

**ŠIAULIŲ UNIVERSITETO
GAMTOS MOKSLŲ FAKULTETO
FIZIKOS KATEDRA**

PETRAS RAŠČIUS

**DIFRAKCINIŲ OPTINIŲ ELEMENTŲ TAIKYMAS LAZERIŲ ŠVIESOS PLUOŠTŲ
TRANSFORMAVIMUI**

LASER LIGHT BEAM SHAPING BY USING DIFFRACTIVE OPTICAL ELEMENTS

Magistrantūros studijų programos “Fizika”

MAGISTRO DARBAS

Mokslinis vadovas
doc. V. Girdauskas

Šiauliai,
2011

TURINYS

ĮVADAS.....	4
1.LAZERIO PLUOŠTO TRANSFORMAVIMO METODŲ PRINCIPAI.....	6
2.ŠVIESOS DIFRAKCIJA IR DIFRAKCINIAI OPTINIAI ELEMENTAI.....	8
2.1.Fraunhoferio difrakcija	12
2.2.Difrakcija už plyšio.....	13
2.3.Vienos zonos binarinių elementų veikimo principas	18
3.DOE FAZĖS PROFILIO SKAIČIAVIMO METODŲ APŽVALGA.....	20
4.GAUSO PLUOŠTO TRANSFORMAVIMO FAZINIŲ PLYŠIŲ IR KIAURYME DOE MODELIAVIMO REZULTATAI.....	27
4.1.Gauso pluošto difrakcija už fazinių plyšių.....	32
4.2.Centriškumo, pluošto elipsiškumo, fazės pokyčio, lęšio židinio nuotolio, ekrano nuotolio neatitikimo įtaka plokščios stačiakampės formos viršūnės skirstiniui panaudojant fazinį plyšį.	34
4.3.Gauso pluošto difrakcija už fazinės kiaurymės.....	42
4.4.Centriškumo, pluošto elipsiškumo, fazės pokyčio, lęšio židinio nuotolio, ekrano nuotolio neatitikimo įtaka plokščios apskritiminės formos viršūnės skirstiniui, panaudojant fazinę kiaurymę	44
IŠVADOS	51
LITERATŪRA.....	52

ANOTACIJA

Magistro darbą sudaro įvadas, 4 skyriai, 7 poskyriai, išvados, 34 literatūros šaltiniai. Darbe pateikti 52 paveikslai, 1 lentelė. Darbo apimtis 54 puslapiai.

Šiame darbe yra atliekama lazerio pluošto, kurio bangos ilgis 1064 nm, transformavimo į apskrito ir stačiakampio skerspjūvio profilio plokščios viršūnės pluoštą, naudojantis difrakciniais optiniais elementais, analizė. Pirmoje darbo dalyje yra apžvelgiama difrakcinių optinių elementų samprata, jų poreikis šiandieniniame aukštųjų lazerinių technologijų srityje, pagrindiniai difrakcinės optikos dėsniai, kuriais remiantis yra projektuojami binariniai difrakciniai elementai, jų veikimo principas. Taip pat yra apžvelgiama lazerio pluošto sklaidimo optinėmis sistemomis modeliavimo metodika. Antroje darbo dalyje yra pateikti pluoštų transformavimo kompiuterinio modeliavimo rezultatai bei jų analizė. Modeliuojamas lazerio pluošto transformavimas į apskrito ir stačiakampio skerspjūvio plokščios viršūnės pluoštą, atliekamas transformuoto pluošto fokusavimo į didesnio ir mažesnio puspločio pluoštus modeliavimas. Taip pat yra modeliuojama pluošto elipsiškumo ir centriškumo neatitikimo įtaka pluošto transformavimui.

ANNOTATION

Master's thesis consists of an introduction, 4 sections, 7 sections the findings, 34 references. The study includes 52 paintings, 1 table. Working volume of 54 pages.

This work is performed a laser beam with a wavelength of 1064 nm the transformation of the circular and rectangular flat-top beam profile analysis and optimization diffractive optical elements. In the first part is an overview the concept of diffractive optical elements and it demand for today's high-tech Laser Technology level, the basic laws of diffractive optics, which is based the design of binary diffractive elements and their operating principle. It also provides an overview of laser beam shaping method. The second part of this work is representing computer simulation results and analysis. Simulated laser beam transformation, performed the beam focusing to bigger and smaller beam waist radius. There are also simulating elliptical beam and central discrepancy influence of beam transformation.

IVADAS

Ypač didelės galios lazerio apdirbimo sistemos šiuo metu taikomos įvairiose pramonės srityse: pjovimo, plieno suvirinimo, automobilių gamyboje, mechaninio apdirbimo, atkaitinimo skystų kristalų ir puslaidininkiniams įtaisams (Полещук, 2008).

Apdirbimui dažniausiai naudojamas lazerio pluoštas su Gauso skersiniu intensyvumo profiliu. Žinoma, jog toks Gauso pluoštas ne visuomet tinkamas spręsti uždavinius susijusius su medžiagų apdorojimu lazeriais. Dėl to tampa aktualu rasti būdus, kurie padėtų transformuoti Gauso pluoštą į norimą, skersinio intensyvumo profilio pluoštą. Vienas iš galimų, dabartiniu metu plačiai tiriamų būdų yra fazinės plokštelės difrakcinių optinių elementų (DOE) panaudojimas. Pastarosios, keičia lazerio pluošto bangos frontą taip, kad Gauso pluoštas transformuojasi į Hiper Gauso pluoštą. Todėl, difrakcinių optinių elementų fazės profilio skaičiavimas, jų tobulinimas bei panaudojimas yra svarbus lazerio pluošto transformavimo uždavinys.

Šiame darbe aptarsime difrakcinės optikos principus, jų taikymą difrakcinių optinių elementų konstravimui. Aptarsime DOE fazės skaičiavimo algoritmus bei išnagrinėsime paprastų difrakcinių optinių elementų, pluoštų transformavimo į stačiakampio ir apskritiminio profilio pluoštų modeliavimo rezultatus.

TYRIMO HIPOTEZĖ

Taikant lazerio šviesos pluoštų sklidimo ir difrakcijos modeliavimo algoritmus, galima optimizuoti paprastų DOE fazinio pralaidumo profilį, kurio difrakcinis efektyvumas būtų pakankamai didelis, o transformuoto pluošto intensyvumo iškraipymai maži.

TYRIMO TIKSLAS

Taikant lazerio šviesos pluoštų sklidimo ir difrakcijos kompiuterinį modeliavimą, apskaičiuoti Gauso lazerio pluošto transformavimo į Hiper Gauso pluoštą, panaudojant fazinio plyšio ir fazinės kiaurymės DOE, ypatybes.

DARBO UŽDAVINIAI

- Susipažinti su difrakcinės optikos taikymu lazerio šviesos pluošto transformavimui į norimą skersinio intensyvumo pluoštą.
- Išanalizuoti mokslinę literatūrą skirtą lazerių pluoštų difrakcijos teorijai.
- Išsiaiškinti ir įsisavinti pluoštų difrakcijos ir sklidimo intensyvumo modeliavimo metodiką.
- Ištirti Gauso pluošto transformavimo į Hiper – Gauso pluoštą ypatybes fazinio plyšio ir kiaurymės DOE, ir nustatyti optimalius DOE parametrus.

TYRIMO OBJEKTAS

Transformuotas Gauso pluoštas DOE faziniu plyšiu ir fazine kiauryme.

TYRIMO METODAI

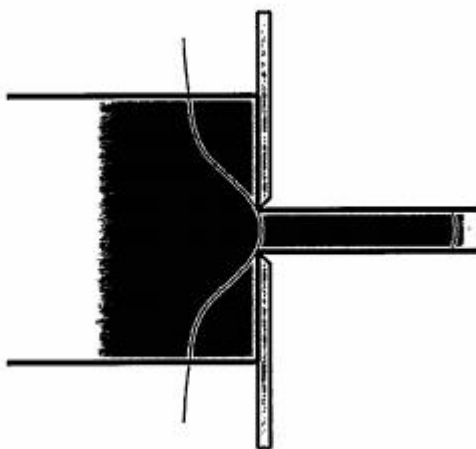
- Mokslinės literatūros analizė, leidusi pagrįsti difrakcinės optikos taikymą lazerių pluošto transformavime sampratą.
- Kompiuterinis modeliavimas taikant specializuotą, lazerio šviesos pluošto sklidimo, kompiuterinio modeliavimo Fresnel programinę įrangą.

1. LAZERIO PLUOŠTO TRANSFORMAVIMO METODŲ PRINCIPAI

Lazerio pluošto formavimo metodai gali būti suskirstyti į keturias grupes:

- 1) Trivialus metodas.
- 2) Šviesos pluošto formavimas asferiniu lęšio ar veidrodžio paviršiumi.
- 3) Šviesos integratorių metodas.
- 4) Difrakcinių optinių elementų (DOE) metodas.

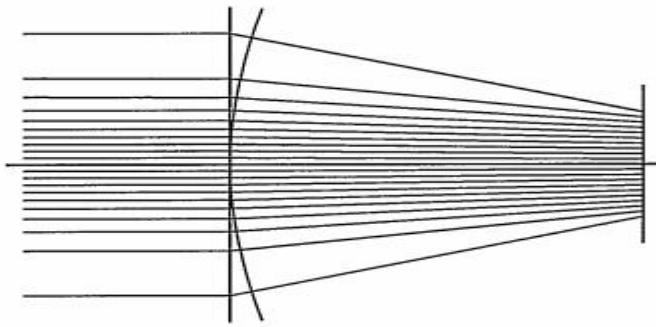
Pirmuoju metodu lazerio šviesos srauto pluoštas yra nukreipiamas į angą (1 pav.). Pluoštas yra išplečiamas, o anga panaudojama tam, kad išskirtų plokščią spindulio centro dalį. Šviesos pluošto intensyvumo nelygumas keičiamas reguliuojant angos dydį.



1 pav. Gauta vienoda apšvita po diafragmos įvesties (Dickey, 2000)

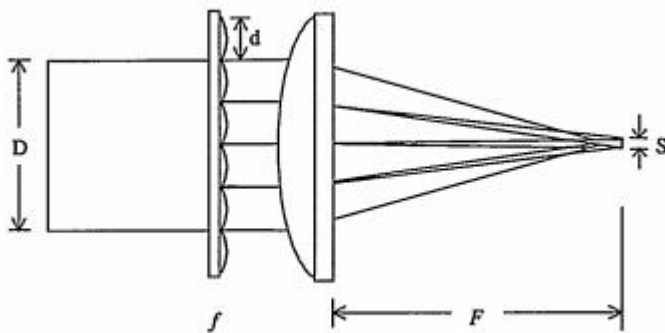
Pagrindinis šio metodo trūkumas tas, kas jis yra nuostolingas energijos atžvilgiu. Dėl to, kad didelė energijos dalis yra sugerama, o panaudojama tik centrinė spindulio dalis. Be to, jei įvesties spindulio intensyvumas nelygus, būna sudėtinga rasti tinkamą angos padėtį bei dydį. Tai savaime suprantama turi įtakos rezultatui. Tačiau, jei būtų siekiama įvesties pluošto formos homogenizavimo, šis metodas tiktų.

Antruoju metodu lazerio šviesos pluošto transformavimas pagrįstas asferiniu paviršiumi. Lazerio šviesos pluoštas sklinda per asferinį paviršių taip, kad šviesos centrinė pluošto dalis išlaiko pradinę sklaidimo kryptį, o einant į kraštus bei veikiant asferiniam paviršiui, šviesos pluošto kraštai užlinksta link centrinės dalies, taip padidindami intensyvumą centrinėje šviesos pluošto dalyje. Pagrindinė šio metodo schema pateikta 2 paveiksle. Šio metodo pagrindinis trūkumas tas, kad šviesos pluošto atvaizdų formavimas dažniausiai taikomas griežtai apibrėžtiems, vienos rūšies lazerio šviesos pluoštams, be to pagaminti asferinius paviršius sudėtinga ir brangu.



2 pav. Lazerio šviesos pluošto transformavimas asferiniu paviršiumi (Farn, 1994)

Trečias metodas, tai toks metodas, kurio metu naudojami šviesos integratoriai, dar žinomi kaip šviesos homogenizatoriai. Šio metodo schema pateikta 3 paveiksle. Ji sudaryta iš daug mažų lęšių, kurie yra išdėstyti matricos pavidalu bei vieno didelio lęšio, kuris transformuoja lazerio šviesos pluoštą. Sklindantis lazerio šviesos pluoštas patenka į mažus asferinius lęšius, kurie yra išdėstyti matricos pavidalu. Šie lęšiai sufokusuoja šviesos pluoštą ir nukreipia į didįjį lęšį. Šviesos pluoštas, praėjęs lęšį, sufokusuojamas į vienodo intensyvumo centrinį spindulį, kurio kraštai ir centrinė dalis turi vienodą šviesos intensyvumą.



3 pav. Pluošto integratorius (Dickey, 2000)

Ketvirtas metodas yra difracinių optinių elementų metodas. Jis yra perspektyvus lazerio šviesos pluošto transformavime, kadangi nereikalauja brangių technologijų gaminant difracinius optinius elementus medžiagų apdirbimui. Lazerio šviesos pluoštui naudinga turėti pluošto skersinio intensyvumo pasiskirstymą, kuris išlaikytų tą pačią intensyvumo vertę per visą, ar bent jau didesnę dalį pluošto pločio, tai yra plokščios viršūnės pluoštą. Lazerio šviesos pluošto, turinčio artimą Gauso skersinį intensyvumo skirstinį, transformacijai į plokščios viršūnės pluoštą, plačiausiai naudojami

asferinių lęšių geometrinės optikos elementai arba difrakciniai optiniai elementai – DOE (Tan ir kt., 2008).

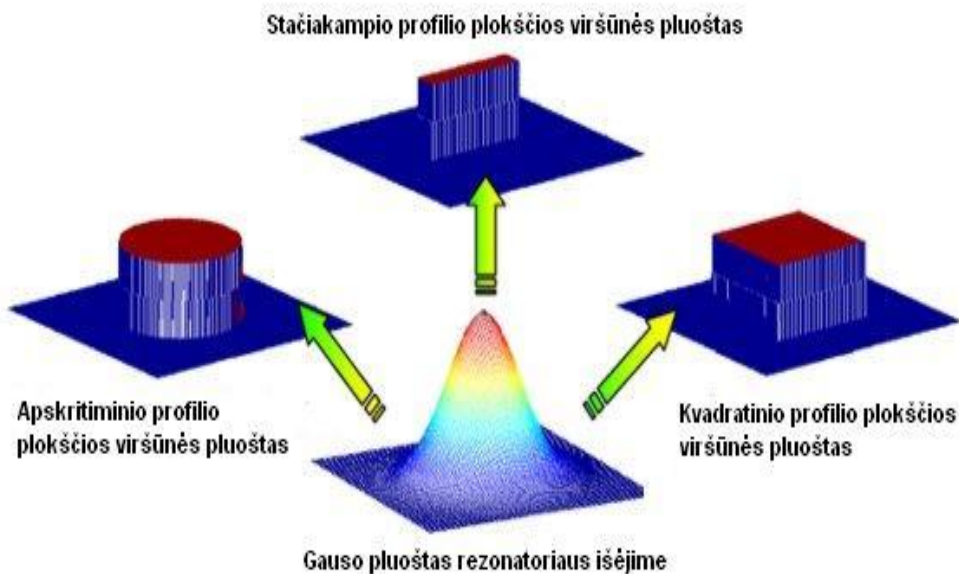
2. ŠVIESOS DIFRAKCIJA IR DIFRAKCINIAI OPTINIAI ELEMENTAI

Šviesos bangoms, kaip ir visoms kitoms bangoms, būdinga difrakcija.

Difrakcija (nuo lot. "diffringere", "skaidyti į dalis", "sklaidyti"), tai bet koks nuokrypis nuo bangų tiesaus sklidimo, nepaaiškinamas bangos atspindžiu arba lūžiu. Optikoje difrakcijos sąvoka yra susieta su banginėmis šviesos savybėmis ir nėra paaiškinama geometrinės optikos rėmuose. Klasikiniuose difrakcijos eksperimentuose buvo naudojami įvairių formų plyšiai. Šviesos difrakcija vis stipriau pasireiškėdavo plyšio matmenims artėjant prie šviesos bangos ilgio. Tuomet šviesa, sklisdama pro plyšį, nukrypėdavo nuo tiesaus kelio ir kuo daugiau, tuo plyšio matmuo buvo artimesnis bangos ilgiui. Analogiškai buvo stebėta šviesos difrakcija ties kliūtimi. Kuo artimesni kliūties matmenys šviesos bangos ilgiui, tuo šviesa labiau užlinksta į šešėlio sritį.

Difrakcija vyksta tuomet, kai sukuriama amplitudės ir/arba fazės pokytis bangos fronto paviršiuje (Полещук, 2007). Tokie pokyčiai atsiranda šviesos bangai sklidimo kelyje sutikus kliūtį. Ryškiausiai difrakcija pasireiškia tuomet, kai kliūties matmenys yra palyginami su šviesos bangos ilgiu. Difrakcija buvo paaiškinta Hiugenso ir Frenelio principo pagalba: šviesos bangos paviršius kiekvienu laiko momentu yra ne paprasta antrinių bangų gaubtinė, o tų bangų interferencijos rezultatas.

Šviesos difrakcijai vykti nebūtinai reikalingos kliūtys arba plyšiai. Koherentinių šviesos šaltinių, tokių kaip lazeris, spinduliuojama šviesa difraguoja savaime. Lazerio spinduliuotei yra būdinga sudėtinga erdvinė sandara, priklausanti nuo lazerinio rezonatoriaus simetrijos bei lazerinės generacijos sąlygų. Lazeris su skirtingais lazerinio rezonatoriaus išvadinais veidrodžiais, be lazerinių kaupinimų, spinduliuoja skirtingas lazerinės spinduliuotės skersines modas. Žemiausios eilės moda - Gauso pluoštas – yra lengviausiai sužadinama lazerio moda, turinti platų taikymą (Golub, 2004). Esminė Gauso pluošto savybė yra ta, kad jos neįmanoma sufokusuoti iki matmenų mažesnių nei bangos ilgis. Dėl šios priežasties, šiuolaikinėje optikoje, Gausinis pluoštas ir kitos lazerinio rezonatoriaus modos yra vadinami difraguojančiais spinduliais. Daugelio apdirbimui naudojamų lazerių šviesos pluoštų, skersinis intensyvumo profilis yra artimas Gauso profiliui. Tai reiškia, kad pluošto centre intensyvumas yra didžiausias, o slenkant į kraštus, pluošto intensyvumas mažėja (4 pav.).



4 pav. Lazero šviesos pluošto transformavimo problema (Golub, 2004).

Daugeliui taikymų, tokio skersinio profilio pluoštas yra netinkamas ir jis turi būti transformuotas. Šiam tikslui gali būti naudojamos lęšių, veidrodžių ir kitų asferinės geometrinės optikos elementų sistemos (Golub, 2004). Šių sistemų trūkumas tas, jog yra brangi gamyba ir sudėtingas derinimas.

Vis sparčiau tobulėjant kompiuteriams ir skaičiavimo metodams, galima išspręsti vis sudėtingesnius difrakcinės optikos uždavinius, suprojektuoti ir pagaminti naujus difrakcinės optikos principais paremtus šviesos pluoštų transformavimo prietaisus, kurie supaprastintų optines sistemas iki vieno optinio elemento. Tie optiniai elementai vadinami difrakciniais optiniais elementais arba tiesiog DOE (Herzig, 1997). Panaudojant DOE galima gauti prietaisus, kuriais galėtume pagauti dalelę ir perkelti iš vienos vietos į kitą. Toks prietaisas vadinamas optiniu pincetu. Lazero spinduliuotės sufokusuoto pluošto intensyvumas pasiskirsto pagal Gauso dėsnį. Lazero pluošto maksimumas būna pačiame šviesos pluošto centre, o stūmos jėga tarsi įkalina dalelę ties pluošto ašimi. Kadangi, intensyviausia lazero generuojamo pluošto dalis yra jo optinėje ašyje, galima sakyti, kad jėga stumia dalelę skaisčiosios dėmės link, ir ji tarsi patenka į trimatę gaudyklę. Kad gaudyklėje susiformuotų dalelei išlaikyti reikalinga jėga, didelės lazero spinduliuotės galios nereikia (paprastai užtenka vos kelių milivatų) (Soifer, 2001). Kita vertus pluošto intensyvumas statmenai sklidimo krypties turi būti didelio gradiento. Todėl, pluoštas turi būti sutransformuotas į tašką, kurio skersmuo – vos keli milimetrai.

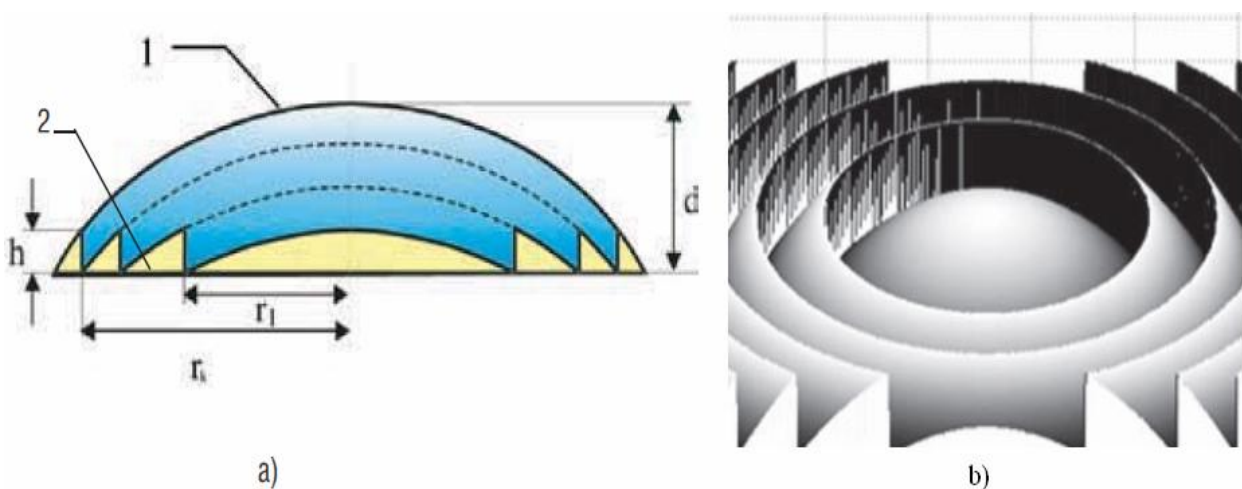
Optinis pincetas yra išties galingas medžiagų tyrimo įtaisas, tačiau vis dėlto jo galimybės ribotos. Vienas šių trūkumų atsiranda dėl smarkiai transformuojamo lazero pluošto, siekiant, kad

dalelė įstrigtų gaudyklėje. (Dickey, 2001). Tačiau, kuo geriau transformuotas šviesos pluoštas, tuo staigiau į šonus nuo spinduliavimo ašies mažėja jo intensyvumas, vadinasi jėga laikanti dalelę gaudyklės srityje už jos ribų, labai staigiai mažėja. Iš tikrųjų kelių dešimčių mikronų atstumu nuo pluošto ašies, jėga jau nebepajėgia dalelės lokalizuoti erdvėje, todėl lazerio spinduliuotės pluošto gaudyklėje galėtų įstrigti tik viena, ganėtinai mažų matmenų dalelė (Tan, 2008).

