

Vilniaus universitetas
Fizikos fakultetas
Lazerinių tyrimų centras

Giedrius Martynaitis

**Sinchroniškai kaupinamo optinio parametrinio osciliatoriaus
erdvinių pluošto savybių tyrimas**

Magistrantūros studijų baigiamasis darbas

Lazerinės fizikos ir optinių technologijų

studijų programa

Studentas

Giedrius Martynaitis

Leisti ginti

2018 05 28

Darbo vadovas

Dr. Kipras Redeckas

Konsultantai:

Ignas Stasevičius

Prof. Dr. Mikas Vengris

Recenzentas

Doc. Dr. Vygandas Jarutis

Centro direktorius

Prof. Dr. Roaldas Gadonas

Vilnius 2018

Turinys

1. Įvadas	3
2. Teorija	5
2.1. Fizikiniai optinės parametrinės generacijos principai	5
2.2. Optiniai parametriniai osciliatoriai.....	6
2.3. Gauso pluoštas	9
2.4. Pluošto kokybės parametrai	12
2.5. Daugelio skersinių modų struktūra, nuostoliai.....	13
2.6. OPO pluoštų matematinio modeliavimo principai	14
3. OPO erdvinės pluošto kokybės tyrimo metodinė dalis.	16
4. Rezultatai ir diskusija.....	19
4.1. OPO pluošto parametrai, kai keičiami kaupinančios bei signalinės bangų diametrai.....	19
4.2. OPO pluošto parametrai kaupinant simetriniu bei asimetriniu pluoštu.....	25
4.3. OPO pluošto parametrų astigmatizmo bei asimetrijos tyrimas	31
5. Išvados.....	40
6. Santrauka.....	41
7. Summary	42
8. Literatūros sąrašas.....	43

1. Įvadas

Dėl savo plataus bangų ilgio derinimo diapazono stovinčios bangos optinis parametrinis osciliatorius (OPO) yra mėgstamas tyrimų įrankis mikroskopijoje, spektroskopijoje, medicinoje bei kitose srityse [1]. Medicinoje OPO gali būti panaudotas selektyviam ląstelių žadinimui, įvairių darinių detekcijai bei fototerapijai [2]. Taip pat OPO gali būti pritaikytas įvairių rūšių spektroskopiniuose tyrimuose: kinetinėje, pavienių molekulių, žadinimo zondavimo bei fluorescencijos. Vienas pagrindinių bet kokio lazerinio įrenginio parametrų yra erdvinė pluošto kokybė, kuri yra labai svarbi daugeliui anksčiau išvardintų taikymo sričių.

Erdvinė pluošto kokybė gali būti apibūdinta tokiais parametrais: pluošto diametru, skėstimi, astigmatizmu, asimetrija ir kitais. Erdvinę pluošto kokybę gali lemti daugelis veiksnių pradedant prastos kokybės optika ir baigiant termolėšio atsiradimu medžiagose, esant didelio intensyvumo spinduliuotei. Daugeliui šiuolaikinių taikymų yra norima turėti geriausią erdvinę pluošto kokybę, kuri labiausiai atitiktų fundamentinę Gauso (Gauss) modos struktūrą. Optinių parametrinių osciliatorių laikinės bei spektrinės savybės yra sudėtingos. Tai lemia grupinių greičių dispersija, šviesos impulsų fazės moduliavimasis ir kiti reiškiniai, kurie daro įtaką osciliatoriaus veikimui. Šios savybės yra neblogai iširtos ir išanalizuotos, tuo tarpu erdvinės pluošto charakteristikos nėra labai išsamiai išanalizuotos [10, 16, 22, 23]. Siekiant geriau suprasti nuo ko priklauso optinio parametrinio osciliatoriaus pluošto kokybė šiame darbe atliekamas OPO erdvinės pluošto kokybės tyrimas. Pirmojoje darbo dalyje yra keičiami kaupinančios bei signalinės bangų pluošto diametrai. Antroje darbo dalyje yra keičiama optinio parametrinio osciliatoriaus netiesinio kristalo padėtis, kaupinančio pluošto sąsmaukos atžvilgiu, bei keičiama kaupinančio pluošto sąsmauka, netiesinio kristalo atžvilgiu. Tai atliekama kaupinčiai bangai esant simetrinei ir asimetrinei y kryptimi (kai x ir y statmenos pluošto sklidimo kryptims). Trečioje darbo dalyje dėmesys sutelkiamas į asimetrijos bei astigmatizmo pokyčius, stengiamasi išsiaiškinti kas juos lemia. Norint išryškinti atsirandančias tendencijas rezonatoriuje buvo sukurta papildoma asimetrija su skirtingo pločio stiklo plokštelėmis. Bandymų metu buvo keičiami įvairūs OPO parametrai: kaupinančios bangos sąsmaukos padėtis, asimetrijos plokštelės plotis, stabilumo parametrų vertės, netiesinio kristalo padėtis, kaupinančios spinduliuotės galia. Atliekant visus eksperimentus buvo matuoti OPO spinduliuotės pluošto parametrai.

Darbo tikslai:

- Sukurti optinę sistemą, kuria būtų galima matuoti OPO erdvinius parametrus kai keičiama: signalinės ir kaupinančios bangos pluoštų diametrai, kaupinančios bangos asimetrija, signalinės bangos asimetrija.

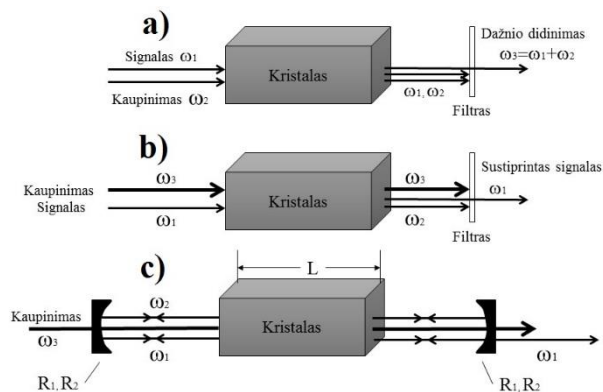
- Nustatyti, kaip kinta OPO erdviniai parametrai ir galia priklausomai nuo kaupinančios bei signalinės bangų pluoštų diametrų.
- Nustatyti, kaip kinta OPO signalinės bangos pluošto parametrai, kai sistema kaupinama simetrine ir asimetrine banga.
- Nustatyti kokią reikšmę OPO signalinės bangos pluošto savybėms turi netiesinio kristalo padėtis ir kaupinančio pluošto sąsmaukos padėtis.
- Nustatyti ar įnešant papildomą asimetriją į rezonatorių galima pakeisti esamą rezonatoriaus pluošto asimetriją.
- Nustatyti ar kaupinimo galia turi įtakos OPO pluošto parametrams ir kokie procesai už tai atsakingi, kai rezonatoriuje yra sukurta papildoma asimetrija ir kai jos nėra.

2. Teorija

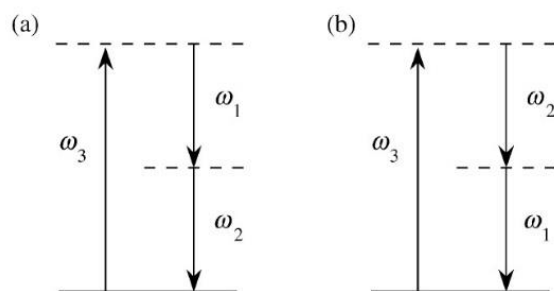
2.1. Fizikiniai optinės parametrinės generacijos principai

Esant trimis bangoms, kurios tenkina fazinio sinchronizmo sąlygą ir kurių dažniai yra ω_1 , ω_2 , ir ω_3 , netiesiniame kristale galima atlikti vadinamąjį trijų bangų maišymą. Kalbant apie parametrinius procesus yra įprasta ω_1 dažnio bangą vadinti signaline (ω_s), ω_2 – šalutine (ω_l) ir ω_3 – kaupinančia (ω_p). Kaupinančios spinduliuotės bangos ilgis yra mažiausias (energija didžiausia) lyginant su signaline bei šalutine bangomis. Tribangis maišymas - tai parametrinis procesas, kurio metu netiesiniame kristale sąveikauja trys bangos. Priklausomai nuo to, kurios bangos įvedamos iš išorės egzistuoja keletas skirtingų prietaisų tipų. 1 a) paveiksle vaizduojama suminio dažnio generatoriaus principinė schema. Dažnių ω_1 ir ω_2 bangos yra įvedamos į netiesinę terpę ir gaunama didesnio dažnio $\omega_3 = \omega_2 + \omega_1$ banga. Taip pat galima gauti ir skirtuminio dažnio generatorių, kai ω_3 dažnio banga sąveikauja su ω_1 banga ir yra generuojama mažesnio dažnio $\omega_2 = \omega_3 - \omega_1$ banga. 1 pav. b) vaizduojama principinė parametrinio stiprintuvo schema, kai sąveikauja visų trijų ω_1 , ω_2 , ω_3 dažnių bangos ir gaunamas ω_1 dažnio bangos stiprinimas. Kaupinanti dažnio ω_3 banga suteikia reikalingą energiją stiprinimui. 1 pav. c) vaizduojama principinė parametrinio osciliatoriaus schema, detaliau ji apžvelgta 2.2 skyriuje [3].

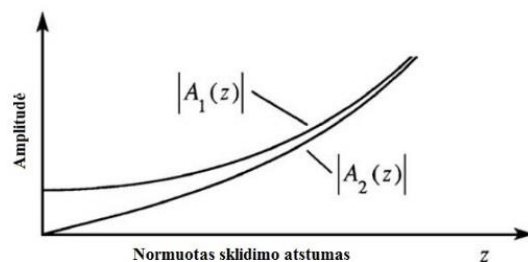
Parametrinis stiprinimas gali būti gaunamas skirtuminio dažnio generacijos metu, kai stiprinama mažesnio dažnio banga. Būtent šis procesas yra pritaikomas stovinčios bangos parametriniuose šviesos osciliatoriuose. Įgyvendinimui yra naudojami įvairūs netiesiniai kristalai,



1 pav. Optinių parametrinių prietaisų principinės schemas a) suminio dažnio generatorius b) optinis parametrinis stiprintuvas c) optinis parametrinis osciliatorius [3, 4, 5].



2 pav. Skirtuminio dažnio generacijos energijos lygmenų diagrama [4, 5].



3 pav. Skirtuminio dažnio generacijos metu sąveikaujančių bangų amplitudžių priklausomybė nuo sklaidimo atstumo [4, 5].

tokie kaip beta bario boratas (BBO) ar kalio titanilo fosfatas (KTP) ir kiti [4]. Skirtuminio dažnio generacijos proceso metu generuojama mažesnio dažnio spinduliuotė, tai reiškia, kad spinduliuotė pastumiama į ilgabangę sritį. Energijos lygmenų diagrama vaizduojama 2 pav. Iš jos galima matyti, kad silpna dažnio ω_1 banga skatina generuoti ω_2 dažnio bangą, esant stipriam kaupinimo bangos ω_3 laukui. Atvirkščias procesas taip pat veikia (2 pav. b)), kai ω_2 dažnio banga skatina ω_1 bangos atsiradimą, taigi abi bangos stiprėja vienu metu. Tokia sąveika yra vadinama parametriniu šviesos stiprinimu, kurio metu nedalyvauja realūs energijos lygmenys. Šių sąveikaujančių bangų amplitudžių priklausomybė nuo sklidimo atstumo vaizduojama 3 pav., abiem bangoms būdingas eksponentinis amplitudžių augimas, kai neatsižvelgiama į kaupinančios bangos nuskurdinimą [4, 5].

2.2. Optiniai parametriniai osciliatoriai

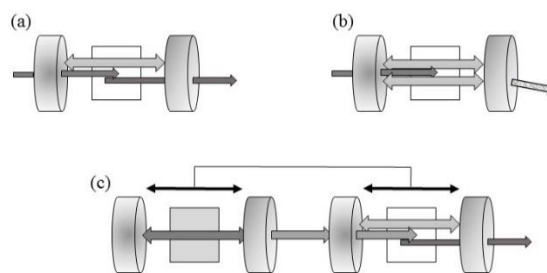
Stovinčios bangos optinio parametrinio osciliatoriaus principinė schema pavaizduota 1 pav. c). Kaip minėta 2.1 skyriuje, OPO generacijos procesas yra panašus į skirtuminio dažnio generaciją, esant parametriniam stiprinimui. Schemoje vaizduojama ilgio L netiesinė terpė ir grįžtamąjį ryšį suteikiantys veidrodžiai, kurie gali būti atspindintys signalinę bangą (atspindžio koeficientas R_1) arba atspindintys signalinę ir šalutinę bangą (atspindžio koeficientai R_1, R_2). Taigi optinio parametrinio osciliatoriaus viduje gali osciliuoti tik signalinė banga arba signalinė ir šalutinė bangos. Pagal tai, kiek bangų osciliuoja rezonatoriaus viduje, OPO yra skirstomi į vienbangius ir dvibangius. Pastarieji bei sinchroninio kaupinimo optinio parametrinio osciliatoriaus principinės schemas vaizduojamos 4 pav. [4].

Kad vyktų generacija, yra reikalinga, kad stiprinimas per vieną rezonatoriaus apėjimą viršytų nuostolius, kurie susidaro dėl atspindžių nuo veidrodžių, difrakcijos, sklaidos ir kitų faktorių [11]. Tribangės sąveikos fazinį sinchronizmą galima užrašyti $\Delta k = k_3 - k_2 - k_1 = 0$. OPO generavimo sąlyga:

$$e^{2gL} - 1 = 2(1 - R), \quad (1)$$

čia g – stiprinimo koeficientas, L – netiesinės terpės ilgis, R – veidrodžių atspindžio koeficientas, kuris yra lygus signalinei ir šalutinei bangoms $R_1 = R_2 = R$. Bendriausiu atveju, kai $R_1 \neq R_2$ generacijos sąlygą galima užrašyti taip:

$$\cosh(gL) = 1 + \frac{l_s l_i}{2 - l_s - l_i}, \quad (2)$$



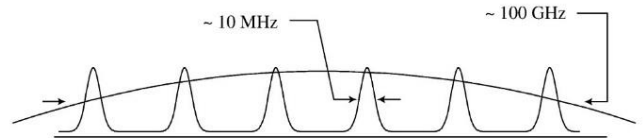
4 pav. Optinio parametrinio osciliatoriaus tipai a) vienbangis b) dvibangis c) sinchroninio kaupinimo [4, 5].

čia $l_j = 1 - R_j e^{-\alpha_j L}$ ($j=s,i$) amplitudės nuostoliai per vieną rezonatoriaus apėjimą, α_j – sugerties koeficientas atitinkamai bangai. Dvibangio OPO atveju laikome, kad $l_s l_i \ll 1$, o vienbangio $l_i = 1$, $l_s \ll 1$. Pagal (2) matome, kad generacijos sąlygos bus skirtingos vienbangiam ir dvibangiam OPO. Jas galima išreikšti:

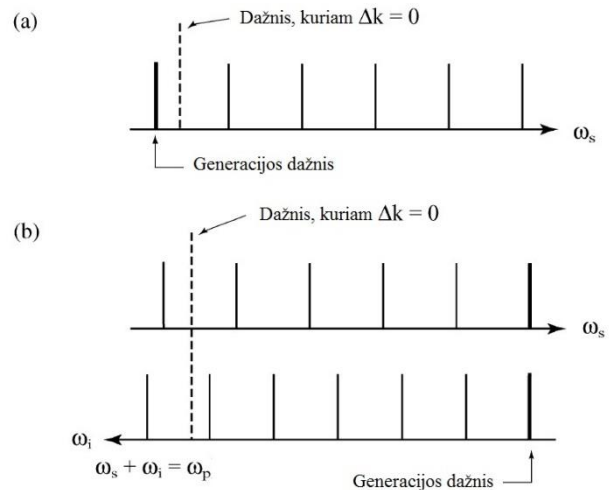
$$g^2 L^2 = 2l_s \text{ vienbangiui OPO (3)}$$

$$g^2 L^2 = l_s l_i \text{ dvibangiu OPO (4) [4].}$$

Optinio parametrinio osciliatoriaus stiprinimo juosta dažniausiai yra daug platesnė, nei vienos išilginės modos plotis (5 pav.), taigi atrodytų, kad OPO galėtų generuoti daug išilginių modų vienu metu, tačiau realybėje yra kitaip. Schematinė vienbangio ir dvibangio optinio parametrinio osciliatoriaus išilginių modų struktūra bei generavimo dažniai vaizduojami 6 pav. Vienbangio OPO atveju generuojama yra ta išilginė moda, kuri yra arčiausiai stiprinimo juostos maksimumo padėties, o generuojamos spinduliuotės dažnis atitiks dažnį, kuriam geriausiai tenkinama fazinio sinchronizmo $\Delta k = 0$ sąlyga. Gretimos išilginės modos nebus stiprinamos dėl stiprinimo juostos nuskurdinimo, kadangi nebus išpildoma generacijos sąlyga. Dvibangio OPO atveju



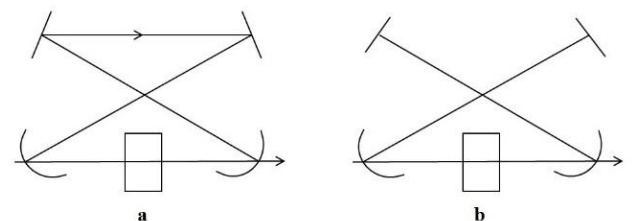
5 pav. Stiprinimo juostos kontūras ir OPO modų struktūra [4, 5].



6 pav. a) vienbangio OPO modų struktūra b) dvibangio OPO modų struktūra [4,5].

generacija vyks tik tose dvejose išilginėse modose, kurių dažniai sutaps su rezonatoriaus savųjų modų dažniais. Šie dažniai nebūtinai yra arčiausiai stiprinimo juostos maksimumo. Dėl šios priežasties dvibangių OPO bangos ilgio derinimas nėra toks tolydus kaip vienbangių. Verta paminėti, kad dvibanguose optiniuose parametriniuose osciliatoriuose atstumas tarp išilginių modų nėra pastovus dažnio atžvilgiu, taip pat toks prietaisas yra mažiau stabilus [4, 5].

Sinchroninis kaupinimas reiškia, kad OPO rezonatoriaus ilgis tiksliai sutampa su kaupinimui naudojamu lazerio rezonatoriaus ilgiu. Kaupinimui dažniausiai naudojami lazeriniai



7 pav. a) žiedo b) stovinčios bangos rezonatorių principinės schemas [12].

osciliatoriai dėl didelio pasikartojimų dažnio ir sąlyginai mažos impulsų energijos. Taip kaupinami optiniai parametriniai osciliatoriai skirti itin trumpiems impulsams generuoti. Sinchroniškai

kaupinamų OPO smailinės galios bei konfigūracijos yra panašios į vienabangių OPO kaupinamų nuolatinės veikos lazeriais. Itin trumpus impulsus generuojančius optinius parametrinius osciliatorius yra sunku išsamiai išnagrinėti dėl daugelio efektų, kurie daro įtaką jų veikimui. Tokie reiškiniai kaip grupinių greičių dispersija, šviesos impulsų fazės moduliavimasis, laikiniai nestabilumai ir kiti veiksniai vienu metu gali lemti OPO veikimą. Atskirti įvairių veiksnių įtaką labai sunku, dėl to dažnai yra nelengva taikyti analitinius sprendinius [22, 23]. Žiedo formos ir stovinčios bangos OPO rezonatoriaus konfigūracijos vaizduojamos 7 pav. Populiareesnė yra stovinčios bangos, dėl lengvai keičiamo rezonatoriaus ilgio. Žiedo formos konfigūracijoje sugeneruota banga vieno apėjimo metu pro aktyviają terpę praeina vieną kartą, tai sumažina nuostolių bei fazės moduliavimosi įtaką, taip pat sumažina medžiagos pramušimo tikimybę. Rezonatoriuose taip pat gali būti dispersiją valdančių elementų, pavyzdžiui prizminis impulsų spaustuvas. Jie reikalingi norint valdyti impulso dispersiją, nuo kurios daugiau ar mažiau priklauso rezonatoriaus stabilus veikimas, spektro forma ir kiti parametrai [4, 12].

