildomai pajustiravus kameros objektyvą dar keliais procentais išauga smailinis intensyvumas ir pasiekiamas 0,8 Strehl\* santykis nuo idealios vertės.

Aberacijų korekcijos efektyvumo rezultatai galima matyti (3 lentelėje). Kadangi Strehl\* santykis parodo intensyvumų santykius matome, kad pritaikius aberacijų korekciją, smailinis intensyvumas išaugo 5,5 karto. Po aberacijos korekcijos intensyvumas sudaro 80 % neaburuoto pluošto smailinio intensyvumo.

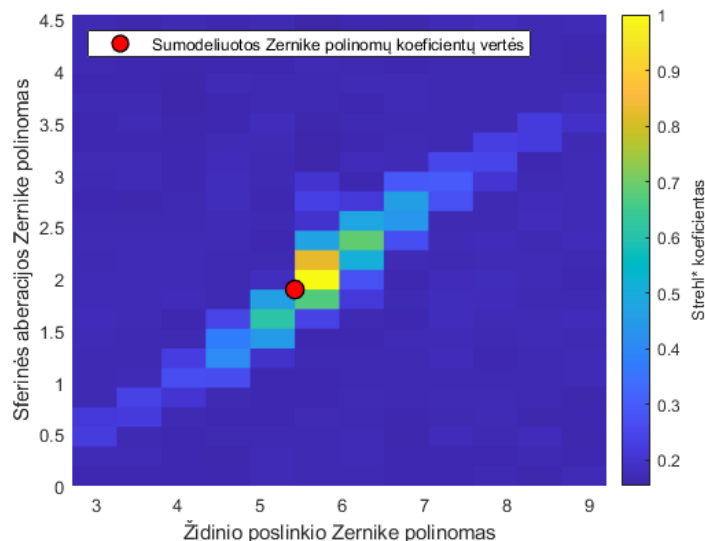
Smailinio intensyvumo padidėjimas matomas ir lentelėje (3 lentelė). Pluoštui sklindant pro stiklą vizualiai išsiplečia židinio moda bei aplink modą atsiranda nedidelio intensyvumo žiedas. Pritaikius aberacijų korekciją vizualiai pluošto profilis sumažėja ir dingsta žiedas aplink centrinę modą. Po korekcijos pluošto profilis tampa vizualiai panašus į pradinį aberacijų nepaveiktą modą. Modos skersmuo tampa toks pat kaip ir fokusuojant pluoštą ore.

3 lentelė. Optimizuotos aberacijų korekcijos efektyvumo duomenys.

Fokusuojant pluoštą ore.	Fokusuojant pluoštą 4 mm stiklo plokštelėje be aberacijų korekcijos.	Fokusuojant pluoštą 4 mm stiklo plokštelėje ir pritaikius aberacijų korekciją.
		
Strehl* santykis 1	Strehl* santykis 0,14	Strehl* santykis 0,8
Pluošto skersmuo 6,8 μm	Pluošto skersmuo 12 μm	Pluošto skersmuo 6,9 μm

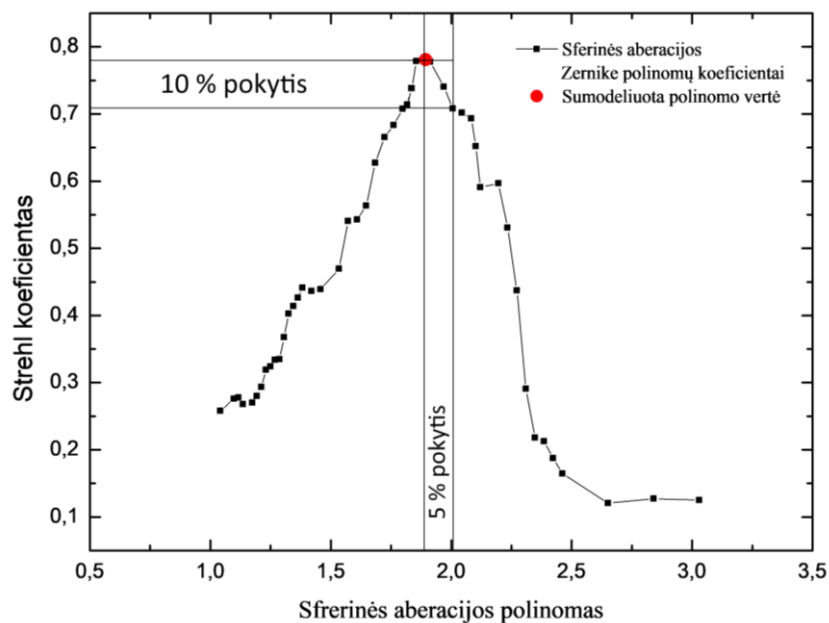
Iš aberacijos korekcijos eksperimento matyti, kad pritaikius aberacijų korekciją fokusuojant lazerio pluoštą skaidrijoje terpėje smailinis intensyvumas išaugo 5,5 karto ir pluošto skersmuo sumažėja 2 kartus. Tokie rezultatai parodo, kad aberacijų korekcija vyksta efektyviai. Nors, toliau testuojama ar Zernike polinomai nustatyti iš spindulių trasavimo atitinka realią optinę sistemą. (24 pav.) grafike