Tačiau, vienas iš svarbesnių lazerio pluošto transformavimo uždavinių yra transformuoti Gauso pluoštą į plokščios viršūnės, apskrito arba stačiakampio skerspjūvio pluoštą.

Lazerio pluoštas gali būti pritaikytas daugelyje sričių: medžiagų suvirinime, įvairiam medžiagos apdirbimui ir kt. Plokščios viršūnės pluoštas gali būti sąlyginai nesudėtingai gautas naudojant difrakcinius optinius elementus. Tačiau DOE, su tolydiniu ar laiptuotu profiliu projektavimas (Fienup, 1993) ir gamyba yra pakankamai brangi ir sudėtinga, kadangi reljefo aukštis neviršija šviesos bangos ilgio. O tai reiškia, kad visa paviršiaus mikrostruktūros paklaida turi būti dešimčių, o norint gauti ypatingai gerą tikslumą, net ir kelių nanometrų eilės. Kuriant DOE skirtus transformuoti Gauso pluoštą į plokščios viršūnės pluoštą, galima gauti gerų rezultatų naudojant vadinamus binarinius DOE su daug paprastesniu mikroreljefu (Yang, 2003). Binariniai difrakciniai optiniai elementai – tai tokie DOE, kurių fazinio pralaidumo funkcijoje yra tik du lygmenys. Kitaip sakant, binarinių difrakcinių optinių elementų fazės funkcija visame paviršiuje turi tik dvi reikšmes. Nesudėtinga binarinių optinių elementų mikroreljefo struktūra, leidžia pagaminti tokius elementus naudojant paprastesnes technologijas, nei laiptuotų DOE gamybai reikalingos technologijos (Волков, 2000). Todėl, atsiranda potencialas tokių elementų tyrimams.

Sudėtingesnio DOE pavyzdys būtų difrakcinis lęšis. Lęšis skirtas šviesos fokusavimui ir objektų vaizdų gavimui, dėl geometrinių ir banginių šviesos pluoštų fokusavimo.

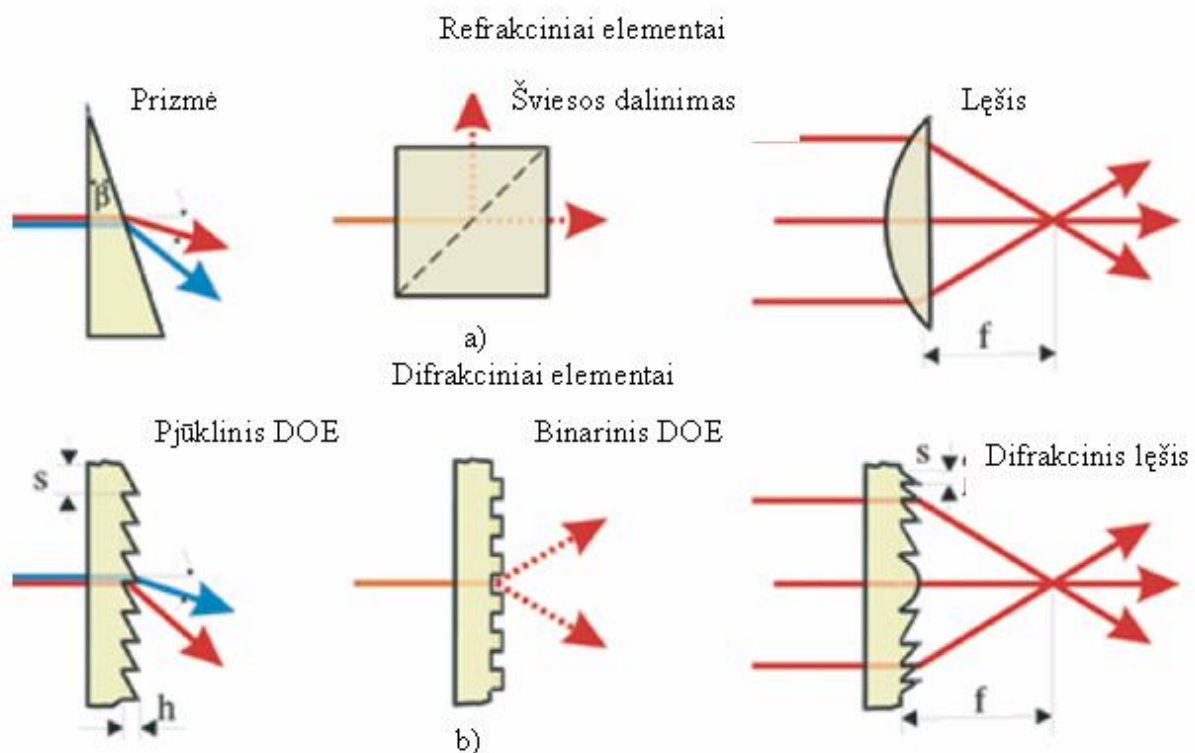


5 pav. Transformacija plokščiai iškilo lęšio į difrakcinį lęšį a) ir jo trimatis modelis b) (Полещук, 1998).

5 a paveiksle pavaizduotas paprastas, plokščiai išgaubtas lęšis 1, ir jį atitinkanti difrakcinė struktūra 2. Ji gaunama lęšį padalinus į plonus sferinius vienodo storio sluoksnius (brūkšniuotas linijas). Sluoksnių skersmuo lygus kreivės skersmeniui lęšio asferiniams paviršiams, o jo storis išreikštas dydžiu:

$$h = \frac{N \cdot \lambda}{n - 1} \quad (1)$$

1 formulėje λ - šviesos bangos ilgis, N - sveikas skaičius, n - lęšio lūžio rodiklis. 5 a paveiksle pateiktas pavyzdys, kur parodyti keturi sluoksniai. Jei lęšis turi pavyzdžiui, $d = 5 \text{ mm}$, tai esant $\lambda = 0.5 \text{ mkm}$, $n = 1.5$ (stiklas) ir $k = 1$, sferinių sluoksnių storis 1 mkm skaičius bus lygus 5000. Skirtingus sluoksnius galima sujungti į pakopinę struktūrą 2 linijomis, paralelinėmis optiniai ašiai. Gauta struktūra 2 vadinama zonine plokštele arba difrakciniu lęšiu. Tai labai svarbus ir ypatingai naudingas difrakcinis lęšis, kadangi jo labai mažas storis. Pateiktame pavyzdyje ji sudaro 1 mkm. Esant vienodai laužiamajai gebai, optinei jėgai, storis difrakcinių lęšių gali būti 1000 kartų mažesnis nei klasikinių.



6 pav. Šviesos spindulių transformacija a) refrakciniais ir b) difrakciniais elementais (Полещук, 1998).

6 paveiksle parodyti kitokie DOE ir jų refrakciniai analogai.

Pilnai šviesos difrakcijos reiškinį, remdamasis Huygenso principu (http://lt.wikipedia.org/wiki/Huigenso_ir_Frenelio_principas/) paaikšino Frenelis, suformuluodamas pagrindinius du principus:

1. Visi bangos fronto paviršiaus taškai yra antrinių bangų sferiniai šaltiniai.
2. Šviesos laukas visuose tolimesniuose taškuose yra lemiamas šių sferinių šaltinių šviesos interferencijos.

Galime suformuluoti tokį difrakcinių optinių elementų apibrėžimą: *DOE – tai toks optinis prietaisas, kuris pakeičia šviesos bangos amplitudę arba fazę srityse, kurių matmenys artimi šviesos bangos ilgiui*. DOE skirstomi į amplitudinius, fazinius ir amplitudinius – fazinius (Farn, 1994). Faziniai difrakciniai optiniai elementai yra perspektyvesni, kadangi amplitudiniuose DOE suformuojamos šviesai nelaidžios arba dalinai laidžios kliūtys, dėl ko, ne visą DOE pasiekusi šviesos energija pro ją praeina – atsiranda energijos nuostolių. Kadangi, faziniai difrakciniai optiniai elementai keičia tik bangos fazę, todėl energijos nuostolių nėra arba jie labai maži. Faziniai DOE gaminami iš šviesai laidžių medžiagų. Jų paviršiuje suformuojamos mikrostruktūros, kurių matmenys artimi šviesos bangos ilgiui. Dėl to, šviesai sklindant pro šias struktūras, pasireiškia stipri difrakcija (Farn, 1994).

Pilnai aprašyti DOE galima naudojantis jo fazės funkcija. Tokiai funkcijai aprašyti užtenka žinoti bangos ilgį λ , medžiagos iš kurios gaminamas DOE lūžio rodiklį n ir mikroreljefo funkciją $h(r)$ (Golub, 2004), kuri priklauso nuo mikroreljefo aukščio r .

$$\varphi(r) = \frac{2\pi}{\lambda}(n-1)h(r) \quad (2)$$

Dažniausiai funkcijos $\varphi(r)$ reikšmių kitimo sritis priklauso intervalui $[0;2\pi]$. Tai reiškia, kad tokio mikroreljefo aukštis turi būti ne didesnis, kaip bangos ilgis (Грейсх, 2010).

2.1. Fraunhoferio difrakcija

Sferinės bangos difrakcija, kuri formuoja difrakcinį vaizdą taške esantį baigtiniame atstume nuo kliūties, buvo pavadinta Frenelio difrakcija (Lansbergas, 1955). Difrakcijos taikymuose yra labai svarbi Fraunhoferio difrakcija. Ji taikoma nagrinėjant daugelį klausimų susijusių su optinių prietaisų veikimu. Tai pat, naudojantis Fraunhoferio difrakcijos dėsniais, buvo suprojektuoti binariniai difrakciniai optiniai elementai. Frenelio difrakcijos stebėjimui yra reikalingos ganėtinai

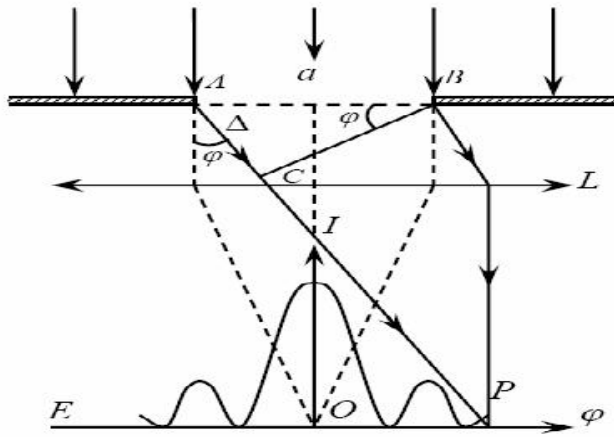
paprastos sąlygos. Užtenka šviesos šaltinio ir kliūtis, kurios matmenys būtų artimi šviesos bangos ilgiui.

Norint stebėti Fraunhoferio difrakciją, reikia sukurti tam tikras sąlygas. Būtina sąlyga Fraunhoferio difrakcijai stebėti – šviesos spinduliai einantys pro kliūtį, turi būti lygiagretūs vienas kitam.

Sąlygas artimas Fraunhoferio difrakcijos sąlygoms, galima sudaryti lęšio židinyje pastačius mažą šviesos šaltinį ir antruoju lęšiu surinkus šviesą tam tikrame taške ant ekrano, kuris įtaisomas lęšio židinio plokštumoje. Šis taškas bus šaltinio atvaizdas. Įstatydami tarp lęšių ekranus su įvairaus didumo ir formos angomis, galime pakeisti pobūdį difrakcinio vaizdo, kuris yra mūsų šaltinio atvaizdas. Įstatydami tarp lęšių ekraną su įvairaus pobūdžio angomis, sukuriame tokias sąlygas, kad į ekrano plyšį krenta plokščioji banga, kurios radiusas yra lygus begalybei (visi šviesos pluoštai yra lygiagretūs). Priklausomai nuo angų formos ir didumo, dalis šviesos eis skirtingomis kryptimis ir bus surenkama įvairiose ekrano vietose. Norint pilnai išspęsti difrakcijos uždavinį, reikia rasti šviesos pluošto pasiskirstymą, kuris priklauso nuo difrakciją sukeliančių kliūčių matmenų ir formos. Fraunhoferio difrakcijos taikymuose svarbiausi atvejai yra tokie, kaip pavyzdžiui anga, kuri sukelia difrakciją, yra stačiakampio ir apskritimo formos.

2.2. Difrakcija už plyšio

Tarkime, kad plokščia banga krinta į begalo ilgą (plyšio ilgis daug didesnis už jo plotį a) plyšį. Difrakcinis vaizdas susidaro glaudžiamojo lęšio L židinio plokštumoje esančiame ekrane E . Lęšis surenka į vieną juostą, vienodu kampu užlinkusius lygiagrečius spindulius. Ekrano centre O visada šviesu. Šviesu ar tamsu bet kurioje kitoje ekrano vietoje P , priklauso nuo to, kiek Frenelio zonų žiūrint iš šio taško, telpa plyšyje. Iš gretimų zonų kraštų išėjusių bangų eigos skirtumas lygus $\lambda/2$.



7 pav. Fraunhoferio difrakcija (Požėla, 2003).

Tada difragavusių kraštinių spindulių eigos skirtumas:

$$\Delta = N \cdot \frac{\lambda}{2} \quad (3)$$

Jį dar galima užrašyti taip:

$$\Delta = a \sin \varphi \quad (4)$$

N – plyšyje telpančių Frenelio zonų skaičius. Jei $N = 2k$ ($k = 1, 2, 3, \dots$), tai šia kryptimi zonos poromis gesins viena kitą ir minimumų sąlygos bus tokios:

$$a \sin \varphi = \pm k\lambda \quad (5)$$

Jei $N = 2k + 1$, tai šia kryptimi lieka nesukompensuota viena zona, o maksimumų sąlygos bus tokios:

$$a \sin \varphi = \pm (2k + 1) \frac{\lambda}{2} \quad (6)$$

Centrinio maksimumo kampinis plotis:

$$\Delta \varphi = 2 \arcsin \frac{\lambda}{a} \quad (7)$$

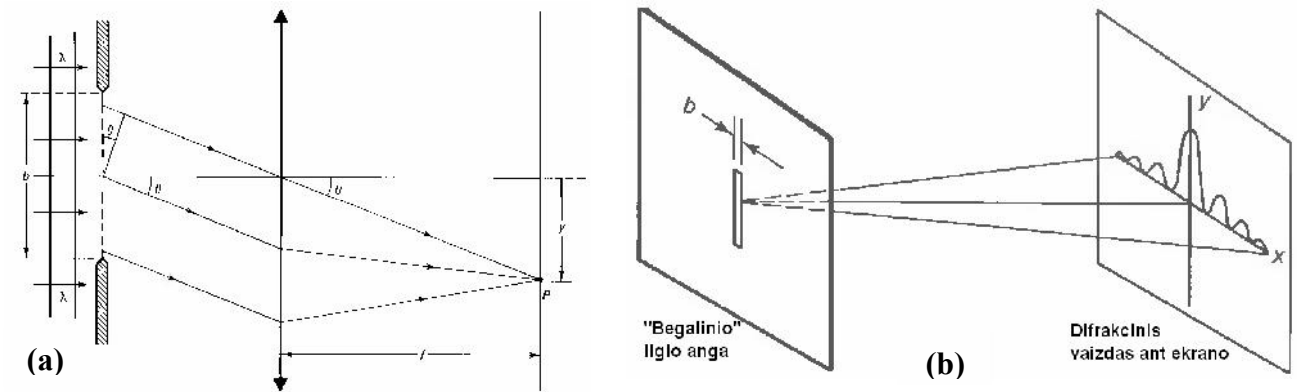
Pastarasis didėja, siaurėjant plyšiui. Jei $a \leq \lambda$, ekrane apšviestumas nuo centro į kraštus monotoniškai mažėja. Difrakcinio vaizdo dydis gali ženkliai viršyti plyšelio (kliūties) matmenis, todėl šiuo optiniu metodu galima išmatuoti labai plonų siūlų ar vielos storį.

Apibrėžiame kam yra lygus šviesos intensyvumas lęšio židinio plokštumoje, kai plokščioji banga krenta į begalinio ilgio ir nedidelio pločio b angą (8 pav.). Sprendžiant tokį uždavinį pakanka,

kad angos ilgis būtų keliolika kartų didesnis už plotį. Šviesos intensyvumas (Lauterborn, 2003) ant ekrano bus išreiškiamas sąryšiu:

$$I = I_0 \frac{\sin^2(\beta)}{\beta^2} \equiv I_0 \operatorname{sinc}^2(\beta), \text{ kur } \beta = \frac{1}{2}(kb \sin \theta) \quad (8)$$

$$k \equiv \frac{2\pi}{\lambda} - \text{bangos skaičius} \quad (9)$$



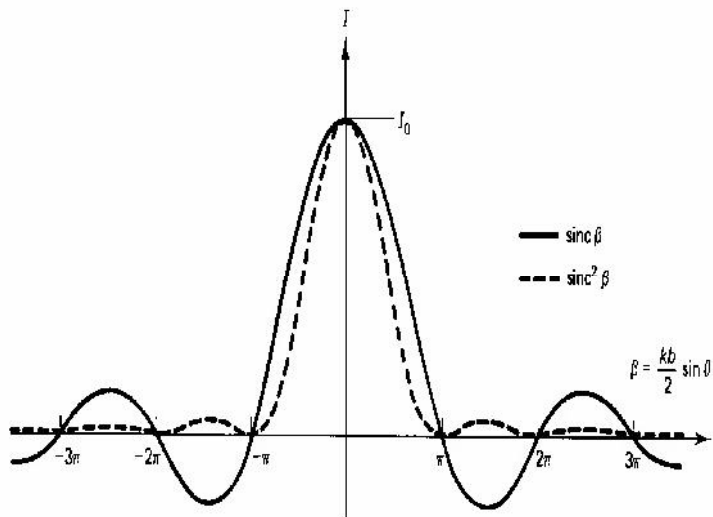
8 pav. (a) Fraunhoferio difrakcijos schema už „begalinio“ ilgio angos; (b) difrakcija už „begalinio“ ilgio plyšio (Jame, 2003).

Difrakcinio minimumo sąlyga išpildoma, kai $\beta = \pi m$, kur $m = \pm 1, \pm 2, \pm 3 \dots$ sveiki skaičiai.

Kai $m = 0$, tuomet $\theta = \beta = 0$, ir funkcijai $\operatorname{sinc}(\beta)$ galioja riba.

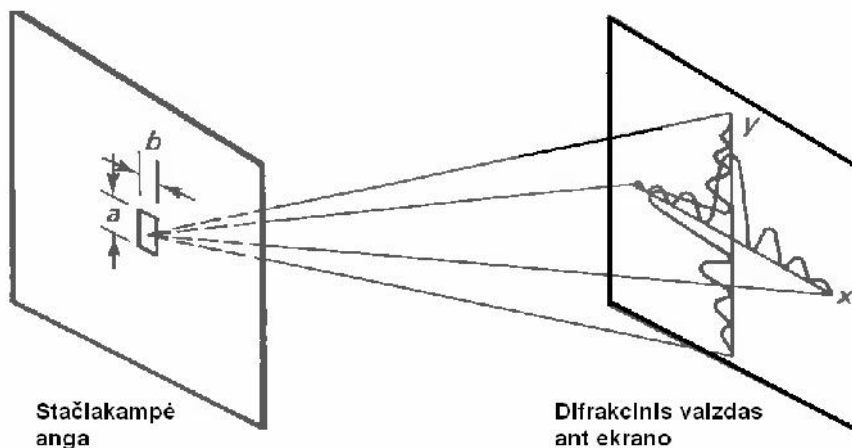
$$\lim_{\beta \rightarrow 0} \operatorname{sinc}(\beta) = \lim_{\beta \rightarrow 0} \left(\frac{\sin(\beta)}{\beta} \right) = 1 \quad (10)$$

Kai kampas θ ir y yra lygus nuliui, toje srityje yra stebimas centrinis difrakcijos maksimumas. Pateiktas amplitudės ir intensyvumo funkcijos grafikas (9 pav.).



9 pav. Amplitudės ir intensyvumo funkcijos grafikas (Jame, 2003).

Kai plyšio plotis ir ilgis yra panašių matmenų, tuomet Fraunhoferio difrakcija vyksta už stačiakampio plyšio (10 pav.).



10 pav. Fraunhoferio difrakcija už stačiakampės angos (Jame, 2003).

