

VILNIAUS UNIVERSITETAS

FIZIKOS FAKULTETAS

Lazerinių tyrimų centras

Justas Girskis

REGIMOSIOS SPEKTRO SRITIES PR: YLF LAZERIO TYRIMAS

Magistrantūros studijų mokslo tiriamasis darbas

Lazerinių technologijų studijų programa

Studentas

Justas Girskis

Darbo vadovas

prof. habil. dr. Valerijus Smilgevičius

LTC direktorius

doc. dr. Aidas Matijošius

Recenzentas

doc. dr. Rytis Butkus

Vilnius 2020

Turinys

Įvadas	3
1. Kietojo kūno lazerio veikimo principai	4
2. Diodinis lazeris.....	7
3. Lazerinio pluošto formavimas	9
3.1. Spinduliuotės perdavimas šviesolaidžiu	9
3.2. Lazerinio pluošto formavimo sistema	11
4. Kristalinio būvio Pr:YLF medžiagos aptarimas.....	14
5. Tyrimu metodika	16
5.1. Eksperimento schema	16
5.2. Termo lęšio matavimo schema	18
6. Tyrimo rezultatai	19
6.1. 0,6 at. % Pr:YLF kristalo tyrimas	19
6.2. Diodo lazerio tyrimas.....	22
6.3. Lazerio optinio rezonatoriaus modeliavimas	26
6.5. Lazerinės spinduliuotės generacijos tyrimas	29
Pagrindiniai rezultatai	38
Išvados.....	40
Literatūra.....	41
Santrauka	44
Summary	45

Ivadas

Pirmas veikiantis lazeris buvo sukurtas 1960 metais Teodoro Maimano. Tuo metu, kaip aktyvioji medžiaga, buvo naudota kietojo kūno rubino kristalo strypas, o kaupinta didelės galios blykstinė lempa [1]. Iki tol nebuvo sukurta jokių prietaisų, kurie generuotų siauro spektro regimo diapazono koherentinę spinduliuotę su vidutine galia viršijančia bet kurią tų laikų elektromagnetinės spinduliuotės sistemą. Tuo metu tai buvo didžiulis pasiekimas, nes atsivėrė naujos galimybės tokių šviesos šaltinių panaudojimui elektronikoje, moksle, medicinoje, industrijoje, kariuomenėje [2]. Šiais laikais lazerinės sistemos naudojamos pramonėje apdirbant medžiagas - pjaustant, virinant, grūdinant. Moksle naudojamos tiriant greitus procesus, tokius kaip fluorescencija, ir kur reikia didelių intensyvumų tiriant medžiagą koherentine spinduliuote. Medicinoje naudojama tiksliai pjūviams atlikti, mirusių audinių pašalinimui, lazerinei akių korekcijai ir t.t. Panaudojimo galimybės yra labai plačios, o rinkoje yra didžiulė paklausa regimojo diapazono lazeriams.

Šiuo metu naudojami kietojo kūno, dujiniai, skysto būvio, cheminiai, laisvų elektronų, šviesolaidiniai, diodiniai lazeriai. Išvardinti lazeriai pasižymi skirtingais žadinimo principais, kai užpildos apgraža sudaroma optiniu, elektriniu ar cheminių reakcijų būdais. Taip pat skiriasi ir lazerio matmenys. Įprastai kietojo kūno ar diodiniai lazeriai yra kur kas mažesni, lyginant su cheminiais ar laisvųjų elektronų lazeriais, kur reikalinga gerai išvystyta infrastruktūra, o pačio lazerio mechanizmo matmenys gali užimti ir tūkstančius kvadratinių metrų [3]. Priklausomai nuo lazerio tipo, skiriasi išgaunamos lazerinės spinduliuotės bangos ilgis, pluošto kokybė, intensyvumai ir kiti parametrai. Dujiniai lazeriai, dėl homogeniškos medžiagos naudojamos rezonatoriuje, pasižymi aukštos erdvinės kokybės išvadine spinduliuote, tačiau naudojant juos sudėtinga pasiekti dideles galias, o efektyvumas yra mažas. Diodiniai lazeriai yra kompaktiški, kaupinami elektros srove, efektyvūs, tačiau tokio lazerio išvadinis pluoštas yra prastos kokybės, o spektras platus. Naudojant kietojo kūno lazerius galima pasiekti aukštą lazerinės spinduliuotės galias ir gerą pluošto kokybę, tačiau didžioji dalis naudojamų aktyviųjų medžiagų spinduliuoja infraraudonojoje srityje. Ieškant alternatyvų yra tiriamos naujos medžiagos, kurios turėtų tinkamas savybes generacijai regimajame spektre.