parodytas Strehl\* koeficiento kitimas kai keičiami Židinio poslinkio ir sferinės aberacijos polinomial. Matyti, kad kompiuteriu sugeneruoto modelio Zernike polinomial, pažymėti raudonu tašku, sukuria didžiausią Strehl\* koeficientą. Tai reiškia, kad trasavimo būdu kompiuterio sugeneruoti Zernike polinomial yra teisingi ir atitinka teorinį modelį.



24 pav. Zernike polinomų optimizavimo schema. Strehl\* koeficientas esant skirtingoms Sferinės aberacijos Zernike polinomų ir Defokuso Zernike polinomų vertėms.

Teoriškai sumodeliavus difrakcinę erdvinio šviesos modulatoriaus kaukę gali atsirasti nesutapimų dėl teorinio modelio praktinio eksperimento. Optiniai elementai, tokie kaip lazerio pluošto fokusavimo objektyvas bei CCD kameros objektyvai iš savęs turi optinių aberacijų, kurios nėra įskaičiuotos teoriniame modelyje. Dėl to grafike (25 pav.) atvaizduota sferinės aberacijos Zernike polinomo koeficiento ir Strehl\* koeficiento priklausomybė parodo, kokia yra maksimali polinomo koeficiento paklaida, su kuria galima gauti pakankamai gerus rezultatus. Šiame matavime kiekviename taške CCD kamera sufokusuojama į didžiausią smailinį intensyvumą. Grafike pavaizduotas Strehl\* koeficientas yra santykis tarp eksperimente išmatuoto ir nedifragavusio, tik atsispindėjusio nuo SLM pluošto, smailino intensyvumo santykis. Gautame grafike matyti, jog sumodeliuotos difrakcinės kaukės Strehl\* koeficientas yra aukščiausias ir siekia 0,8.



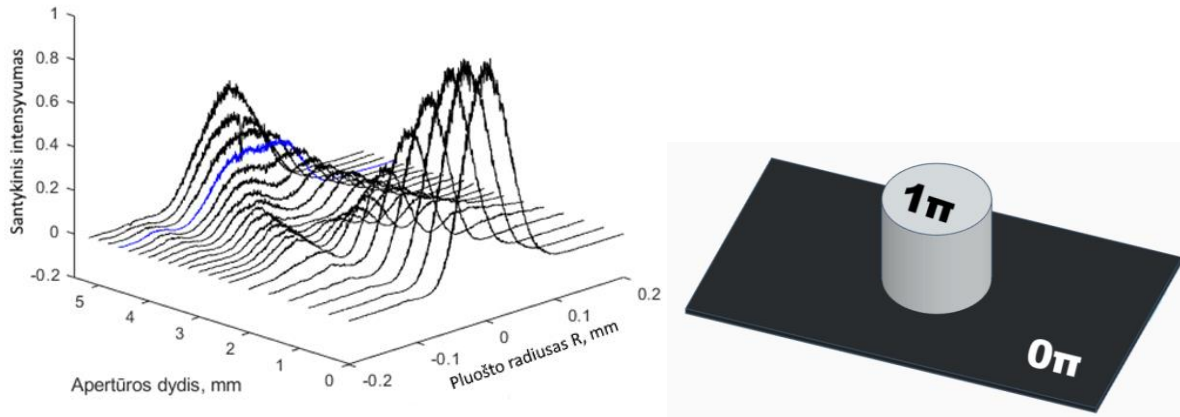
25 pav. Strehl\* koeficiento priklausomybė nuo aberacijų korekcijos difrakcinės kaukės sferinės aberacijos polinomo, ties kiekvienu matavimu fokusuojant CCD kamerą į didžiausią intensyvumą. Raudonu tašku pažymėtas modeliavimo metu gautų polinomų koeficientų matavimas.

Jeigu tariame, kad praktiniame pritaikyme leidžiama maksimali Strehl\* koeficiento paklaida iki 0,7, kas atitinka grafike vertikaliomis tiesėmis pažymėtas vertes. Šios vertės pasirinktos dėl to, kad paveiksle (25 pav.) nustatytame intervale stipriausiai kinta Strehl\* intensyvumas, dėl to praktiniame pritaikyme bus sunkiausia atitaikyti reikiamą polinomo reikšmę realiai sistemai ir optinė sistema jautriausiai reaguos į pokyčius. Pasirinktame paklaidų intervale Strehl\* koeficientas sumažėja 10%, kai Sferinės aberacijos polinomas nuo pradinės vertės į teigiamą arba neigiamą pusę pakinta 5 %. Norint sužinoti kaip tiksliai reali optinė sistema turi atitikti modeliavimuose naudotą sistemą, OSLO programa buvo sumodeliuota Sferinės aberacijos polinomo pokytis, kai keičiamas lazerio pluošto fokusavimo gylis skaidrioje terpėje. Nustatyta, kad 0,2 mm fokusavimo gylio pokytis sukelia 5 % pirmos eilės sferinės aberacijos pokytį. Vadinasi realioje optinėje sistemoje lazerio fokusavimo gylį skaidrioje medžiagoje pakeitus 0,2 mm gausime 10% Strehl\* koeficiento sumažėjimą.