Difrakcijos už plyšio, kurio plotis a , įtaka šviesos pluošto intensyvumui ant ekrano užsirašo sekančiai:

$$I = I_0 \frac{\sin^2(\alpha)}{\alpha^2} \equiv I_0 \text{sinc}^2(\alpha) \quad (11)$$

$$\alpha = \frac{1}{2}(ka \sin \theta) \quad (12)$$

Šviesos pluošto intensyvumas ant ekrano, kuomet difrakcija vyksta už stačiakampio plyšio, yra apibrėžiamas taip:

$$I = I_0 \text{sinc}^2(\alpha) \cdot \text{sinc}^2(\beta) \quad (13)$$

Projektuojant binarinius elementus, kurie transformuotų lazerio šviesos pluoštą, svarbu žinoti kam yra lygus šviesos elektrinio lauko amplitudės pasiskirstymas lęšio židinio plokštumoje, kai Fraunhoferio difrakcija vyksta už apskritimo formos plyšio, kurio diametras lygus D . Tuomet intensyvumas ant ekrano yra užrašomas:

$$I = I_0 \left(\frac{2J_1(\gamma)}{\gamma} \right)^2 \quad (14)$$

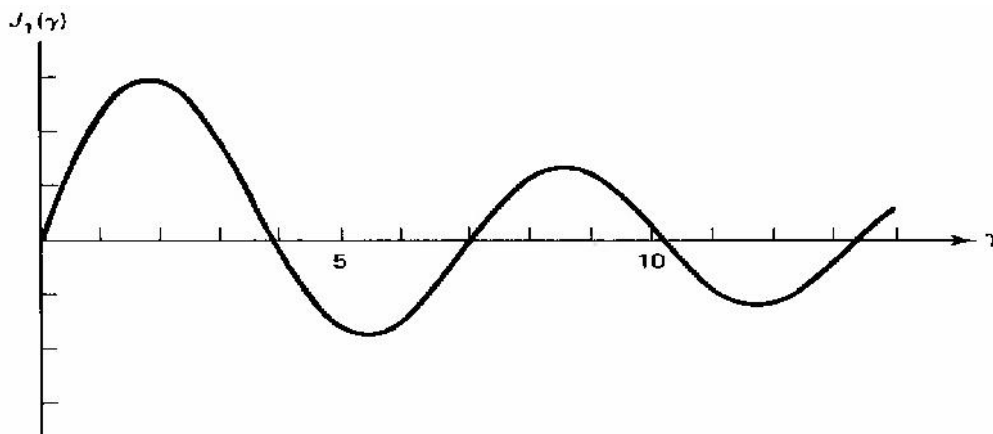
$$\gamma = \frac{1}{2} kD \sin \theta \quad (15)$$

$J_1(\gamma)$ yra pirmos rūšies, pirmos eilės Beselio funkcija

(http://lt.wikipedia.org/wiki/Beselio_funkcija), išreikšta begaline eilute:

$$J_1(\gamma) = \frac{\gamma}{2} - \frac{\left(\frac{\gamma}{2}\right)^3}{1^2 \cdot 2} + \frac{\left(\frac{\gamma}{2}\right)^5}{1^2 \cdot 2^2 \cdot 3} - \dots \quad (16)$$

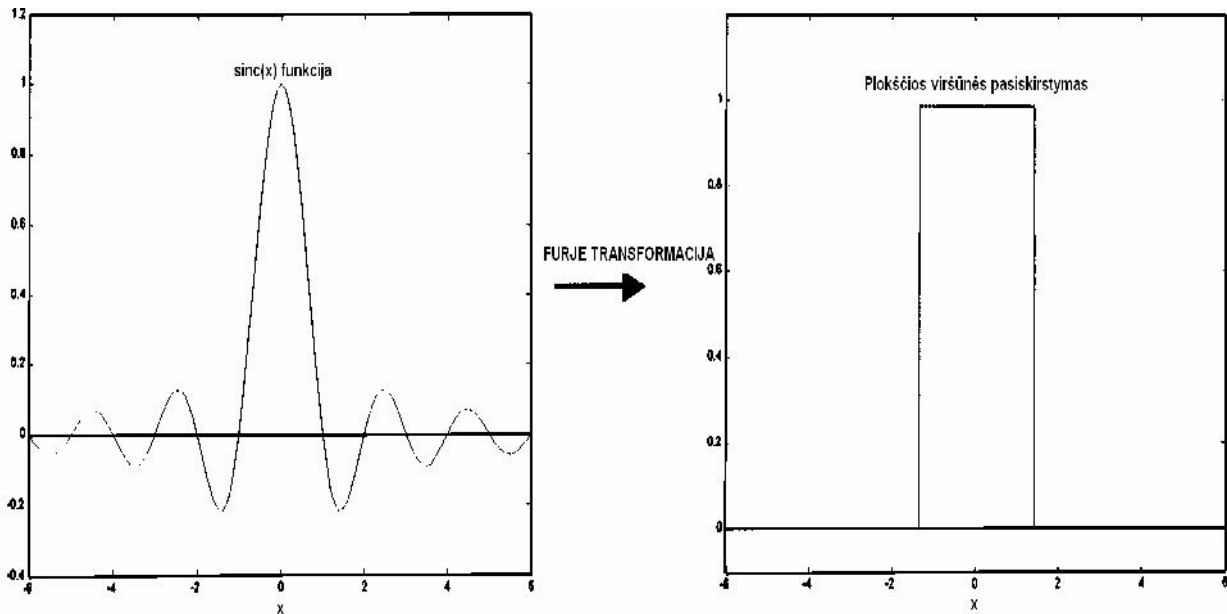
Šios funkcijos grafikas pateiktas 11 paveiksle.



11 pav. Pirmos rūšies, pirmos eilės Beselio funkcija lygi nuliui, kai pirmoji šaknis ir antroji šaknis atitinkamai lygios $\gamma_1 = 3.8317$ ir $\gamma_2 = 7.0156$.

2.3. Vienos zonos binarinių elementų veikimo principas

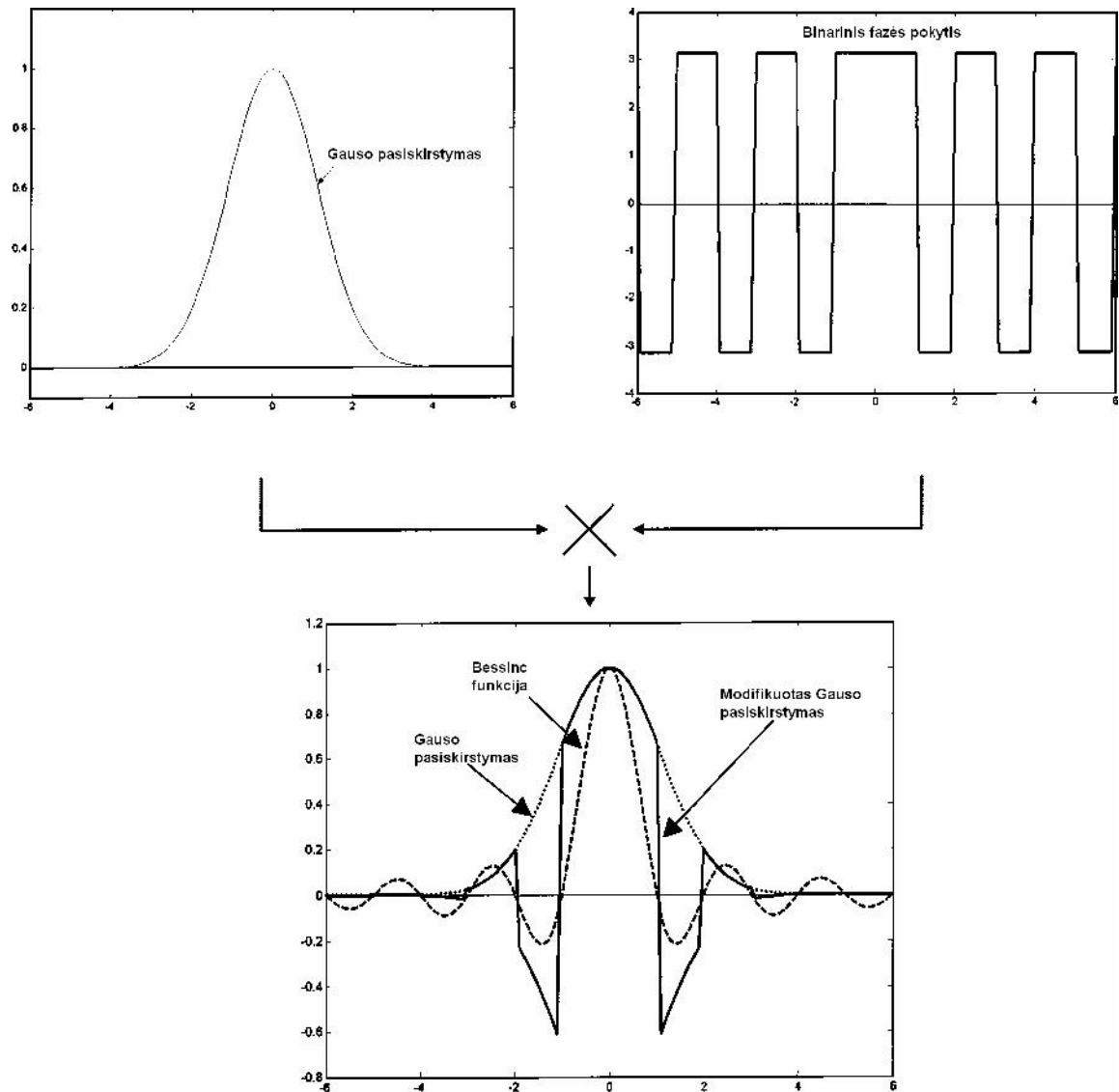
Atlikus Furje transformaciją funkcijai $\text{sinc}(x)$ vienmačiu arba dvimačiu atveju, funkcijai $\text{Bessinc}(\gamma)$ (kur $\text{Bessinc}(\gamma) = \frac{J_1(\gamma)}{\gamma}$), visada gausime plokščios viršūnės pasiskirstymą. Principinė schema pavaizduota 12 paveiksle.



12 pav. Furje transformacija funkcijai $\text{sinc}(x)$ (Yang, 2003).

Kaip matome, funkcijos $\text{sinc}(x)$ skirstinys yra panašus į Gauso skirstinį. Atlikus Furje transformaciją, funkcijai $\text{sinc}(x)$ gauname plokščios viršūnės pasiskirstymą. Taigi, naudojant difracinius optinius elementus Gauso skirstinį galėtume padaryti kiek įmanoma panašesniį į funkciją $\text{Bessinc}(\gamma)$. Tuomet, tokią funkciją paveikę Furjė transformacija, galėtume tikėtis gauti tą patį plokščios viršūnės pasiskirstymą.

Vienas iš paprastesnių metodų yra Gauso skirstinį modifikuoti į $\text{Bessinc}(\gamma)$ funkcijos skirstinį, panaudojant binarinius difracinius elementus. Visų pirma, Gauso skirstinį sugretiname su funkcija $\text{Bessinc}(\gamma)$ ir tose srityse, kur funkcija $\text{Bessinc}(\gamma)$ yra neigiama, Gauso skirstinio amplitudės fazę pakeičiame per π . Taip Gauso pluošto amplitudė tose vietose tampa neigiama ir toks Gauso pluošto skirstinio modifikavimas jį paverčia šiek tiek panašų į funkcijos $\text{Bessinc}(\gamma)$ skirstinį. Supaprastinta schema pateikta 13 paveiksle.



13 pav. Gauso skirstinio modifikavimo schema (Yang, 2003).

Iš 13 paveikslo matyti, kad modifikuotas Gauso skirstinys yra panašus į Bessinc(γ) funkcijos skirstinį.

Kaip yra žinoma, Furjė transformaciją geometrinėje optikoje atlieka plonasis lęšis (http://web.vu.lt/ff/v.pyragaite/brm/konspektai/text_07_frenel.pdf), todėl toks modifikuotas pluoštas sklisdamas per plonąjį lęšį, turėtų transformuotis į plokščios viršūnės pluoštą lęšio židinio plokštumoje. Kaip matome iš 13 paveikslo, labiausiai Gauso pluošto amplitudės fazė yra keičiama toje srityje, kur funkcija Bessinc(r) turi pirmąsias dvi šaknis: γ_1 ir γ_2 . Ties trečiąja ir ketvirtąja šaknimi, kur funkcija Bessinc(γ) turi neigiamas reikšmes, Gauso skirstinio amplitudė pasikeičia ir įgyja neigiamas reikšmes. Žvelgiant į bendrą Gauso skirstinio reikšmių sritį matome, kad toje srityje Gauso skirstinio reikšmės keičiasi labai mažame reikšmių intervale.

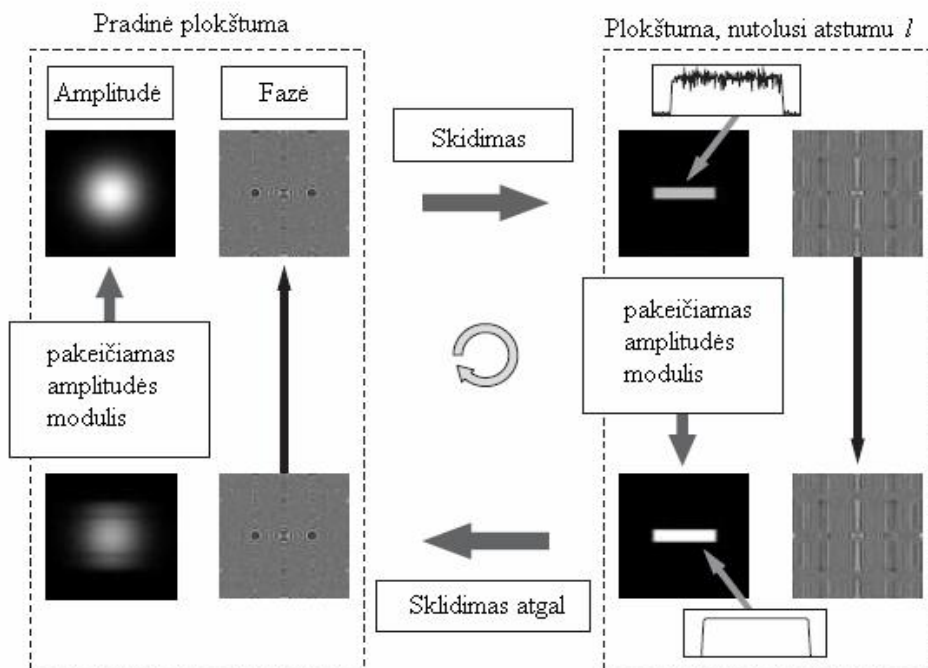
Taigi, toje srityje galime nemodifikuoti Gauso pluošto ir palikti jį tokį, koks jis yra. Keičiame Gauso pluošto amplitudę tik toje srityje, kur funkcija $Bessinc(\gamma)$ įgyja neigiamas vertes, tarp γ_1 ir γ_2 . Norėdami tai padaryti, turime suformuoti tokį DOE, kuris toje vienoje zonoje keistų Gauso amplitudės fazę per pusę bangos ilgio. Tokie, paprastos struktūros DOE yra vadinami vienos zonos binariniais difrakciniais elementais.

3. DOE FAZĖS PROFILIO SKAIČIAVIMO METODŲ APŽVALGA

Pagrindinis uždavinys, kuris sprendžiamas transformuojant pluoštą DOE, tai tinkamo DOE fazinio profilio parinkimas.

Toliau darbe aptarsime DOE fazinio pralaidumo profilio parinkimui taikomus algoritmus ir šiais algoritmais gautus profilio skaičiavimo ir pluoštų transformavimo DOE modeliavimo rezultatų pavyzdžius.

1. Plačiai naudojami iteraciniai algoritmai, DOE fazinio pralaidumo profilio skaičiavimuose. Aptarsime du pagrindinius algoritmus: GS (Gerchberg – Saxton) ir AA (Adaptive - Additive) (Soifer, 2001). GS algoritmas, tai iteracinis algoritmas, kuris naudojamas fazės rekonstrukcijos uždaviniuose, kai žinomas pradinis ir galutinis šviesos pluošto intensyvumo pasiskirstymas. Algoritmo schema pateikiama 14 paveiksle.



14 pav. GS algoritmo schema (Soifer, 2001).

Pagrindiniai GS algoritmo žingsniai yra :

1) Skaičiuojamas pradinio amplitudinio pasiskirstymo pluošto su atsitiktine ar pastovia faze sklidimas iki plokštumos, kurioje norima gauti plokščios viršūnės pasiskirstymo pluoštą. Skaičiavimai atliekami pagal tokią formulę:

$$OUT'(x, y, z = l) = F^{-1} \left[F \left[IN(x, y, z = 0) \exp(i\varphi(x, y, z = 0)) \right] H(k_x, k_y, z = l) \right] \quad (17)$$

2) Gautas amplitudės pasiskirstymas pakeičiamas pageidaujamu, o fazė nekeičiama. Tuomet skaičiavimus atliekame remdamiesi sekančia išraiška:

$$OUT''(x, y, z = l) = OUT(x, y, z = l) \frac{OUT'(x, y, z = l)}{|OUT'(x, y, z = l)|} \quad (18)$$

3) Skaičiuojamas pluošto sklidimas atgal į pradinę plokštumą, pagal formulę:

$$IN'(x, y, z = 0) = F^{-1} \left[F \left[OUT'(x, y, z = l) \right] H(k_x, k_y, z = -l) \right] \quad (19)$$

4) Gautas amplitudės pasiskirstymas vėl pakeičiamas pradiniu, o fazė paliekama nepakeista:

$$IN''(x, y, z = 0) = IN(x, y, z = 0) \frac{IN'(x, y)}{|IN'(x, y)|} \quad (20)$$

Algoritmo formulėse pažymėta pradinio pluošto amplitudė $IN(x, y)$, pageidaujama amplitudė $OUT(x, y)$, atstumas išilgai optinės ašies tarp pradinės ir Furjė plokštumų l , tiesioginė Furjė transformacija F , atvirkštinė – F^{-1} (Tan ir kt., 2008).

AA algoritmas yra analogiškas GS algoritmui, tik amplitudė antrame žingsnyje yra suformuojama kaip gautos ir pageidaujamos amplitudžių tiesinė kombinacija:

$$OUT''(x, y, z = l) = \left| \lambda \cdot OUT(x, y, z = l) + (1 - \lambda) OUT'(x, y, z = l) \right| \frac{OUT'(x, y, z = l)}{|OUT'(x, y, z = l)|} \quad (21)$$

Kad AA iteracijos konverguotų, konstanta turi būti $0 \leq \lambda \leq 2$.

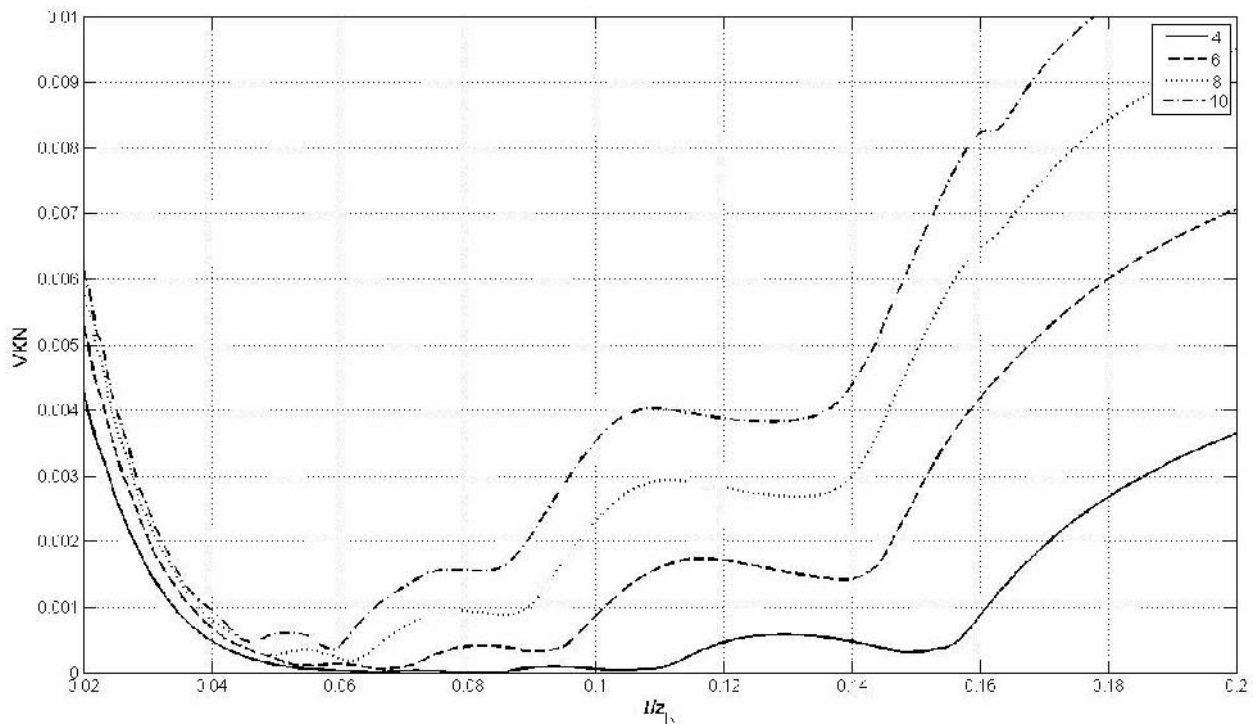
Iteracijų konvergavimo ir skaičiavimo tikslumo kontrolei įvertinti naudojamas vidutinis kvadratinis nuokrypis (VKN):

$$VKN = \frac{1}{N^2} \sum \left(|OUT(x, y, z = l)|^2 - |OUT''(x, y, z = l)|^2 \right)^2 \quad (22)$$

DOE su GS algoritmu, apskaičiuotu fazinio pralaidumo profiliu, tiksliai transformuoja Gauso pluoštą į Hyper-Gauso profilio pluoštą.

Vienintelis algoritmo trūkumas tas, kad transformuotas profilis su mažais iškreipimais (mažu VKN) gaunamas tik esant tam tikram atstumui už DOE, kur siekiama gauti pageidaujamo

intensyvumo profilio pluoštą. Kaip parodyta 15 paveiksle, šis atstumas esant skirtingiems Hyper-Gauso laipsniams, yra skirtingas.

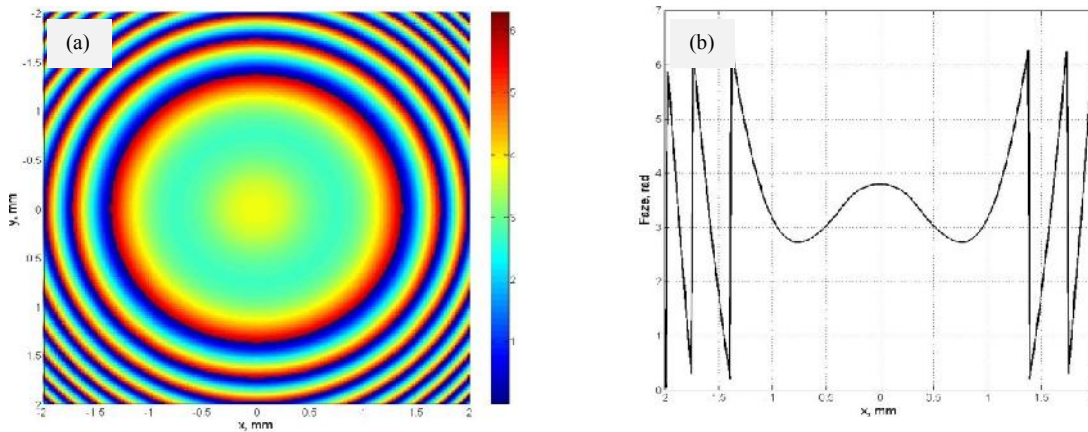


15 pav. VKN priklausomybė nuo atstumo l , išreikšto Relėjaus ilgiais, esant šiems Hyper-Gauso laipsniams: 4, 6, 8 ir 10 (Soifer, 2001).

Apskaičiuotas DOE fazės profilis, žemiau lentelėje pateiktoms parametrų vertėms:

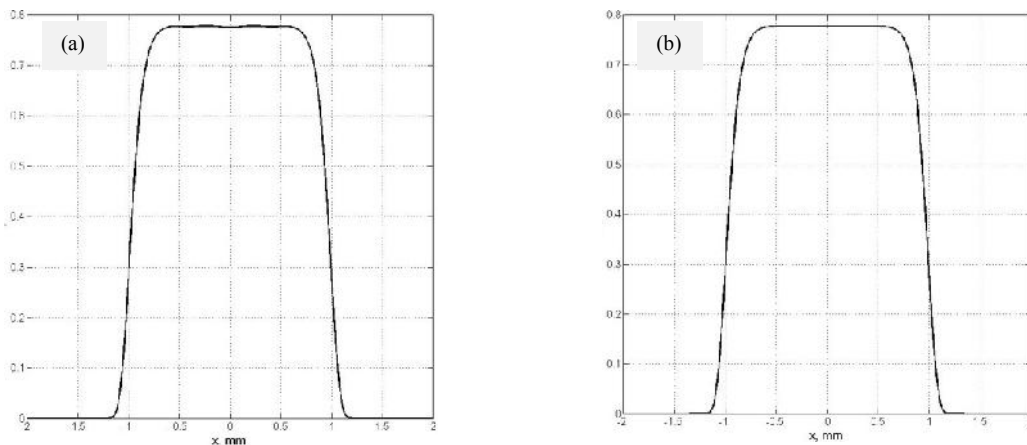
w_0	1 mm	Pradinio lazerio pluošto pusplotis
λ	1064 nm	Lazerio pluošto bangos ilgis
w	1 mm	Pageidaujamo pluošto pusplotis
l	197.8 mm	Atstumas už DOE, kuriame norima suformuoti Hyper-Gauso profilio pluoštą

DOE fazinio pralaidumo profilis gautas GS algoritmu pateiktas 16 paveiksle.