Optinių parametrinių osciliatorių bangos ilgio derinimas yra apibrėžtas energijos tvermės dėsnio. Iš esmės galimas bet kokio dažnio signalinės bangos ω_s , mažesnio nei ω_p generavimas, kai tenkinama sąlyga $\omega_i + \omega_s = \omega_p$. Signalinės bangos dažnis gali būti keičiamas valdant fazinio sinchronizmo sąlygą $\Delta k = 0$, tai atliekama keičiant netiesinės terpės orientaciją arba temperatūrą. Naudojant temperatūrinį dažnio derinimą dažniausiai naudojamas 90° fazinis sinchronizmas, kai neegzistuoja pluoštų nunešimas. Generuojamos juostos plotis dažnai yra ribotas rezonatoriuje naudojamos optikos spektrinėmis savybėmis [4,5].

Kalbant apie stabilius optinius parametrinius osciliatorius jiems galioja įprastinių rezonatorių stabilumo principai. Tarkime, kad rezonatorių sudaro du sferiniai veidrodžiai, kurių kreivumo spinduliai R_1 ir R_2 , o atstumas tarp veidrodžių L . Rezonatorius laikomas stabilium, kai lygiagrečiai optiniai ašiai įleistas pluoštas lieka rezonatoriuje po begalės atsispindėjimų nuo rezonatoriaus veidrodžių. Galima įvesti rezonatoriaus stabilumo parametrus: [10]

$$g_i = 1 - \frac{L}{R_i}, \quad i = 1, 2 \quad (5)$$

Tada rezonatoriaus stabilumo sąlygą galima užrašyti:

$$0 < g_1 g_2 < 1 \quad (6) \quad [10]$$

2.3. Gauso pluoštas

Optinėse technologijose dažniausiai sutinkamas yra Gauso pluoštas. Taip yra dėl to, kad tokio tipo pluošto energija yra lokalizuota apie sklidimo ašį, sąsmaukoje kampinė skėstis yra labai maža bei dauguma lazerių generuoja būtent Gauso pluoštą. [7]

Gauso pluošto amplitudė aprašoma:

$$A(r) = a_v \exp(-r^2/W_0^2), \quad (7)$$

čia a_v – pluošto amplitudė, $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ radialinė koordinatė, W_0 – apibūdina ašinius pluošto matmenis [13].

Gauso pluošto spindulys yra funkcija nuo atstumo z :

$$W(z) = W_0 \left[1 + \left(\frac{z}{z_0} \right)^2 \right]^{1/2}. \quad (8)$$

Minimali vertė W_0 yra kai $z=0$, ji vadinama pluošto sąsmauka. W_0 – pluošto spindulys sąsmaukoje, o dydis $2W_0$ – pluošto diametras. Pluošto spindulys didėja didėjant z vertei ir pasiekia vertę $\sqrt{2}W_0$, kai $z=z_0$. Kai $z \gg z_0$, tai:

$$W(z) \approx \frac{W_0}{z_0} z = \theta_0 z, \quad (9)$$

čia θ_0 – pluošto skėstis, kuri dar gali būti išreikšta:

$$\theta_0 = \frac{2}{\pi} \frac{\lambda}{2W_0}, \quad (10)$$

kur λ yra bangos ilgis.

Pluošto skėstis yra tiesiogiai proporcinga bangos ilgiui ir atvirkščiai proporcinga pluošto diametrui [13]. Stabilus rezonatorius skėstis gali būti apskaičiuota žinant jo stabilumo parametrus g_1 , g_2 ir rezonatoriaus ilgį L :

$$\theta_0^2 = \frac{\lambda}{\pi L} \frac{|g_1 + g_2 - 2g_1g_2|}{\sqrt{g_1g_2(1-g_1g_2)}} \quad (11) \quad [10].$$

Kitas svarbus parametras yra Reilėjaus ilgis:

$$z_0 = \frac{\pi W_0^2}{\lambda}, \quad (12)$$

kuris yra lygus ilgiui, kai pluošto spindulys sklisdamas nuo sąsmaukos padidėja $\sqrt{2}$ karto. Vaizduojama 8 pav. [3, 6].

Gauso pluošto intensyvumas yra funkcija, priklausanti nuo išilginio atstumo z ir ašinio atstumo $\rho = (x^2 + y^2)^{1/2}$ ir gali būti aprašyta formule:

$$I(\rho, z) = I_0 \left[\frac{W_0}{W(z)} \right] \exp \left[-\frac{2\rho^2}{W^2(z)} \right], \quad (13)$$

čia $I_0 = |A_0|^2$, $W(z)$ – pluošto spindulys, W_0 – minimalus spindulys. Gauso funkcija pasiekia maksimumą I_0 kai $\rho = 0$ ir $z = 0$. Pluošto spindulys $W(z)$ didėja augant išilginiam atstumui z . Tai vaizduojama 9 pav. Didėjant atstumui z , intensyvumas krinta ir pasiekia vertę $I_0/2$, kai $z = \pm z_0$. Esant $|z| \gg z_0$ intensyvumas yra lygus $I(0, z) = I_0 z_0^2 / z^2$ [3].

Gauso impulso galia yra intensyvumas integruotas pagal laiką ir yra aprašomas formule:

$$P = \frac{1}{2} I_0 (\pi W_0^2) \cdot (14)$$

Lęšiu fokusuojant kolimuotą Gauso pavidalo pluoštą, sąsmaukos vieta yra lęšio židinio plokštumoje. Galima užrašyti:

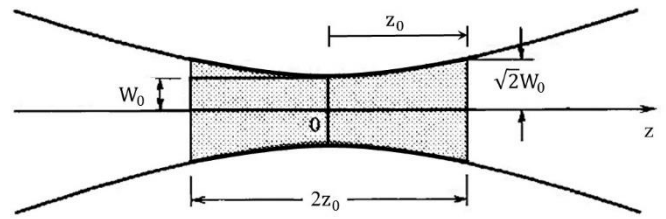
$$W_0 \cdot W(f) \approx \frac{f\lambda}{\pi}, (15)$$

Čia dėmės dydis W_0 , $W(f)$ – dėmės dydis ant lęšio, f – lęšio židinio nuotolis. Iš (15) matome, kad norint fokusuoti į kuo mažesnę dėmę reikia kuo daugiau išnaudoti lęšio apertūrą. Turint fokusuojančio lęšio parametą $D = \pi W(f)$, tokį, kad prarandama tik apie 1% energijos, ir tuo pačiu kitą parametą $d_0 = 2W_0$, kuris atitinka $\frac{1}{e^2} \approx 14\%$ nuotolių, galima užrašyti fokusuojamo Gauso pluošto efektyvųjį diametą [6]:

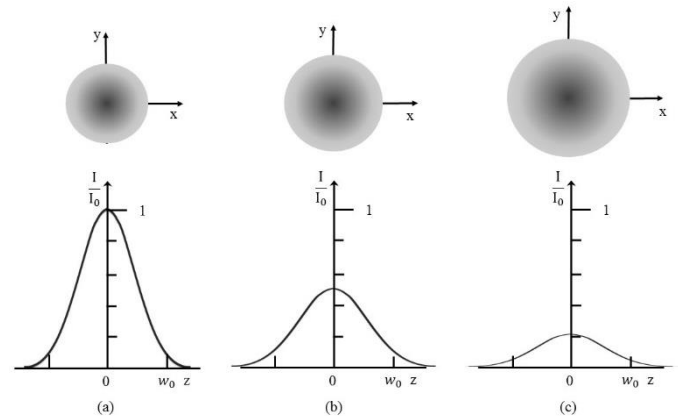
$$d_0 \approx \frac{2f\lambda}{D} (16). [6]$$

10 pav. vaizduojamas Gauso pluošto fokusavimas į du skirtingus dėmių dydžius $2W_{01}$ ir $2W_{02} > 2W_{01}$. Matome, kad fokusuojant į mažesnę dėmę W_{01} dėl difrakcijos pluoštas plečiasi daug greičiau, bei turi trumpesnę Reilėjaus ilgį. Reikia paminėti, kad fokusuojant kolimuotą pluoštą su realiu

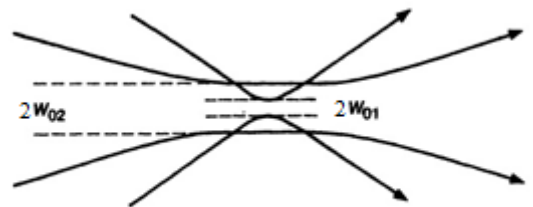
lęšiu fokusavimo padėtis ne visiškai sutampa su lęšio židinio nuotoliu. Ji būna šiek tiek paslinkta arčiau fokusuojančio lęšio, tačiau poslinkis yra toks mažas, kad dažniausiai jis yra nepaisomas [6].



8 pav. Gauso pluošto Reilėjaus ilgis bei fokusavimo gylis [3].



9 pav. Normalizuotas Gauso pluošto intensyvumas esant skirtingoms z vertėms [3].



10 pav. Gauso pluošto fokusavimas į dvejų dydžių modas [6].

Kadangi judant z kryptimi į abi puses pluoštas išsifokusuoja, tai dydis, kai pluošto spindulys yra ne didesnis nei $\sqrt{2}W_0$ yra vadinamas fokusavimo gyliu (8 pav.). Jis taip pat yra lygus dvigubam Reilėjaus ilgiui:

$$2z_0 = \frac{2\pi W_0^2}{\lambda} \quad (17).$$

Fokusavimo gylis yra tiesiogiai proporcingas pluošto spindulio kvadratui ir atvirkščiai proporcingas bangos ilgiui. Fokusuojant į mažą dėmę fokusavimo ilgis yra mažas, dėl to rasti tikslią fokusavimosi padėtį yra sunku. Jei pluoštas sufokusuojamas iki N bangos ilgių diametro, tai fokusavimosi gylis yra $\sim N^2$ [3,6]. Reikia paminėti, kad naudojant bet kokią optiką pluošto fokusavimui du parametrai nekinta: pluošto parametru sandauga BPP (*angl. beam parameter product*) bei santykis tarp pluošto skerspjūvio ploto su Reilėjaus ilgiu: [10]

$$BPP = \frac{W^2\pi}{z_0} = \pi w\theta, \quad (18)$$

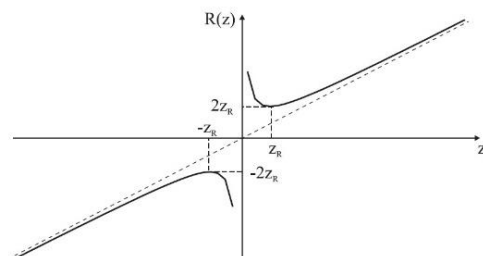
BPP visada skaičiuojamas sąsmaukoje.

11 pav. vaizduojama Gauso pluošto kreivumo spindulio priklausomybė nuo atstumo z . Matome, kad taške $z = 0$ kreivumo spindulys yra begalinis, t.y. sutampa su plokščiosios bangos fronto kreivumo spinduliu. Minimalią vertę $2z_0$ pasiekia kai $z = z_0$, tai padėtis, kai Gauso pluošto bangos fronto išlinkimas yra didžiausias. Toliau didinant atstumą z kreivumo spindulys $R(z)$ didėja iki vertės $R(z) \approx z$, kai $z \gg z_0$, tai galima laikyti, kad bangos frontas yra sferinės bangos. Neigiamoms z vertėms galioja tos pačios taisyklės. Yra sutarta, kad besiskečiantis bangos frontas yra teigiamo spindulio, o konverguojantis neigiamo [3].

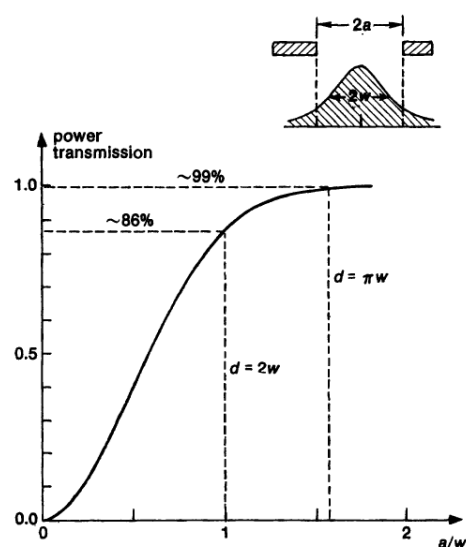
Norint pilnai apibūdinti Gauso pluoštą reikia žinoti jo: maksimalią amplitudę A_0 , kryptį, sąsmaukos padėtį ir vieną iš dviejų parametru: spindulį sąsmaukoje W_0 arba Reilėjaus ilgį z_0 .

Gauso pluošto, praėjusio pro apertūrą, santykinę galią galima aprašyti formule:

$$P = 1 - e^{-\frac{2a^2}{w^2}}, \quad (19)$$



11 pav. Gauso pluošto kreivumo spindulio priklausomybė nuo atstumo z . Punktyrinė linija žymi sferinės bangos kreivumo spindulį [7].



12 pav. Gauso pluošto galios pralaidumo priklausomybė nuo apertūros spindulio bei pluošto spindulio santykio [6].

čia a – apertūros spindulys, W – pluošto spindulys. 12 pav. vaizduojama Gauso pluošto galios pralaidumo priklausomybė nuo apertūros spindulio bei pluošto spindulio santykio. Kaip matome apertūra, kurios diametras $2a = W$ praleidžia $\approx 86\%$ galios, o apertūra, kurios diametras $2a = \pi W$ praleidžia kiek daugiau nei 99% [6].

2.4. Pluošto kokybės parametrai

M^2 yra vienas pagrindinių lazerio pluošto kokybę apibūdinančių parametru. Šis parametras susieja svarbius lazerinio pluošto dydžius: sąsmaukos plotį ir skėstį. M^2 parametro esmė yra palyginti matuojamą pluoštą su idealiu Gauso pluoštu, kurio $M^2=1$. Visų realių pluoštų M^2 vertės yra didesnės nei 1. M^2 aprašomas formule:

$$M^2 = W_0 \theta \pi n / 4 \lambda , \quad (20)$$

čia W_0 - pluošto diametras, θ – skėstis, n – terpės lūžio rodiklis, λ - bangos ilgis. Svarbus praktinis aspektas yra tai, jog lazerinis pluoštas, turintis $M^2=1$ gali būti sufokusuotas į mažiausio diametro dėmę, nusakoma (15) formule. Pluoštai, turintys didesnes M^2 vertes gali būti sufokusuoti į M kartų didesnius diametrus, lyginant su idealiu Gauso pluoštu [8].

Pluošto kokybė taip pat gali būti apibūdinta BPP, kuris susijęs su M^2 tokiu sąryšiu: [8]

$$BPP = M^2 \lambda / \pi . \quad (21)$$

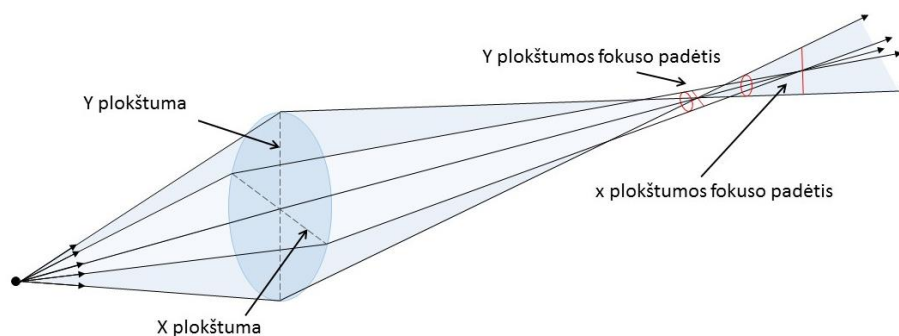
Pluošto kokybę gali gadinti bet kokie bangos fronto iškraipymai. Dažniausiai jie atsiranda dėl prastos optikos kokybės arba blogo optinės sistemos suderinimo, sferinių aberacijų lęšiuose, terminių reiškinių optiniuose komponentuose, difrakcijos, atsirandančios pluoštui sklindant per apertūras ar parazitinių atspindžių [9]. Dėl to, norint išlaikyti gerą pluošto kokybę ir fokusuojamumą, yra stengiamasi vengti visų anksčiau išvardintų veiksnių arba juos kaip įmanoma sumažinti.

Astigmatizmas - tai pluošto aberacija, kuri pasižymi tuo, kad ne ant optinės ašies einantys spinduliai, praeinantys pro lęšį x ir y plokštumose (statmenose pluošto sklidimo kryptims) yra sufokusuojami skirtinguose atstumuose. 13 pav. vaizduojamas astigmatizmas. Iš taškinio šaltinio sklindanti spinduliuotė pasiekia lęšį. x ir y plokštumose esantys spinduliai yra sufokusuojami skirtingose plokštumose, vaizdas yra „išsiliejęs“. Viena iš astigmatizmo skaitinių išraiškų, kuri sieja ne tik skirtingų plokštumų fokusavimo atstumus, bet ir atitinkamus Reilėjaus ilgius yra:

$$Ast = 2 \frac{|Z_{01x} - Z_{01y}|}{(Z_{R1x} + Z_{R1y})} , \quad (22)$$

čia Z_{01x}, Z_{01y} atstumas kuriame fokusuojami skirtingų plokštumų spinduliai, Z_{R1x} ir Z_{R1y} atitinkamų plokštumų Reilėjaus ilgiai [8]. Jei formulės rezultatas yra artimas 0, tai reiškia, kad astigmatizmo beveik nėra. Jei rezultatas yra tarp 0 ir 1, tai egzistuoja mažas astigmatizmas, tačiau abiejų kryptų sąsmaukos papuola viena į kitos Reilėjaus ilgį. Esant rezultatui nuo 1 iki 2

astigmatizmas yra dar didesnis, sąsmaukos nebepatenka viena į kitos Reilėjaus ilgus, tačiau Reilėjaus ilgiai dar turi nedidelį persiklojimą. Rezultatai didesni nei 2, kai Reilėjaus ilgiai neturi jokio persiklojimo [8,15].



13 pav. Astigmatizmo atvaizdavimas [15].