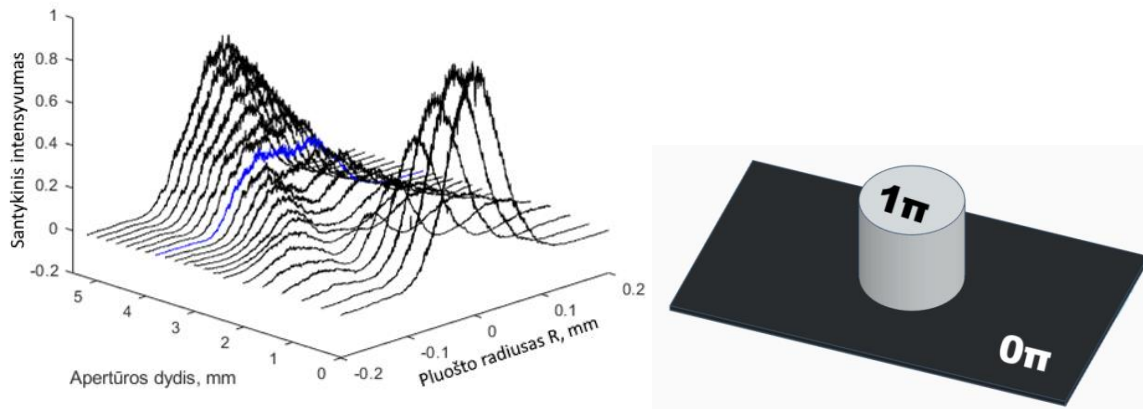
Taigi galima teigti, kad modeliavimo metodo pagalba galima sėkmingai sukurti aberacijų korekcijos difrakcines kaukes. Tai yra paprastesnė tačiau taip pat efektyvi alternatyva sudėtingesniems difrakcinių kaukių sudarymo metodams, kuriuose naudojami papildomi prietaisai nustatyti aberuotui bangos frontui.

### 3.2 Butelio formos ir plokščios viršūnės pluoštų formavimas

Išmatuotos butelio formos pluoštų formos ir intensyvumo priklausomybės nuo difrakcinės kaukės apertūros skersmens. Eksperimente apertūros skersmuo keičiamas nuo Matavimai atlikti su dviem skirtingais Gauso pluošto pločiais ir skirtingomis difrakcinių kaukių konfigūracijomis (26-28 pav.), kai fazinis vėlinimas apertūros centre ir kai vėlinimas aplink apertūrą.

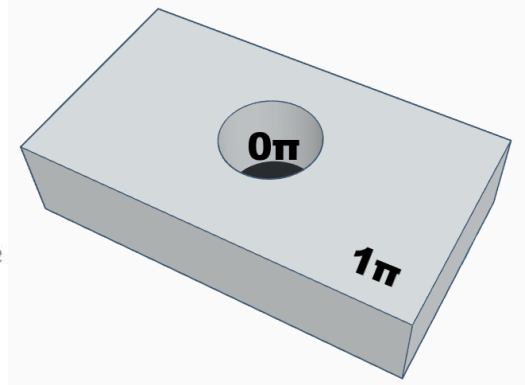
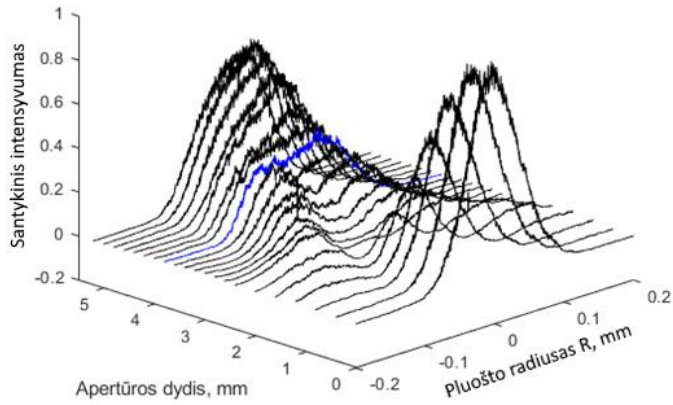


26 pav. Butelio formos pluošto formos ir santykinio intensyvumo priklausomybė nuo difrakcinės kaukės apertūros skersmens. Naudojama difrakcinė kaukė, kurių centre  $\pi$  fazės vėlinimas, o išorėje nėra fazės vėlinimo. Į SLM krinta 4,29 mm skersmens  $1/e^2$  Gauso pluoštas. Geriausias plokščios viršūnės pluoštas, pažymėtas mėlyna spalva, gaunamas naudojant 4,6 mm skersmens apertūros kaukę.