16 pav. DOE fazinio pralaidumo profilis, gautas GS algoritmu: (a) skersinis profilis, (b) išilgai koordinatės x . (Soifer, 2001).

DOE su 16 paveiksle pavaizduotu fazės profiliu transformuoto šviesos pluošto intensyvumo skirstinys, pateiktas 17 paveiksle. Matyti, kad ašinės simetrijos šviesos pluoštui gaunamas labai tikslus rezultatas.

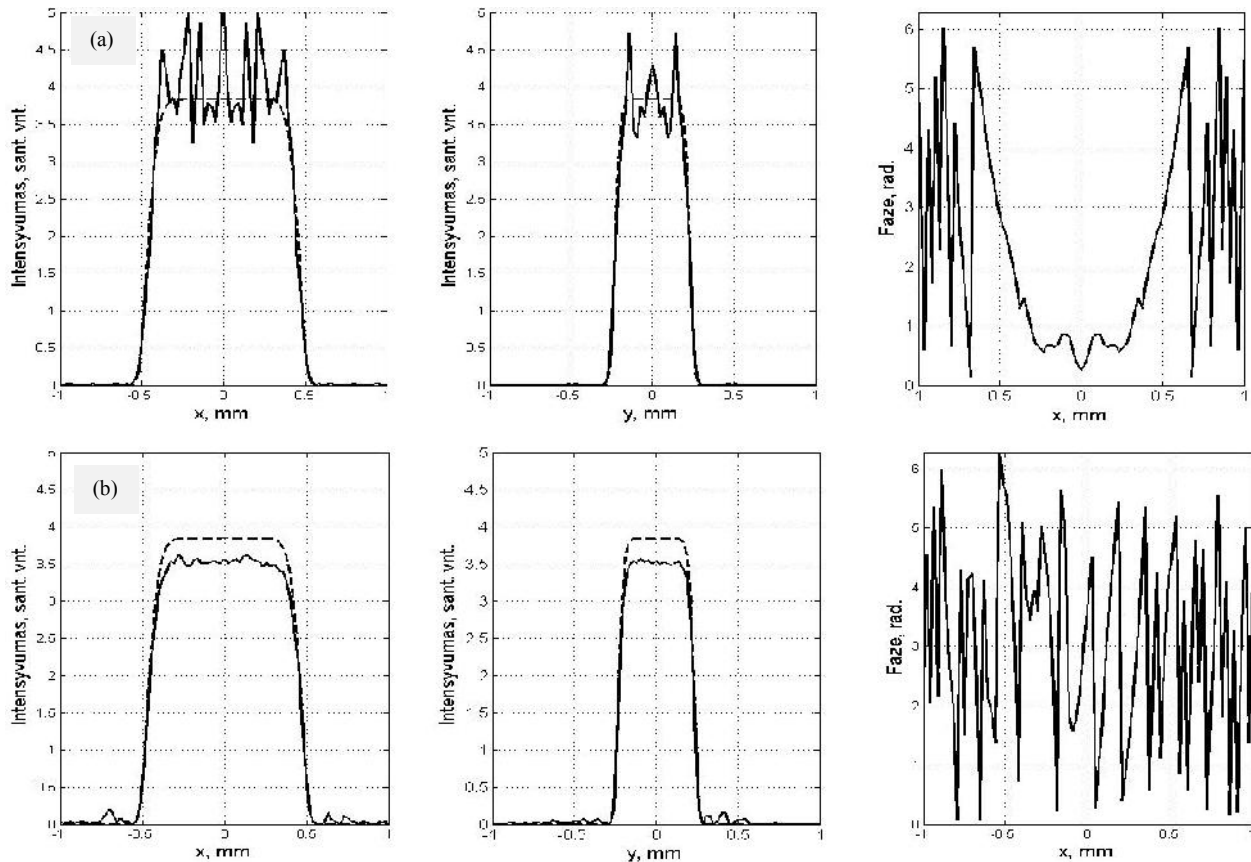


17 pav. Intensyvumas išilgai koordinatės x : (a) gauto pluošto, (b) idealaus 6 laipsnio Hyper-Gauso pluošto (Soifer, 2001).

Tačiau GS ir AA algoritmai neduoda tikslių rezultatų DOE fazės profiliui, kuris transformuoja pluoštą į plokščios viršūnės stačiakampio skerspjūvio profilio pluoštą (Tan ir kt., 2008). Rezultatai, gauti abiem algoritmais (GS ir AA) transformuojant Gauso pluoštą į stačiakampio skerspjūvio profilio pluoštą, pateikti 18 paveiksle, esant tokiems parametrams:

w_0	1 mm	Pradinio lazerio pluošto pusplotis
λ	1064 nm	Lazerio pluošto bangos ilgis
w_x	0.5 mm	Pageidaujamo pluošto pusplotis išilgai koordinatės x

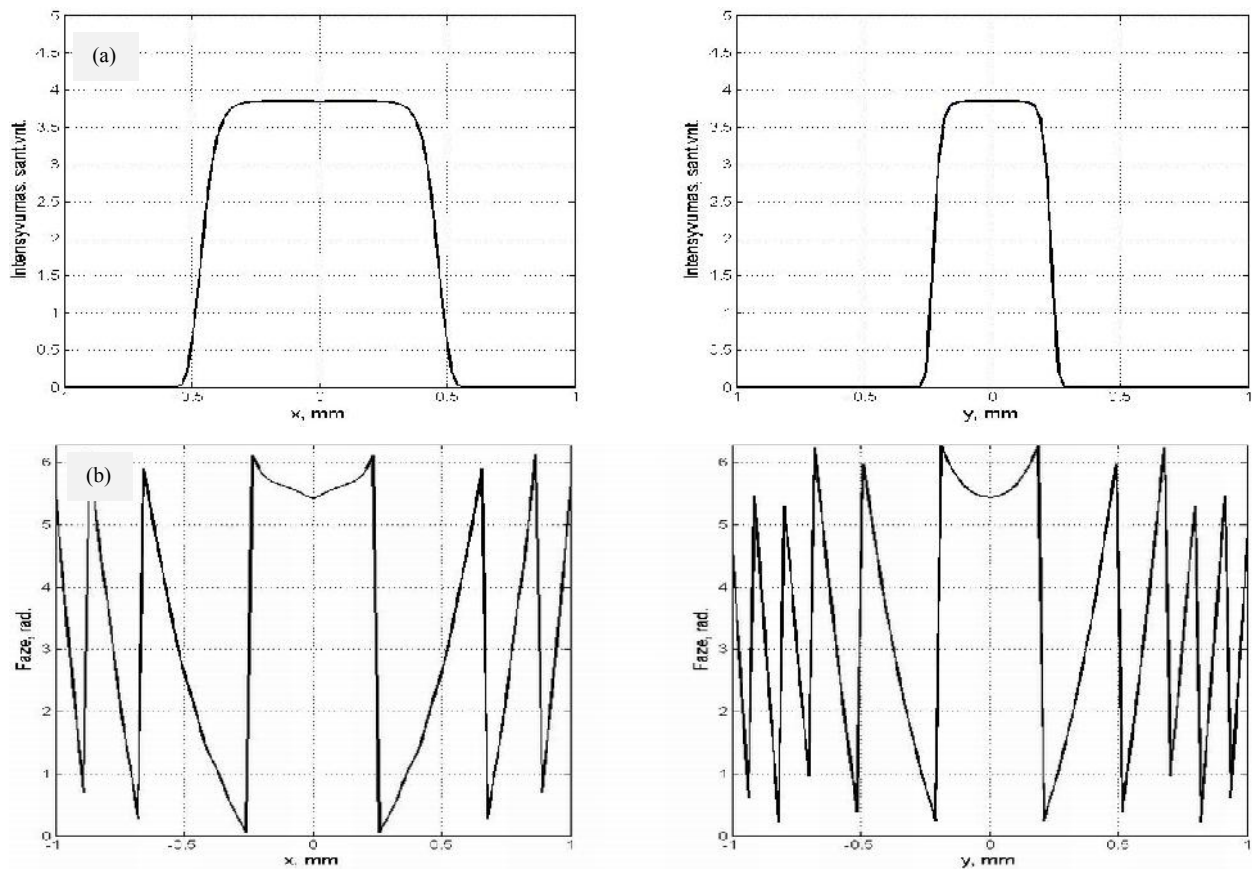
w_y 0.25 mm Pageidaujamo pluošto pusplotis išilgai koordinatės y
 l 70 mm Atstumas už DOE, kuriame norima suformuoti Hyper-Gauso profilio pluoštą



18 pav. Intensyvumo pasiskirstymai išilgai koordinatėių x ir y , ir fazės profilis išilgai x paskaičiuoti su: (a) GS algoritmu, (b) AA algoritmu. Punktyrinė linija žymi norimą pasiskirstymą (Tan 2008).

18 paveiksle matyti abiejų algoritmų pateiktų rezultatų pagrindiniai skirtumai: GS algoritmu gaunama simetriška, be iškraipymų centrinėje dalyje fazė. Tačiau intensyvumo pasiskirstyme atsiranda nepageidaujami triukšmai (Tan ir kt., 2008). AA algoritmu suskaičiuota fazė pasižymi dideliais iškraipymais bei nesimetriškumu, tačiau intensyvumo profilis neturi didelių iškraipymų ir jo maksimali vertė yra mažesnė nei norimo pasiskirstymo.

Siekiant išvengti šių fazės ir amplitudės iškraipymų, taikomas kombinuotas metodas, kai pradžioje DOE fazės profilio skaičiavimai atliekami GS algoritmu, o vėliau patikslinami taikant AA algoritmą (Soifer, 2001). Abiejų algoritmų kombinacija šį uždavinį išsprendžia daug tiksliau (19 pav.).



19 pav. Kombinuotu GS ir AA algoritmu gauti rezultatai. (a) intensyvumo pasiskirstymas išilgai koordinatų x ir y , (b) fazės profilis išilgai x ir y (Tan 2008).

Kaip matyti, lyginant 19 (a) paveiksle su 18 (a) ir 18 (b) paveiksluose pateiktu kombinuotu algoritmu, gaunami žymiai tikslesni rezultatai: intensyvumo profilis labai gerai atitinka norimą, o fazė neturi atsitiktinių fliuktuacijų.

Technologinės DOE gamybos ypatybės (Soifer, 2001) verčia pereiti nuo tolydinių fazinio pralaidumo profilių prie kvantuotų. Šis uždavinys sprendžiamas sudalinant kvadratinę fazinio pralaidumo profilio sritį į vienodų matmenų kvadratų masyvą. Kiekvienam šio masyvo elementui priskiriamas vidurkis visų tolydinės fazės verčių, esančių to masyvo srityje. Toliau, fazės pokytis intervale nuo 0 iki 2π yra sudalinamas į baigtinį vienodų intervalų (lygių) skaičių. Vertė priskiriama kiekvienam kvadratų masyvo elementui ir yra parenkama iš fazės lygių tai, kuri yra arčiausiai vidurkio (Tan ir kt., 2008).

DOE fazinio pralaidumo profilio, transformuojančio Gauso pluoštą į kvadratinio skerspjūvio profilio pluoštą, kvantavimo pavyzdys pateikiamas esant tokiems parametrams:

w_0	1 mm	Pradinio lazerio pluošto pusplotis
λ	1064 nm	Lazerio pluošto bangos ilgis

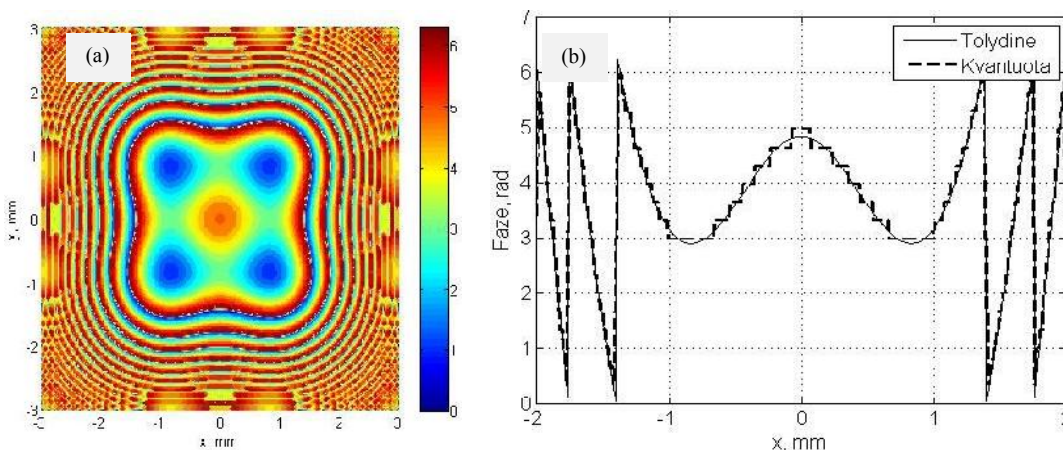
w_x 1 mm Pageidaujamo pluošto pusplotis išilgai koordinatės x
 w_y 1 mm Pageidaujamo pluošto pusplotis išilgai koordinatės y
 l 200 mm Atstumas už DOE, kuriame norima suformuoti Hyper-Gauso profilio pluoštą

Pažymėjus s – vieno kvantavimo kvadratinio kraštinės ilgį [mm], DE – difrakcijos efektyvumą į pluošto kvadratinio skerspjūvio plotą, ir n – fazės kvantavimo lygių skaičių intervale nuo 0 iki 2π , rezultatai esant skirtingiems kvadratėlių kraštinių ilgiams ir fazės kvantavimo lygių skaičiams pateikti 1 lentelėje:

s, mm	VKN	DE, %
0.0117	0.000046	99.0
0.0235	0.000064	98.8
0.0469	0.000144	98.6
0.0938	0.000309	98.0

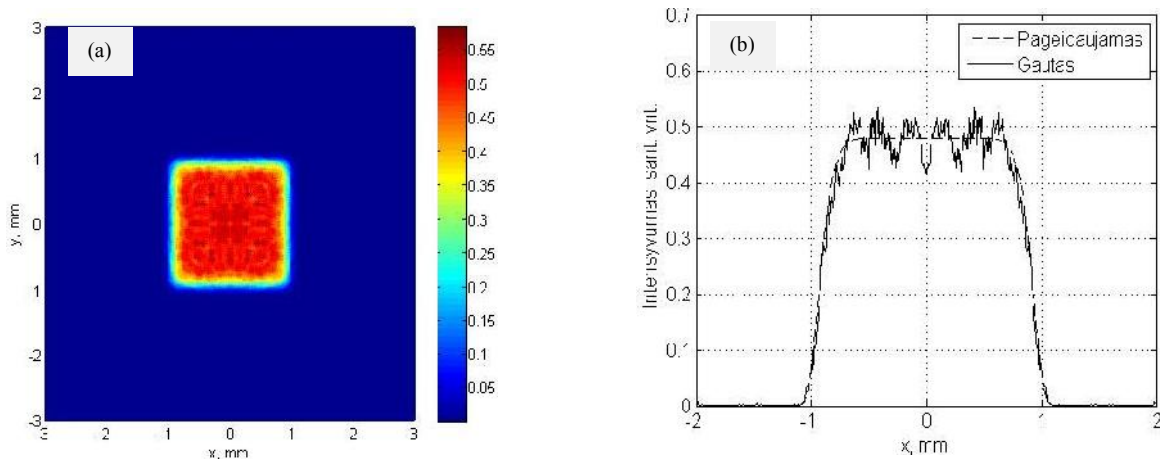
1 lentelė. Skirtingi kvadratėlių kraštinių ilgi ir fazės kvantavimo lygių skaičiai

Konkrečiu atveju, kai $s = 0.0235$ mm ir $n = 20$, gaunamas sukvančiuotas fazinio pralaidumo profilis pateiktas 20 paveiksle.



20 pav. Sukvančiuotas fazinio pralaidumo profilis: (a) skersinis, (b) išilgai koordinatės x (Soifer, 2001).

DOE, su tokio fazinio pralaidumo profiliu, intensyvumo pasiskirstymas matomas 21 paveiksle.



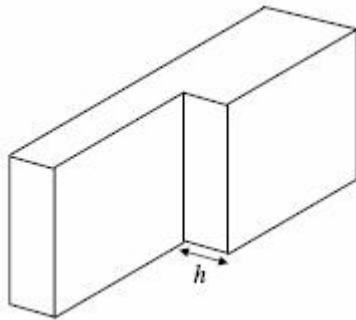
21 pav. Kvantuotų fazinio pralaidumo profilio intensyvumo pasiskirstymas: (a) skersinis, (b) išilgai koordinatės x . Punktyrine linija pažymėtas pageidaujamas profilis (Soifer, 2001).

Matyti, kad ir santykinai nedideliame fazės kvantavimo lygių skaičiui 5 užtikrinamas aukštas difrakcinis efektyvumas. Tačiau, norint turėti nedidelius intensyvumo profilio iškraipymus, reikalingas gerokai didesnis kvantavimo lygių skaičius, siekiantis 20.

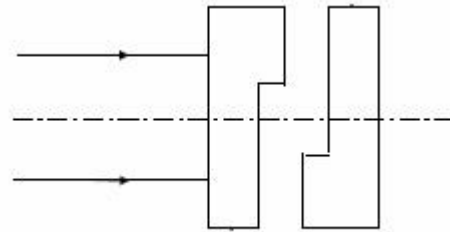
4. GAUSO PLUOŠTO TRANSFORMAVIMO FAZINIO PLYŠIO IR KIAURYMĖS DOE MODELIAVIMO REZULTATAI

Vienos zonos binarinis DOE, atitinka nagrinėjamas darbe fazinį plyšį ir fazinę kiaurymę.

Spindulio transformavimas sudarytas iš paprasto binarinio DOE, toliau darbe nurodomas kaip fazinė plokštelė. Ji susideda iš dviejų stiklo plokščių, turinčių po laiptelį (22 pav. b). Plokštelių laipteliai dažniausiai išgraviruoti jonų ėsdinimo spindulių įranga. Šios dvi plokštelės sustatomos lygiagrečiai ir gali slysti viena ant kitos taip, kol fazė galutinai pritaikoma. Ši fazinė plokštelė parodyta 22 a paveiksle ir yra naudojamas spindulio transformavimui.



a)



b)

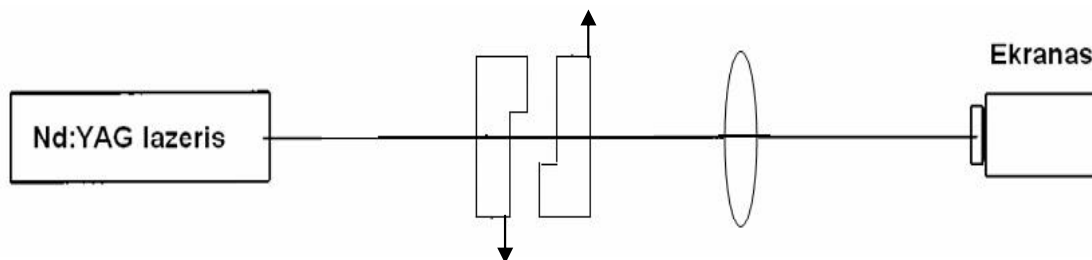
22 pav. Fazinis slenkstis pagamintas iš skaidraus stiklo su lūžio rodikliu n , turint fazės laiptelio aukštį h , a) fazinė plokštelė, b) dvi prisitaikančios stiklinės fazinės plokštelės.

Fazinės plokštelės laiptelio aukštis h yra pritaikytas taip, kad fazės pokytis $\varphi = \pi$. Naudojantis FRESNEL programa buvo modeliuota, kaip yra transformuojamas lazerio Nd:YAG pluoštas praėjęs per plokštelę su keičiamo pločio faziniu plyšiu. Parinkti tokie pluošto parametrai:

pluošto pusplotis $w_0 = 0.3$ cm.

bangos ilgis $\lambda = 1064$ nm. (Nd:YAG lazerio bangos ilgis).

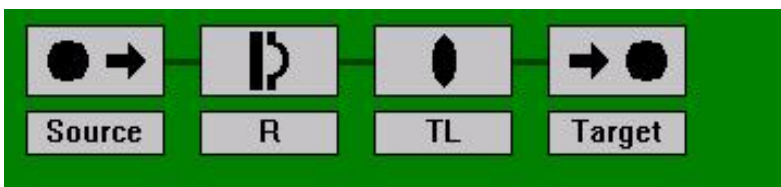
Modeliuojamos optinės sistemos schema pavaizduota 23 paveiksle.



23 pav. Lazerio pluošto optinė schema kompiuteriniam modeliavimui.

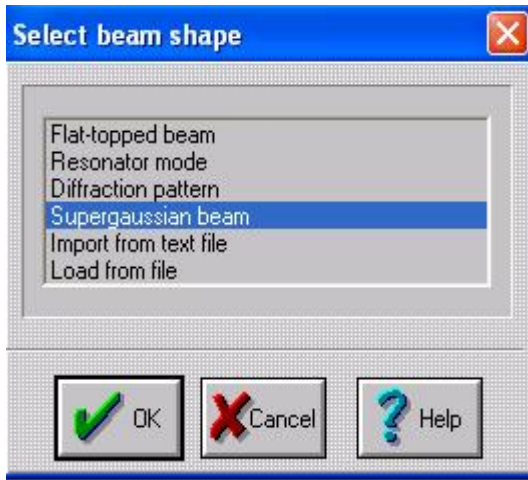
Glaustai apibūdiname optinės schemos parametrus ir modeliavimo eigą.

FRESNEL programa sukonstruojame optinę schemą (24 pav.), kurią naudojame lazerio šviesos pluošto transformavimui. Nustatome parametrus FRESNEL programoje.