Aktyvios medžiagos turi pasižymėti dideliu šiluminiu laidumu, cheminiu stabilumu, atsparumu mechaniniams virpesiams. Visa tai svarbu dėl to, kad lazeris veiktų stabiliai, o parametrai nesikeistų laike. Tokiomis savybėmis pasižymi monokristalai, kurie sudaryti iš

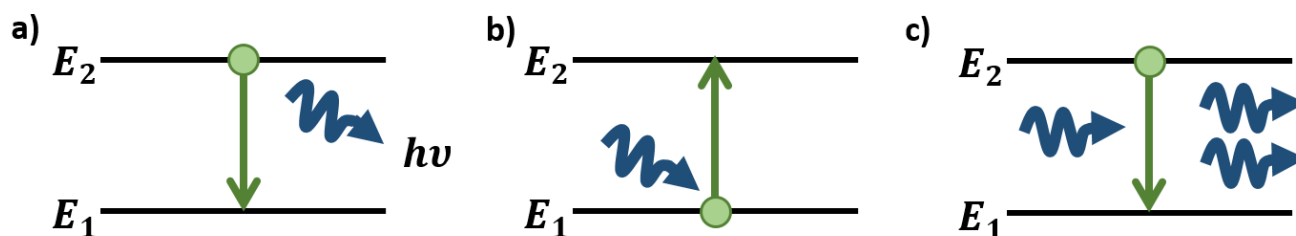
struktūriškai išsidėsčiusių atomų gardelėje, o atstumai tarp artimiausių atomų yra sąlygiškai vienodi visame kristale. Lazeriniai kristalai gaunami pakeičiant kai kuriuos monokristalų jonus tam tikrų metalų jonais, o viena iš tokių medžiagų yra itrio ličio fluoridas legiruotas prazeodimio jonais (**Pr:YLF**). Ši medžiaga yra mažai tirta. Pirmieji straipsniai, apie tokio kristalo panaudojimą lazerinės spinduliuotės generacijai, pasirodė prieš kiek daugiau nei keturiasdešimt metų [4][5], tačiau aktyvesni tyrimai pradėti tik šį tūkstantmetį [6]. Pr:YLF pasižymi unikalia savybe - turi skirtingas emisijos juostas visame regimajame spektre ir artimojoje infraraudonojoje srityje [7]. Tai leidžia tokį lazerį pritaikyti tiek moksliniams, tiek medicininiais tikslams dėl savo universalumo, t.y. gebėjimo generuoti įvairaus spektrinio diapazono lazerinę spinduliuotę.

Šio darbo tikslas yra sukonstruoti Pr:YLF lazerio schemą, išsiaiškinti, kokių sąlygų reikia, jog vyktų Pr:YLF lazerio generacija bei nustatyti kaupinimo spinduliuotės parametrus įgalinančius generuoti lazerinę spinduliuotę.

1. Kietojo kūno lazerio veikimo principai

Kietojo kūno lazerius dažniausiai kaupina optiškai, dėl to šitame skyriuje bus aptarta tik optinio kaupinimo kietojo kūno lazerio veikimo principai.