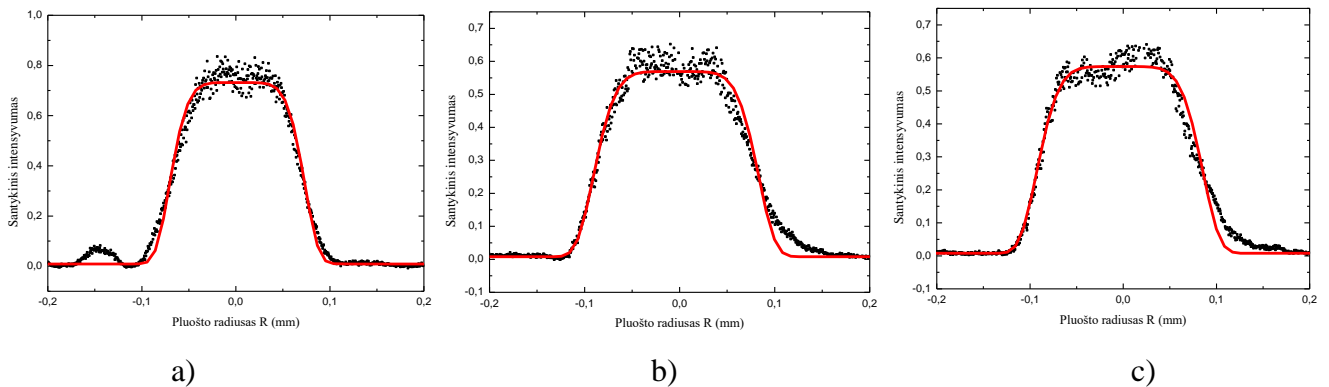
27 pav. Butelio formos pluošto formos ir santykinio intensyvumo priklausomybė nuo difrakcinės kaukės apertūros skersmens. Naudojama difrakcinė kaukė, kurių centre  $\pi$  fazės vėlinimas, o išorėje nėra fazės vėlinimo. Į SLM krinta 3,19 mm skersmens  $1/e^2$  Gauso pluoštas. Geriausias plokščios viršūnės pluoštas, pažymėtas mėlyna spalva, gaunamas naudojant 3,8 mm skersmens apertūros kaukę.





28 pav. Butelio formos pluošto formos ir santykinio intensyvumo priklausomybė nuo difrakcinės kaukės apertūros skersmens. Naudojama difrakcinė kaukė kurios centre nėra fazės vėlinimo, o išorėje yra  $\pi$  fazės vėlinimas. Į SLM krinta 3,19 mm skersmens  $1/e^2$  Gauso pluoštas. Geriausias plokščios viršūnės pluoštas, pažymėtas mėlyna spalva, gaunamas naudojant 3,8 mm skersmens apertūros kaukę.

Iš trijų atliktų matavimų matyti, kad panašiausias į plokščios viršūnės pluoštą gaunamas, kai difrakcinės kaukės apertūros skersmuo yra vidutiniškai 1,13 karto didesnis negu ant SLM krintančio Gauso pluošto  $1/e^2$  plotis. Tai reiškia, kad panašiausias į plokščios viršūnės pluoštą tuomet kai fazinis vėlinimas atliekamas tik Gauso pluošto išoriniam perimetrui. Jeigu apertūra bus per maža arba per didelė gaunamas paprastas Gauso pluoštas, nes tuomet difrakcinė kaukė sukuria fazės vėlinimą visam pluoštui tolygiai.

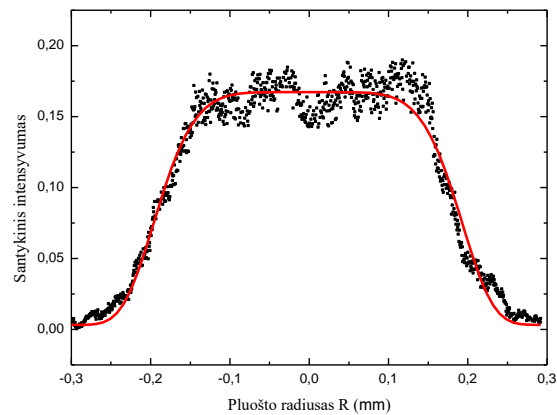


29 pav. Plokščios viršūnės pluoštas suformuotas naudojant a) fazės vėlinimą 4,6 mm skersmens apertūros viduje ir 4,29 mm  $1/e^2$  Gauso pluoštą. b) fazės vėlinimą 3,8 mm apertūros viduje ir 3,19 mm  $1/e^2$  Gauso pluoštą c) fazės vėlinimą 3,8mm apertūros išorėje ir 3,19 mm  $1/e^2$  Gauso pluoštą. Grafikai aproksimuoti super-Gauso 3 eilės funkcijomis.