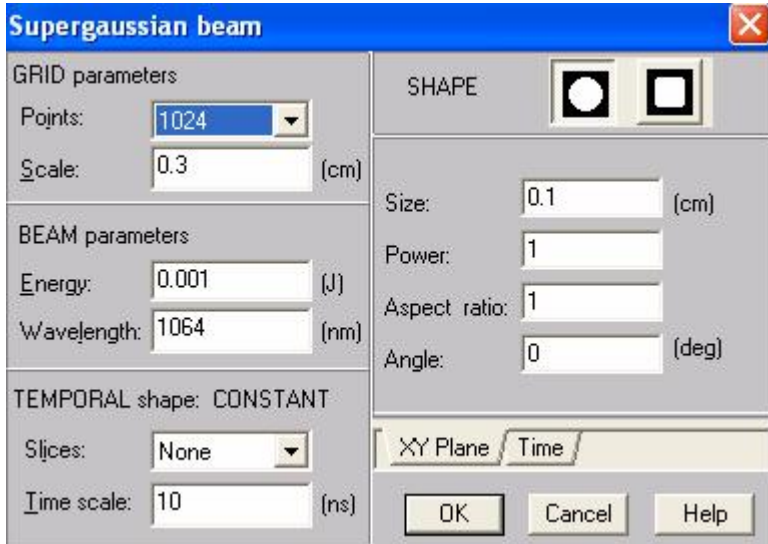
24 pav. FRESNEL programa modeliuojama optinė schema.

FRESNEL programos parametrai: Source – (lazerio šviesos šaltinis), R – fazinis plyšys, TL – lęšis, Target – ekranas, kuriame analizuojame lazerio spindulio transformavimą. Parametrai yra nustatomi kiekvienam elementui atskirai, paspaudus mygtuką source (24 pav.).



25 pav. Spindulių lentelė.

Atidaromas langas (25 pav.), kuriame pasirenkamas Supergauso spindulys (Supergaussian beam). Toliau, pasirinkus mygtuką OK, atidaromas lazerio spindulio parametrų langas (26 pav.) ir nustatomi Supergauso spindulio parametrai.

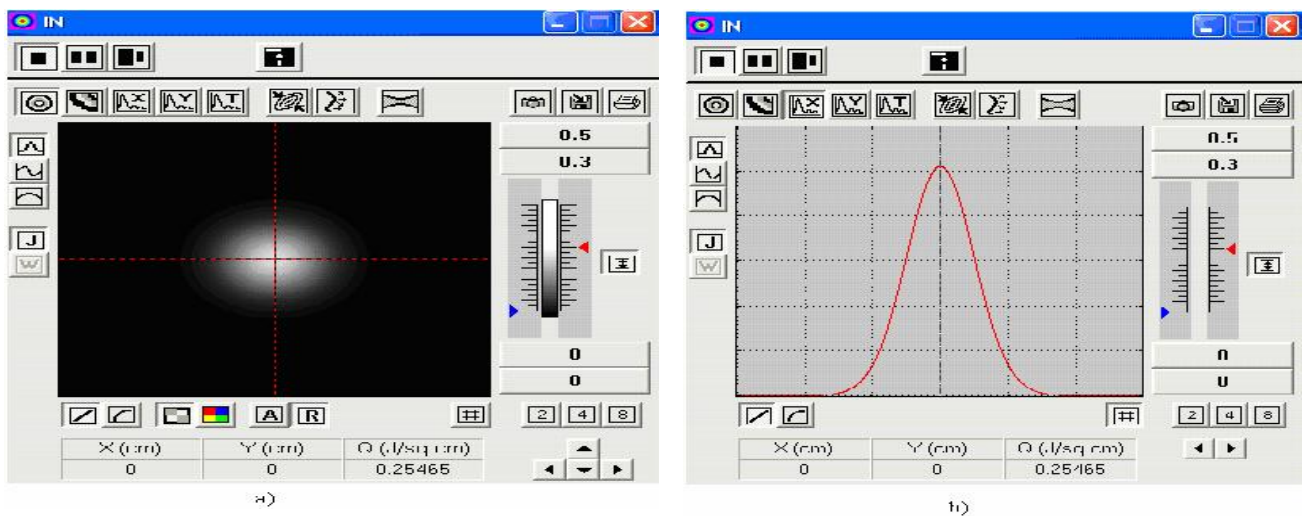


26 pav. Supergauso spindulio parametrai.

Skiltyje Points (taškai), pasirenkame 1024 taškus tam, kad gautume tikslesnius rezultatus. Skiltyje Scale (spindulio skersmuo), nustatome modeliujamo spindulio dydį x ir y ašimis. Skiltyje Energy (energija), pasirenkame 0.01 J.

Skiltyje Wavelength (lazerio šviesos bangos ilgis) pasirenkame 1064 nm, toks yra lazerio Nd:YAG bangos ilgis.

Skiltyje Time scale (laiko skaitiklis) nustatoma 10 ns. Shape (forma), parenkama apskritimo forma, Size (dydis) parenkamas lęšio pluošto skersmuo, Power (galia) ir Aspect ratio (požiūrio santykis), parenkama po 1. Angle (laipsniai) paliekamas 0. Nustatę norimus parametrus spaudžiame OK mygtuką. Tuomet, atidaromas langas ir (27 pav. a) gaunamas lazerio šviesos šaltinio pluošto 2D arba 1D vaizdas. 27 paveikslo b dalyje pateikiamas intensyvumo skirstinys išilgai skersinės koordinatės x arba y. Gaunamas lazerio šviesos spindulys 1D režimu. Paspaudus mygtuką X arba Y gaunamas, netransformuotas pradinis lazerio šviesos pluoštas.



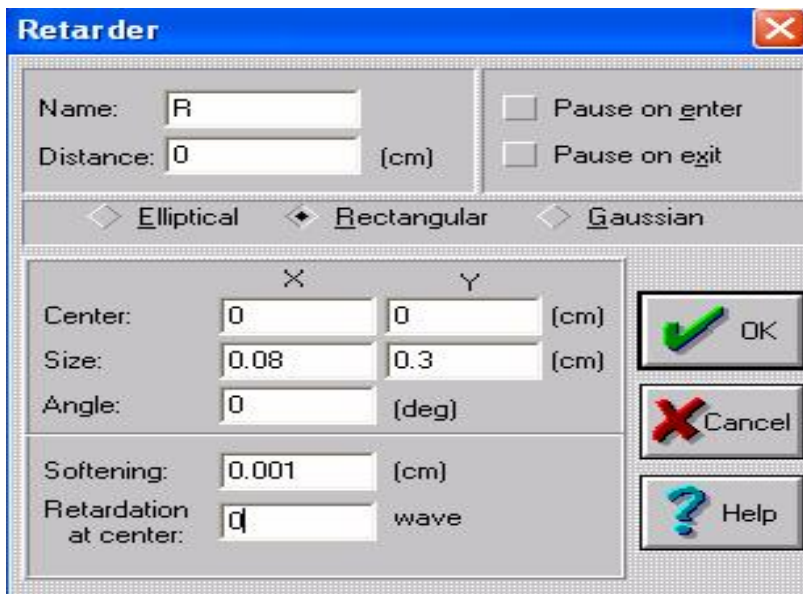
27 pav. a) Lazerio šviesos pluoštas 2D režimu, b) Lazerio šviesos pluoštas 1D režimu

Toliau nustatomi fazinio ekrano parametrai. Paspaudus ant R mygtuko (24 pav.), atidaromas langas su fazinio plyšio parametrais (28 pav). Skiltyje Distance (atstumas) parenkamas 0 cm. Pasirenkamas parametras Rectangular – stačiakampio formos plyšys. Stačiakampio plyšio parametrai:

Center – plyšio centro x ir y koordinatė parenkama taip, kad lazerio spindulys eina per centrą, kai $x = 0$ ir $y = 0$.

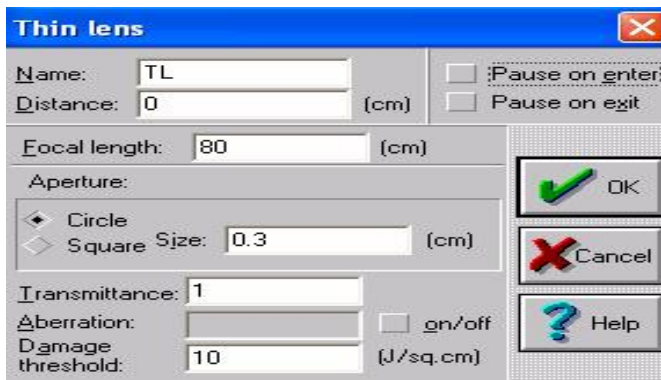
Size – plyšio dydis x ir y kryptimis. Šioje skiltyje keičiamas, tik x kryptimi plyšio plotis, o y kryptimi nekeičiamas.

Softening – perėjimo srities plotis 0.001 cm.



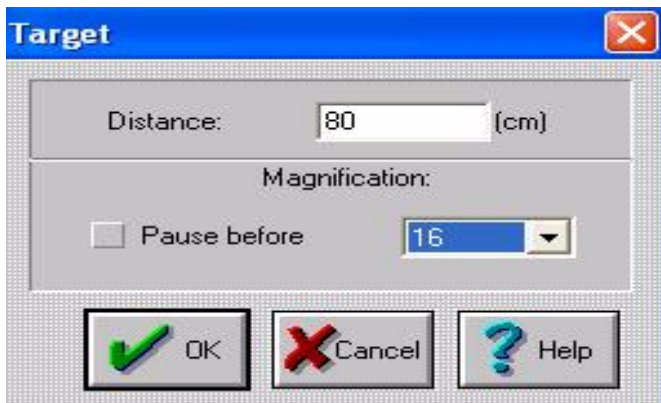
28 pav. Fazinio plyšio stačiakampės formos parametrai.

Retardation at center – fazės pokytis φ . Nustačius fazinio plyšio parametrus, nustatomi lęšio parametrai. Paspaudus ant mygtuko TL (24 pav.), atidaromas langas (29 pav.) lęšio parametrų nustatymui. Parenkami reikalingi dydžiai.



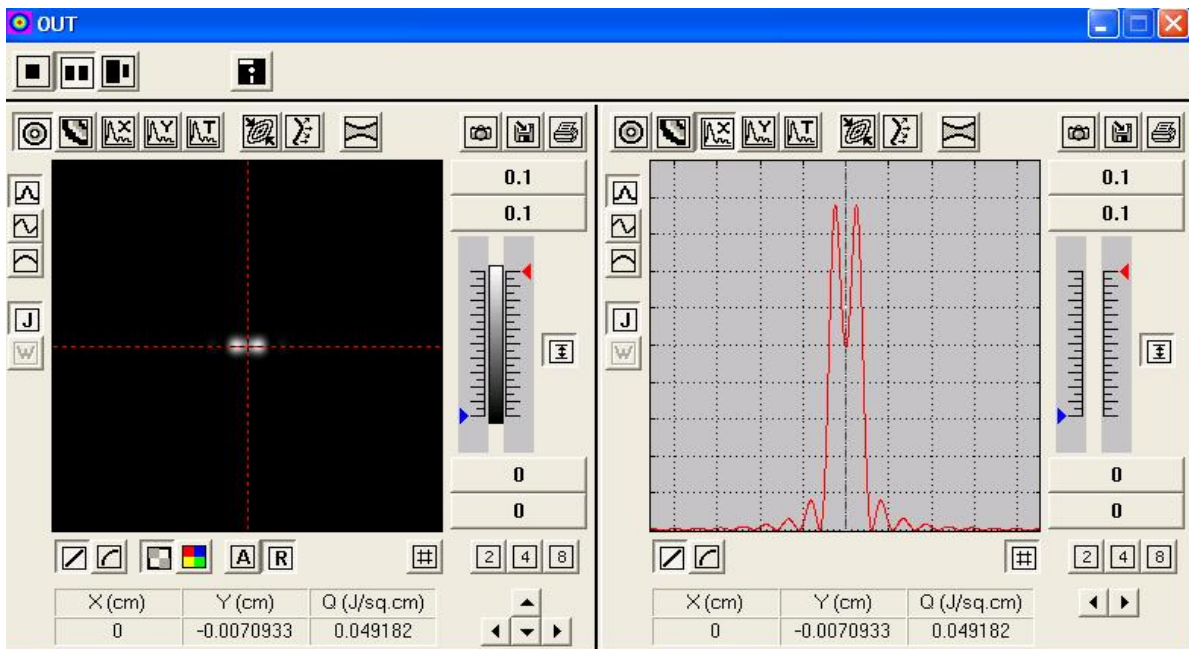
29 pav. Lęšio parametrų langas.

Distance - atstumas iki fazinio ekrano (cm). Focal length – židinio nuotolis (cm). Aperture – lęšio forma apskritimas, lęšis (circle), kurio dydis yra 0.3 cm. Šis dydis negali būti mažesnis už fazinio plyšio ir Supergausinio pluošto intensyvumo parametrus. Nustačius lęšio parametrus, paspaudžiamas ekrano mygtukas Target (25 pav.) ir atidaromas langas su ekrano parametrų nustatymu (30 pav.). Tuomet pasirenkami reikiami parametrai.



30 pav. Ekranu parametrų langas.

Target parametras Distance (30 pav.) nustatomas pagal lęšio židinio nuotolį. Nustačius parametrus ir paspaudus aktyvavimo mygtuką, FRESNEL programa gaunamas intensyvumo vaizdas 2D ir 1D formatu, pasiskirstęs x ašies kryptimi (31 pav. a, b).



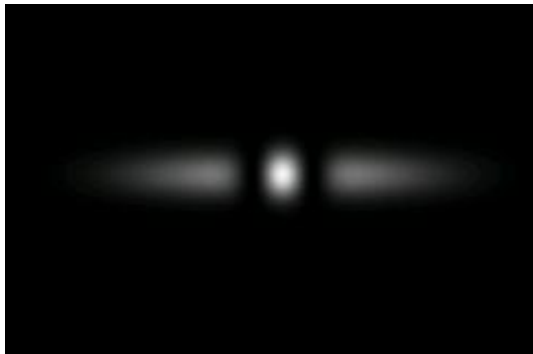
31 pav. a) 2D vaizdas ekrane, b) 1D intensyvumo pasiskirstymas x ašies kryptimi ekrane.

4.1. Gauso pluošto difrakcija už fazinių plyšių

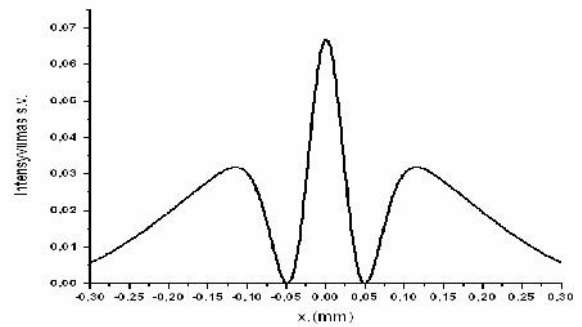
Pirmiausia buvo analizuota, kaip transformuojasi Gauso pluoštas lęšio židinio plokštumoje praėjęs per fazinį plyšį. Buvo tirta šviesos intensyvumo skersinių skirstinių, židinio plokštumoje priklausomybė nuo fazinio plyšio pločio santykio su lazerio pluošto pločiu:

$$\Delta = \frac{\Delta_x}{2\omega_o} \quad (50)$$

Apskaičiuoti intensyvumo skersiniai skirstiniai išilgai x koordinatės pateikti 32 paveiksle.



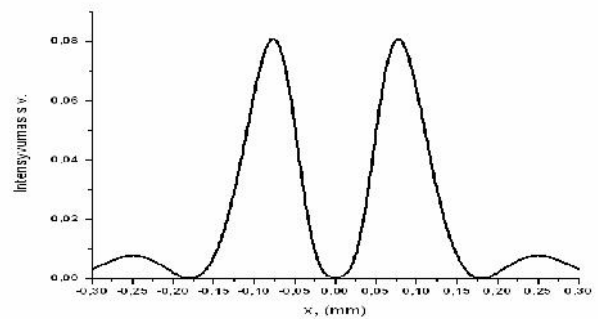
a)



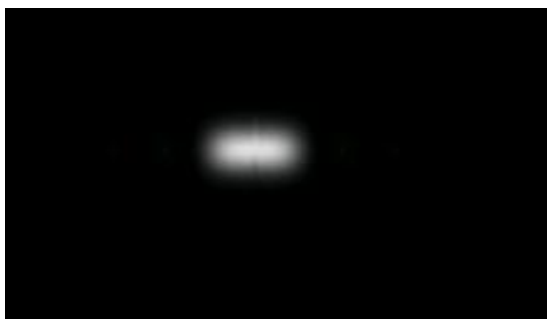
b)



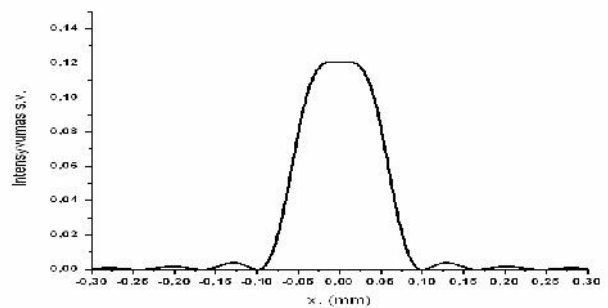
c)



d)



e)



f)

32 pav. Intensyvumo skersinis skirstinys lęšio židinio plokštumoje, kai fazinio plyšio pločio santykis su lazerio pluošto pločiu: $\Delta=0.03$ a) 2D vaizdas, b) 1D vaizdas; $\Delta=0.16$ c) 2D vaizdas, d) 1D vaizdas; $\Delta=0.36$ e) 2D vaizdas, f) 1D vaizdas.

Kai plyšio pločio santykis su lazerio pluošto pločiu lygus $\Delta = 0.03$ intensyvumo skirstinyje stebime centrinę smailę su dviem mažesnio intensyvumo šoniniais pikais, kurių intensyvumas didėja kintant minėtam santykiui.

Kai plyšio plotis lygus arba didesnis už lazerio pluošto plotį, skersiniam intensyvumo skirstinyje turime du didelio vienodo intensyvumo pikus išsidėsčiusius simetriškai, atžvilgiu pluošto centrui.

Santykiui esant $\Delta = 0.16$, šviesos intensyvumas ties pluošto centru lygus 0, o santykio vertei didėjant šviesos intensyvumas pluošto viduje pradeda augti, kadangi šoniniai pikai šioje pluošto dalyje persikloja. Skaičiavimai rodo, Gauso pluoštas transformuojasi į plokščios viršūnės stačiakampio formos pluoštą, kai plyšio pločio santykis su lazerio pluošto pločiu lygus $\Delta = 0.36$. Net ir nedidelis nukrypimas nuo šios santykio vertės, pastebimai iškraipo intensyvumo pasiskirstymą centrinėje pluošto dalyje (pav. 32).

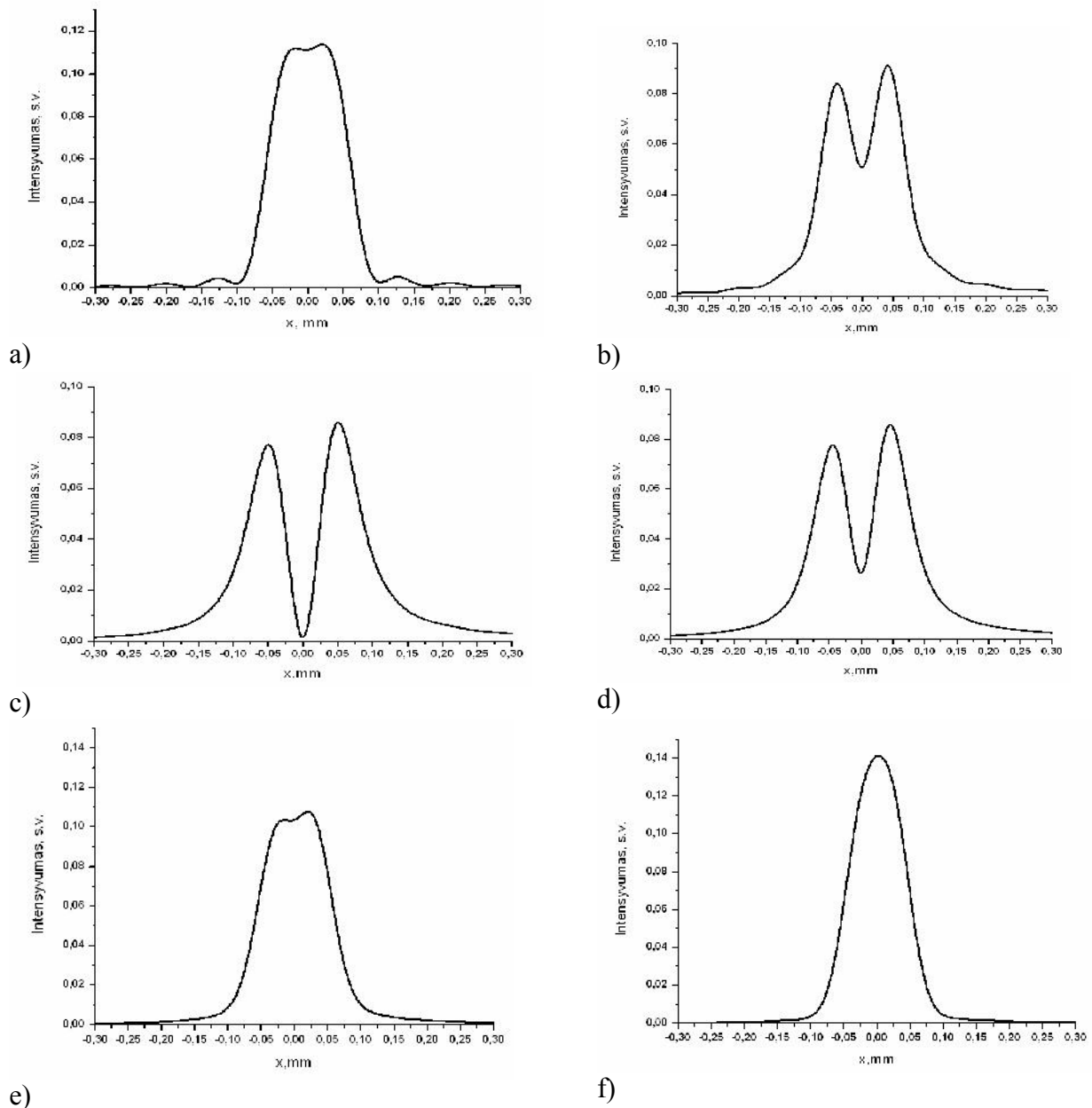
4.2. Centriškumo, pluošto elipsiškumo, fazės pokyčio, lęšio židinio nuotolio, ekrano nuotolio neatitikimo įtaka plokščios stačiakampės formos viršūnės skirstiniui panaudojant fazinį plyšį.

Atliekant eksperimentą, visada atsiranda paklaidos faktorius. Dažnai sunku suderinti optinę sistemą taip, kad ji pilnai atitiktų teorinius kriterijus. Todėl, reikia analizuoti atvejį, kai lazerio pluoštas krenta ne tiesiai į fazinio plyšio centrą. Tiriamas šviesos intensyvumo skersinių skirstinių, židinio plokštumoje priklausomybė nuo centriškumo neatitikimo, pastumiant fazinę plokštelę nuo 0.001 iki 0.01 mm nuo pluošto ašies, x koordinatės ašies kryptimi, kai fazinio plyšio plotis yra lygus 1.08 mm.