Dvidešimto amžiaus pradžioje, Naujosios Zelandijos kilmės fizikai - mokslininkai Nilsas Boras ir Ernestas Rezerfordas aprašė atomo modelį [8]. Jie teigė, kad atomas yra sudarytas iš teigiamo krūvio branduolio dalelių, kurios yra apsuptos neigiamo krūvio elektronais, judančiais aplink branduolį. Atomo energija yra nekintanti tol, kol orbitose esantys elektronai nekeičia savo orbitalių.



1 pav. Kvantinės sistemos su diskrečiais energijos lygmenimis galimų šuolių tipai: a) savaiminė spinduliuotė, b) sugertis, c) priverstinė spinduliuotė.

Kiek vėliau Albertas Einšteinas papildė atomo modelio teoriją teigdamas, jog galimi trijų tipų šuoliai tarp diskrečių energijos lygmenų: sugertis, priverstinė ir savaiminė spinduliuotė (1

pav.) [9]. Šie šuoliai yra vadinami spinduliniais, nes proceso metu atsiranda, arba išnyksta fotonas. Vykstant priverstiniams sistemos šuoliams galima tiek sugertis, kai sistema pereina į aukštesnę energetinę būseną, tiek išspinduliavimas, kai sistema pereina į žemesnę energetinę lygmenį. Priverstinio spinduliavimo metu papildomai atsiranda vienas fotonas, kurio energija aprašoma tokia išraiška:

$$h\nu = E_2 - E_1. \quad (1.1)$$

Čia E_1, E_2 - pagrindinio ir aukštesnio lygmens energijos, h - Planko konstanta, ν – fotono dažnis

Tokio fotono energija, dažnis, fazė, poliarizacija, sklaidimo kryptis yra tokia pati kaip ir žadinančios spinduliuotės. Tokiu būdu, vienas fotonas gal sukurti identišką antrą fotoną. Tai įmanoma tik veikiant rezonansinio dažnio elektromagnetiniam laukui, kurio energija yra lygi tarpo tarp energetinių lygmenų dydžiui. Priverstinio šuolio tikimybė per laiko vienetą proporcinga išorinio elektromagnetinio lauko energijos tankiui vienetiniame dažnių intervale (spektrinis tūrinis energijos tankis) ρ_ν , kurio dimensija yra $[J/cm^3Hz]$:

$$W_{21}^{pr} = B_{21}\rho_\nu, \quad (1.2)$$

Čia B_{21} – priverstinio spinduliavimo Einšteino koeficientas.

Sugerties metu elektronas, esantis žemesnėje energetinėje būsenoje, veikiamas elektromagnetinio lauko, pereina į aukštesnę lygmenį. Kad procesas įvyktų, išorinio lauko energija turi būti lygi arba didesnė, negu energijų skirtumas tarp elektrono orbitų, tarp kurių vyksta šuolis. Proceso metu yra sugeriamas išorinis fotonas, o sugerties tikimybė per laiko vienetą proporcinga:

$$W_{21}^{pr} = B_{12}\rho_\nu, \quad (1.3)$$

Čia B_{12} – priverstinės sugerties Einšteino koeficientas.

Be priverstinės sugerties ir spinduliavimo, yra ir savaiminė spinduliuotė. Tokio proceso metu sužadintoje būsenoje esantis atomas savaimė išspinduliuoja fotoną, kurio kvanto energija lygi energijų skirtumui tarp aukštesnės ir žemesnės elektrono orbitų. Atsiradęs fotonas nėra apibrėžtas, jo fazė, poliarizacija, kryptis nepriklauso nuo išorinio elektromagnetinio lauko. Savaiminis spinduliavimas yra nekoherentinis išorinio elektromagnetinio lauko atžvilgiu ir atlieka savaiminį triukšmų vaidmenį, kuris yra pradinė lazerio generuojamos spinduliuotės užuomazga. Taip pat, spontaninis spinduliavimas išlaisvina viršutinį energijos lygmenį, padėdamas atomui grįžti į

stablesnį energijos lygmenį. Tokia metastabili būsena savaime išnyksta tam tikru vidutiniu greičiu. Proceso tikimybė, jog savaiminė spinduliuotė įvyks, proporcinga laikui. Per laiką dt ši tikimybė lygi:

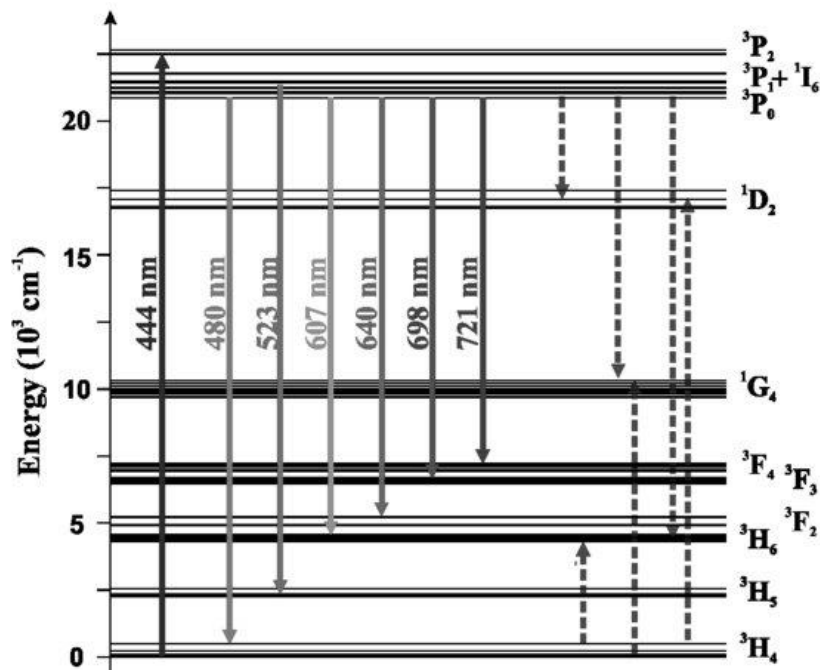
$$dw^{sav} = A_{21}dt, \quad (1.4)$$

Kur A_{21} -spontatinio spinduliavimo Einšteino koeficientas.

Postuluojama, jog savaiminio spinduliavimo per laiko vienetą tikimybė, tenkanti vienai sužadintai energijos E_2 dalelei, yra pastovi ir lygi spontaninio spinduliavimo Einšteino koeficientui:

$$W_{21}^{sav} = A_{21}, \quad (1.5)$$

Savaiminė spinduliuotė aprašo tik šuolius iš viršutinio lygmens į apatinį. Savaiminiai šuoliai iš apatinių energijos lygmenų į viršutinius nevyksta. Vykstant savaiminiams spinduliniais šuoliams sužadintų atomų skaičius laikui bėgant mažėja.



2 pav. Pr:YLF energijos lygmenų diagrama[10].

Kad prasidėtų lazerinė generacija, reikalingos tokios sąlygos, kurių metu elektronų, esančių aukštesnėje energijos lygmenyje, būtų daugiau, negu pagrindinėje būsenoje. Tai vadinama užpildos apgrąža. Realiose medžiagose lazerinius procesus apima labai daug energijos lygmenų. Ličio itrio