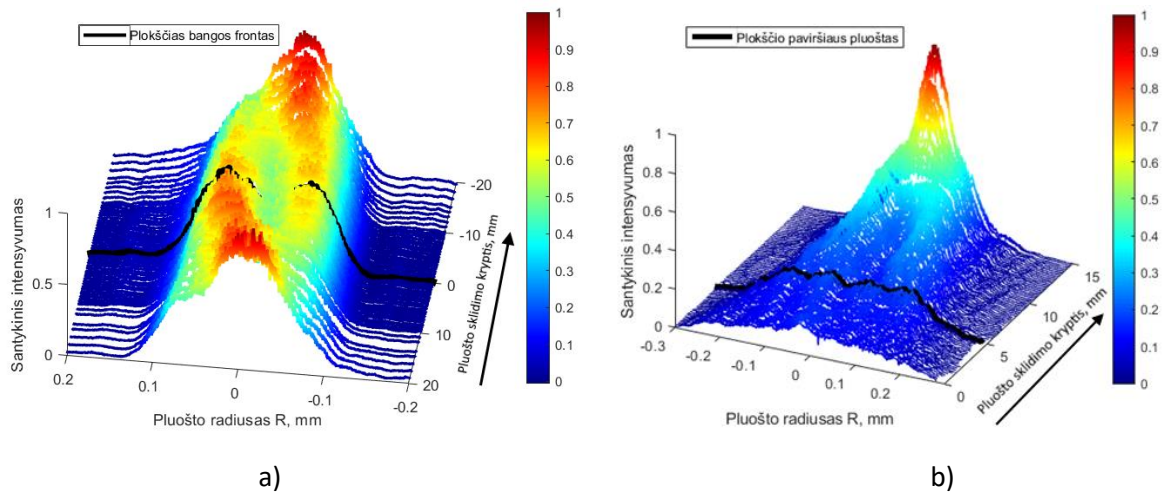
Grafikuose (29 pav.) pavaizduoti panašiausi į plokščios viršūnės pluoštai. Iš antrojo ir trečiojo matavimų (29 pav. b ir c) matyti, kad nėra skirtumo ar fazės vėlinimas vykdomas apertūros centre, ar apertūros išorėje, vis tiek gaunami identiški butelio formos pluoštai.

Klasikiniu plokščios viršūnės pluošto formavimo metodu sukurtas pluoštas pavaizduotas (30 pav.) paveiksle. Šiuo metodu kuriant pluoštus kokybiškesni didelio skersmens pluoštai. SLM skiriamoji geba apriboja minimalų sukuriama pluošto plotį. Kai naudojamas fokusuojamas plokščios viršūnės pluoštas gaunamas Airy disko formos pluošto profilį. Tai galima pamatyti ir (31 pav. b) paveiksle. [25] Norint kad plokščios viršūnės pluoštas būtų židinyje, difrakcinei kaukei reiktų atlikti papildomą Furje transformaciją, kad į fokusuojamą objektyvą patektų sinc funkcijos pluoštas. Grafike pavaizduotas mažiausio skersmens pluoštas, kurį galima išgauti su ta pačia optine sistema kaip ir butelio formos pluoštų formavime. Suformuoto pluošto yra apie du kartus didesnis, tačiau santykinis intensyvumas yra 3,5 karto mažesnis.

Abiejų formavimo metodų plokščios viršūnės pluoštai skirtingai sklinda erdvėje. Paveiksle (31 pav. a) plokščios viršūnės pluoštas yra beveik židinio centre, o (31 pav. b) klasikiniu metodu suformuotas plokščios viršūnės pluoštas gaunamas 10 mm nuo židinio. Pluošto nesimetriškumas matomas (31 pav. a) grafike atsiranda iš naudojamos optinės sistemos arba ant SLM krintančio Gauso pluošto nesimetriškumo



30 pav. sinc funkcijos difrakcine kauke suformuotas flat-top pluoštas Aproximuotas 3 eilės super-Gauso funkcija.



31 pav. Apertūros difracine kauke ir sinc funkcijos difracine kauke sukurtų apertūrų pluošto profilių kitimai pluošto sklindimo kryptimi.

Apertūros difracine kauke sukurtas butelio formos pluoštas panašus į plokščios viršūnės pluoštą išsilaiko 6 mm sklindant pluošto sklindimo kryptimi. Sinc funkcija sukurtas plokščiosios viršūnės pluoštas nesuirdamas sklinda 0,45 mm.