FRESNEL programos, schema pateikta 33 paveiksle.



33 pav. FRESNEL optinė schema difrakcijai skaičiuoti.



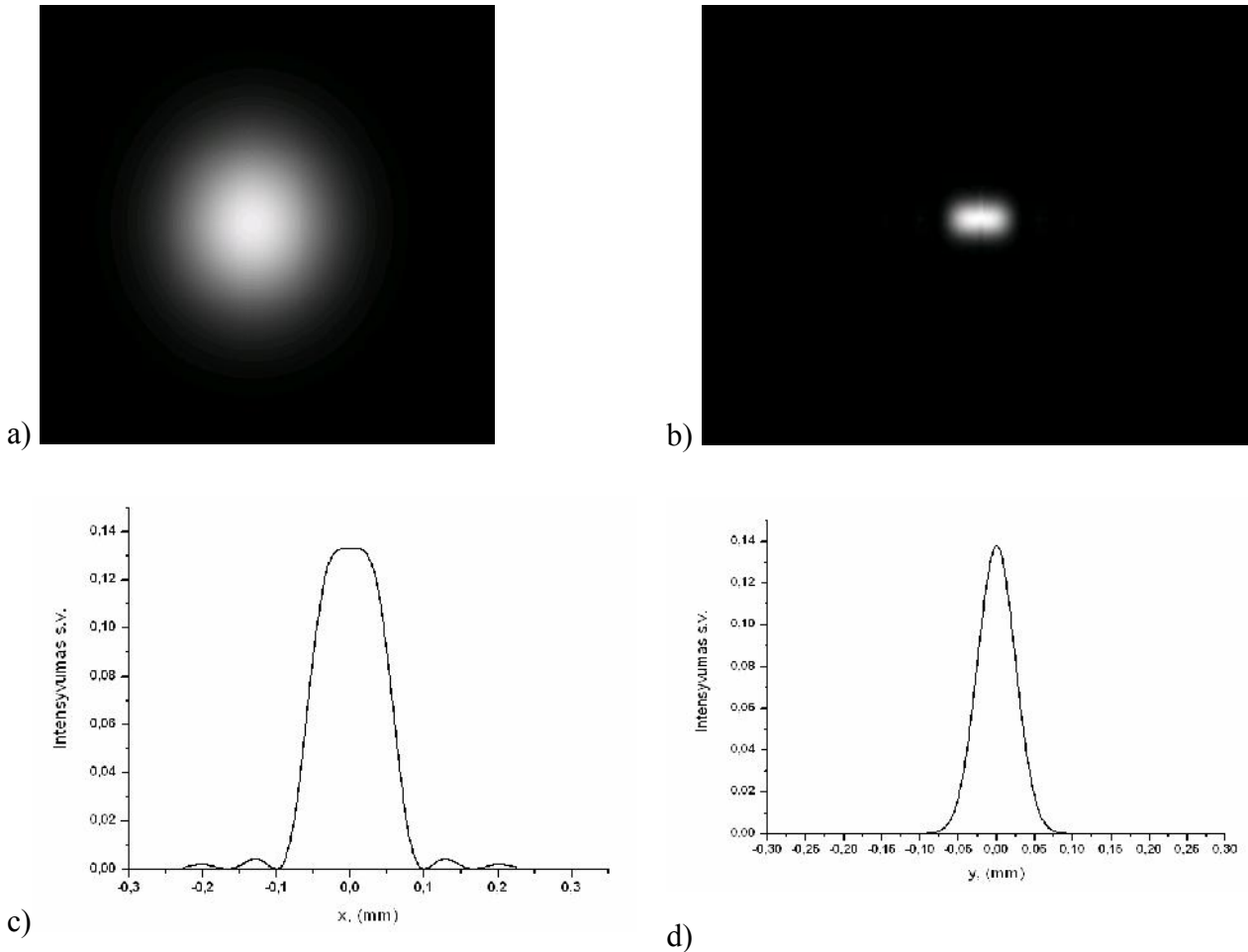
34 pav. Intensyvumo skersiniai skirstiniai koordinatės x ašimi, fazinės plokštelės pastūmimo ir fazinio plyšio pločio santykio, grafikai: a) 0.0009; b) 0.0027; c) 0.0046; d) 0.0064; e) 0.0083; f) 0.0092.

Iš 34 paveikslo matoma, kad fazinę plokštelę pastūmus į šoną net ir labai nedideliu atstumu, turi didelę įtaką pluošto nelygumui. Todėl, galima teigti, kad konstruojant optinę sistemą, kuri transformuotų lazerio šviesos pluoštą į plokščios viršūnės stačiakampio skerspjuvio pluoštą, reikia ypatingai tiksliai suderinti fazinį plyšį su lazerio šviesos pluošto optine ašimi. Tinkamai nesuderinus optinės sistemos, iškart atsiras transformuoto pluošto viršūnės iškraipymai.

Atliekant eksperimentus laboratorijoje susiduriama su dar viena problema. Tai lazerio pluošto elipsiškumas. Rezonatoriaus išėjime lazerio pluoštas ne visada turi apskrito Gauso pluošto

skerspjūvio profilį. Būna atvejų, kai lazerio pluošto skerspjūvio profilis yra šiek tiek elipsiškas. Todėl, analizuojame atvejį, kai yra transformuojamas lazerio pluoštas, kuris yra elipsiškas. Naudojame fazinę plokštelę, kurios fazės pokytis yra π ir optinę schemą, kuri pateikta 33 paveiksle.

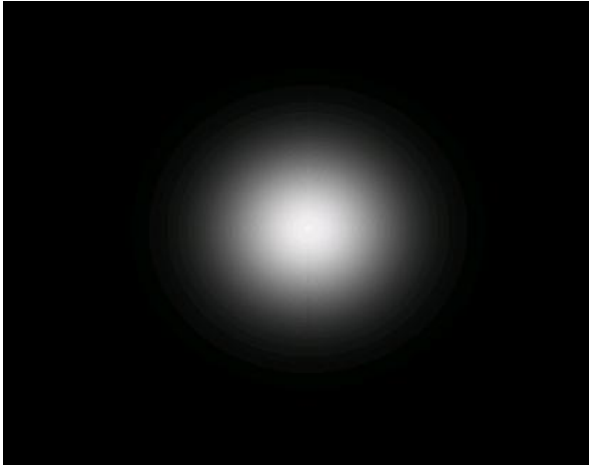
Apskaičiuojama, kaip transformuojamas pluoštas, kai jo elipsiškumas yra $\frac{w_y}{w_x} = 1.1$ (35 pav.).



35 pav. Pluoštų intensyvumo grafikai: (a) pradinio elipsiško pluošto, kai $\frac{w_y}{w_x} = 1.1$, intensyvumo skerspjūvio profilis, (b) transformuoto pluošto skerspjūvio profilis, (c) transformuoto pluošto skersinis intensyvumo pasiskirstymas x ašimi, (d) transformuoto pluošto skersinis intensyvumo pasiskirstymas y ašimi.

Intensyvumo pasiskirstymas lęšio židinio plokštumoje pateiktas 36 paveiksle. Pakartojami

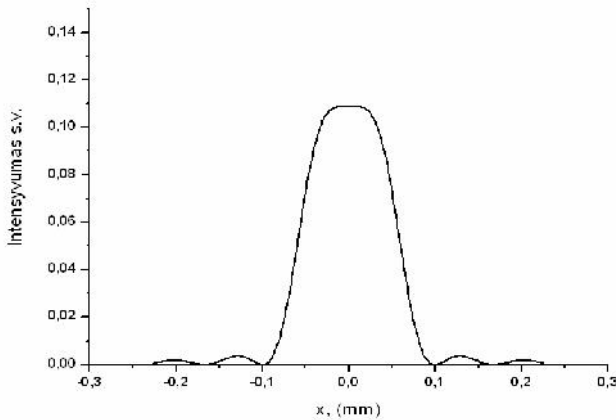
skaičiavimai, kai pluošto elipsiškumas yra lygus $\frac{w_y}{w_x} = 0.9$



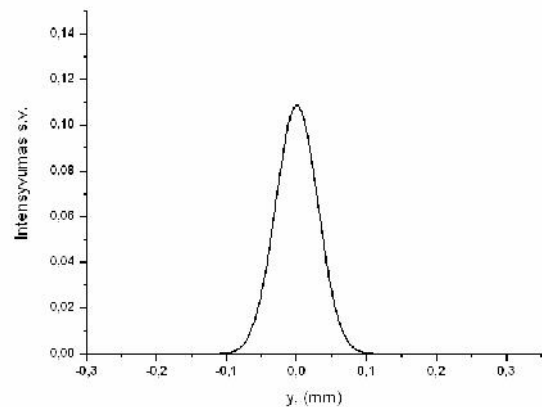
a)



b)



c)



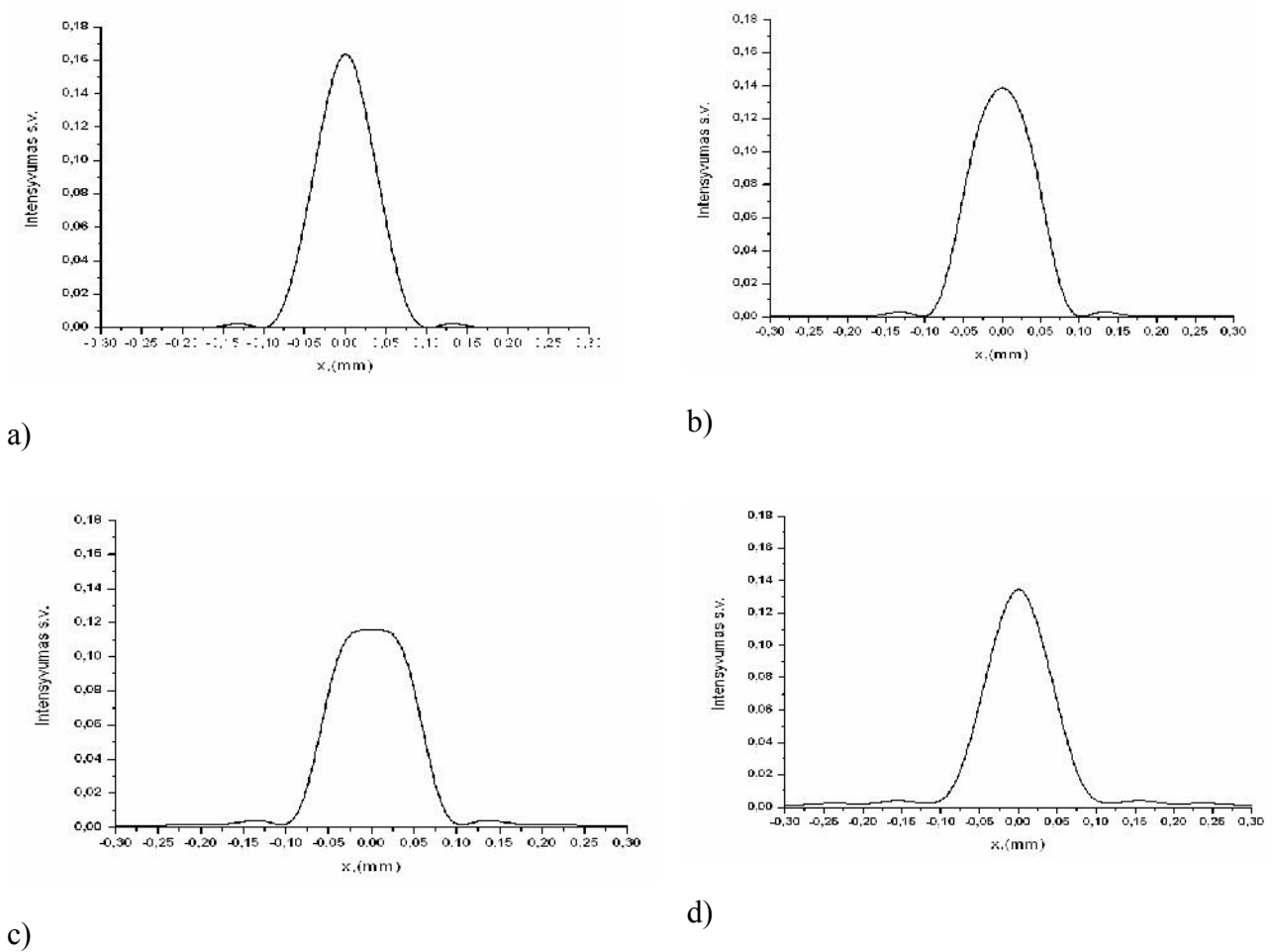
d)

36 pav. Pluoštų intensyvumo grafikai: (a) pradinio elipsiško pluošto, kai $\frac{w_y}{w_x} = 0.9$, intensyvumo skerspjūvio profilis, (b) transformuoto pluošto skerspjūvio profilis, (c) transformuoto pluošto skersinis intensyvumo pasiskirstymas x ašimi, (d) transformuoto pluošto skersinis intensyvumo pasiskirstymas y ašimi.

Kaip matoma iš gautų rezultatų, pluošto elipsiškumas taip pat daro neigiamą įtaką transformuoto pluošto nelygumui. Naudojant fazinę plokštelę, lazerio pradinis pluoštas turėtų būti kiek įmanoma mažiau elipsiškas.

Tiriant lazerio šviesos pluošto transformaciją, svarbu parinkti tinkamą fazę, esant tam tikram fazinio plyšio pločiui. 37 paveiksle pavaizduoti grafikai apibūdinantys fazės pokyčio įtaką transformuojamam Gauso pluoštui. Iš grafikų pateiktų 37 paveikslo a, b dalyse matyti, kad esant fazei $\varphi < \pi$ intensyvumas išauga, o skersinis skirstinys tampa artimas Gauso. Didinant fazę stebimos

smailės intensyvumas pradeda mažėti ir didžiausią plokščios viršūnės plotį gauname, kai gautas pokytis artimas stačiakampio formai, o $\varphi = \pi$ (37 pav. c). Toliau didinant fazės pokytį, $\varphi > \pi$, intensyvumas pradeda vėl didėti, o plokščia centrinė dalis siaurėja, kol vėl skirstinys pasidaro panašus į Gauso skirstinį (37 pav. d).

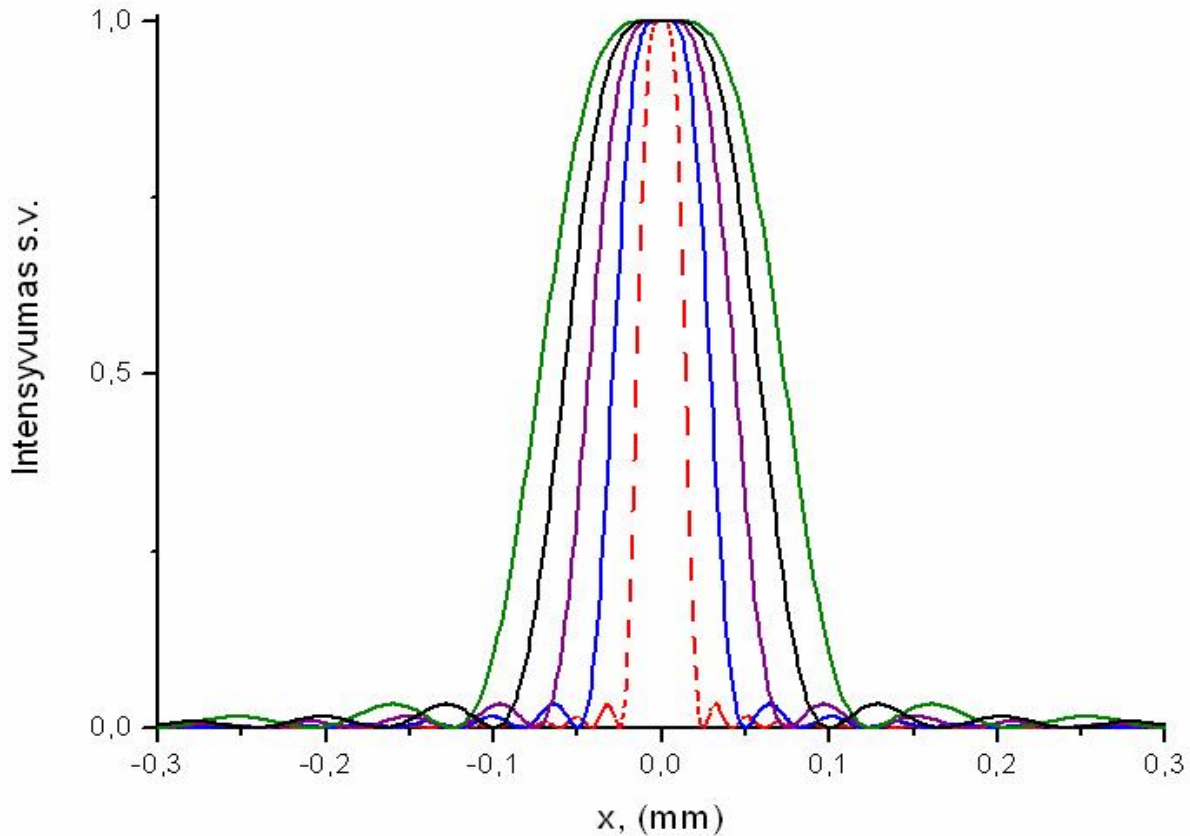


37 pav. Intensyvumo skersiniai skirstiniai išilgai koordinatės x skirtingam fazės pokyčiui: a) $\varphi = 0.3\lambda$ b) $\varphi = 0.4\lambda$ c) $\varphi = 0.5\lambda$ d) $\varphi = 0.7\lambda$.

Kaip matoma iš gautų rezultatų, netinkamas fazės pokyčio parinkimas, daro neigiamą įtaką transformuoto pluošto nelygumui.

Toliau buvo tirta, kaip transformuojasi lazerio šviesos pluoštas praėjęs per fazinį plyšį, keičiant tik lęšio židinio nuotolį, esant tiems patiems plyšio parametrams. Gauti intensyvumo skersiniai skirstiniai išilgai koordinatės x , pateikti 38 paveiksle. Matyti, kad keičiant lęšio židinio nuotolį, kinta centrinės smailės intensyvumas ir plotis. Intensyvumas mažėja didinant lęšio židinio nuotolį. Kai lęšio židinio nuotolį padidiname 0.20 m (mėlyna linija) matome, kad intensyvumas sumažėja 4 kartus, o pluošto plotis taip pat padidėja 4 kartus, koordinatės x ašies kryptimi. Toliau

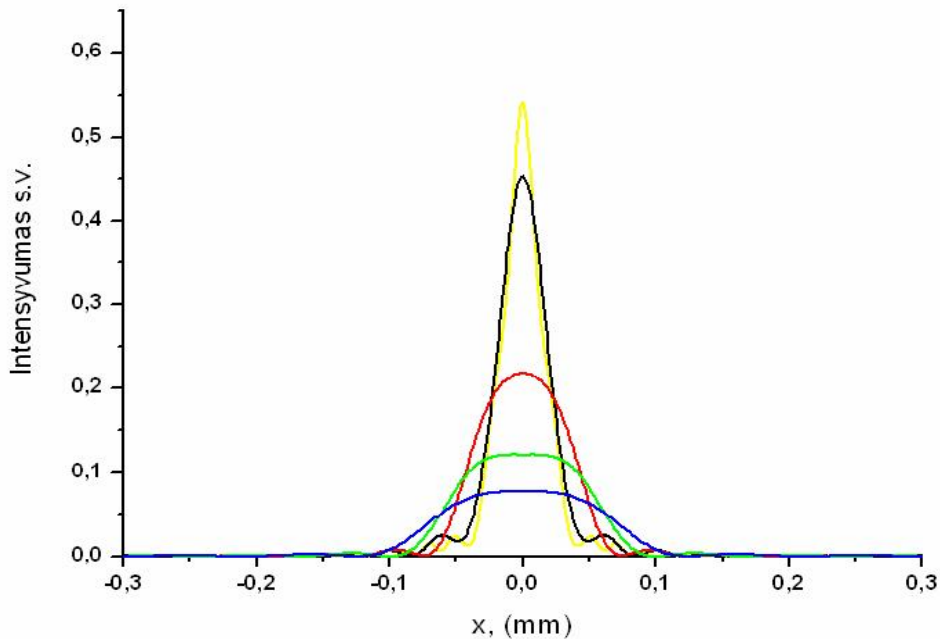
didinant lęšio židinio nuotolį intensyvumas mažėja, didėjant pluošto pločiui x ašies kryptimi. Parinkus tinkamą lęšio židinio nuotolį yra gaunamas plokščios viršūnės intensyvumo skersinis skirstinys ($f = 0.8$ m, juoda linija). Dar didinant lęšio židinio nuotolį, transformuotas pluoštas praranda stačiakampę formą ir tampa artimas Gauso pluoštui.



38 pav. Intensyvumo skersiniai skirstiniai išilgai koordinatės x skirtingiems lęšio židinio nuotoliams: raudona linija $f = 0.2$ m, mėlyna linija $f = 0.4$ m, violetinė linija $f = 0.6$ m, juoda linija $f = 0.8$ m, žalia linija $f = 1$ m.

Lazerio pluoštas praeina per fazinį plyšį ir lęšį. Praėjęs jis transformuosi. Todėl, buvo analizuojama, kokią įtaką skersiniams skirstiniams turi ekrano nuotolis, nelygus lęšio židinio nuotoliui. Gauti intensyvumo skersiniai skirstiniai išilgai koordinatės x ašies pateikti 39 paveiksle. Matyti, kad esant ekrano nuotoliui nuo lęšio $l = 0.20$ m (geltona linija), intensyvumo skirstinyje stebima smailė, kuri artima Gauso spinduliui. Smailės intensyvumas mažėja, didinant ekrano nuotolį nuo lęšio. Padidinus ekrano nuotolį 0.20 m (juoda linija) matome, kad intensyvumas sumažėja, bet gautos smailės pluošto plotis išlieka artimas Gauso pluoštui, tik su mažesniu intensyvumu. Toliau didinant ekrano nuotolį intensyvumas vėl mažėja ir didėja pluošto plotis koordinatės x ašies

kryptimi, pluoštas artėja į stačiakampės viršūnės paviršių. Ekranu nuotoliui susilyginus su lęšio židinio nuotoliu, pluoštas įgyja stačiakampę viršūnę (žalia linija), o esant atstumui didesniai už lęšio židinio nuotolį, intensyvumas mažėja ir pluošto plotis prarandama stačiakampės viršūnės paviršių. Iš grafiko (39 pav.) matome, kad esant ekranu nuotoliui nelygiam lęšio židinio nuotoliui, gauti intensyvumo skersiniai skirstiniai artimi Gauso pluoštui.