Asimetrija yra santykis tarp pluošto spindulio diametrų x ir y kryptimis. Ji parodo kiek pluoštas yra apvalus arba eliptiškas. Kai vertės yra artimos 1 tai pluošto asimetrija yra minimali [8]

$$Asim = \frac{W_x}{W_y}. \quad (23)$$

2.5. Daugelio skersinių modų struktūra, nuostoliai

Lazeriniuose rezonatoriuose gali osciliuoti daug skersinių modų. Stengiantis padaryti taip, kad stiprinama būtų tik fundamentinė TEM_{00} moda, į rezonatorius dažnai yra dedama apertūra. Gauso modos diametras turi būti artimas apertūros diametru. Jei apertūros diametras yra daug didesnis nei Gauso modos diametras, tai stiprinamos bus visos aukštesnės eilės skersinės modos, telpančios pro filtruojančią apertūrą. Aukštesnių eilių skersinės modos patiria nevienodą stiprinimą skirtingose aktyviosios terpės vietose. Tam tikrose srityse atsiranda nuskurdinimas, o nenuskurdintose srityse gali formuotis kitos modos. Taip sukuriamas savitas erdvinis skirstinys, priklausomai nuo to kiek ir kokių skersinių modų yra generuojama. Rezultate gaunamas puoštas, sudarytas iš visų skersinių modų superpozicijos [10].

Jei generuojama daugiau nei viena skersinė moda, rezonatoriaus spinduliuotės intensyvumui įtaką daro ir šių modų rezonansinių dažnių skirtumas. Dėl jo laike atsiranda intensyvumo oscilacijos, t.y. mušimai ir papildoma lazerio pasikartojimo dažnio moduliacija. Tada intensyvumo skirstinys yra suma visų atskirų skersinių modų intensyvumų kartu su dažnių skirtumo nulemta moduliacija [10].

Aukštesnių eilių skersinių modų sklidimas yra aprašomas taip pat kaip ir fundamentinės modos. Visos modos turi tokį pat Reilėjaus ilgį. Esant apskritiminei simetrijai pagrindinius parametrus galima aprašyti [10]:

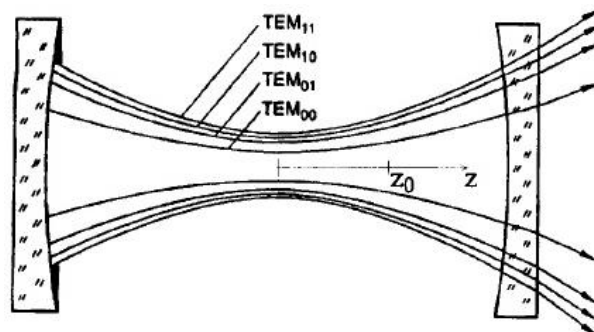
$$D_{pl}(z) = W_0 \sqrt{(2p + l + 1) \left(1 + \left(\frac{z}{z_0}\right)^2\right)}, \quad (24)$$

$$\theta_{pt} = \theta_0 \sqrt{2p + l + 1}, \quad (25)$$

čia D_{pl} – modos diametras, θ_{pt} – modos skėtis, simboliai p ir t atitinka kampinę bei radialinę variacijas.

Pluošto sklaidimas TEM_{00} bei aukštesnės eilės skersinės modos schematiškai vaizduojamas 14 pav. Anksčiau minėtas BPP parametras stabiliam rezonatoriui, generuojančiam kelias aukštesnės eilės modas, yra konstanta ir gali būti išreikštas: [10]

$$BPP = w_{pt} \theta_{pt} = (2p + l + 1) \frac{\lambda}{\pi} = M^2 \frac{\lambda}{\pi} \quad (26).$$



14 pav. TEM_{00} bei aukštesnių eilių skersinių modų sklaidimas rezonatoriuje [10].

2.6. OPO pluoštų matematinio modeliavimo principai

Naudojantis geometrine optika galima modeliuoti pluoštų sklaidimą per įvairius optinius elementus ir laisvąją erdvę. Šiam tikslui naudojamos ABCD matricos. Pro optinę sistemą praėjęs spindulys pakeičia savo koordinatę y ir sklaidimo kampą θ . ABCD matrica susieja naują spindulio (θ_2, y_2) koordinatę ir kampą su senais (θ_1, y_1) . ABCD matricą galima užrašyti taip [20]:

$$\begin{pmatrix} y_2 \\ \theta_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y_1 \\ \theta_1 \end{pmatrix}, \quad (27)$$

Egzistuoja ABCD matricos laisvajai terpei, terpių sandūrai, plonajam lęšiui, įvairiems veidrodžiams ir kitiems optiniams elementams. Naudojantis ABCD matricomis galima modeliuoti dideles optines sistemas ir sklindančių spindulių pluoštus [20].

Kitas OPO modeliavimo metodas sudėtingesnis, galintis aprašyti impulsų laikinį bei pluoštų erdvinį pasiskirstymą, naudojantis monochromatinių bangų tribangės sąveikos lygtimis su difrakciniu nariu [13]:

$$\frac{\partial E_1}{\partial z} + v_{13} \frac{\partial E_1}{\partial t} - \frac{i}{2} k_1'' \frac{\partial^2 E_1}{\partial t^2} + \frac{i}{2k_{01}} \Delta E_1 = -i\sigma_1 E_2^* E_3 e^{-i\Delta k z} - i\beta_1 E_1 \left(|E_1|^2 + \gamma_{12} |E_2|^2 + \gamma_{13} |E_3|^2 \right), \quad (28)$$

$$\frac{\partial E_2}{\partial z} + v_{23} \frac{\partial E_2}{\partial t} - \frac{i}{2} k_2'' \frac{\partial^2 E_2}{\partial t^2} + \frac{i}{2k_{02}} \Delta E_2 = -i\sigma_2 E_1^* E_3 e^{-i\Delta k z} - i\beta_2 E_2 \left(|E_2|^2 + \gamma_{21} |E_1|^2 + \gamma_{23} |E_3|^2 \right), \quad (29)$$

$$\frac{\partial E_3}{\partial z} - \frac{i}{2} k_3'' \frac{\partial^2 E_3}{\partial t^2} + \frac{i}{2k_{03}} \Delta E_3 = -i\sigma_3 E_1 E_2 e^{i\Delta kz} - i\beta_3 E_3 \left(|E_3|^2 + \gamma_{31} |E_1|^2 + \gamma_{32} |E_2|^2 \right), \quad (30)$$

kur E – elektrinio lauko stipris, v – grupinio nederinimo koeficientas, t – bėgantis laikas k_{0j} - tai kiekvienos iš j bangų bangos vektorius, o Δ - Laplaso operatorius, Dekarto koordinatų sistemoje

$$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \quad (31).$$

Kai atsižvelgiama į nepaprastosios bangos pluošto nunešimą, tai lygtys sprendžiamos Dekarto koordinatų sistemoje, reikia atlikti 2D Furjė transformaciją. Sprendžiant (28)-(30) lygtis nepaisoma laikinių narių, kad skaičiavimai būtų spartesni. Fazės moduliavimosi nariai lygtyse aprašo pluoštų savifokusacijos efektą, kuris gali sukelti Kero lęšį. Viena iš (28)-(30) lygčių aprašoma [21]:

$$\frac{\partial E_1}{\partial z} + \frac{i}{2k_{01}} \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) E_1 = -i\sigma_1 E_2^* E_3 e^{-i\Delta kz} - i\beta_1 E_1 \left(|E_1|^2 + \gamma_{12} |E_2|^2 + \gamma_{13} |E_3|^2 \right), \quad (32)$$

Tiesinis operatorius erdvinio spektro atvaizdavime:

$$\hat{D} = i \frac{k_x^2 + k_y^2}{2k_{01}}, \quad (33)$$

Netiesinis operatorius:

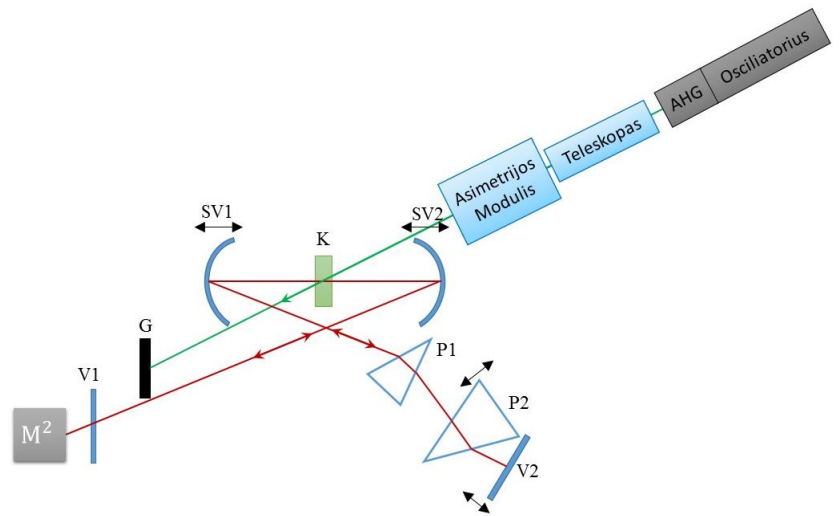
$$\hat{N} = -i\sigma_1 \frac{E_2^* E_3}{E_1} e^{-i\Delta kz} - i\beta_1 \left(|E_1|^2 + \gamma_{12} |E_2|^2 + \gamma_{13} |E_3|^2 \right), \quad (34)$$

Pirmiausia z koordinatė suskirstoma į diskretinius dydžius Δz , tada N kartų atliekama tiesinės lygties sprendimo operacija ir atliekama atvirkštinė 2D Furjė transformacija, gaunamas Δz atstumą difragavęs laukas. Šis metodas vadinamas „*split step*“. Vėliau sprendžiama netiesinė lygties dalis ir vėl atliekama 2D Furjė transformacija. Šios operacijos atliekamos visoms trimis bangoms [21].

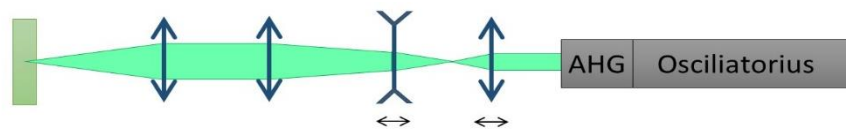
Vienas paprasčiausių rezonatoriaus modeliavimo būdų yra difrakcijos lygties sprendimas, pasinaudojant erdvinio spektru. Taikant lęšio perdavimo funkciją realioje erdvėje modeliuojami rezonatoriaus sferiniai veidrodžiai. Praėjus pilną rezonatoriaus ilgį laukai vėl grąžinami į netiesinį kristalą ir vėl sprendžiama lygčių sistema [21]. [20] straipsnyje pateiktas tokio modeliavimo pavyzdys.

3. OPO erdvinės pluošto kokybės tyrimo metodinė dalis.

Eksperimento schema vaizduojama 15 pav. Sistema kaupinama Yb:KGW femtosekundiniu osciliatoriumi (FLINT, Šviesos konversija), kurio pasikartojimų dažnis 76 MHz, centrinis bangos ilgis 1026 nm, maksimali vidutinė galia 6 W (naudota pirmoje bei antroje darbo dalyje), 10 W (naudota trečioje darbo dalyje) impulso trukmė <100 fs. Kartu su osciliatoriumi yra antros harmonikos generavimo

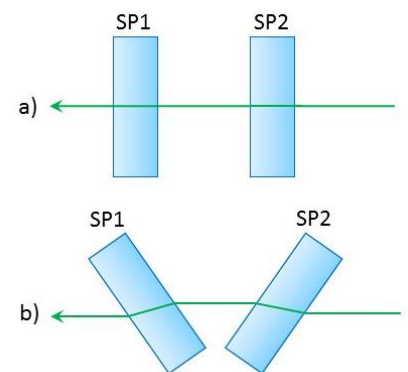


15 pav. Eksperimento principinė schema.



16 pav. Teleskopo principinė schema.

modulis, kuris generuoja 513 nm šviesą. Daugumos eksperimentų metu buvo nustatyta maždaug 2 W antros harmonikos spinduliuotės kaupinimo galia, keletui eksperimentų buvo keičiama kaupinimo galia intervale nuo 1 W iki beveik 5 W (esant 10 W fundamentinei spinduliuotei). Už osciliatoriaus yra teleskopas, t.y. keturių lęšių sistema, vaizduojama 16 pav. Teleskope naudojami trys glaudžiamieji lęšiai bei vienas sklaidomasis (lęšių židinio nuotoliai pagal 16 pav. iš kairės į dešinę: $f_1=150$ mm, $f_2=300$ mm, $f_3=-135$ mm, $f_4=175$ mm), lęšiai padengti AR 515 nm danga. Dviejų arčiausiai osciliatoriaus esančių teleskopo lęšių padėtis gali būti



17 pav. Asimetrijos modulio schema. a) Pluoštas išlieka nepakitęs b) Pluoštas iškreipiamas y kryptimi.

keičiama (f_3 ir f_4), taip gaunamas norimas modos diametras kristale, nepakeičiant fokusavimo padėties. Teleskopas sukonstruotas taip, kad atliktų kaupinančios bangos pluošto spindulio keitimą 20 - 100 μm intervale. Už teleskopo kaupinantis pluoštas patenka į asimetrijos modulį, kurio principinė schema vaizduojama 17 pav. Modulį sudaro dvi 5 mm storio lydyto kvarco plokštelės, kurių tikslas yra sukurti kaupinančio pluošto asimetriją viena kryptimi. 17 pav. a) vaizduojama, kaip kaupinantis pluoštas praeina pro stiklo plokšteles ir jo erdvinė struktūra yra nepakeičiama, 17 pav. b)

vaizduojama kaip pakreipiant abi stiklo plokšteles Briusterio kampu yra sukuriama pluošto asimetrija y kryptimi, nepakeičiant pluošto sklaidimo krypties. Pro kristalą praėjęs kaupinimo pluoštas patenka į gaudyklę G. Netiesiniame kristale generuojama signalinė banga yra uždaroma rezonatoriaus viduje. Rezonatorių sudaro du sferiniai veidrodžiai (SV1 ir SV2, R=200 mm), galinis veidrodis (V2), išvadinis veidrodis (V1) bei prizmių pora (P1 ir P2). SV1, SV2 ir V2 veidrodžiai padengti HR 650 – 820 nm danga, V2 yra dalinai pralaidus šviesai (80% atspindi, 20% praleidžia), tai yra sistemos išvadinis veidrodis. Sferiniai veidrodžiai sumontuoti ant poslinkio stalelių, dėl to atstumas tarp jų gali būti keičiamas nekeičiant signalinės bangos sąsmaukos padėties. Taip pasiekiamas signalinės bangos pluošto diametro, tuo pačiu ir rezonatoriaus stabilumo parametrų verčių keitimas. Veidrodis V2 taip pat stovi ant automatizuoto poslinkio stalelio, kad būtų galima palaikyti vienodą rezonatoriaus optinio kelio ilgį lyginant su kaupinimui naudojamo osciliatoriaus optinio kelio ilgiu, kad būtų išpildoma sinchroninio kaupinimo generacijos sąlyga. Darbo metu naudojant „Labview“ programinę įrangą buvo parašyta programa, kuri gali stabiliai palaikyti norimą bangos ilgį. Optinėmis dangomis nedengtų prizmių pora yra reikalinga sukurti anomaliajai dispersijai sistemoje. Prizmė P2 yra sumontuota ant poslinkio stalelio, tai leidžia ją daugiau ar mažiau įstumti į sklindantį pluoštą, taip reguliuojant dispersiją sistemoje. OPO buvo suderintas, kad generuotų 765 nm šviesą, kadangi tai buvo artimas bangos ilgis naudojamų veidrodžių didelio atspindžio diapazono centrui. Už išvadinio veidrodžio stovi pluošto parametro M^2 matuoklis (M^2 -200, OPHIR), kuriuo buvo matuojami lazerinės spinduliuotės pluošto parametrai: M^2 , pluošto diameteras, skėstis, astigmatizmas, asimetrija ir kiti.

Pirmoje eksperimentinėje dalyje naudojant kompiuterinę programą „reZonator“ buvo modeliuojamas teleskopo veikimas [14]. Atliktas teleskopo lęšių padėčių kalibravimas, norint gauti konkretaus dydžio kaupinimo pluošto modos diameterą kristale. Taip pat buvo modeliuojamos sferinių veidrodžių padėtys, stengiantis pakeisti rezonatoriaus stabilumo parametrus, taip pat ir signalinės bangos pluošto diameterą. Eksperimento metu buvo keičiami signalinės bei kaupinančios bangos diameterai netiesiniame kristale ir matuojami OPO išvadinės spinduliuotės pluošto parametrai.

Prieš antrąją eksperimentinę dalį su CCD kamera (Chameleon, FLIR) aplink OPO kristalo plokštumą buvo atsivaizduojamas kaupinantis pluoštas, esant dviem asimetrijos modulio padėtimis (17 pav. a) ir b)), stengiantis išsiaiškinti kaip veikia asimetrijos modulis. Eksperimento metu buvo matuojami optinio parametrinio osciliatoriaus pluošto kokybę apibūdinantys parametrai, priklausomai nuo netiesinio kristalo padėties, kaupinančios spinduliuotės sąsmaukos, kaupinančios spinduliuotės simetrijos. Naudojant kompiuterinę programą „reZonator“ buvo modeliuojami kaupinimo bei signalinės bangos pluoštai [14].

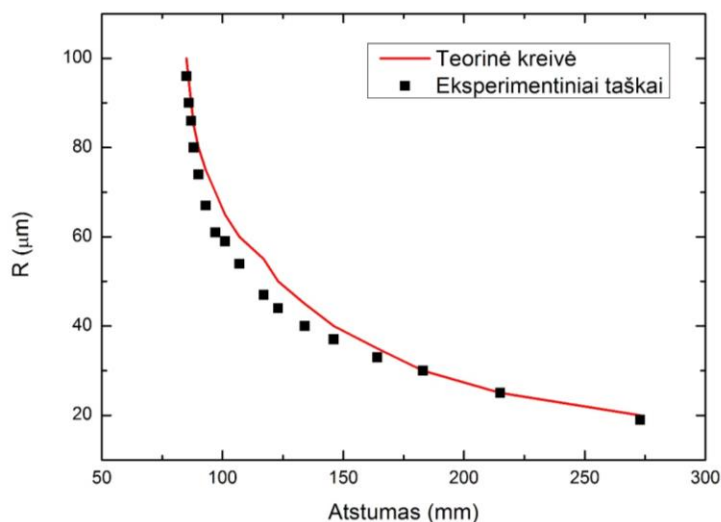
Trečiojoje eksperimentų dalyje rezonatoriuje papildomai yra sukuriama asimetrija, naudojant 5 mm stiklo plokštelę. Ji yra rezonatoriaus viduje, tarp vieno iš sferinių veidrodžių ir netiesinio kristalo. Viename papildomame eksperimente 5 mm stiklo plokštelė buvo keičiama keliomis plonesnėmis

plokštelėmis (4 mm, 3 mm, 2 mm ir 1 mm storio). Naudojant papildomą asimetriją rezonatoriuje buvo stengtasi išryškinti asimetrijos bei astigmatizmo tendencijas. Naudojant programas „reZonator“ ir „Matlab“ buvo modeliuojamas rezonatoriaus veikimas, stengiantis paaiškinti eksperimento metu išmatuotas tendencijas. Programa „reZonator“ yra laisvai prieinama visiems [14], programos „Matlab“ kodas buvo parašytas vieno iš šio darbo konsultantų. „Matlab“ programa parašyto modeliavimo vieno skaičiavimo trukmė yra apie 12 valandų. Modeliavimo principai trumpai aprašyti 2.6. skyriuje. Eksperimento metu buvo matuojami OPO pluošto parametrai, kai keičiami rezonatoriaus parametrai: netiesinio kristalo padėtis, kaupinančios bangos sąsmaukos padėtis, stabilumas, kaupinančios spinduliuotės galia ir kiti.