Taigi galima teigti, kad butelio formos pluoštą galima sėkmingai sugeneruoti su apertūros formos  $\pi$  fazine vėlinimo kauke. Sugeneruoti pluoštai turi ilga fokusavimo gylį, Toks metodas yra daug paprastesnis už klasikinį sinc funkcijos formavimo metodą. Dėl paprastumo šis metodas gali būti lengvai pritaikomas ne tik erdvinuose šviesos modulatoriuose, bet ir skaidrių terpių pagamintuose optiniuose elementuose vietoj apertūros, ten kur nėra fazės vėlinimo išpjaunant skylę.

## Pagrindiniai rezultatai ir išvados

1. Aberacijų korekcijos difrakcinės kaukės, kurios sukurtos iš Zernike polinomų, suskaičiuotų spindulių trasavimo metodu, sugeba efektyviai kompensuoti skaidriose terpėse susidariusias aberacijas. Pritaikius aberacijų korekciją stiklo, fokusuojamo pluošto smailinis intensyvumas išaugo 5,5 karto. Šiuo metodu kompensuojant aberacijas gaunamas 0,8 Strehl\* koeficiento Gauso pluoštas.

2. Tiriant įvairių Zernike polinomų koeficientų kombinacijų efektyvumus, nustatyta, kad trasavimo metodu apskaičiuotos Zernike polinomų difrakcinės kaukės sukuria pluoštus su didžiausiu Strehl\* koeficientu. Tai reiškia, kad eksperimentinės Zernike polinomų vertės atitinka spindulių trasavimo metodu apskaičiuotas teorines polinomų vertes.

3. Aberacijų korekcijos pirmos eilės sferinės aberacijos polinomui pakitus 5 %, gaunamas 10 % Strehl\* koeficiento sumažėjimas. Spindulių trasavimu sumodeliavus tokį pokytį, gaunamas apie 0,2 mm aberacijos židinio poslinkis. Toks poslinkis parodo, kad aberacijų korekcijos pluošto Strehl\* koeficientas nėra jautrus židinio poslinkiui, todėl nebūtina pritaikius korekcijos labai tiksliai parinkti fokusavimo gylio.

4. Apertūros formos  $\pi$  fazės vėlinimo difrakcinės kaukės sėkmingai sukuria butelio formos pluoštus, iš kurių parinkus tinkamą kaukės apertūros skersmenį gaunami plokščios viršūnės pluoštai. Formuojamų butelio formos pluoštus, geriausi plokščios viršūnės pluoštai gaunami, kai apertūros skersmuo yra 1,13 karto didesnis už Gauso pluošto plotį. Suformuotas plokščias plokščios viršūnės pluoštas sklisdamas erdvėje išsilaiko 6 mm.

5. Dėl savo nesudėtingo dizaino ir lengvos gamybos apertūros formos difrakcinės kaukės, skirtos formuoti butelio formos pluoštus, gali būti naudojamos kaip alternatyva klasikiniam sinc funkcijos plokščios viršūnės pluošto formavimui erdviniuose šviesos modulatoriuose.

## Literatūra

- [1] J. Liesener, M. Reicherter, and H. J. Tiziani, "Determination and compensation of aberrations using SLMs," *Opt. Commun.*, vol. 233, no. 1–3, pp. 161–166, 2004, doi: 10.1016/j.optcom.2004.01.029.
- [2] H. Itoh, N. Matsumoto, and T. Inoue, "Spherical aberration correction suitable for a wavefront controller," *Opt. Express*, vol. 17, no. 16, pp. 14–67, 2009, doi: 10.1364/oe.17.014367.
- [3] M. J. Booth *et al.*, "Predictive aberration correction for multilayer optical data storage," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 88, no. 3, pp. 1–3, 2006, doi: 10.1063/1.2166684.
- [4] Lambda Research Corporation, "OSLO Optics Reference Version 6.1," 2001.
- [5] K. WYANT, James C.; CREATH, *Basic wavefront aberration theory for optical metrology*, vol. 11.part 2. Applied optics and optical engineering, 1992.
- [6] V. Lakshminarayanan and A. Flece, "Erratum: Zernike polynomials: A guide (Journal of Modern Optics (2011) 58:7 (545-561))," *J. Mod. Opt.*, vol. 58, no. 18, p. 1678, 2011, doi: 10.1080/09500340.2011.633763.
- [7] P. M. J. Macdonald, *Geometrical Optics and Optical Design*. Oxford University Press, 1997.
- [8] A. Jesacher and M. J. Booth, "Parallel direct laser writing in three dimensions with spatially dependent aberration correction," *Opt. Express*, vol. 18, no. 20, pp. 21–90, 2010, doi: 10.1364/oe.18.021090.
- [9] V. N. MAHAJAN, *Optical imaging and aberrations Part III Wavefront Analysis*. Bellingham, Washington: Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers All, 2013.
- [10] H. Gross, H. Zügge, M. Peschka, and F. Blechinger, *Handbook of Optical Systems, Volume 3\_ Aberration Theory and Correction of Optical Systems-Wiley-VCH*, vol. 3. 2007.
- [11] G. D. Love, "Wave-front correction and production of Zernike modes with a liquid-crystal spatial light modulator," *Appl. Opt.*, vol. 36, no. 7, p. 1517, 1997, doi: 10.1364/ao.36.001517.
- [12] H. P. AG, "Spatial light modulators product description," *Holoeye Pioneers in Photonic Technology*, 2018. <https://holoeye.com/spatial-light-modulators/>.
- [13] D. Liu *et al.*, "Dynamic laser beam shaping for material processing using hybrid holograms," *Opt. Laser Technol.*, vol. 102, pp. 68–73, 2018, doi: 10.1016/j.optlastec.2017.12.022.
- [14] B. R. Boruah, "Dynamic manipulation of a laser beam using a liquid crystal spatial light modulator," *Am. J. Phys.*, vol. 77, no. 4, pp. 331–336, 2009, doi: 10.1119/1.3054349.
- [15] J. A. Davis, T. I. Hall, I. Moreno, J. P. Sorger, and D. M. Cottrell, "Programmable zoom lens system with two spatial light modulators: Limits imposed by the spatial resolution," *Appl. Sci.*, vol. 8, no. 6, 2018, doi: 10.3390/app8061006.
- [16] S. Hasegawa and Y. Hayasaki, "Holographic femtosecond laser processing with multiplexed phase fresnel lenses displayed on a liquid crystal spatial light modulator," *Opt. Rev.*, vol. 14, no. 4, pp. 208–213, 2007, doi: 10.1007/s10043-007-0208-9.
- [17] K. Paivasaari, M. Silvennoinen, J. Kaakkunen, and P. Vahimaa, "Femtosecond laser processing and spatial light modulator," *Laser Appl. Microelectron. Optoelectron. Manuf. XIX*, vol. 8967, p. 89670F,