39 pav. Intensyvumo skersinių skirstinių pasiskirstymo priklausomybė nuo ekranu nuotolio: geltona linija $l = 0.20$ m, juoda linija $l = 0.40$ m, raudona linija $l = 0.60$ m, žalia linija $l = 0.80$ m, mėlyna linija $l = 1$ m.

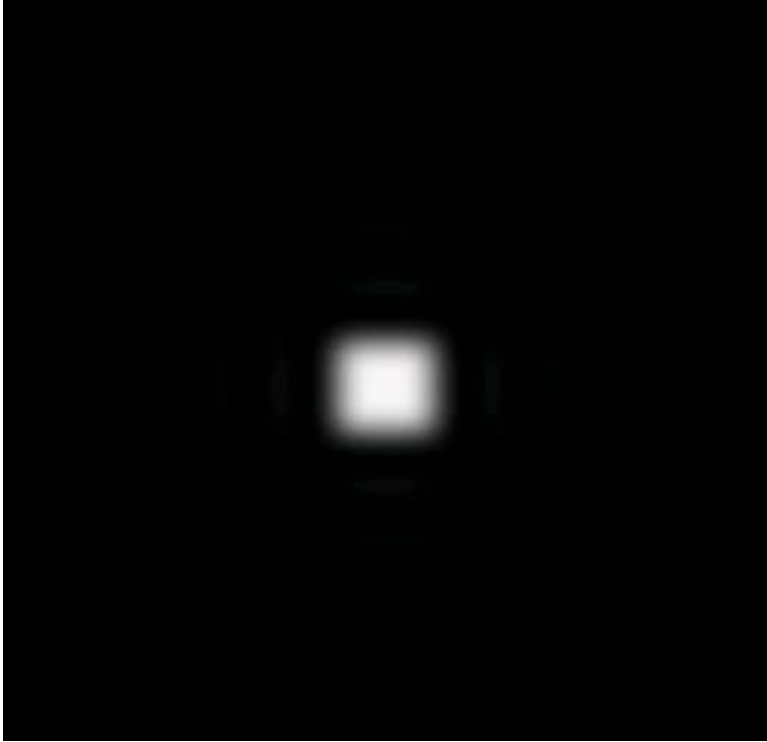
Iš gautų rezultatų matome, kad netinkamas ekranu nuotolio parinkimas daro neigiamą įtaką transformuoto pluošto nelygumui.

Pluoštui perėjus per vieną fazinį plyšį, intensyvumo skersinis skirstinys transformuojamas statmena kryptimi, o kryptimi išilgai plyšio Gauso skirstinys lieka nepakitęs.

Pluoštas gali būti pilnai transformuotas į plokščios viršūnės stačiakampio formos pluoštą, jei bus pastatyti du sukryžiuoti 90° kampų faziniai plyšiai. Pluošto transformavimas dviem fazinėmis plokštelėmis pateikti 40 paveiksle, o jų modeliavimo rezultatai pateikti 41 paveiksle.

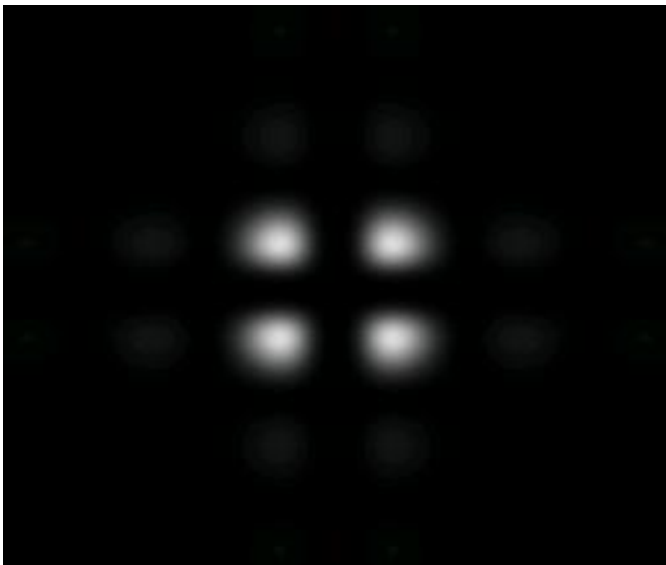


40 pav. FRESNEL optinė schema su dvejais plyšiais apskaičiuoti difrakcijai.



41 pav. Gauso spindulio transformavimo dviem faziniais plyšiais 2D vaizdas.

Dviem sukryžiuotais faziniais plyšiais galima gauti pluoštus su gyliu intensyvumo minimumu pluošto centre, kurie yra tinkami mikrodalelių pagavimui ir jų perstūmimui iš vienos vietos į kitą. Toks pluoštas literatūroje vadinamas „optiniu pincetu“ (42 pav.).

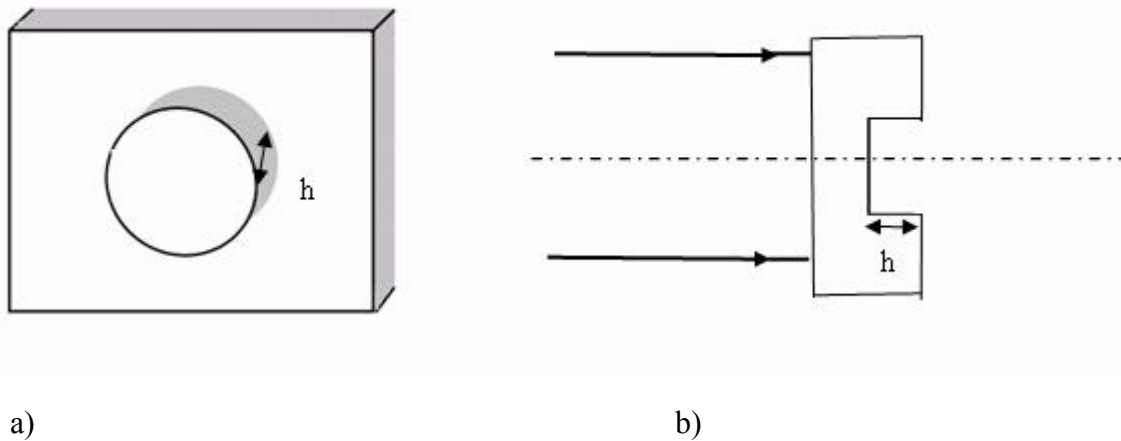


42 pav. Optinis pincetas.

Optinis pincetas gaunamas, kai plyšio santykis su lazerio šviesos pluošto plyšiu, lygus $\Delta_x = \Delta_y = 0.16$. Toks optinis pincetas gali būti naudojamas tik dalelėms, kurios veikiamos jėgos nukreiptos šviesos pluošto intensyvumo mažėjimo kryptimi.

4.3. Gauso pluošto difrakcija už fazinės kiaurymės

Fazinės kiaurymės, kaip ir fazinės plokštelės, pasižymi analogiškėmis savybėmis. Jomis transformuojamas Gauso pluoštas į norimos formos paviršių (apskrito skerspjūvio pločio intensyvumo skersinio profilio pluoštą). Ji susideda iš vienos stiklo plokštelės, turinčios viduje apskritiminę angą (43 pav. b). Plokštelėje apskritiminė anga išgraviruota jonų ėsdinimo spindulių įranga. Ši fazinė kiaurymė parodyta 43 paveikslo a dalyje ir yra naudojama lazerio šviesos pluošto transformavimui.



43 pav. a) Stiklo ploštelė su fazine kiauryme b) Stiklo plokštelė turinti viduje apskritiminę angą

Fazinės kiaurymės aukštis h yra pritaikytas taip, kad $\varphi = \pi$.

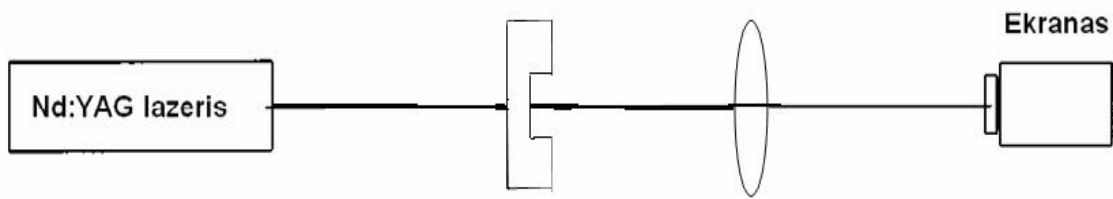
Naudojantis FRESNEL programa buvo modeliuota, kaip yra transformuojamas lazerio Nd:YAG pluoštas per fazinę kiaurymę. Parinkti tokie pluošto parametrai:

pluošto pusplotis $w_0 = 0.3 \text{ cm}$

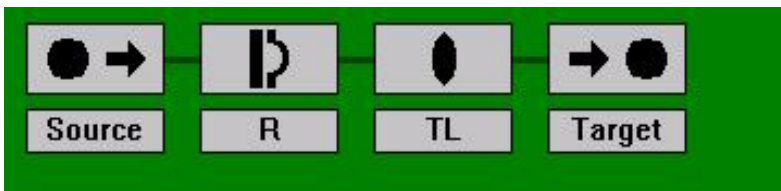
bangos ilgis $\lambda = 1064 \text{ nm}$

Modeliuojamos optinės sistemos schema pavaizduota 44 paveiksle.

FRESNEL programa sukonstruojama optinė schema (45 pav.), kuri naudojama lazerio šviesos pluošto transformavimui. Nustatomi parametrai FRESNEL programa.



44 pav. Lazerio šviesos pluošto optinė schema kompiuteriniam modeliavimui.

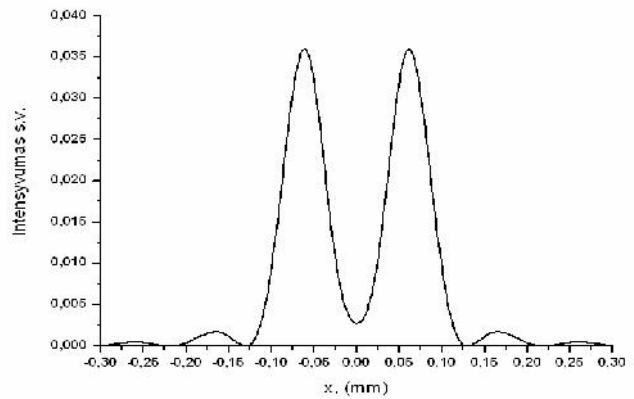


45 pav. FRESNEL programa sukonstruota optinė schema.

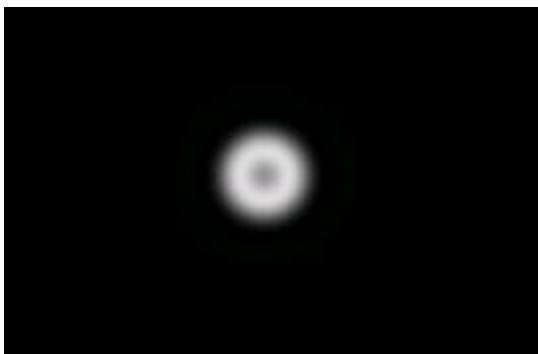
Atliekant eksperimentą su fazine kiauryme svarbu parinkti tinkamą kiaurymės plyšio plotį.



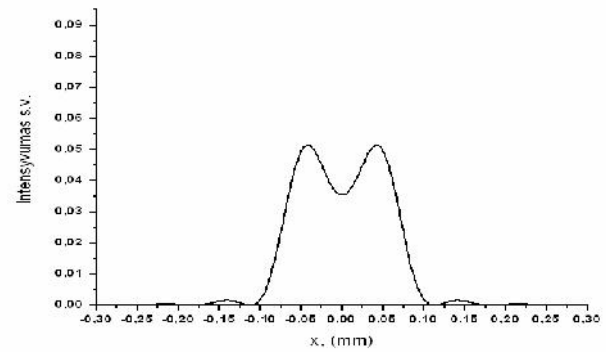
a)



b)



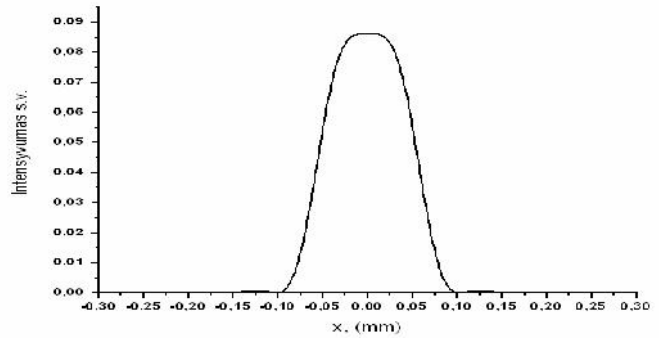
c)



d)



e)



f)

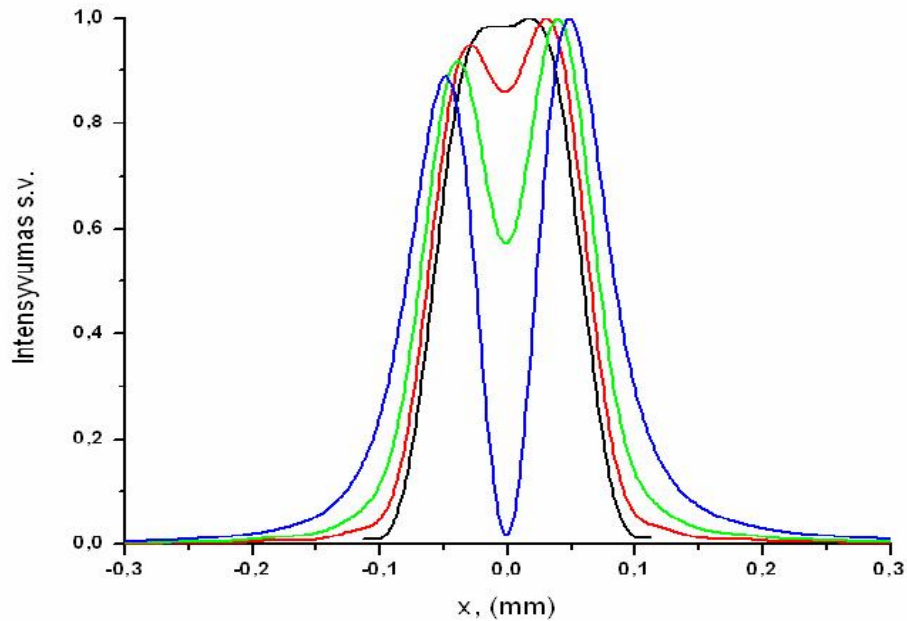
46 pav. Intensyvumo skersinis skirstinys lęšio židinio plokštumoje, kai fazinės kiaurymės pločio santykis su lazerio pluošto pločiu: $\Delta = 0.3$ a) 2D vaizdas, b) 1D vaizdas; $\Delta = 0.36$ c) 2D vaizdas, d) 1D vaizdas; $\Delta = 43$ e) 2D vaizdas, f) 1D vaizdas.

Pateiktame grafike (46 pav.) matyti, kad kiaurymės plotis lygus arba didesnis už lazerio pluošto plotį. Skersiniame intensyvumo skirstinyje turime du didelį, vienodo intensyvumo pikus, išsidėsčiusius simetriškai atžvilgiu pluošto centrui. Kiaurymei plečiantis, šviesos intensyvumas pluošto viduje pradeda augti, kadangi šoniniai pikai šioje pluošto dalyje persikloja.

Skaičiavimai rodo, Gauso pluoštas transformuojasi į plokščio profilio apskritinės formos viršūnės pluoštą, kai kiaurymės pločio santykis su lazerio pluošto pločiu (50 formulė) lygus $\Delta = 0.43$. Nors ir nedidelis nukrypimas nuo šios santykio vertės pastebimai iškraipo intensyvumo pasiskirstymą centrinėje pluošto dalyje (pav. 46).

4.4 Centriškumo, pluošto elipsiškumo, fazės pokyčio, lęšio židinio nuotolio, ekrano nuotolio neatitikimo įtaka plokščios apskritinės formos viršūnės skirstiniui, panaudojant fazinę kiaurymę

Suderinti optinę sistemą taip, kad ji atitiktų teorinius kriterijus yra sudėtinga. Analizuojame atvejį, kai lazerio šviesos pluoštas krenta ne tiesiai į fazinės plokštelės kiaurymės centrą ir jų priklausomybė nuo centriškumo neatitikimo pastumiant fazinę plokštelę nuo 0.001 iki 0.005 mm santykį su fazinės kiaurymės pločiu, kai fazinės kiaurymės plotis lygus 1.3 mm (47 pav.).



47 pav. Intensyvumo skersinių skirstinių pasiskirstymo, koordinatės x ašimi, fazinės plokštelės pastūmimo ir fazinės kiaurymės plyšio pločio santykio, grafikai: 0.001 mm juoda linija, 0.002 mm raudona linija, 0.003 mm žalia linija, 0.005 mm mėlyna linija.

Iš 47 paveikslo matome, kad fazinės plokštelės pastūmimas į šoną net ir labai nedideliu atstumu, turi didelę įtaką pluošto nelygumui. Todėl, galima teigti, kad konstruojant optinę sistemą, kuri transformuotų lazerio pluoštą į plokščios viršūnės apskrito skerspjūvio pluoštą, reikia ypatingai tiksliai suderinti fazinės plokštelės kiaurymę su lazerio pluošto optine ašimi. Tinkamai nesuderinus optinės sistemos, iškart atsiras transformuoto pluošto viršūnės iškraipymai.

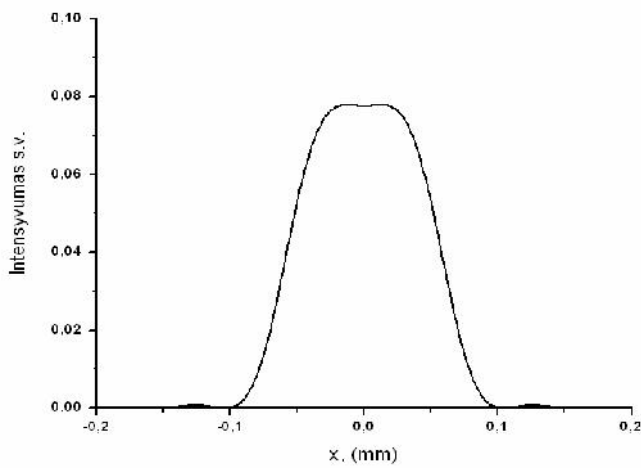
Susiduriama su dar viena problema. Tai lazerio pluošto elipsiškumas. Rezonatoriaus išėjime lazerio pluoštas ne visada turi apskrito Gauso pluošto skerspjūvio profilį. Būna atveju, kai lazerio pluošto skerspjūvio profilis yra šiek tiek elipsiškas. Todėl, analizuojame atvejį, kaip yra transformuojamas lazerio pluoštas, kuris yra elipsiškas. Naudojame fazinę plokštelę, kurio fazės pokytis yra π ir optinę schemą, kuri pateikta 33 paveiksle. Apskaičiuojama, kaip transformuojamas pluoštas, kai jo elipsiškumas yra $\frac{w_y}{w_x} = 1.1$. Intensyvumo pasiskirstymas lęšio židinio plokštumoje, pateiktas 48 paveiksle.



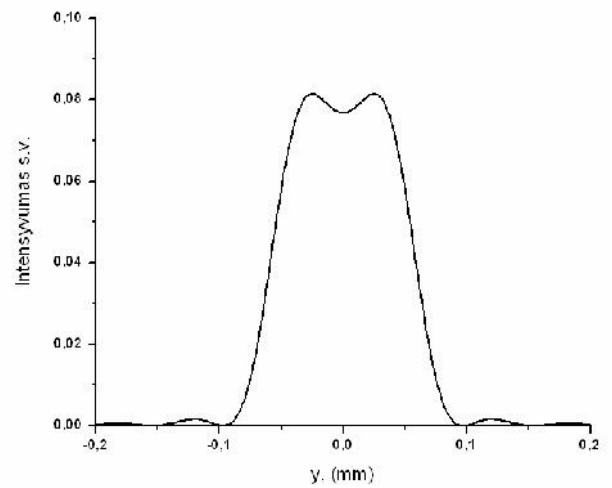
a)



b)



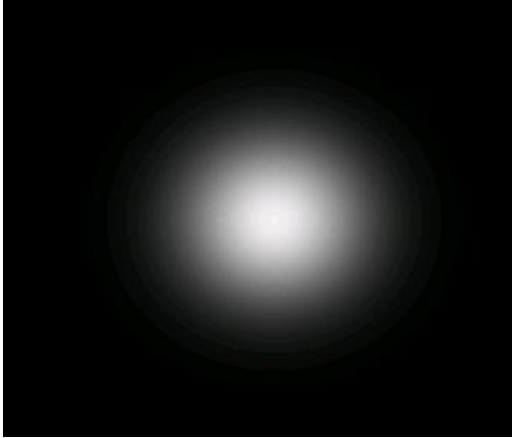
c)



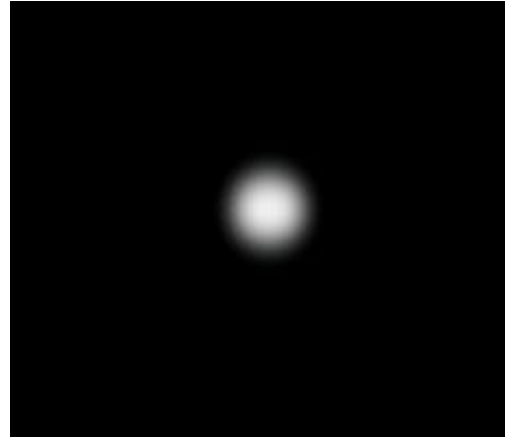
d)

48 pav. Pluoštų intensyvumo grafikai: (a) pradinio elipsiško pluošto, kai $\frac{w_y}{w_x} = 1.1$, intensyvumo skerspjūvio profilis, (b) transformuoto pluošto skerspjūvio profilis, (c) transformuoto pluošto skersinis intensyvumo pasiskirstymas x ašimi, (d) transformuoto pluošto skersinis intensyvumo pasiskirstymas y ašimi.