4. Rezultatai ir diskusija.

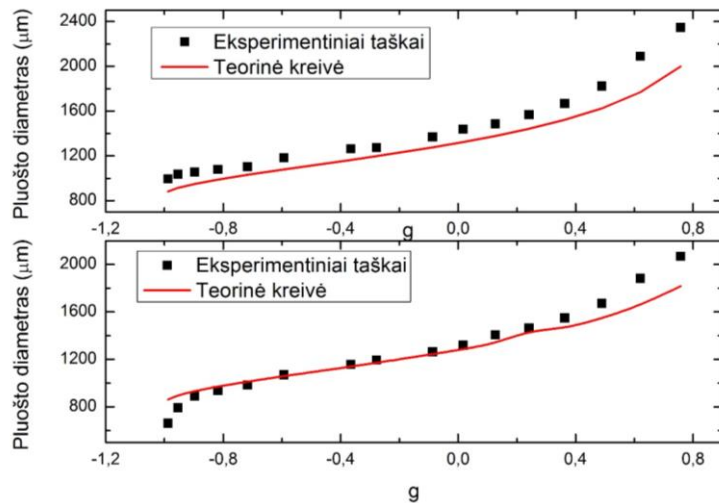
4.1. OPO pluošto parametrai, kai keičiami kaupinančios bei signalinės bangų diametrai

18 pav. vaizduojama kaupinimo pluošto spindulio priklausomybė nuo atstumo tarp dviejų stumdomų teleskopo lęšių, ji lyginama su teorine verte, apskaičiuota naudojant kompiuterinę programą „reZonator“. Raudona kreivė atitinka teorinius skaičiavimus, juodi taškai - eksperimentinius rezultatus, kurie buvo gauti matuojant praėjusią galią pro apertūrą kristalo plokštumoje ir pritaikius (19) formulę. Matome, kad pluošto spindulio keitimas idealiai neatitinka teorijos, tačiau veikia pakankamai gerai ir savo pagrindinę funkciją atlieka. Teleskopas buvo projektuojamas, taip kad galėtų atlikti penkių kartų didinimą (nuo 20 μm iki 100 μm), tačiau eksperimento metu buvo nustatyta, kad kaupinimo pluoštą padidinus daugiau nei $\sim 60 \mu\text{m}$ OPO generacija yra labai silpna arba jos visai nėra, esant turimai kaupinimo galiiai (2 W). Dėl šios priežasties tolimesniuose matavimuose naudojama tik dalis kaupinimo modos spindulio keitimo srities (20 - 60 μm).



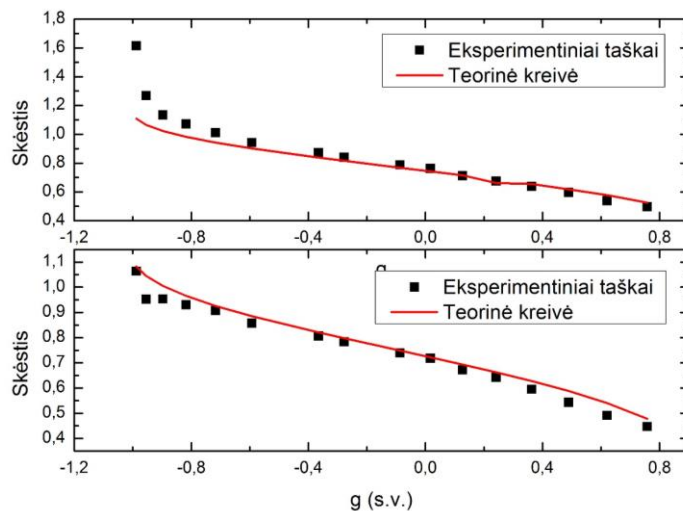
18 pav. Kaupinimo pluošto spindulio priklausomybė nuo atstumo tarp dviejų lęšių.

19 pav. a) ir b) vaizduojamos signalinės bangos pluošto diametro priklausomybės nuo stabilumo parametru $g_1=g_2=g$ verčių x ir y kryptimis. Teorinė kreivė (raudona) gauta modeliuojant OPO sistemą naudojant kompiuterinę programą, o eksperimentiniai taškai (juodi) gauti matuojant pluošto diametrą su M^2 matuokliu. Matome, kad kreivės yra panašios, tai reiškia, kad signalinės bangos diametro keitimo mechanizmas veikia kaip ir buvo tikėtasi, labiausiai vertės išsiskiria judant prie stabilumo parametro kraštinių verčių.



19 pav. Signalinės bangos diametro priklausomybės nuo stabilumo parametru $g_1=g_2=g$ verčių a) x kryptimi b) y kryptimi. Teorinė kreivė – raudona linija, išmatuoti taškai – juodi taškai.

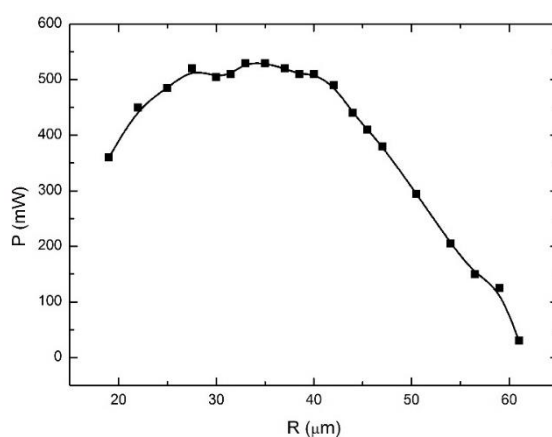
20 pav. a) ir b) vaizduojamos signalinės bangos pluošto skėsties, skirtingomis kryptimis x ir y , priklausomybės nuo stabilumo parametru $g_1=g_2=g$ verčių. Teorinė kreivė (raudona) ir eksperimentiniai taškai (juodi) gauti taip pat kaip ir prieš tai aptartame grafike, naudojant kompiuterinę programą bei matuojant M^2 matuokliu. Išmatuotųjų skėstčių atitikimas su teorinėmis vertėmis yra geras, didžiausias nesutapimas matomas stabilumo parametru $g_1=g_2=g$ kraštinėmis neigiamomis vertėmis.



20 pav. Signalinės bangos skėsties priklausomybė nuo stabilumo parametru $g_1=g_2=g$ verčių a) x kryptimi b) y kryptimi. Teorinė kreivė – raudona linija, išmatuoti taškai – juodi taškai.

21 pav. vaizduojama išvadinės galios priklausomybė nuo kaupinimo bangos pluošto spindulio, signalinės bangos spinduliui esant $\sim 33 \mu\text{m}$. Visame matuotame stabilumo verčių, o tuo pačiu ir signalinės bangos diametro keitimo, diapazone galios priklausomybių grafikų kreivės atrodo panašiai (išskyrus prie stabilumo verčių kraštų bei prie 0), dėl to vaizduojama tik viena. Matome, kad

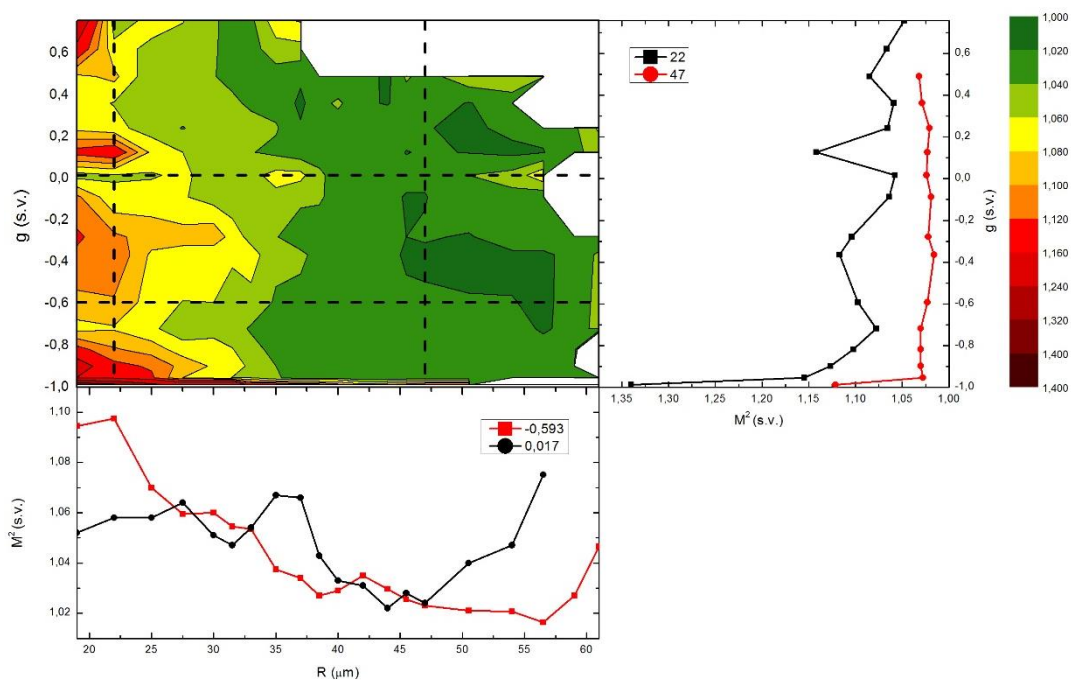
maksimali galia yra gaunama, kai kaupinimo spindulys yra tarp 28 μm ir 40 μm . Galios kritimas 19-28 μm srityje yra siejamas su tuo, kad kaupinimo bangos pluoštas yra mažesnis, nei signalinės bangos ir dėl šio dydžių skirtumo pluoštų persiklojimas kristale vyksta neoptimaliai. Galios kritimas srityje 40-60 μm srityje siejamas su atvirkščiu veiksniu, kai kaupinimo bangos pluošto spindulys yra didesnis, nei signalinės bangos ir dėl to dalis kaupinimo nėra panaudojama generacijai. Taip pat, jei signalinės bangos diametrą laikome apertūra, tai galios kritimą galime sieti ir su difrakciniais nuostoliais. Norint sumažinti difrakcinius nuostolius pro apertūrą ir kad neosciliuotų aukštesnės eilės skersinės modos rekomenduojama, kad apertūros ir kaupinimo pluošto diametrų santykis būtų 1,2 – 1,4 [10]. Pagal atliktus matavimus šio santykio vertė gauta 1 – 1,2. Panaši tendencija yra stebima ir esant kitoms signalinės bangoms pluošto spindulio vertėms (duomenys nevaizduojami).



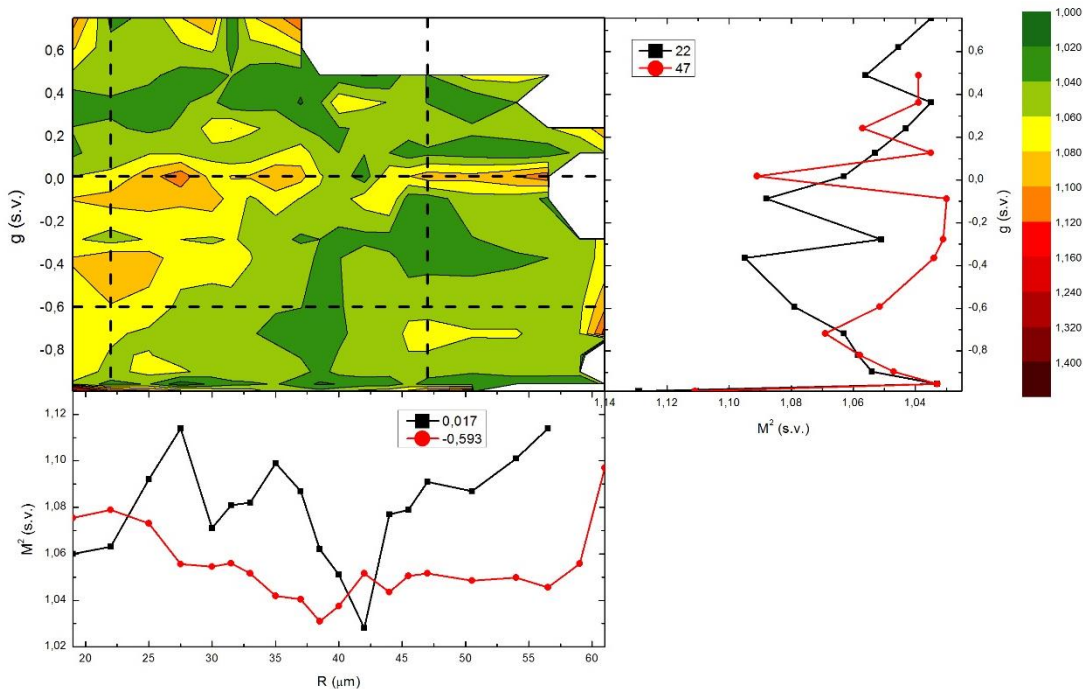
21 pav. Išvadinės galios priklausomybė nuo kaupinimo bangos pluošto spindulio, signalinės bangos spinduliui esant $\sim 33 \mu\text{m}$.

22 pav. kairėje viršuje vaizduojama signalinės bangos pluošto parametro M^2 (z ašis) priklausomybė nuo kaupinimo pluošto spindulio (x ašis) bei rezonatoriaus stabilumo parametro $g_1=g_2=g$ (y ašis) verčių, x kryptimi. Dešinėje viršuje - pjūviai, esant kaupinimo bangos pluošto spinduliui 22 μm ir 47 μm . Apačioje - pjūviai, esant stabilumo parametro g vertėms -0,593 ir 0,017. Kairėje viršuje juoda punktyrinė linija vaizduoja pjūvių vietas. Pjūviams parinktos kaupinimo bangos pluošto spindulių bei stabilumo parametrų vertės, tokios kad atspindėtų pluošto parametro M^2 kitimą, skirtingose srityse. 23 pav. vaizduojama viskas taip pat, tik y kryptimi. Paprastumo dėlei 23 pav. kairės viršutinės dalies paveikslas suskirstytas į zonas, detalizuotas 24 pav., kur stora juoda linija

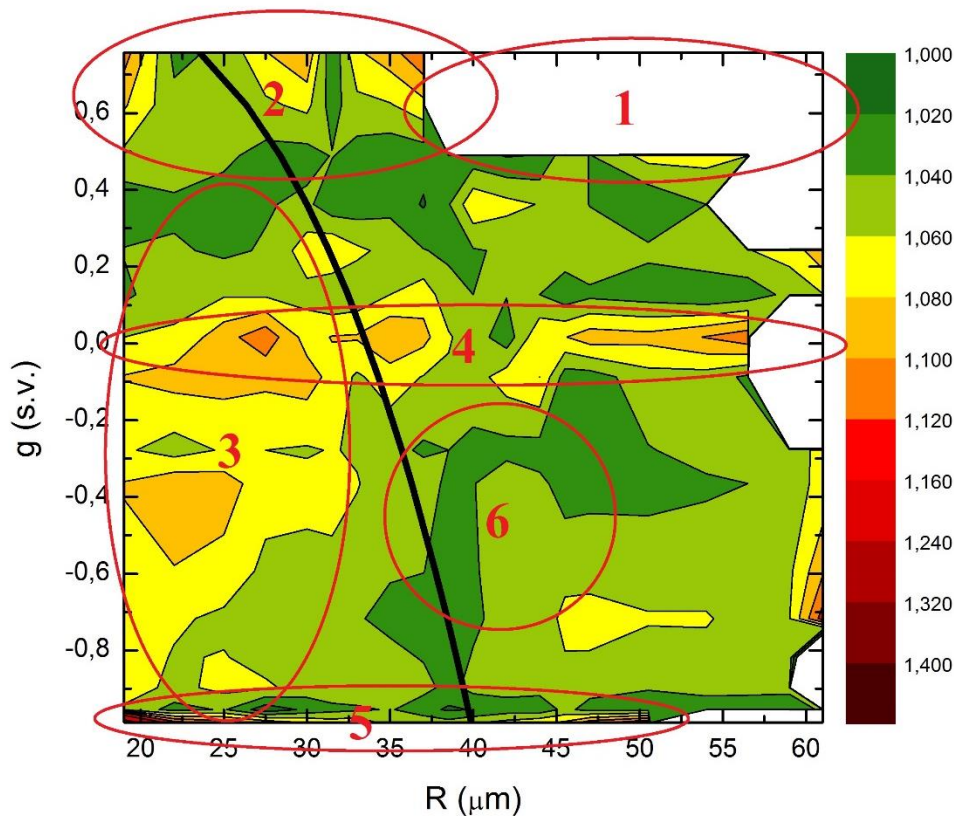
vaizduoja signalinės bei kaupinimo bangos pluoštų spindulių sutapimą.



22 pav. Kairėje viršuje vaizduojama signalinės bangos pluošto parametru M^2 (z ašis) priklausomybė nuo kaupinimo pluošto spindulio (x ašis) bei rezonatoriaus stabilumo parametru $g_1=g_2=g$ (y ašis) verčių, x kryptimi. Dešinėje viršuje pjūviai, esant kaupinimo bangos pluošto spinduliui 22 μm ir 47 μm . Apačioje – pjūviai, esant stabilumo parametru g vertėms -0,593 ir 0,017. Juodos punktyrinės linijos – pjūvių vietos.



23 pav. Kairėje viršuje vaizduojama signalinės bangos pluošto parametru M^2 (z ašis) priklausomybė nuo kaupinimo pluošto spindulio (x ašis) bei rezonatoriaus stabilumo parametru $g_1=g_2=g$ (y ašis) verčių, y kryptimi. Dešinėje viršuje pjūviai, esant kaupinimo bangos pluošto spinduliui 22 μm ir 47 μm . Apačioje – pjūviai, esant stabilumo parametru g vertėms -0,593 ir 0,017. Juodos punktyrinės linijos – pjūvių vietos.



24 pav. Signalinės bangos pluošto parametro M^2 priklausomybė nuo kaupinimo pluošto spindulio bei rezonatoriaus stabilumo parametro $g_1=g_2=g$ verčių y kryptyje, suskirstyta į zonas. Juoda linija vaizduoja signalinės bei kaupinančios bangų pluoštų spindulių sutapimą.

22 pav., 23 pav. ir 24 pav. visos balta spalva pažymėtos zonos yra neišmatuotos vertės. 24 pav. 1-oje zonoje kaupinimo pluošto spindulys yra didžiausias, o signalinės bangos mažiausias, dėl to jų persiklojimas ir sąveikos plotas yra mažas, tai lemia nestabilią generaciją arba visiškai generacijos nebuvimą, dėl to nepavyko išmatuoti šių verčių.

2-oje zonoje generaciją gauti pavyko, kadangi signalinės ir kaupinimo bangos bangų pluoštų spinduliai yra palyginamo dydžio. Tačiau čia egzistuoja ryškūs galios svyravimai, kurie realiai šią zoną padaro tokia, kurioje dirbti beveik neįmanoma. Nestabili generacija yra galima, kai rezonatoriuje osciliuoja daugiau nei viena skersinė moda, tikėtina, kad taip buvo ir šiuo atveju. Kaip minėta 2.5 skyriuje skirtingos skersinės modos turi nevienodą rezonansinį dažnį, dėl kurio laike atsiranda intensyvumo osciliacijos. Taip pat iš 19 pav. ir 20 pav. matome, kad signalinio pluošto diametras beveik nesiskiria nuo teorinės vertės, o skėtis skiriasi, esant neigiamoms g parametro vertėms. Tai yra būdinga rezonatoriams, kuriuose egzistuoja termolėšis arba Kero lėšis, kurie gali lemti aukštesnės eilės skersinių modų generavimąsi [10].