2014, doi: 10.1117/12.2044459.

- [18] M. J. Booth, M. A. A. Neil, and T. Wilson, “Aberration correction for confocal imaging in refractive-index-mismatched media,” *J. Microsc.*, vol. 192, no. 2, pp. 90–98, 1998, doi: 10.1111/j.1365-2818.1998.99999.x.
- [19] Z. Kuang, E. Lyon, H. Cheng, V. Page, T. Shenton, and G. Dearden, “Multi-location laser ignition using a spatial light modulator towards improving automotive gasoline engine performance,” *Opt. Lasers Eng.*, vol. 90, pp. 275–283, 2017, doi: 10.1016/j.optlaseng.2016.10.024.
- [20] R. D. Simmonds, P. S. Salter, A. Jesacher, and M. J. Booth, “Three dimensional laser microfabrication in diamond using a dual adaptive optics system,” *Opt. Express*, vol. 19, no. 24, p. 24122, 2011, doi: 10.1364/oe.19.024122.
- [21] R. Di Leonardo, F. Ianni, and G. Ruocco, “Computer generation of optimal holograms for optical trap arrays,” *Opt. Express*, vol. 15, no. 4, p. 1913, 2007, doi: 10.1364/oe.15.001913.
- [22] V. Pal *et al.*, “Generating flat-top beams with extended depth of focus,” *Appl. Opt.*, vol. 57, no. 16, p. 4583, 2018, doi: 10.1364/ao.57.004583.
- [23] J. Arlt and M. J. Padgett, “Generation of a beam with a dark focus surrounded by regions of higher intensity: the optical bottle beam,” *Opt. Lett.*, vol. 25, no. 4, p. 191, 2000, doi: 10.1364/ol.25.000191.
- [24] J. Otón, P. Ambs, M. S. Millán, and E. Pérez-Cabré, “Multipoint phase calibration for improved compensation of inherent wavefront distortion in parallel aligned liquid crystal on silicon displays,” *Appl. Opt.*, vol. 46, no. 23, pp. 5667–5679, 2007, doi: 10.1364/AO.46.005667.
- [25] A. Laskin, V. Laskin, and A. Ostrun, “Refractive beam shapers for focused laser beams,” *Laser Beam Shap. XVII*, vol. 9950, p. 995002, 2016, doi: 10.1117/12.2235712.

# Santrauka

Julius Serapinas

## Aberacijų korekcija ir lazerio pluošto modifikavimas erdviniu šviesos moduliatoriumi

Lazerinėse sistemose lazerio pluoštas dėl naudojamų optinių elementų visuomet patiria didesnes ar mažesnes optines aberacijas. Jas tipiškai galima koreguoti naudojant papildomus optinius elementus, tačiau bandant lazerio pluoštą fokusuoti arba praveisti aukštesnio lūžio rodiklio skaidriose terpėse, sistemoje atsiranda optinės aberacijos, kurios priklauso nuo lazerio pluošto kritimo kampo, bangos ilgio, terpės lūžio rodiklio bei pluošto fokusavimo gylio medžiagoje. Tokiu atveju, aberacijų kompensacija tampa kebli, nes reikia korekcijos metodo, kuris galėtų dinamiškai keisti aberacijų korekcijos funkciją, kai keičiama pluošto pozicija. Dėl šios priežasties pravartu naudoti erdvinius šviesos moduliatorius, su kuriais galima formuoti pluošto bangos frontą, taip kompensuojant aberacijų sukeltus bangos fronto iškraipymus. Šie moduliatoriai taip pat yra naudingi pluošto formavime. Keičiant fazinį vėlinimą skirtingose lazerio pluošto bangos fronto zonose, galima suformuoti pluoštus butelio formos ar plokščios viršūnės pluoštus, taip išplečiant turimo lazerio pritaikymo galimybes.