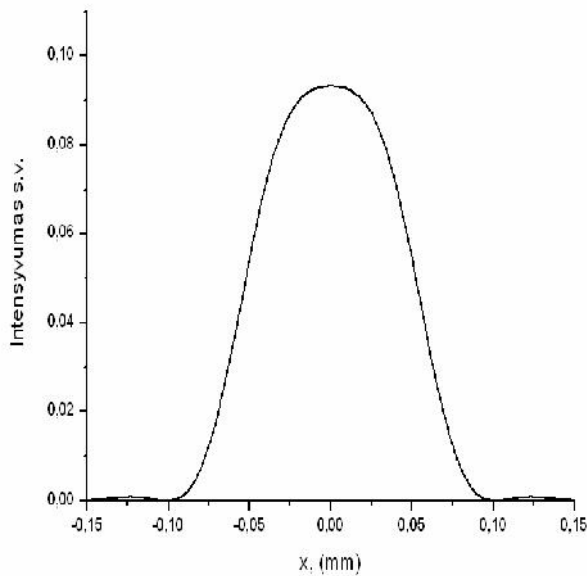
Pakartojami skaičiavimai, kai pluošto elipsiškumas yra lygus $\frac{w_y}{w_x} = 0.9$



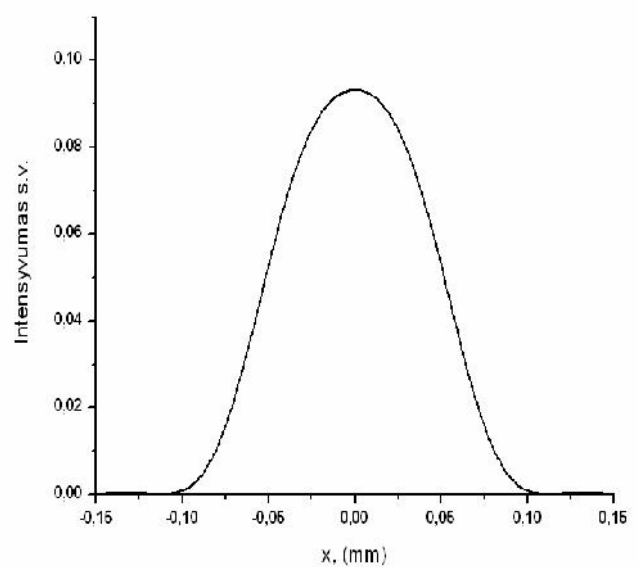
a)



b)



c)



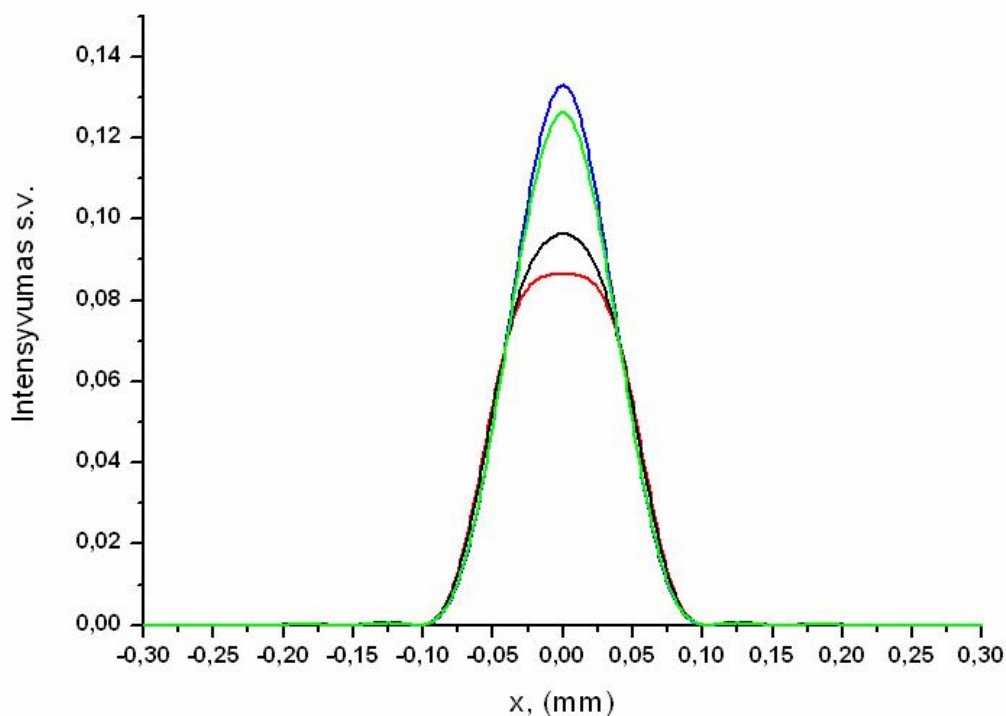
d)

y

49 pav. Pluoštų intensyvumo grafikai: (a) pradinio elipsiško pluošto, kai, $\frac{w_y}{w_x} = 0.9$, intensyvumo skerspjūvio profilis, (b) transformuoto pluošto skerspjūvio profilis, (c) transformuoto pluošto skersinis intensyvumo pasiskirstymas x ašimi, (d) transformuoto pluošto skersinis intensyvumo pasiskirstymas y ašimi.

Kaip matoma iš gautų rezultatų, pluošto elipsiškumas taip pat daro neigiamą įtaką transformuoto pluošto nelygumui. Naudojant fazinę kiaurymę, lazerio pradinis pluoštas turėtų būti kiek įmanoma mažiau elipsiškas.

Tiriant lazerio šviesos pluošto transformavimą per kiaurymę, svarbu parinkti tinkamą fazę, esant tam tikram kiaurymės pločiui. 50 paveiksle pavaizduoti grafikai apibūdinantys fazės pokyčio įtaką transformuojamam Gauso pluoštui.

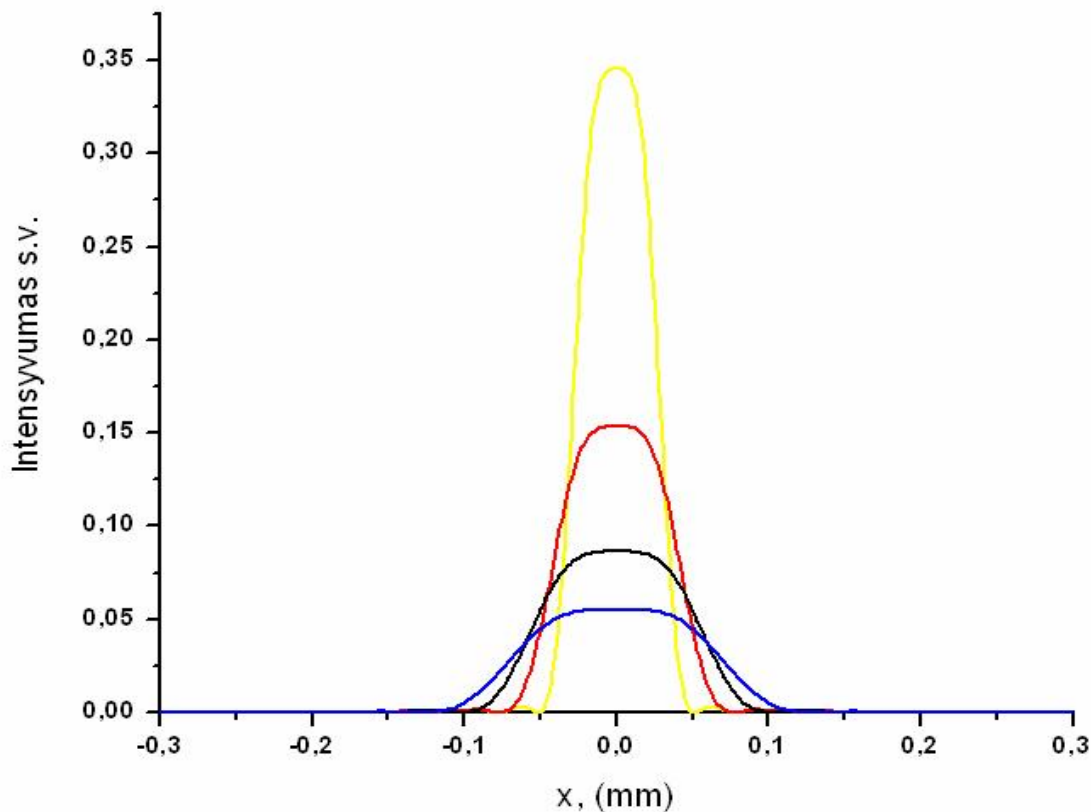


50 pav. Intensyvumo skersiniai skirstiniai išilgai koordinatės x , esant skirtingam fazės pokyčiui: $\varphi = 0.7\lambda$ (žalia linija), $\varphi = 0.6\lambda$ (juoda linija), $\varphi = 0.5\lambda$ (raudona linija), $\varphi = 0.3\lambda$ (mėlyna linija).

Iš grafikų pateiktų 50 paveiksle (mėlyna linija) matyti, kad esant fazei $\varphi < \pi$, intensyvumas išauga, o skersinis skirstinys tampa artimas Gauso. Didinant fazę stebimos smailės intensyvumas pradeda mažėti ir didžiausią plokščios viršūnės plotį gauname, kai gautas pokytis artimas plokščios viršūnės apskritiminiai formai prie $\varphi = \pi$ (50 pav. raudona linija). Toliau didinant fazės pokytį $\varphi > \pi$, intensyvumas pradeda vėl didėti, o plokščia centrinė dalis siaurėja, kol vėl skirstinys pasidaro panašus į Gauso skirstinį (50 pav. juoda ir žalia linija).

Kaip matoma iš gautų rezultatų, netinkamas fazės pokyčio parinkimas daro neigiamą įtaką transformuoto pluošto nelygumui.

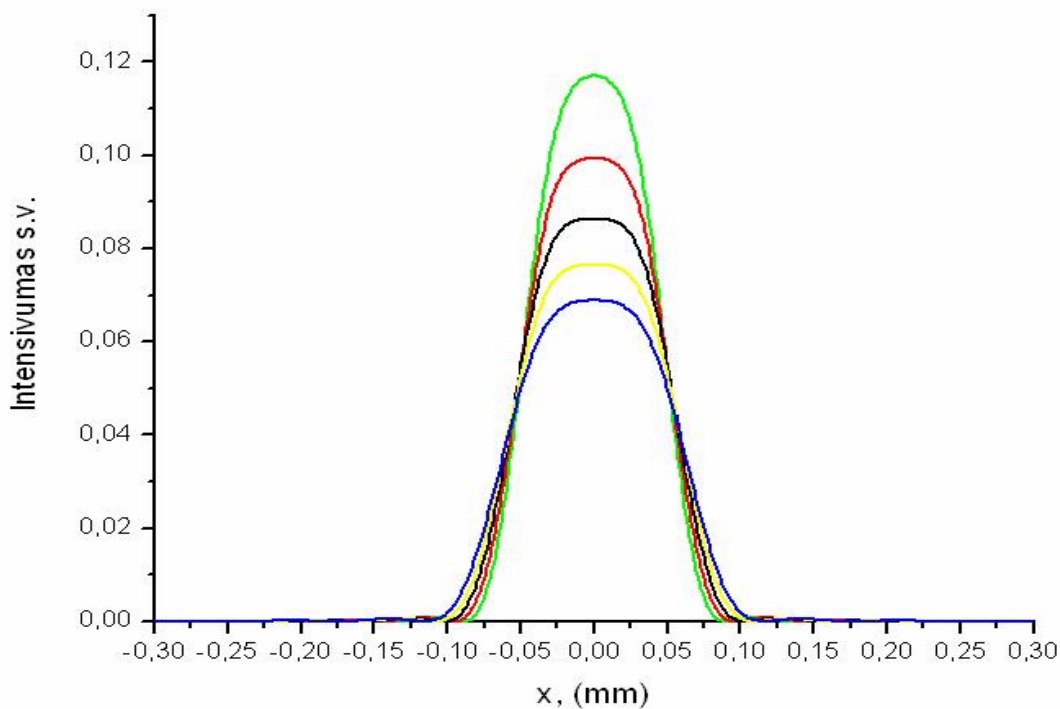
Tiriama, kaip transformuojasi lazerio šviesos pluoštas praėjęs per fazinę kiaurymę, keičiant lęšio židinio nuotolį, esant tiems patiems kiaurymės parametrams. Gauti intensyvumo skersiniai skirstiniai išilgai koordinatės x , pateikti 51 paveiksle.



51 pav. Intensyvumo skersiniai skirstiniai išilgai koordinatės x , esant skirtingiems lęšio židinio nuotoliams: geltona linija $f = 0.4$ m, raudona linija $f = 0.6$ m, juoda linija $f = 0.8$ m, mėlyna linija $f = 1$ m.

Matyti, kad keičiant lęšio židinio nuotolį, kinta centrinės smailės intensyvumas ir plotis. Intensyvumas mažėja didinant lęšio židinio nuotolį. Kai lęšio židinio nuotolį padidiname 0.40 m (geltona linija) matome, kad intensyvumas sumažėja 2 kartus, o pluošto plotis padidėja 2 kartus koordinatės x ašies kryptimi. Toliau didinant lęšio židinio nuotolį intensyvumas mažėja, didėjant pluošto pločiui x ašies kryptimi. Parinkus tinkamą lęšio židinio nuotolį yra gaunamas plokščios viršūnės intensyvumo skersinis skirstinys ($f = 0.8$ m juoda linija). Dar didinant lęšio židinio nuotolį transformuotas pluoštas praranda plokščios viršūnės formą ir tampa artimas Gauso pluoštui.

Lazerio šviesos pluoštas praeina per fazinę kiaurymę ir lęšį. Praėjęs jis transformuojasi. Todėl, buvo analizuota, kokią įtaką skersiniams skirstiniams turi ekrano nuotolis nelygus lęšio židinio nuotoliui. Gauti intensyvumo skersiniai skirstiniai išilgai koordinatės x ašies pateikti 52 paveiksle.



52 pav. Intensyvumo skersinių skirstinių pasiskirstymo priklausomybė nuo ekrano nuotolio: žalia linija $l = 0.70$ m, raudona linija $l = 0.75$ m, juoda linija $l = 0.80$ m, geltona linija $l = 0.85$ m, mėlyna linija $l = 0.90$ m.

Matyti, kad esant ekrano nuotoliui nuo lėšio $l = 0.70$ m (žalia linija) intensyvumo skirstinyje stebima smailė, kuri artima Gauso pluoštui. Smailės intensyvumas mažėja didinant ekrano nuotolį nuo lėšio. Padidinus ekrano nuotolį 0.05 m (raudona linija) matome, kad intensyvumas sumažėja, bet gautos smailės pluošto plotis išlieka artimas Gauso pluoštui, tik su mažesniu intensyvumu. Toliau didinant ekrano nuotolį, intensyvumas vėl mažėja ir didėja pluošto plotis koordinatės x ašies kryptimi. Pluoštas artėja į plokščios viršūnės apskritiminį paviršių. Ekrano nuotolį susilyginus su lėšio židinio nuotoliu, šviesos pluoštas įgyja plokščią viršūnę (juoda linija), o esant atstumui didesniau už lėšio židinio nuotolį, intensyvumas mažėja ir pluošto plotis praranda plokščios viršūnės apskritiminio paviršiaus formą. Iš grafiko pateikto 52 paveiksle matoma, kad esant ekrano nuotoliui nelygiam lėšio židinio nuotoliui, gauti intensyvumo skersiniai skirstiniai artimi Gauso pluoštui.

Išvados

1. Atlikus tyrimą buvo nustatyta, kad naudojant fazinį plyšį ir fazinę kiaurymę galima transformuoti Gauso pluoštą į plokščios viršūnės intensyvumo skirstinio profilio pluoštą.

2. Vienodo intensyvumo transformuoto pluošto plokščia viršūnė buvo gauta, kai fazinio plyšio įnešamas fazės pokytis yra lygus π , o atstumas iki lęšio 0.8 m. ir plyšio pločio santykis su Gauso pluošto pločiu yra 0.36.

3. Pluošto skersiniai skirstiniai priklauso nuo ekrano atstumo neatitikimo su lęšio židiniu. Neparinkus tinkamo atstumo, pluošto viršūnė praranda lygumą, formuojasi viršūnėje įduba arba iškilimas.

4. Transformuojant į plokščios viršūnės vienodo intensyvumo skersinius skirstinius, turi būti tiksliai parenkamas lazerio šviesos pluošto ir fazinio plyšio bei kiaurymės centriškumas.

5. Pradinis pluošto elipsiškumas daro neigiamą įtaką transformuoto pluošto plokščios viršūnės gavimui.

6. Pluoštas gali būti transformuotas į plokščios viršūnės stačiakampio skerspjūvio pluoštą, pastačius du sukryžiuotus 90° kampu fazinius plyšius.

LITERATŪRA

1. Beselio funkcija. http://lt.wikipedia.org/wiki/Beselio_funkcija [Prieiga per internetą, žiūrėta 2011-01-19].
2. Chiao R. Y., Garmire E., Townes C. H. (1964). Self-trapping of optical beams, *Physical Review Letters* 13, p. 479–482.
3. Cordingley J. (1994). Application of a binary diffractive optics for beam shaping a semiconductor processing by lasers. *Appl. Opt.*, v.32, No 14, pp.2538-2542.
4. Dickey F. M, Holswade S. C. (2000). *Laser Beam Shaping Theory and Techniques*.
5. Eismann M.T., Tai A.M., Cederquist J.N.(1989). Iterative design of holographic beam former. *Appl. Opt.*, v. 28, No.15, p.2641-2650.
6. Farn M.W. (1994). Modelling of diffractive optics. *OSA Proceedings of the Intern. Opt. Design Conf.*, v.22, p.246-250.
7. Fienup J. (1993). Phase – retrieval algorithms for a complicated optical system, *Appl. Opt.* 32 p.1737 – 1746
8. Frenelio ir Fraunhoferio difrakcija http://web.vu.lt/ff/v.pyragaite/brm/konspektai/text_07_frenel.pdf [Prieiga per internetą, žiūrėta 2011-02-20].
9. Jame J. Yang (2003). Analysis and optimization on single-zone binary flat-top beam shaper *Optical Engineering*, Vol. 42, November, No. 11.
10. Gabalis M. (2009). Lazerio pluošto dalinimas ir formavimas difrakciniais optiniais elementais. *Bakalauro darbas.VDU*.
11. Golub M. A. (2004). Laser beam splitting by diffractive optics // *Optics & Photonics News*.
12. Hessler T., Rossi M., Kunz R.E. (1998). Gale Analysis and optimization of fabrication of continuous-relief diffractive optical elements // *Appl.Opt.*- v.3. P.4069-4079.
13. Herzig H. (1997). *Micro-Optics: Elements, Systems & Applications*, Taylor and Francis, Ltd., London
14. Huigenso ir Frenelio principas (http://lt.wikipedia.org/wiki/Huigenso_ir_Frenelio_principas/). [Prieiga per internetą, žiūrėta 2010-12-14].
15. Kanapėnas R., (1988). *Lazerinė technologija*. V. p108.
16. Kreszig E. (1978). *Introductory Functional Analysis with applications*. New York: Jon Wiley and Sons.

17. Lansbergas G. S. (1955). Optika, V.
18. Lauterborn W., Kurz T. (2003). Coherent optics Fundamentals and Applications. Springer. Appl. Opt. 32.p.737 – 746.
19. Poleshchuk A.G. (1998). Techniques for formation of the surface profile of diffractive optical elements//Optics and lasers in engineering. Vol.29, No.4-5, p.289-306.
20. Požėla I., Radvilavičius Č. (2003). Optika ir atomo fizika. K.
21. Račiukaitis G. Lazerinis suvirinimas (http://www.fi.lt/aplinka/index.php?menu_item=apie+lazerines+technologijas) [Prieiga per internetą, žiūrėta 2011-03-14].
22. Soifer V. A. (2001). Methods for Computer Design of Diffractive Optical Elements, Wiley-Interscience
23. Tan C., Peng C. S., Petryakov V. N., Verevkin Yu. K., Zhang J., Wang Z., Olaizola S. M., Berthou T., Tisserand S. ir Pessa M. (2008). Line defects in two-dimensional four-beam interference patterns // New Journal of Physics. p10.
24. Ведерников В.М., Вьюхин В.П., Кирьянов В.П., Коронкевич В.П., Кокоулин Ф.И, Полещук А.Г., Лохматов А.И., Наливайко В.И., Тарасов Г.Г., Щербаченко А.М., Юрлов Ю.И. (1979). Синтез оптических элементов с осевой симметрией прецизионным лазерным (киноформов) фотопостроителем.// Всес. конференция «Формирование изображения и методы его коррекции» Могилев, ИФ АН БССР
25. Воронцов М. А. и др. (1987). Бинарный дифракционный оптический элемент, гауссовой пучок в продольный отрезок // Компьютерная оптика М. №1. с.74-78
26. Волков А.В, Котляр В.В, Моисеев О.Ю. (2000). Бинарный дифракционный оптический элемент, гауссовой пучок в продольный отрезок // Оптика и спектроскопия. Том 89. №2б,с.343-348
27. Голуб М.А. и др., (1990). Эксперимет с фокусатором гауссового пучка в прямоугольник с постоянной интенсивности. Компьютерная оптика. М. N.7, с.42-49.
28. Грейсух Г.И., Ежов Е.Г., Казин С.В., Степанов С.А. (2010). Анализ возможностей ахроматизации оптических систем, состоящих из дифракционных элементовю Компьютерная оптика, том 34, №2 <http://elibrary.ru/download/52648599.pdf> [Prieiga per internetą, žiūrėta 2011-01-10].
29. Коронкевич В.П. и др. (1985). Киноформные оптические элементы: методы расчота, технология изготовление, практическое применение.М. N.1, с. 4-25

30. Полещук А.Г. (2007). Методы изготовления и контроля дифракционных оптических элементов / А.Г. Полещук, В.П. Корольков // Сборник трудов научно-практической конференции. Голография в России и за рубежом. Наука и практика. с.5-12
31. Полещук А.Г. (2008). Дифракционная оптика. [http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:OnqPvR8Qcd4J:www.mtk-magazine.ru/file/MTK_8.pdf+%D0%9F%D0%BE%D0%BB%D0%B5%D1%89%D1%83%D0%BA+%D0%90.%D0%93.+\(2008\)+%D0%B4%D0%B8%D1%84%D1%80%D0%B0%D0%BA%D1%86%D0%B8%D0%BE%D0%BD%D0%BDa%D1%8F+%D0%BE%D0%BF%D1%82%D0%B8%D0%BAa&cd=8&hl=lt&ct=clnk&gl=lt&source=www.google.lt](http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:OnqPvR8Qcd4J:www.mtk-magazine.ru/file/MTK_8.pdf+%D0%9F%D0%BE%D0%BB%D0%B5%D1%89%D1%83%D0%BA+%D0%90.%D0%93.+(2008)+%D0%B4%D0%B8%D1%84%D1%80%D0%B0%D0%BA%D1%86%D0%B8%D0%BE%D0%BD%D0%BDa%D1%8F+%D0%BE%D0%BF%D1%82%D0%B8%D0%BAa&cd=8&hl=lt&ct=clnk&gl=lt&source=www.google.lt) [Prieiga per internetą, žiūrėta 2011-03-10].
32. Полещук А.Г. (1996). Методы формирования профиля поверхности дифракционных оптических элементов. Компьютерная оптика. - М., МЦНТИ, вып. 16, с.54-61.
33. Прудников А.П., Брычков Ю.А., Маричев О.И. (1983). Интегралы и ряды. Специальные функции. М., Наука.
34. Харитонов С.И., Казанский Н.Л., Дмитриев А.Ю. Дифракция пространственно-ограниченного пучка на радиально-симметричных дифракционных оптических элементах. <http://elibrary.ru/download/38881356.pdf> [Prieiga per internetą, žiūrėta 2011-01-10].