3-oje zonoje stebimas M^2 prastėjimas, tai matome tiek x tiek y kryptyse. Atsižvelgiant į storos juodos linijos padėtį, matome, kad M^2 prastesnis, kur kaupinimo pluošto moda yra mažesnė nei signalinė. Jei apie signalinės bangos pluošto modą galvotume kaip apie apertūrą, tokiu atveju visas

kaupinimo pluoštas telpa pro ją, taip pat ir aukštesnių eilių modos, kurios gali osciliuoti rezonatoriuje, dėl to blogėja M^2 parametro vertės.

4-a zona yra stipriau išreikšta y kryptyje. M^2 parametro blogėjimas gali būti susietas ir su tuo, kad rezonatorius yra arti stabilumo zonos $g_1=g_2=g=0$, kuri pati savaime neturėtų įtakoti pluošto kokybės, tačiau dėl jautrumo derinimui galėjo daryti įtaką.

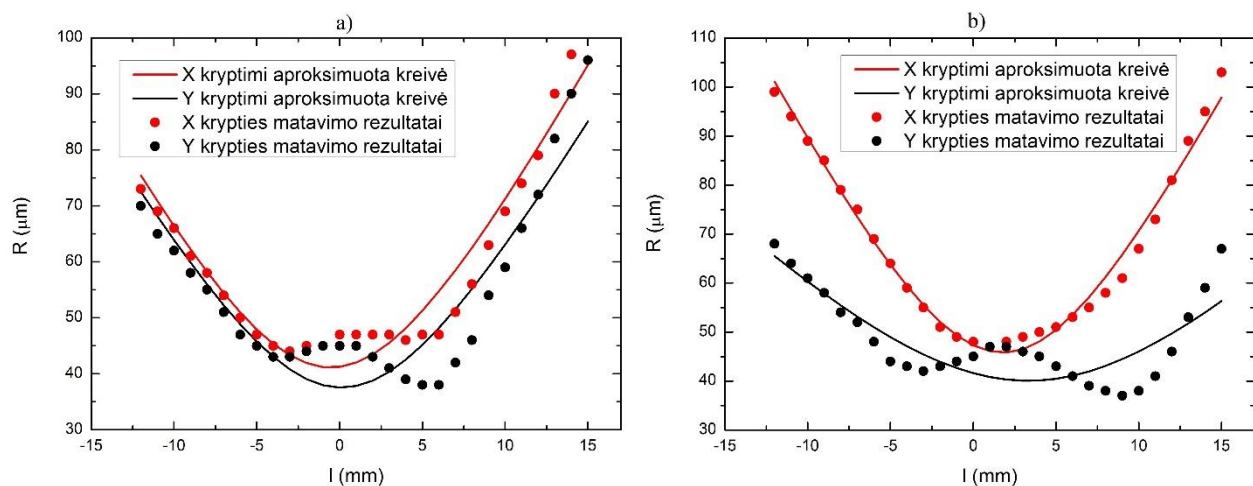
5-oje zonoje signalinės bangos pluošto spindulys yra didžiausias ($g < -0,9$) ir tai lemia visai kitokį OPO generavimą nei priešingoje pusėje (1 ir 2 zonos), kur parametras $g > 0,6$. 5-oje zonoje nestebimi galios svyravimai, dėl to šioje srityje dirbti yra lengva, lyginant ją su 1 - 2 zona. Mažinant parametro g vertę beveik iki -1 staigiai keičiasi pluošto kokybė. M^2 vertės suprastėja, tačiau labiausiai pluošto kokybės suprastėjimas matomas padidėjus astigmatizmui bei asimetrijai (duomenys nevaizduojami). Lyginant su visomis kitomis zonomis astigmatizmas 5-oje zonoje padidėja daugiau nei 10 kartų, o asimetrija ~30%.

6-oje zonoje M^2 vertės yra artimos vienetui, signalinės bangos pluošto diametras yra mažesnis nei kaupinančios bangos. Jei signalinės bangos pluošto diametras veikia kaip apertūra rezonatoriuje, tai ji praleidžia tik žemiausios eilės skersinę modą, kuri tuo pačiu yra stiprinama, taip gaunamos artimos vienetui M^2 vertės, kartu su neblogu astigmatizmu (vidurkis ~0,03) bei asimetrija (vidurkis 1,13). Atsižvelgiant į 21 pav., taip pat galima rasti maksimalų galios tašką, kuris egzistuoja 6 zonoje. Visame, matuotame stabilumo verčių, diapazone galios priklausomybių grafikų kreivės atrodo panašiai (išskyrus prie stabilumo verčių kraštų bei prie 0).

Iš gautų duomenų matome, kad pluošto parametro M^2 kitimas yra nedidelis (1 - 1,4). Akivaizdu, kad kaupinimo bangos diametras turi ganėtinai nežymią įtaką pluošto parametrui M^2 , kuri labiausiai pastebima, kai kaupinimo bangos diametras yra mažesnis nei signalinės bangos. Geros M^2 vertės gali būti susijusios su tuo, jog signalinės bangos pluoštas veikia kaip erdvinis filtras, kai signalinės bangos pluošto diametras yra mažesnis nei kaupinančios bangos. Galima išskirti 24 pav. vaizduojamą 6-os zonos sritį (kaupinimo bangos pluošto spindulys R nuo 30 μm iki 45 μm , stabilumo parametrai $g_1=g_2=g$ nuo -0.8 s.v. iki -0.2 s.v.), kurioje pluošto kokybė yra gera, kartu su didele išvadine galia. Atlikus matavimus prie kito bangos ilgio vertės pluošto parametro M^2 priklausomybės gali keistis, nes pakeitus bangos ilgį pasikeis rezonuojančios modos diametras, o tuo pačiu ir santykis tarp signalinės ir kaupinančios bangos diametrų.

4.2. OPO pluošto parametrai kaupinant simetriniu bei asimetriniu pluoštu

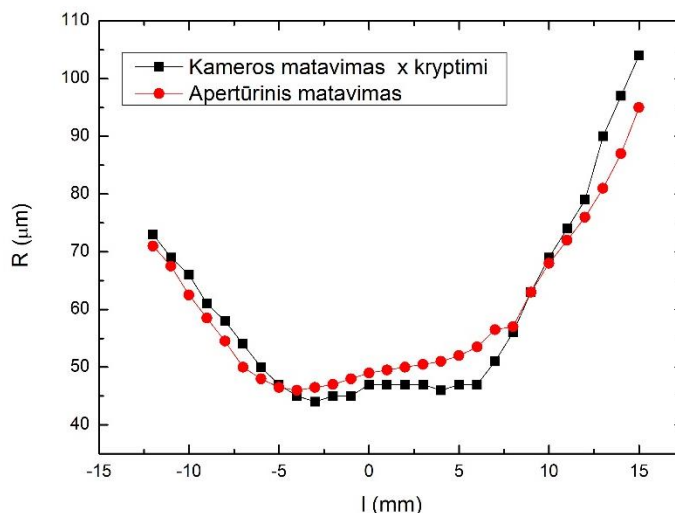
Eksperimento metu su CCD kamera aplink OPO kristalo plokštumą buvo atvaizduojami su asimetrijos moduliu gauti pluoštai. Reikia paminėti, kad kamera netilpo į sistemą tiksliai toje vietoje, kur turėtų būti kristalas, dėl to kaupinantis pluoštas buvo nukreiptas kitur, kur galima pastatyti kamerą. 25 pav. a) vaizduojamos simetrinio pluošto bei b) asimetrinio pluošto spindulių



25 pav. a) Simetrinio b) asimetrinio kaupinimo pluoštų spindulių priklausomybė nuo atstumo.

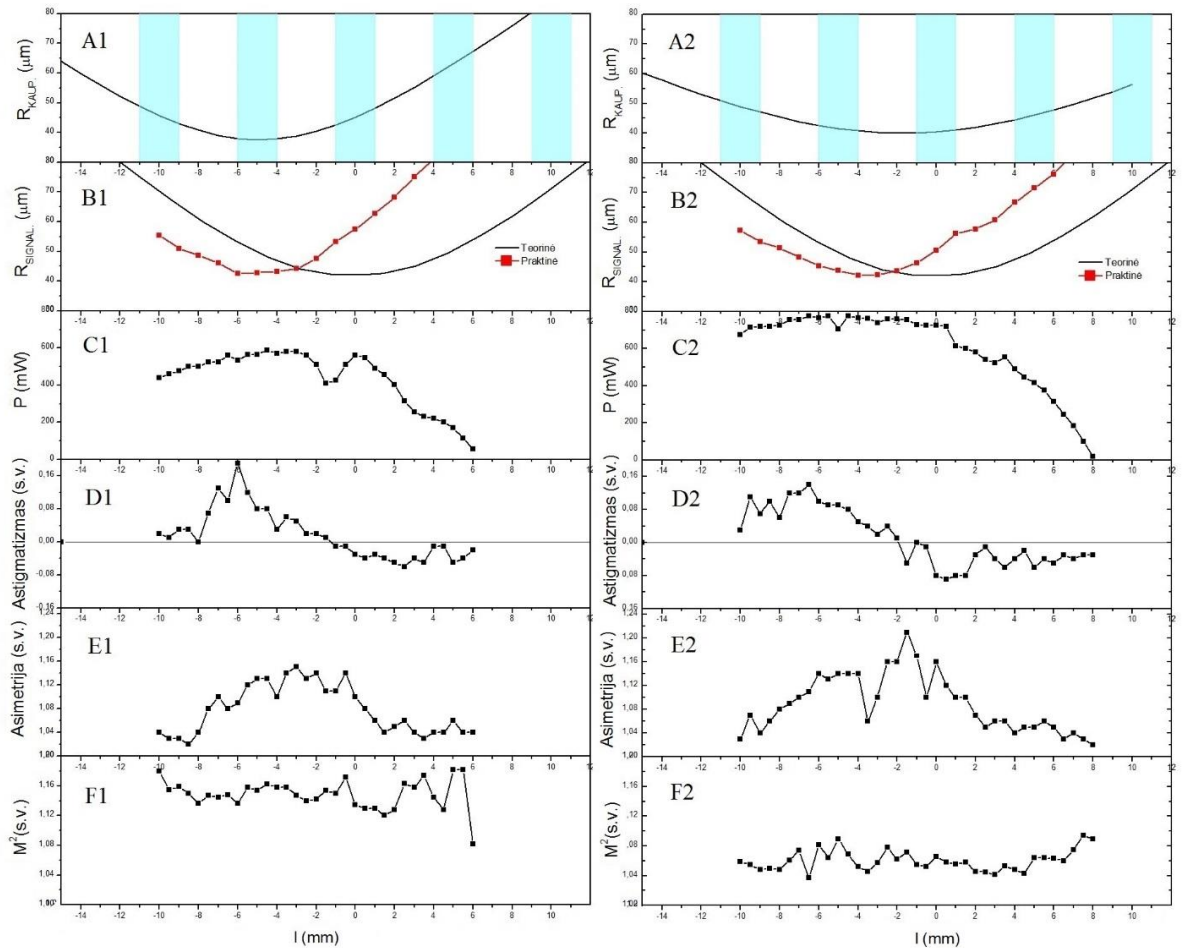
priklausomybės nuo atstumo. Grafikuose taškais vaizduojami išmatuoti dydžiai, tiesės gautos atlikus aproksimaciją, pagal Gauso funkciją. Matoma, kad x kryptimi pluoštas liko nepakitęs, o y kryptimi pasikeitė jo skėstis. Pagal (20) formulę pluošto parametras M^2 dėl pasikeitusios skėsties suprastėja. Dėl nevisai taisyklingos formos sunku įvertinti kiek tiksliai y kryptimi pasikeitė skėstis, todėl negalima tiksliai pasakyti ir M^2 pokyčio.

Su kamera išmatavus pluoštą reikėjo jo poziciją susieti su tikslia kristalo padėtimi rezonatoriuje. Tam tikslui realioje kristalo plokštumoje buvo statoma apertūra (50 μm diametro) ir už jos matuojama praėjusios spinduliuotės galia, stumdant fokusuojantį lęšį. Pagal (19) formulę apskaičiuota pluošto spindulio priklausomybė nuo atstumo vaizduojama 26 pav., kartu su CCD kameros matavimo rezultatais. Reikia pastebėti, kad matuojant su CCD kamera galima fiksuoti pluošto pokyčius x ir y kryptimis, apertūrinio matavimo metu to padaryti negalima - yra matuojama galia, praėjusi pro apertūrą. 26 pav. juoda spalva vaizduoja matavimą atliktą su kamera, esant simetriškam pluoštui, raudona linija atitinka apertūrinį matavimą, esant simetriškam pluoštui. Matoma, kad yra sutapimas, dėl to galima teigti, kad žinome kaip atrodo kaupinančios bangos pluoštas optinio parametrinio osciliatoriaus kristalo aplinkoje. Taip pat susiejome atskaitos sistemas, kai matavimai buvo atlikti su kamera ir su apertūra. Išėmus apertūrą į tikslią jos padėtį įdedamas kristalas, tiksliai žinant koks kaupinimo pluoštas yra kristale.



26 pav. Kaupinančios bangos pluošto spindulio priklausomybė nuo atstumo. Juoda kreivė – matavimui naudojama kamera, raudona kreivė – naudojama apertūra.

Toliau buvo atliekami OPO signalinės spinduliuotės pluošto kokybės matavimai keičiant netiesinio kristalo padėtį rezonatoriuje, kaupinant su simetriniu bei asimetriniu pluoštu. Paprastumo dėlei vaizduojami tik pluošto matmenys bei rezultatai y ašyje (išskyrus astigmatizmą bei asimetriją, kurie priklauso nuo abiejų koordinatų), kadangi būtent y kryptimi buvo keičiama kaupinančio pluošto asimetrija ir x kryptimi dauguma tendencijų sutampa su y krypties tendencijomis. 27 pav. grafikai A1-F1, kai kaupinama simetriniu pluoštu (vaizduojami kairėje), grafikai A2-F2, kai kaupinama asimetriniu pluoštu (vaizduojami dešinėje). Grafikuose vaizduojami duomenys yra pateikti tokioje atskaitos sistemoje, kurioje kaupinantis pluoštas sklinda išilgai x ašies (iš dešinės į kairę), kristalas yra transliuojamas pluošto kelyje. 27 pav. A1 juoda linija vaizduoja simetrinės kaupinančios bangos pluošto (aprosimuotas vertes) spindulio priklausomybę nuo atstumo, kuriame buvo stumdomas 2 mm netiesinis kristalas. Keletas kristalo pozicijų taip pat vaizduojama 27 pav. A1, šviesiai mėlyna spalva. Taigi x ašis vaizduoja, kur matavimo metu stovėjo netiesinis kristalas, jo padėtis buvo keičiama kas 0,5 mm. 27 pav. B1 vaizduojamos teorinės bei eksperimentinės signalinės bangos spindulio priklausomybės nuo kristalo padėties. Teorinė kreivė buvo apskaičiuota naudojantis programa „reZonator“. Eksperimentinė kreivė gauta į tą pačią programą suvedus tikslius signalinio pluošto parametrus, kurie buvo gauti matuojant signalinės bangos parametrus, esant skirtingoms netiesinio kristalo padėtimis. 27 pav. C1 ir D1 vaizduojama OPO signalinės bangos galios ir astigmatizmo priklausomybė nuo kristalo padėties. 27 pav. E1 - asimetrijos priklausomybė nuo kristalo padėties, kuri apskaičiuota pagal (23) formulę. 27 pav. F1 - pluošto kokybės parametro M^2



27 pav. OPO pluošto kokybės tyrimo duomenys keičiant netiesinio kristalo padėtį, esant simetriniam (kairėje, grafikai su indeksais „1“) ir asimetriniam (dešinėje, grafikai su indeksais „2“) kaupinimo pluoštui. Mėlynai vaizduojamos kelios netiesinio kristalo padėtys (kristalo storis atitinka realias eksperimentines sąlygas).

priklausomybė nuo kristalo padėties. Grafikuose A2-F2 vaizduojamos visos tos pačios priklausomybės, tik kaupinama buvo asimetriniu pluoštu, kuris pavaizduotas A2 (juoda linija). Abiem atvejais kaupinama buvo vienoda galia (1,7 W).

27 pav. B1 ir B2 signalinės bangos teorinės bei eksperimentinės kreivės nesutampa. Dalinai tai paaiškinti būtų galima nevienodu atstumu rezonatoriaus atšakose, tačiau maždaug 10 mm nesutapimas tarp rezonatoriaus šakų įneštų tik apie 1 mm nesutapimą vaizduojamoje srityje. Eksperimento metu rezonatoriaus šakų nesutapimas nebuvo didesnis nei 10 mm, todėl iki galo nėra aišku kodėl yra toks ryškus signalinės bangos teorinių bei eksperimentinių verčių nesutapimas.

27 pav. C1 ir C2 optinio parametrinio osciliatoriaus išvadinės galios priklausomybės nuo kristalo padėties yra panašios. Maksimali galia pasiekama, kai kaupinimo bangos pluoštas ir signalinės bangos pluoštas (eksperimentinės raudonos kreivės 27 pav. B1 ir B2) yra persikloję, o santykis tarp signalinės bei kaupinančios bangų pluoštų spindulių yra artimas 1. C1 grafike nuo -3 iki 0 mm esantis linkis yra susijęs su kristalo perštūmimo netobulumu eksperimento metu. Šiek tiek didesnė galia gaunama kaupinant su asimetriniu pluoštu. Tai galima paaiškinti tuo, kad dėl asimetrijos

modulio konfigūracijos, kuri aprašyta 3 skyriuje, asimetrinis pluoštas gaunamas, kai stiklo plokštelės išsukamos Briusterio kampu krintančiam kaupinimo pluoštui, o simetrinis, kai plokštelės yra statmenos kaupinimo pluoštui. Kaupinančios spinduliuotės nuostoliai nuo Briusterio kampu išsuktos plokštelės yra mažesni nei nuo statmenos, dėl to OPO išvadine galia su asimetriniu pluoštu yra didesnė.

27 pav. D1 ir D2 astigmatizmo priklausomybės nuo netiesinio kristalo padėties rodo įdomią tendenciją, kad egzistuoja minimalus astigmatizmo taškas. Stengiantis paaiškinti nuo ko tai priklauso buvo bandoma nagrinėti kaupinančios bei signalinės bangų pluoštų diametrus bei jų santykius. Kadangi astigmatizmas yra nulemtas abiejų koordinačių, tai buvo bandoma lyginti kaupinančios spinduliuotės santykį x kryptimi ir y kryptimis. Taip pat buvo daroma ir su signalinės bangos pluošto spinduliais, tačiau jokių tendencijų pastebėti nepavyko dėl to duomenys nevaizduojami. Eksperimento metu geriausias astigmatizmas (artimas 0) gautas, kai santykis tarp kaupinančios bei signalinės bangų pluoštų spindulių, buvo 0,7.