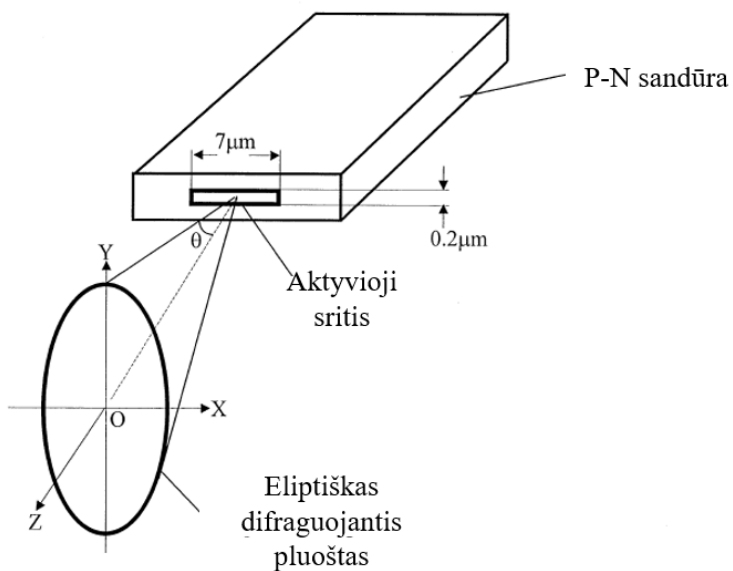
fluoridas legiruotas prazeodimio jonais pasižymi sudėtinga energetine sistema (2 pav.). Priklausomai nuo norimo generuoti bangos ilgio, energetinę struktūrą galima supaprastinti iki trijų ar keturių lygmenų sistemos. Pati intensyviausia Pr:YLF emisijos juosta yra ties 640 nm [6], o tai atitinka trijų lygmenų sistemą. Kad susidarytų užpildos apgrąža, yra reikalingas optinis kaupinimas ties 444 nm ilgio šviesa. Priklausomai nuo nuostolių rezonatoriuje, galima generuoti 480, 523, 607, 640, 698, 721 nm bangos ilgių spinduliuotę regimajame diapazone (2 pav.).

2. Diodinis lazeris

Lazerinis diodas - tai lazeris, kurio aktyvioji medžiaga yra sudaryta iš puslaidininkinių medžiagų, o valdymas vyksta injekcinės srovės pagalba. Pirmą kartą lazerinio diodo veikimas buvo pademonstruotas 1962 metais, tačiau dėl didelės slenkstinės srovės ir negalėjimo naudotis prietaisu kambario temperatūroje, nebuvo naudojamas pramonėje [11]. Kiek vėliau, 1970 m išstobulinius gamybinės technologijas, pavyko sukurti diodą, kurio slenkstinė srovė buvo kur kas mažesnė, nei pirmutinių. Vis dėlto, prireikė dar 10-ties metų, kol buvo sukurti patikimi diodai, kurie pirmą kartą buvo pritaikyti spausdintuvuose ir optinių diskų įrašymams, nuskaitymams. Toliau sekė prietaisų panaudojimas telekomunikacijos srityje, nulėmęs informacijos perdavimo evoliuciją [12]. Šiuo metu lazeriniai diodai yra pritaikomi moksliniuose tyrimuose ir įvairiose srityse, tokiose kaip karyba, pramonė [13]. Dažniausiai kietojo kūno lazeriai yra kaupinami diodiniais lazeriais, kurių spinduliuotė nuvedama šviesolaidžių. Taip yra dėl kelių priežasčių:

1. Siauras spinduliuotės spektras, kuris dažniausiai pusės aukštyje (angliškai –Full width at half maximum) yra nedidesnis negu 2 nm vienamodžiams ir 15 nm daugiamodžiams diodiniais lazeriais. Tai lemia, kad tinkamai parinkus spektrinius parametrus kaupinimo spinduliuotė bus geriau sugerama aktyviojoje medžiagoje, negu naudojant plataus spektro blykstines lempas.
2. Kompaktiškumas. Lazeriniai diodai yra mažų matmenų. Įprasto diodinio lazerio lusto dydis yra 300x200x100 μm^3 . Vis dėlto, siekiant prailginti įrenginio eksploatacijos laikotarpį, lazerinio diodo lustas yra patalpinamas į metalinį korpusą, kuris yra kokybiškai užsandarinamas siekiant apsaugoti nuo drėgmės, mechaninių pažeidimų. Įprastai lazerinių diodų korpuso dydis yra mažesnis už degtukų dėžutę.
3. Didelis efektyvumas. Elektros energijos keitimo į spinduliuotę efektyvumas siekia nuo 35% iki 75%. Tai yra didžiausias iš visų lazerių tipų.