Šio darbo metu buvo sukurtos aberacijų korekcijos difrakcinės kaukės, kurios sumodeliuotos iš aberuotą bangos frontą aprašančių Zernike polinomų. Polinomiali apskaičiuojami spindulių trasavimo metodu, optinės sistemos modelyje realų objektyvą pakeitus idealiuoju. Sukurtos difrakcinės kaukės buvo ištestuotos fokusuojant lazerio pluoštą kvarciniame stikle. Šiuo aberacijos korekcijos metodu gautas 0,8 Strehl\* koeficiento Gauso pluoštas. Pritaikius korekciją, pluošto intensyvumas išauga 5,5 kartus. Kartu buvo įvertinta, ar suskaičiuoti polinomais jautrūs sistemos pokyčiams. Nustatyta, kad sugeneruoti Zernike polinomiali atitinka realios optinės sistemos bangos fronto polinomų vertes. Suskaičiuota, jog židiniui pakitus 0,2 mm nuo pradinės pozicijos, gaunamas 10 % Strehl\* koeficiento sumažėjimas.

Taip pat buvo testuojamas alternatyvus dizaino butelio formos ir plokščios viršūnės pluoštų formavimo metodas, naudojantis apertūros formos  $\pi$  fazės vėlinimo difrakcinės kaukės. Nustatyta, jog šios difrakcinės kaukės efektyviai sukuria butelio formos pluoštus ir parinkus tinkamą apertūros skersmenį gaunami plokščios viršūnės pluoštai. Gautieji pluoštai, sklisdami erdvėje, išsilaiko 6 mm. Nustatyta, jog norint išgauti plokščios viršūnės pluoštą apertūros diametras turi būti 1,13 karto didesnis už naudojamo Gauso pluošto plotį. Lyginant su klasikinio sinc funkcijos metodo plokščios viršūnės pluoštais, fazės vėlinimo apertūros difrakcinės kaukės pluoštai gaunami mažesnio skersmens ir didesnio intensyvumo.

# Summary

**Julius Serapinas**

## **Aberration correction and laser beam modification with a spatial light modulator**

In laser systems, the laser beam always experiences greater or lesser optical aberrations due to the optical elements used. They can typically be corrected using additional optical elements, but when attempting to focus or pass a laser beam on transparent media with higher refractive indices, optical aberrations occur in the system which are depended on the laser beam angle, wavelength, media refractive index, and beam focusing depth in the material. In this case, aberration compensation becomes cumbersome because of the need for a correction method that can dynamically change the aberration correction function when the beam position is changed. For this reason, it is advantageous to use spatial light modulators with which the fiber wavefront can be formed, thus compensating for the wavefront distortions caused by aberrations. These spatial light modulators are also useful in beam formation. By varying the phase delay in different areas of the laser beam wavefront, the beam can be formed as bottle-beam or flat-top beam, thus expanding the applications of the available laser.

In this work, aberration correction diffraction masks were developed, which were modeled from Zernike polynomials describing the aberrated wavefront. Polynomials are calculated by the beam tracing method, replacing a real lens with an ideal one in an optical system model. The developed diffraction masks were tested by focusing the laser beam on quartz glass. This method of aberration correction helped to create a Gaussian beam with a 0.8 Strehl\* coefficient. After applying the correction, the beam intensity increases by 5.5 times. After that, calculated polynomials were valued for their sensitivity to system changes. The generated Zernike polynomials were found to correspond to the values of the wavefront polynomials of a real optical system. It is estimated that a change in focus of 0.2 mm from the initial position results in an 10% reduction in the Strehl\* coefficient.

An alternative design method for forming bottle-beam and flat-top beams using aperture-shaped  $\pi$ -phase delay diffraction masks was also tested. It has been found that these diffractive masks effectively create bottle-beams and by selecting the appropriate aperture diameter, flat-top beams are obtained. The resulting beam withstand 6 mm of space propagation without distorting. It has been determined that in order to obtain a flat-top beam profile, the aperture diameter must be 1.13 times larger than the width of the Gaussian fiber used. Compared to the flat profile fibers of the classical sinc function method, the beams of the phase delay aperture diffraction mask are obtained with smaller diameter and higher intensity.