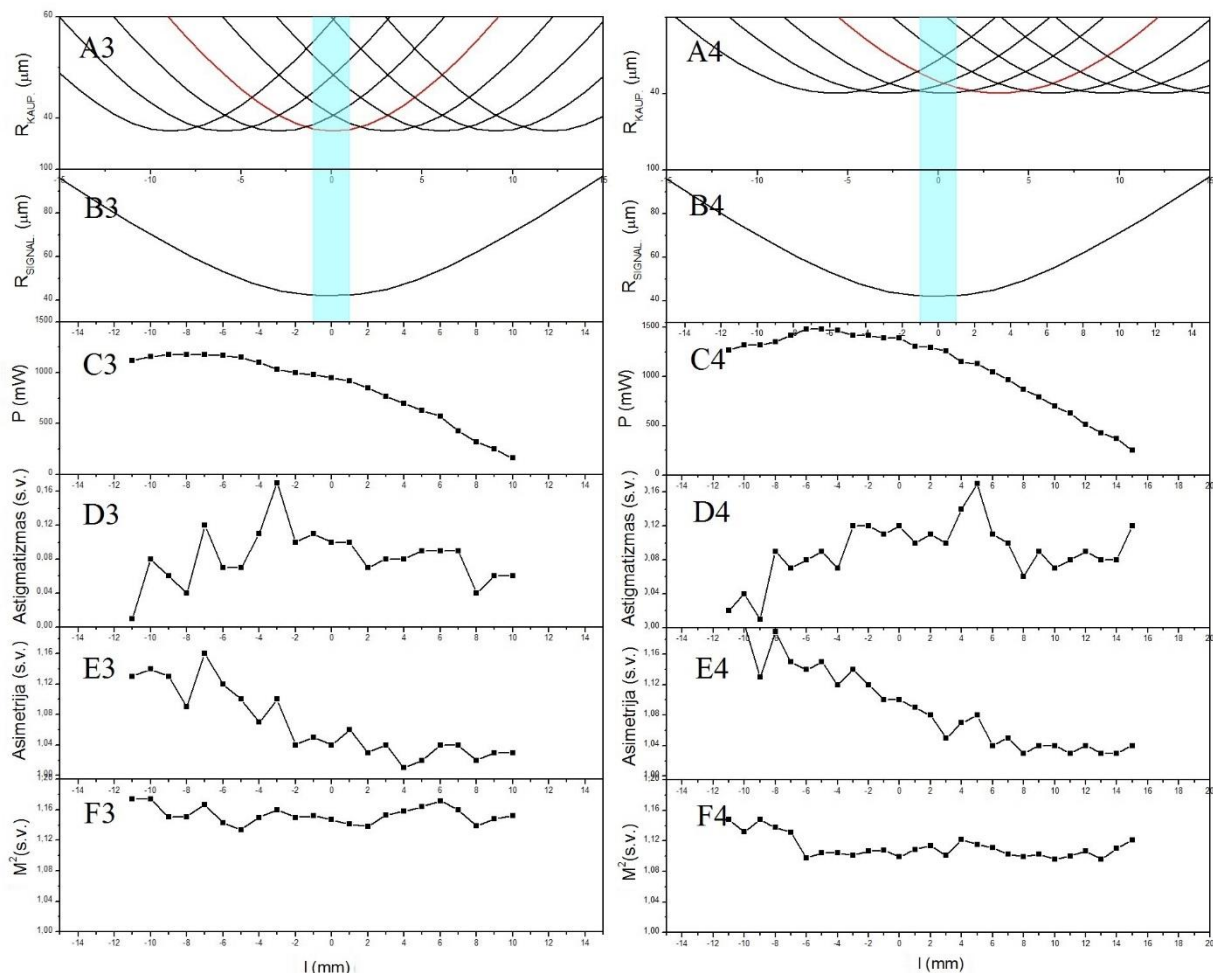
27 pav. E1 ir E2 vaizduojamos signalinės bangos asimetrijos priklausomybės nuo kristalo padėties. Kaupinant simetriniu ir asimetriniu pluoštu tendencija išlieka panaši. Asimetrija taip pat kaip ir astigmatizmas priklauso nuo dviejų koordinačių. Eksperimento metu pluoštas buvo eliptiškas y kryptimi, ta pačia kryptimi, kuria yra derinamas netiesinis kristalas. Galima teigti, kad įtaką asimetrijai turi erdvinis nunešimas netiesiniame kristale, taip pat rezonatoriaus suderinimas [16, 17]. Kitas įtaką darantis veiksnys gali būti signalinio bei kaupinančio pluošto skėscių nesuderinimas. Asimetrija yra mažiausia grafikų kraštuose, toje vietoje signalinės ir kaupinančios bangų skėscių ženklai sutampa. Per vidurį asimetrija šiek tiek padidėja, skėstis toje srityje yra neapibrėžta. Šią prielaidą paremia toliau šiame skyriuje pateikiami duomenys, kai kristalo atžvilgiu keičiama kaupinančios bangos sąsmaukos padėtis.

27 pav. F1 ir F2 vaizduojamos signalinės bangos pluošto parametro M^2 priklausomybės nuo kristalo padėties. Aiškiai matoma, kad M^2 nepriklauso nuo kristalo padėties, vertės visame tiriamame diapazone yra labai panašios. Vienintelis skirtumas, kuris yra matomas, tai absoliutinis skirtumas tarp signalinės bangos M^2 , kai ji yra kaupinama simetriniu ir asimetriniu pluoštu. Geresnės M^2 vertės gautos kaupinant asimetriniu pluoštu.

Toliau eksperimento metu buvo atliekami OPO pluošto kokybės matavimai, keičiant kaupinančio pluošto sąsmaukos padėtį, o kristalo poziciją išlaikant fiksuotą. Kaupinamas buvo atliktas simetriniu ir asimetriniu pluoštu. 28 pav. grafikai A3-F3 atitinka kaupinimą simetriniu pluoštu (kairėje), grafikai A4-F4 atitinka kaupinimą asimetriniu pluoštu (dešinėje). 28 pav. A3 juodos linijos vaizduoja kaip buvo keičiama kaupinančios spinduliuotės sąsmaukos padėtis netiesinio kristalo (pažymėto mėlyna spalva) atžvilgiu. Raudona kreivė atitinka padėtį, kai kaupinimo pluošto sąsmauka yra kristalo centre. 28 pav. B3 ir B4 eksperimentinės ir teorinės signalinės bangos pluošto spindulio

priklausomybės gautos taip pat kaip aprašyta šio skyriaus pradžioje. Visi grafikuose pavaizduoti matavimai pagal raidinius indeksus (A, B...) atitinka anksčiau šiame skyriuje aprašytus matavimus.

28 pav. B3 ir B4 vaizduojamos teorinės bei eksperimentinės signalinių bangų pluoštų spindulių priklausomybės nuo atstumo, kuriame buvo kaupinančio pluošto sąsmaukos padėtis. Reikia pastebėti, kad šiuo atveju teorinės ir eksperimentinės signalinės bangos pluošto spindulio priklausomybės nuo



28 pav. OPO pluošto kokybės tyrimo duomenys keičiant kaupinančios bangos sąsmaukos padėtį, esant simetriniam (kairėje, grafikai su indeksais „1“) ir asimetriniam (dešinėje, grafikai su indeksais „2“) kaupinimo pluoštui. Mėlynai vaizduojamas netiesinis kristalas.

atstumo sutampa. Signalinės bangos pluošto sąsmaukos padėtį rezonatoriuje apibrėžia sferiniai bei plokšti veidrodžiai, kurie nebuvo judinami šių dviejų eksperimentų metu. Taigi kristalo stumdymas darė tam tikrą įtaką signalinės modos padėčiai, o kaupinančio pluošto sąsmaukos stumdymas nedaro jokios įtakos.

28 pav. C3 ir C4 vaizduoja optinio parametrinio osciliatoriaus galios priklausomybę nuo kaupinančio pluošto sąsmaukos padėties. Šiuo atveju didžiausia išvadinė galia gaunama, kai lęšiu fokusuojama yra šiek tiek už kristalo (kaupinimo pluoštas grafike sklinda iš dešinės į kairę). Tai gali būti įtakota signalinės bei kaupinančios spinduliuotės modų persiklojimo. Santykis tarp kaupinančios ir signalinės bangų pluoštų spindulių yra 0,8. Kadangi Gauso pluošto intensyvumas didžiausias

centre, tai gali būti, kad norint optimaliai išnaudoti visą kaupinančią spinduliuotę reikia, kad jos pluošto spindulys būtų šiek tiek didesnis, nei signalinės bangos pluošto spindulys.

28 pav. D3 ir D4 vaizduoja astigmatizmo priklausomybes nuo kaupinančio pluošto sąsmaukos padėties. Tiek kaupinant simetriniu, tiek asimetriniu pluoštu nesimato jokių aiškių tendencijų, taigi galima teigti, kad nuo kaupinančios spinduliuotės sąsmaukos padėties astigmatizmas nepriklauso.

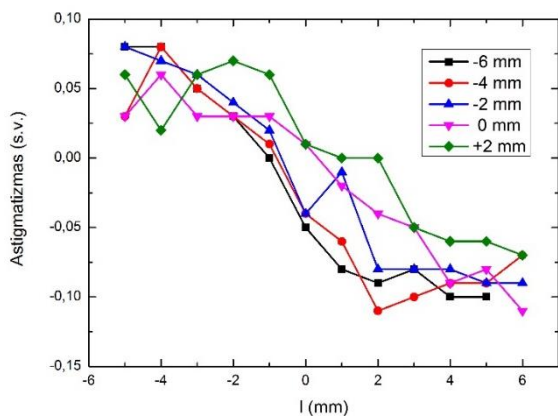
28 pav. E3 ir E4 matoma asimetrijos priklausomybė nuo kaupinimo pluošto sąsmaukos padėties. Kaupinančio pluošto sąsmaukai esant vienoje kristalo pusėje asimetrija yra didesnė nei kitoje, tai gali būti susiję su kaupinančios ir signalinės bangų skėsciu ženkais. Kadangi kristalas visada kaupinamas iš vienos pusės, o signalinės bangos skėstis ties kristalu keičia ženklą, tai asimetrijos atsiradimą būtų galima paaiškinti skirtingais kaupinančios ir signalinės bangos skėsciu ženkais. Šaltiniuose [18, 19] yra parodoma, kad slenkstinės OPO generacijos galia bei išvadinė OPO galia yra priklausoma nuo kaupinančio pluošto skėsties, taigi galima daryti prielaidą, kad ir asimetrija taip pat gali būti įtakota kaupinančio pluošto skėsties.

28 pav. F3 ir F4 vaizduoja pluošto parametro M^2 kitimą nuo kaupinančios spinduliuotės sąsmaukos padėties. Kaip ir anksčiau aptarto eksperimento atveju M^2 nepriklauso nuo sąsmaukos padėties.

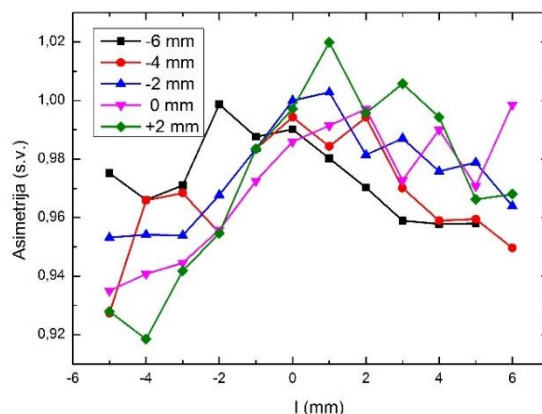
Matoma, kad tarp rezultatų, kai kaupinama simetriniu ir asimetriniu pluoštu beveik nėra skirtumų. Gali būti, kad tai yra susiję su tuo, jog kaupinantis pluoštas kuria kažkiek netvarkingą modos struktūrą, tai ji sklisdama rezonatoriuje „prasivalo“. Turint stipresnę kaupinančio pluošto asimetriją yra tikėtina, kad OPO pluošto kokybė būtų prastesnė ir skirtumai tarp kaupinimo simetrine ir asimetrine banga būtų ryškesni.

4.3. OPO pluošto parametrų astigmatizmo bei asimetrijos tyrimas

Norint geriau suprasti nuo ko priklauso 4.2 skyriuje 27 pav. vaizduojamos astigmatizmo ir asimetrijos tendencijos buvo atliekami nauji matavimai, kurių metu buvo keičiama kaupinančios bangos sąsmaukos padėtis, bei netiesinio kristalo padėtis. Šie matavimai buvo atlikti rezonatoriuje esant papildomam asimetrijos šaltiniui (5 mm storio stiklo plokštelė). 28 pav. vaizduojama astigmatizmo priklausomybė nuo netiesinio kristalo padėties, esant skirtingoms kaupinančio pluošto sąsmaukos padėtimis. Kaupinančios bangos sąsmaukos padėtys sutampa su x ašyje esančiomis netiesinio kristalo vertėmis. Matoma, kad kaupinančio pluošto padėties pokytis nedaro beveik jokios įtakos. 29 pav. vaizduojama asimetrijos priklausomybė nuo netiesinio kristalo padėties, esant skirtingoms kaupinančio pluošto sąsmaukos padėtimis. Kaip ir astigmatizmo atveju nesimato asimetrijos priklausomybės nuo kaupinančios bangos sąsmaukos padėties. Jei 28 pav. palygintume su 4.2 skyriuje 27 pav. D1 grafiku, tai pastebėtume, kad papildoma asimetrija, kuri buvo sukurta rezonatoriuje įtakos astigmatizmui nepadarė. Jei 29 pav. lygintume su 4.2. skyriaus 27 pav. E1 grafiku, tai pastebėtume, kad asimetrija yra apsivertusi (t.y. <1), taip yra dėl papildomos asimetrijos, kuri šio darbo dalyje yra sukurta rezonatoriuje.

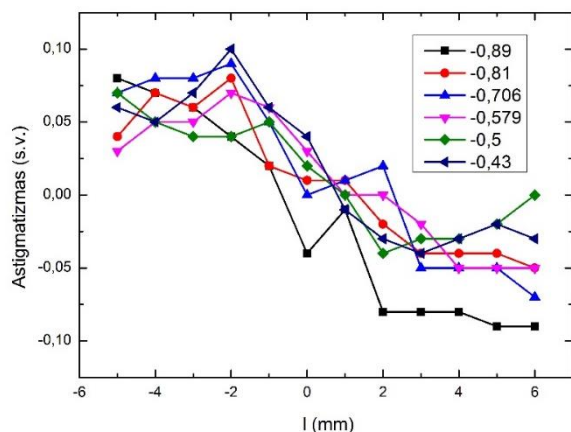


28 pav. Astigmatizmo priklausomybė nuo netiesinio kristalo padėties, esant skirtingoms kaupinančio pluošto sąsmaukos padėtimis.

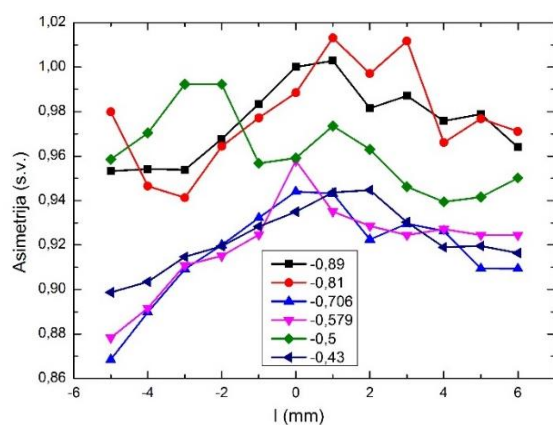


29 pav. Asimetrijos priklausomybė nuo netiesinio kristalo padėties, esant skirtingoms kaupinančio pluošto sąsmaukos padėtimis.

Toliau eksperimento metu buvo keičiama netiesinio kristalo padėtis esant skirtingoms rezonatoriaus stabilumo vertėms. Šio eksperimento metu rezonatoriaus viduje taip pat buvo papildomą asimetriją sukelti stiklo plokštelė. 30 pav. vaizduojama astigmatizmo priklausomybė nuo netiesinio kristalo padėties, esant skirtingoms stabilumo parametro vertėms. Stabilumo vertės nustatytos naudojant kompiuterinę programą „reZonator“. Pastebima, kad stabilumo vertės nedarė įtakos astigmatizmui. 31 pav. vaizduojama asimetrijos priklausomybė nuo netiesinio kristalo padėties, esant skirtingoms stabilumo parametro vertėms. Matoma, kad geresnė pluošto simetrija



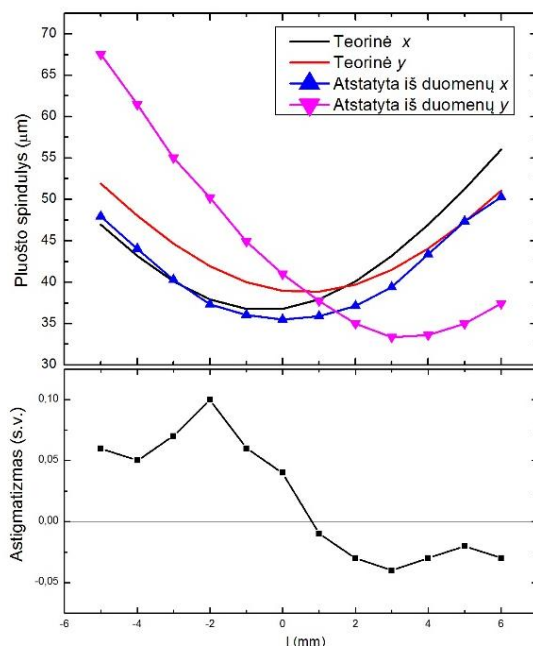
30 pav. Astigmatizmo priklausomybė nuo netiesinio kristalo padėties, esant skirtingoms rezonatoriaus stabilumo vertėms.



31 pav. Asimetrijos priklausomybė nuo netiesinio kristalo padėties, esant skirtingoms rezonatoriaus stabilumo vertėms.

pasiekama, kai stabilumo vertės artėja prie -1, tačiau ten rezonatoriaus veikimas darosi sunkiau kontroliuojamas, dėl to tai nėra gera OPO darbinė padėtis.