4. Galimybė moduluoti lazerinę spinduliuotę. Standartiniai diodai gali būti moduluojami srove iki 50Mhz, o specifiniai ir iki 10Ghz [11].
5. Patikimumas. Lazerio darbo laikas yra nuo 30000 iki 100000 valandų [14].
6. Spinduliuotės bangos ilgio temperatūrinis derinimas. Keičiant diodo temperatūrą, keičiasi ir spinduliuotės bangos ilgis. Įprastai, pašildžius/atšaldžius diodą 1°C, spektras pasislenka 0,3 nm į aukštesnio, arba mažesnio dažnio sritį, priklausomai nuo diodo konstrukcijos ypatumų.



3 pav. Lazerinio diodo schematiška struktūra [15].

Lazerinį diodą sudaro p-n sandūra, kuriame tiesioginei srovei praėjus pro jos sandūrą, elektronai ir skylės, injektuoti į aktyvią sritį, atitinkamai iš n ir p sričių, renkombinuoja ir išspinduliuoja šviesą (3 pav.). Priklausomai nuo aktyvios srities tiesioginio šuolio puslaidininkio draudžiamosios energijos pločio, galima keisti išvadinės spinduliuotės bangos ilgį:

$$\lambda \sim \frac{hc}{E_{dr}} \quad (2.1)$$

Kur h – Planko konstanta, c – šviesos greitis, E_{dr} – aktyvios srities tiesioginio šuolio puslaidininkio draudžiamosios energijos tarpas.

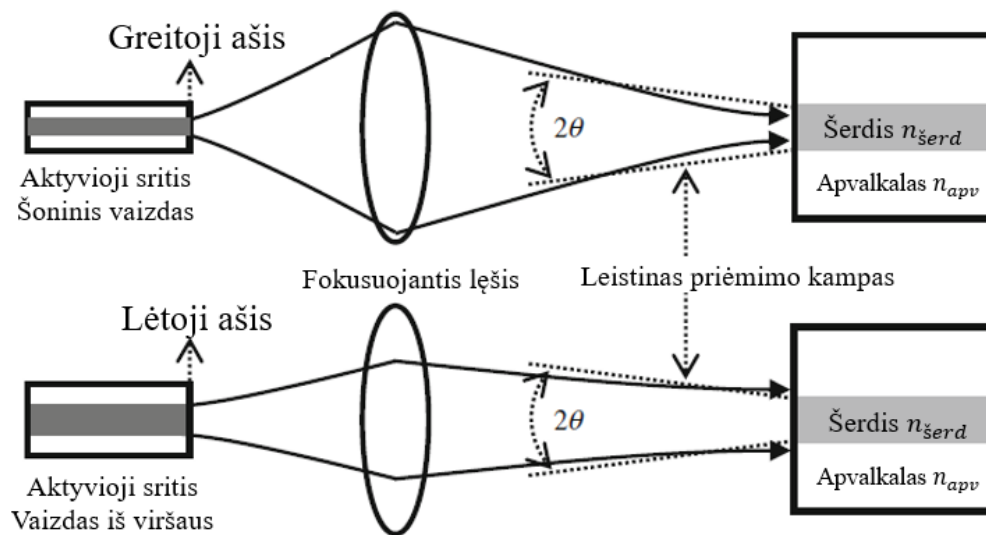
Dėl savo konstrukcijos ypatumų lazerinio diodo pluoštas nėra simetris. Dėl skirtingo aktyviojo sluoksnio aukščio ir pločio, lazerinis pluoštas, išeinantis iš emiterio, yra eliptinis. Skirtingos pluošto ašys apibūdinamos skirtingais M^2 , skėsties, sąsmaukos parametrais. Vienai ašiai, vadinamai greitąja, pluošto skėstis gali siekti 30-45°, spindulys sąsmaukoje 0,5-0,7 μm. Lėtos