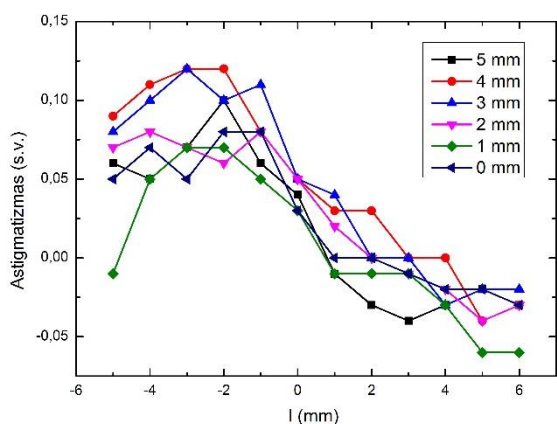
Atlikus šiuos bandymus buvo nustatyta, kad astigmatizmas nepriklauso nuo kaupinančio pluošto padėties ir stabilumo parametrų verčių. Asimetrija nepriklauso nuo kaupinančio pluošto sąsmaukos padėties ir nežymiai priklauso nuo stabilumo parametrų verčių. Keičiant stabilumą matuotame diapazone ir didinant g vertę asimetrija šiek tiek prastėja. Toliau buvo atliekamas teorinis modeliavimas, naudojant „reZonator“ programą. 32 pav. a) dalyje raudona (x kryptis) bei juoda (y kryptis) kreivės vaizduoja teorines signalinės bangos pluošto spindulių priklausomybes nuo netiesinio kristalo padėties. Šiuo atveju signalinės bangos pluošto vertės buvo skaičiuojamos netiesinio kristalo centre, o ne ant rezonatoriaus išvadinio veidrodžio. Rožinė bei mėlyna kreivės vaizduoja iš eksperimentinių duomenų gautą rezultatą, kai eksperimento metu išmatuoti dydžiai buvo suvesti į programą. 32 pav. b) dalyje vaizduojama astigmatizmo priklausomybė nuo netiesinio kristalo padėties, esant tam tikrai fiksuotai stabilumo parametro vertei bei kaupinančio pluošto sąsmaukos padėčiai. Nesutapimas tarp teorinių bei eksperimentinių verčių galimas dėl netobulo, eksperimento metu naudoto rezonatoriaus, parametrų išmatavimo ir aprašymo programoje. Matoma, kad teorinės kreivės x ir y kryptimis kerta viena kitą tam tikroje netiesinio kristalo padėtyje, ta pati tendencija matoma ir iš eksperimentinių duomenų atkurtose kreivėse. Ši netiesinio kristalo padėtis beveik idealiai sutampa su geriausiu astigmatizmo tašku (kai astigmatizmas lygus 0). Taigi galima daryti prielaidą, kad astigmatizmas yra nulemtas signalinės bangos asimetrijos netiesiniame kristale. Tai galima paaiškinti skirtingų diametrų pluoštų fokusavimu praėjus pro lęšį, ar šiuo atveju atsispindėjus nuo sferinio veidrodžio. Skirtingo diametro pluoštai sklisdami per lęšį yra fokusuojami į skirtingo dydžio dėmes, tuo pačiu ir šiek tiek skirtinguose atstumuose. Būtent šis modų dydžių fokusavimo ir atstumo nesutapimas netiesiniame kristale lemia OPO išvadinio pluošto astigmatizmą. Radus tam



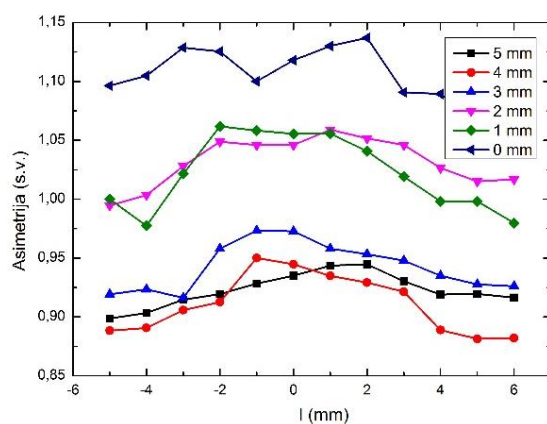
32 pav. a) raudona (x kryptis) bei juoda (y kryptis) kreivės vaizduoja teorines signalinės bangos pluošto spindulių priklausomybes nuo netiesinio kristalo padėties. Rožinė bei mėlyna kreivės vaizduoja iš eksperimentinių duomenų gautą rezultatą, kai eksperimento metu išmatuoti dydžiai. b) dalyje vaizduojama astigmatizmo priklausomybė nuo netiesinio kristalo padėties.

tikrą netiesinio kristalo poziciją, kurioje abiem kryptimis signalinės bangos pluoštas yra simetrinis galima gauti geriausią astigmatizmą rezonatoriaus išėjime.

Lyginant 4.2 skyriaus 27 pav. E1 su šio skyriaus skyriaus 29 pav. matoma, kad asimetrija yra persivertusi. Vienintelis parametras, kuris buvo pakeistas, tai į rezonatorių papildomai įvesta asimetrija pasitelkiant 5 mm stiklo plokštelę. Eksperimento metu buvo atsižvelgta į tai, kad į rezonatorių įdėjus stiklo plokštelę pasikeičia rezonatoriaus stabilumas. 33 pav. vaizduojamos astigmatizmo priklausomybės nuo netiesinio kristalo padėties, rezonatoriuje esant skirtingo storio plokštelėms. Matoma, kad nuo plokštelės storio nepriklauso sistemos astigmatizmas. 34 pav.

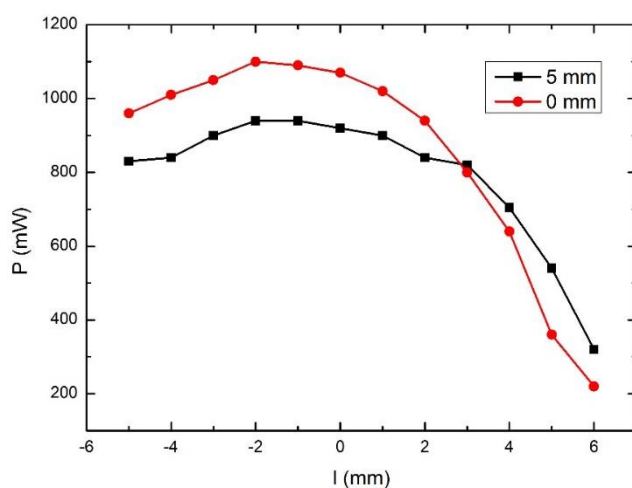


33 pav. Astigmatizmo priklausomybė nuo netiesinio kristalo padėties, esant skirtingo storio stiklo plokštelėms rezonatoriuje.



34 pav. Asimetrijos priklausomybė nuo netiesinio kristalo padėties, esant skirtingo storio stiklo plokštelėms rezonatoriuje.

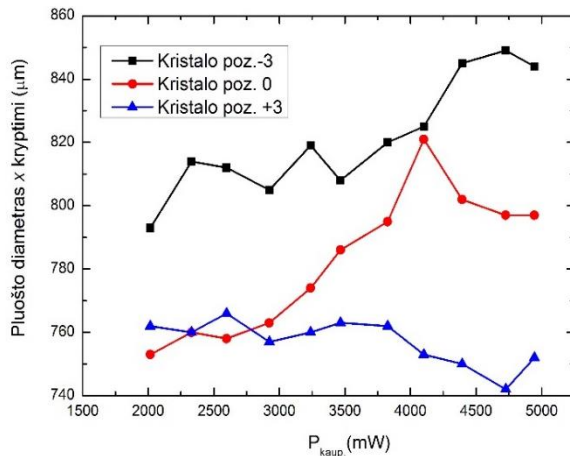
vaizduojamos asimetrijos priklausomybės nuo netiesinio kristalo padėties, rezonatoriuje esant skirtingo storio plokštelėms. Matoma, kad nuo plokštelės storio keičiasi asimetrijos vertė, pluošto eliptiškumas keičiasi iš vienos koordinatės į kitą. Optimaliausia asimetrija gauta naudojant 2 mm ir 3 mm stiklo plokšteles, tiesa geriausios įmanomos asimetrijos vertės 1 pasiekti nepavyko, panašu, kad tam reiktų ~2,5 mm stiklo plokštelės. Dėl rezonatoriuje esančios stiklo plokštelės padidėja nuostoliai, esantys rezonatoriuje, dėl to sumažėja išvadinė OPO galia ir efektyvumas. OPO išvadinės galios priklausomybė, nuo netiesinio kristalo padėties, kai rezonatoriuje yra 5 mm stiklo plokštelė ir kai plokštelės nėra vaizduojama 35 pav. Nepriklausomai nuo plokštelės storio nuostoliai rezonatoriuje visada buvo tokie patys, dėl to visų storių plokštelių duomenys nevaizduojami. Maksimalios galios taške nuostoliai siekia ~15%. Jei eksperimento metu būtų naudotos skaidrintos stiklo plokštelės (signalinei bangai 765 nm), nuostoliai galėtų būti mažesni.



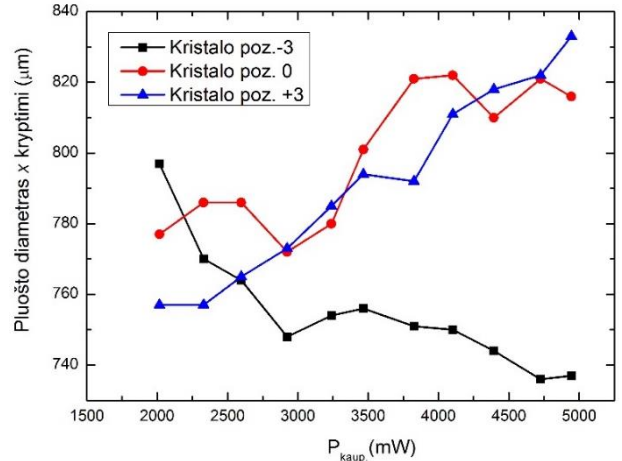
35 pav. OPO išvadinės galios priklausomybė, nuo netiesinio kristalo padėties, kai rezonatoriuje yra 5 mm stiklo plokštelė ir kai jos nėra.

Programa „reZonator“, naudojanti geometrinės optikos skaičiavimo metodus įvairiems rezonatoriams apibūdinti, negalėjo paaiškinti kai kurių pluoštų tendencijų, kurios buvo išmatuotos. Atliekant modeliavimą su „reZonator“, kai keičiama netiesinio kristalo padėtis, pluošto už išvadinio arba galinio veidrodžių diametrai nekinta, tuo pačiu nekinta ir asimetrijos bei astigmatizmo reikšmės. Dėl to reikėjo įsitikinti kokie kiti mechanizmai gali lemti atsiradusius pluošto parametrų pokyčius. Buvo nuspręsta padidinti kaupinimo galią ir stebėti ar nuo to nesikeičia OPO pluošto parametrai. Jei jie keičiasi, tai leistų spėti apie tam tikras netiesines sąveikas arba termolėšio atsiradimą, kurių nerodytų naudotas modeliavimo metodas.

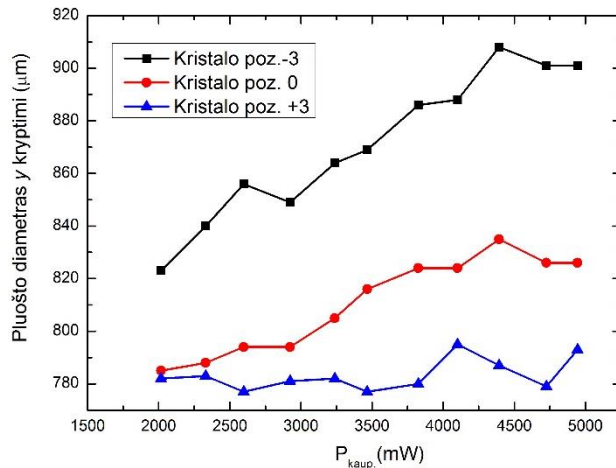
36 pav. ir 37 pav. vaizduojamos OPO pluoštų diametrų priklausomybės nuo kaupinančios spinduliuotės galios, iškarto už galinio bei išvadinio veidrodžių, x kryptimi. Analogiškai 38 pav. ir 39 pav. vaizduojamos priklausomybės y kryptimi. Matavimai atlikti, esant trimis skirtingoms netiesinio kristalo pozicijoms. Matoma, kad didinant kaupinimo galią pluošto diametrai keičiasi. Reikia pastebėti, kad netiesiniam kristalui esant išstumtam iš centrinės padėties (+3 arba -3 pozicija)



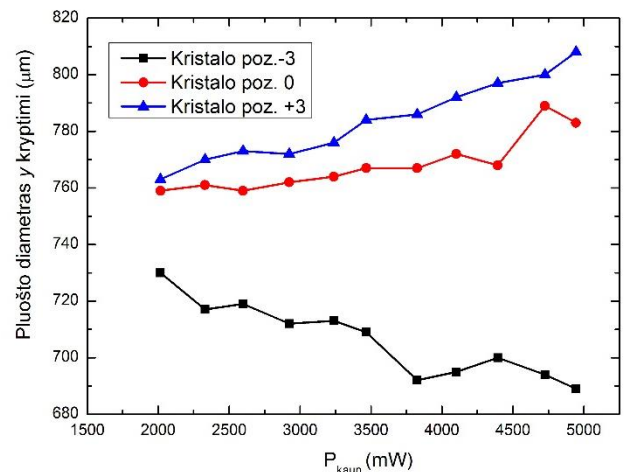
36 pav. Už išvadinio veidrodžio esančio pluošto diametro (x kryptimi) priklausomybė nuo kaupinimo galios, esant skirtingoms netiesinio kristalo pozicijoms.



37 pav. Už galinio veidrodžio esančio pluošto diametro (x kryptimi) priklausomybė nuo kaupinimo galios, esant skirtingoms netiesinio kristalo pozicijoms.



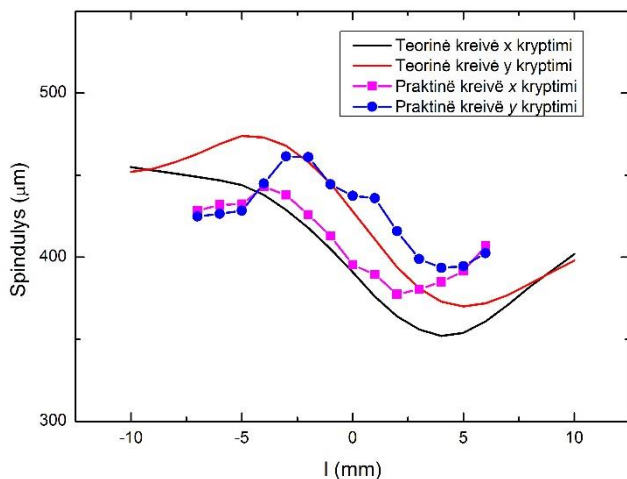
38 pav. Už išvadinio veidrodžio esančio pluošto diametro (y kryptimi) priklausomybė nuo kaupinimo galios, esant skirtingoms netiesinio kristalo pozicijoms.



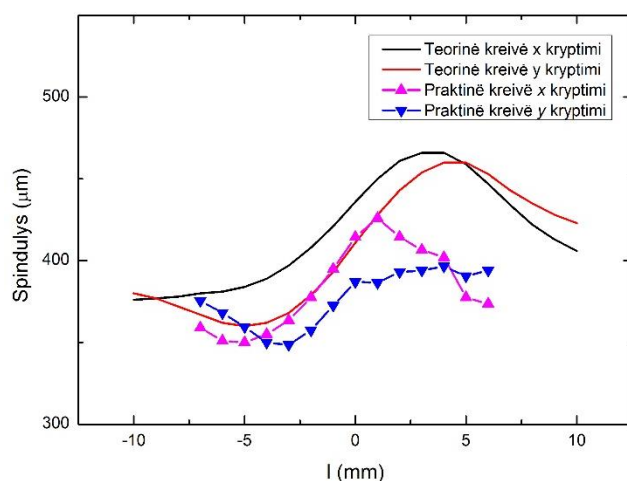
39 pav. Už galinio veidrodžio esančio pluošto diametro (y kryptimi) priklausomybė nuo kaupinimo galios, esant skirtingoms netiesinio kristalo pozicijoms.

pluošto diametrai už abiejų veidrodžių elgiasi priešingai, kai didinama kaupinimo galia. Iš 36 pav. matoma, kad juoda kreivė (-3 poz.) didinant kaupinimo galią kyla aukšyn, t.y. pluošto diametras didėja, o mėlyna (+3 poz.) leidžiasi žemyn, t.y. pluošto diametras mažėja. Kai netiesinis kristalas yra centre (0 pozicija) abiejų pluoštų diametrų pavidalai yra panašūs. Eksperimento metu buvo tikrinama ar neatsiranda termolėšis, kuris galėtų daryti panašią įtaką pluoštams, tuo tikslu buvo pasitelktas termovizorius, tačiau netiesiniame kristale nesimatė jokių temperatūros pokyčių. Tai leido daryti prielaidą, kad OPO pluoštų kitimas, atsirandantis didinant kaupinimo galią yra susijęs su netiesiniais procesais.

Toliau eksperimento metu OPO buvo kaupinamas maksimalia 4,8 W kaupinančios spinduliuotės galia, rezonatoriuje stiklo plokštelės nebuvo. Eksperimento metu buvo keičiama netiesinio kristalo padėtis, bei matuojami visi anksčiau minėti pluošto parametrai. Išmatuoti rezultatai lyginami su teoriniais rezultatais, kurie gauti atlikus teorinį modeliavimą su „Matlab“ programa. Šiame teorinio modeliavimo modelyje yra įskaičiuotos netiesinės sąveikos, modelio veikimo principai trumpai aprašyti 2.6 skyriuje.

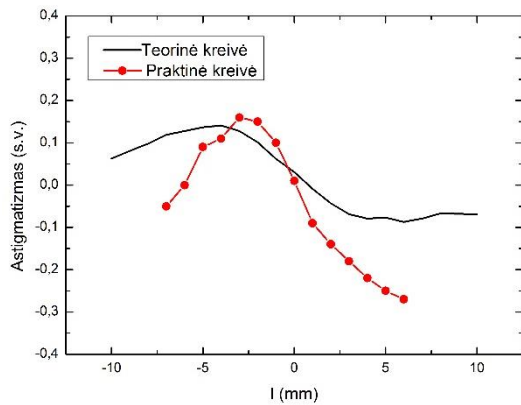


40 pav. Už išvadinio veidrodžio esančio pluošto spindulio priklausomybė nuo netiesinio kristalo pozicijos.

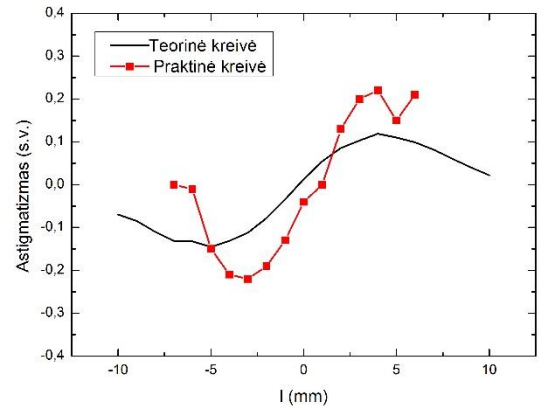


41 pav. Už galinio veidrodžio esančio pluošto diametro priklausomybė nuo netiesinio kristalo pozicijos.

40 pav. ir 41 pav. yra vaizduojamos už išvadinio, bei už galinio veidrodžių esančios pluoštų spindulių priklausomybės nuo netiesinio kristalo padėties. Teoriniai duomenys vaizduojami kartu su eksperimentiniais. Iš eksperimentinių rezultatų matoma, kad skirtingose rezonatoriaus atšakose formuojasi skirtingos modos. Vienoje šakoje moda eliptiškesnė x kryptimi, kitoje y kryptimi. Nežymiai skiriasi ir modų dydžiai, tai tikriausiai yra nulemta nevysiškai vienodų rezonatoriaus atšakų ilgių. Lyginant teorinį modeliavimą su eksperimentiniais rezultatais, matoma, kad pagrindinės tendencijos sutampa, tačiau modelis dar neveikia visiškai tiksliai, kadangi absoliutinės modeliuotų dydžių vertės pilnai neatitinka eksperimentiškai išmatuotų verčių. Teoriniai pluoštų spinduliai kinta didesniame verčių diapazone. Nesunku pastebėti, kad eksperimentinės kreivės yra lyg „suspaustos“ x kryptimi, lyginant su teorinėmis, kolkas nėra aišku kas lemia „suspaudimą“.



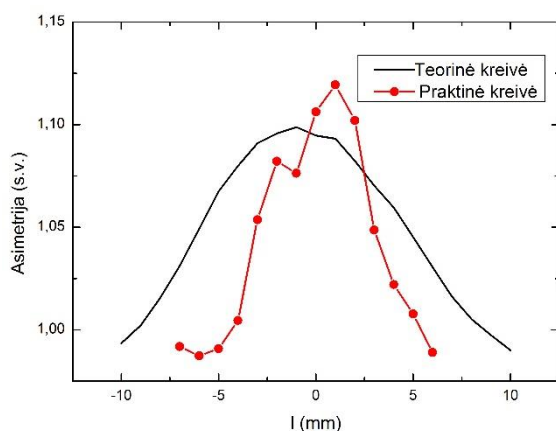
42 pav. Už išvadinio veidrodžio esančio pluošto astigmatizmo priklausomybė nuo netiesinio kristalo pozicijos.



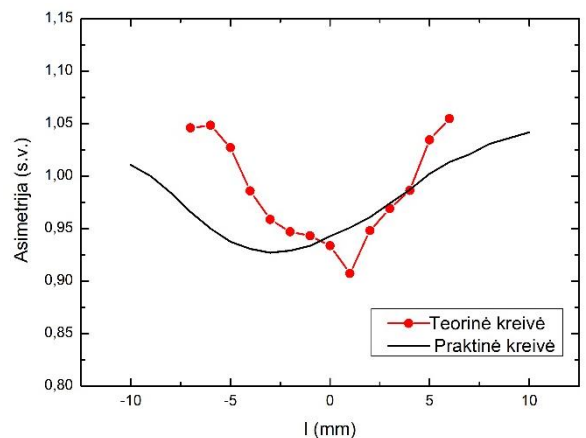
43 pav. Už galinio veidrodžio esančio pluošto astigmatizmo priklausomybė nuo netiesinio kristalo pozicijos.

42 pav. ir 43 pav. vaizduojamos astigmatizmo priklausomybės nuo netiesinio kristalo padėties, už išvadinio bei galinio veidrodžių. Teoriniai bei eksperimentiniai duomenys vaizduojami kartu. Kaip ir prieš tai aptartuose grafikuose, taip ir čia tendencijos išlieka labai panašios, tačiau absoliutinių dydžių neatitiktis yra, taip pat ir eksperimentinių rezultatų „suspaudimas“ x kryptimi. Abiejuose eksperimentiniuose astigmatizmo grafikuose du kartus yra kertamas 0 taškas, kai astigmatizmas yra minimalus. Teoriniame astigmatizmo grafike, už išvadinio veidrodžio, 0 taškas yra kertamas vieną kartą. Astigmatizmo priklausomybės už abiejų veidrodžių elgiasi skirtingai. Tačiau galima pastebėti, kad beveik visose srityse, kur astigmatizmas už išvadinio veidrodžio didėja, tai už galinio – mažėja.

44 pav. ir 45 pav. vaizduojamos asimetrijos priklausomybės nuo netiesinio kristalo padėties, už išvadinio bei galinio veidrodžių. Teoriniai bei eksperimentiniai duomenys vaizduojami kartu. Tendencijų sutapimas egzistuoja, abiejuose asimetrijos grafikuose už išvadinio veidrodžio egzistuoja du minimalios asimetrijos taškai kai asimetrija yra lygi 1. Blogiausia asimetrija gaunama arti netiesio kristalo 0 padėties. Už galinio veidrodžio grafikai yra apsivertę, t.y. moda yra eliptinė kita kryptimi nei ant išvadinio veidrodžio. Už galinio veidrodžio taip pat egzistuoja geriausios simetrijos taškai,



44 pav. Už išvadinio veidrodžio esančio pluošto asimetrijos priklausomybė nuo netiesinio kristalo pozicijos.

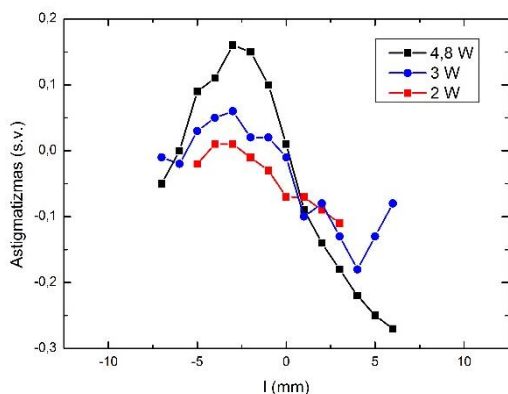


45 pav. Už galinio veidrodžio esančio pluošto asimetrijos priklausomybė nuo netiesinio kristalo pozicijos.

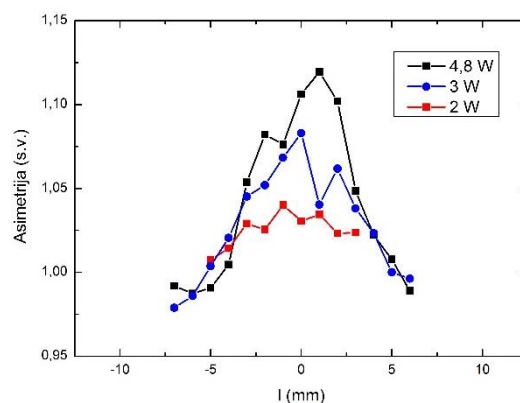
kuriuose asimetrija yra artima 1. Už galinio veidrodžio pagal teorinius duomenis prasčiausia asimetrija gaunama, kai netiesinis kristalas yra arti 0 pozicijos. Pagal eksperimentinius duomenis, kai netiesinis kristalas yra arti 0 arba labai toli nuo jo (-7 ir 5 poz.). Tarp eksperimentinių ir teorinių duomenų taip pat egzistuoja nedidelis absoliutinių dydžių neatitikimas, bei anksčiau minėtas eksperimentinių rezultatų „suspaudimas“ x kryptimi. Galima būtų išskirti netiesinio kristalo padėtį ties -5, kurioje už abiejų veidrodžių asimetrija ir astigmatizmas yra labai maži.

Šie eksperimentiniai matavimai buvo pakartoti su 5 mm storio stiklo plokšte rezonatoriuje ir su dar dviem skirtingomis kaupinančios spinduliuotės galios vertėmis (2 W ir 3 W). Matavimuose su stiklo plokšte ryškių skirtumų nepastebėta, o modeliuoti paprasčiau be plokštelės, dėl to duomenys su stiklo plokšte nėra vaizduojami.

46 pav. vaizduojama OPO astigmatizmo priklausomybė nuo netiesinio kristalo pozicijos, esant skirtingoms kaupinimo galios vertėms, už išvadinio veidrodžio. 47 pav. vaizduojama asimetrijos priklausomybė nuo netiesinio kristalo padėties, esant skirtingoms kaupinimo galios vertėms, už išvadinio veidrodžio. Matoma, kad kreivių pavidalai, priklausomai nuo galios turi panašias tendencijas, tačiau maksimalios vertės skiriasi. Esant 2 W kaupinimo galiai matavimo netiesinio



46 pav. Už išvadinio veidrodžio esančio pluošto astigmatizmo priklausomybė nuo netiesinio kristalo pozicijos, esant skirtingoms kaupinimo galios vertėms.



47 pav. Už išvadinio veidrodžio esančio pluošto asimetrijos priklausomybė nuo netiesinio kristalo pozicijos, esant skirtingoms kaupinimo galios vertėms.

kristalo pozicijos diapazonas yra siauresnis (matuota nuo -5 mm iki 4 mm kristalo pozicijos), kol OPO generacija dar yra stabili. Matoma ryški OPO pluošto parametrų priklausomybė nuo kaupinančios spinduliuotės galios, didinant kaupinančią galią kreivės įgauna didesnes absoliutines vertes, bet išlaiko beveik tokias pat formas. Atsižvelgiant į visus duomenis, gautus darbo metu, kai buvo keičiama kaupinančios spinduliuotės galia, galima teigti, kad OPO netiesiniame kristale intensyvumas yra pakankamai didelis, kad jame vyktų papildoma netiesinė sąveika, kurios metu pasireiškia Kero lęšio efektas. Tai matoma iš eksperimentinių ir iš teorinių duomenų. Jeigu rezonatoriuje Kero lęšio nebūtų, tai 40-45 pav. vaizduojamos priklausomybės būtų visiskai tiesios,

neegzistuoją joks pokytis grafikų y ašyje. Būtent tokie rezultatai yra gaunami modeliuojant rezonatoriaus veikimą su programa „reZonator“, kuri neįskaito netiesinių sąveikų.

Matoma, kad teorinis modelis pakankamai gerai sutampa su eksperimentiniais rezultatais, tačiau turi ir neatitikimų, kurie galėjo atsirasti dėl nepakankamai tiksliai įvestų teorinio rezonatoriaus parametrų. Rezonatoriaus ilgis, nekolinearus kampas, rezonatoriaus veidrodžių kreivumo spinduliai, kaupinimo galia, impulso trukmė, netiesinis lūžio rodiklis n_2 , kampai, kuriais rezonatoriuje sklinda pluoštas ir kiti parametrai buvo naudoti atliekant modeliavimą. Į teorinį modelį buvo stengiamasi įvesti kuo tikslesnius eksperimento metu naudoto rezonatoriaus parametrus, tačiau nevisi jie yra lengvai ir tiksliai išmatuojami, o taip pat kol kas nėra aišku kokio dydžio įtaką kiekvienas parametras daro modeliavimui. Labai tiksliai suvedus eksperimento metu naudoto rezonatoriaus parametrus tikėtina, kad teoriniai rezultatai dar geriau sutaptų su eksperimentiniais.

5. Išvados

- Eksperimento metu nustatyta, kad pluošto parametrai prastėja, kai kaupinimo bangos pluošto diametras yra mažesnis nei signalinės bangos ir kad pluošto kokybei labiausiai kenkia kai osciliatorius dirba ties stabilumo parametro vertėmis $g > 0,5$, $g < -0,9$ bei $g \approx 0$. Norint gauti maksimalią OPO išvadinę galią santykis tarp kaupinančios ir signalinės bangų diametrų turėtų būti 1 – 1,2.
- Nustatyta optimali OPO zona, kurioje erdviniai pluošto parametrai yra geri (M^2 vertės iki 1,06), o išvadinė galia maksimali arba artima maksimaliai. Tai sritis, kai stabilumo parametrai g kinta nuo -0,2 iki -0,8, o kaupinančios bangos pluošto spindulys yra nuo 30 μm iki 45 μm . Taip pat nustatyta kaip netiesinio kristalo padėtis ir kaupinančios bangos sąsmaukos padėtis įtakoja OPO pluošto parametrus.
- Eksperimento metu nustatyta, kad signalinės bangos pluošto parametrai nekinta, kai sistema yra kaupinama simetriniu ar asimetriniu pluoštu, esant turėtai kaupinimo bangos asimetrijai.
- Nustatyta, kad su reikiamo storio papildoma asimetrijos plokšte rezonatoriuje galima valdyti išvadinio pluošto asimetriją ir ją beveik visiškai panaikinti.
- Nustatyta, kad OPO pluošto parametrai kinta priklausomai nuo kaupinančios spinduliuotės galios. Šį kitimą lemia netiesiniai efektai, susiję su netiesiniu lūžio rodikliu n_2 , kuris kuria Kero lęši kristale. Kuo didesnis intensyvumas kristale, tuo ryškesni pluoštų parametru asimetrijos bei astigmatizmo pokyčiai.

6. Santrauka

Giedrius Martynaitis. *Sinchroniškai kaupinamo optinio parametrinio osciliatoriaus erdviųjų pluošto savybių tyrimas.*

Erdvinė pluošto kokybė yra vienas svarbiausių bet kokio lazerinio šaltinio parametrų. Optiniai parametriniai osciliatoriai (OPO) taip pat nėra išimtis - stengiamasi, kad šių prietaisų erdvinė pluošto kokybė būtų kuo artimesnė fundamentinei Gauso modai. Šiuolaikiniuose moksliniuose bei pramoniniuose taikymuose norima dirbti su geriausiomis įmanomomis erdvinėmis pluošto savybėmis, todėl yra svarbu išsiaiškinti kas jas lemia.

Darbo metu sukonstruota optinio parametrinio osciliatoriaus bei teleskopo optinė schema, leidžianti keisti signalinės bei kaupinančios bangų pluoštų diametrus. Sistemoje taip pat buvo moduliai, leidžiantys keisti kaupinančios ir signalinės bangos asimetriją. Teorinis kaupinančios bei signalinės bangų pluoštų diametrų keitimas buvo modeliuojamas kompiuterine programa „reZonator“ ir „Matlab“. Keičiant signalinės ir kaupinančios bangos pluoštų diametrus, netiesinio kristalo padėtį rezonatoriuje, kaupinančios spinduliuotės sąsmaukos padėtį ir kitus parametrus buvo matuojami erdviniai, pluoštą apibūdinantys, dydžiai. Eksperimento metu buvo tiriama kaip OPO išvadinės spinduliuotės pluošto parametrai priklauso nuo to, su kokia spinduliuote (simetrine ar asimetrine) yra kaupinama. Taip pat ar papildoma asimetriją rezonatoriuje gali būti naudinga pluošto kokybei, bei ar kaupinanti galia turi įtakos OPO pluoštui. Išmatuoti dydžiai lyginami su teoriškai apskaičiuotais.

Darbe parodoma, kad erdviųjų pluošto parametrų tyrimo sistemos, kai keičiami kaupinančios bei signalinės bangų pluošto diametrai, veikimas atitinka sumodeliuotąjį naudojant kompiuterinę programą „reZonator“. Nustatyta, kad optinio parametrinio osciliatoriaus signalinės bangos pluošto parametrai nepriklauso nuo kaupinančios bangos asimetrijos, esant naudotai asimetrijos vertei. Taip pat darbe pademonstruota, kaip signalinės bangos pluošto parametrai keičiasi priklausomai nuo netiesinio kristalo, bei kaupinančios bangos pluošto sąsmaukos padėčių. Nustatyta, kad astigmatizmą lemia netiesinio kristalo padėtis rezonatoriuje ir signalinės bangos simetrija kristale, kad įnešus papildomos asimetrijos į rezonatorių galima valdyti ir minimalizuoti išvadinio pluošto asimetriją. Taip pat parodoma, kad nuo kaupinimo galios priklauso OPO astigmatizmas bei asimetrija, nes netiesiniame kristale dėl didelio intensyvumo susidaro Kero lęšis.

7. Summary

Giedrius Martynaitis. *Synchronously pumped optical parametric oscillator beam quality analysis.*

Beam quality is one of the most important laser parameters. Optical parametric oscillators (OPOs) are not an exception and it is necessary to try to get the beam quality as close to the fundamental Gaussian mode as possible. Contemporary scientific and industrial applications of the OPO's require good beam quality therefore it is necessary to investigate the underlying principles that determines it.

The experiments were carried out on a measurement system consisting of an OPO and an external telescope (so that it would be possible to change signal and pump beam diameters). Beam quality parameters were measured under several different signal and pump beam widths. „reZonator“ software was used to simulate the propagation and to determine signal and pump beam widths. Additionally an asymmetry module for the pump beam was incorporated to the measurement system. Beam quality parameters were measured when the system was pumped with a symmetric and with an asymmetric pump beam. Furthermore, beam quality of the OPO was measured under different nonlinear crystal and pump beam waist positions in the OPO cavity. Finally, asymmetry was added to the signal beam. OPO beam parameters were measured depending on nonlinear crystal position in the resonator, resonator stability parameters, pump beam focus position and pump power.

From the collected data it was possible to determine beam quality regions of the OPO, depending on pump and signal beam diameters. It is also shown that beam properties of an OPO signal wave do not depend on the asymmetry of the pump beam, with the amount of asymmetry that was implied in the system. OPO output power, astigmatism, asymmetry and M^2 relationships to nonlinear crystal position and pump beam waist position are presented in this work. It is shown that astigmatism is dependant on the signal mode beam diameter in the nonlinear crystal, asymmetry can be controlled with an additional asymmetry module in the resonator and that asymmetry and astigmatism are dependant on pump power, due to the Kerr lens effect.

8. Literatūros sąrašas

1. <http://www.radiantis.com/>
2. Gloster L A W, Golding P S, King T A (1996) Optical parametric oscillators for medical applications. *SPIE*. 2676: 360 – 368
3. Saleh B E A, Teich M C (1991) Fundamentals of photonics. John Wiley & sons, inc. Smith
4. Dubietis A (2011) Netiesinė optika. Vilniaus universitetas.
5. Boyd R W (2007) Nonlinear optics. Rochester.
6. Siegman A E (1986) Lasers. The Maple – Vail Book Manufacturing Group.
7. Dubietis A Lazeriu konspektas.
8. (2009) M2-200/200s-FW Users Guide. Ophir-Spiricon Inc.
9. https://www.rp-photonics.com/beam_quality.html
10. Hodson N, Weber H (2005) Laser Resonators and Beam Propagation. Fundamentals, Advanced Concepts and Applications. Springer.
11. Fox A G, Li T (1961) Resonant Modes in a Maser Interferometer. *Bell Labs Technical Journal*. 40: 453–488.
12. Smith A (2015) Crystal Nonlinear Optics – With SNLO Examples. AS-Photonics
13. Stabinis A P, Valiulis G (2008) Ultratrumpųjų šviesos impulsų netiesinė optika. TEV.
14. <http://rezonator.orion-project.org/>
15. Jenkins F, White H. (1965) Fundamentals of optics. Quebecor World
16. Anstett G, Nittman M, Wallenstein R (2004) Experimental investigation and numerical simulation of the spatio-temporal dynamics of the light-pulses in nanosecond optical parametric oscillators. *Appl. Phys. B* 79, 305–313.
17. Urschel R, Borsutzky A, Wallenstein R (2000) Numerical analysis of the spatial behaviour of nanosecond optical parametric oscillators of beta-bariumborate. *Appl. Phys. B* 70, 203–210
18. Ewanizky T F (1978) Optical parametric oscillator dependence on pump laser beam quality. *IEEE Journal Of Quantum Electronics*, Vol. QE-14, NO. 12.
19. Hui-Qing L (2005) Beam divergence effects on high power optical parametric oscillation. *Chinese Phys*, 14.
20. Pyragaitė V (2013) Kompiuterinė lazerių fizika. Elektroninis leidinys, Vilniaus universitetas.
21. Stasevičius I (2014) Sinchroniškai kaupinamo femtosekundinio stovinčios bangos optinio parametrinio generatoriaus konstravimas, teorinis modeliavimas bei taikymas dvifotonėje ir harmonikų generacijos mikroskopijoje. Magistro tezės.
22. Smith A, Alford W, Raymond T, Bowers M (1995) Comparison of a numerical model with measured performance of a seeded, nanosecond KTP optical parametric oscillator. *Journal of the Optical Society of America B*. Vol. 12, Issue 11, pp. 2253-2267.

23. Debuisschert T, Raffy J , Pocholle J, Papuchon M (1996) Intracavity optical parametric oscillator: study of the dynamics in pulsed regime. *Journal of the Optical Society of America B*. Vol. 13, Issue 7, pp. 1569-1587.