skėsties ašiai skėstis yra kur kas mažesnė, dažniausiai siekia 5-8°, o spindulys sąsmaukoje 50-150 μm [11]. Dėl pluošto parametrų skirtingomis kryptimis yra sudėtinga suformuoti pluoštą į simetrinę dėmę, kurios reilio ilgai skirtingoms ašims būtų vienodi. Lazerinių diodų pluoštai turi astigmatizmą, dėl to skirtingoms ašims sąsmaukos padėtis yra nevienoda. Atkreipiant dėmesį apie poliarizaciją, vienamodžiai diodai yra poliarizuoti, santykiu nuo 50:1 iki 100:1, o daugiamodžiai apie 30:1. Poliarizacijos kryptis yra lygiagreti lėtosios ašies atžvilgiu [16].

Populiariausių bangos ilgių (dažniausiai 808 nm skirtas Nd:YAG lazerio kaupinimui, 940 nm – Yb:YAG kaupinimui) lazerinių diodų, skirtų kaupinimui, pasiūla yra įvairi. Tokių lazerių išvadinė galia yra nuo kelių mW iki šimtų vatų, galima rinktis tarp siauro (iki 2 nm), ar plataus spektro pločio (iki 15 nm) puslaidininkių lazerių. Mažos galios lazerinių diodų pluoštai gali būti artimi gausinio intensyvumo skirstinio pluoštui ($M^2=1$), tuo tarpu didelės galios diodinių lazerių pluoštų intensyvumo skirstinys nėra gausinis, o pluošto kokybė yra pakankamai prasta ir gali siekti $M^2>20$ vertes.

3. Lazerinio pluošto formavimas

3.1. Spinduliuotės perdavimas šviesolaidžiu



4 pav. Lazerinio diodo pluošto įvedimo į šviesolaidį principas [16].

Lazerinis pluoštas, išeinantis iš puslaidininkio lazerinio diodo, dažniausiai yra sufokusuojamas sferinių ar cilindrinų lęšių pagalba į šviesolaidį (4 pav.). Spinduliuotei sklindant šviesolaidžiu ji yra depoliarizuojama. Įprastai pro šviesolaidį prasklidusios lazerio spinduliuotės galia kiek sumažėja, taip atsitinka dėl šviesos patiriamų nuostolių šviesolaidžio medžiagoje, tam

tikrų priemaišų būvimo, visiškojo vidaus atspindžio nebuvimo ar nevisos lazerinės spinduliuotės įvedimo pro šviesolaidžio galą. Diodinio lazerio spinduliuotės įvedimo į šviesolaidį privalumas yra tas, jog spinduliuotės, praėjusios pro šviesolaidį, pluoštas būna apskritiminis, intensyvumo pasiskirstymas homogeniškas, kas yra labai svarbu kietojo kūno lazerių išilginio kaupinimo atveju. Norint maksimaliai efektyviai įvesti puslaidininkio lazerio pluoštą į šviesolaidį, svarbu, jog pluošto skaitinė apertūra (angliškai – Numerical aperture), būtų mažesnė už šviesolaidžio priimamą apertūrą. Neužtikrinus tokių sąlygų, šviesolaidžiu sklindantis pluoštas gali nepatirti visiško vidaus atspindžio nuo šerdies šoninio paviršiaus, ir išeiti iš šviesolaidžio. Sufokusuoto lazerio pluošto diametras turi būti lygus arba mažesnis už šerdies diametrą. Gradientinių šviesolaidžių skaitinė apertūra priklauso nuo šerdies, apvaskalo lūžio rodiklio, o apskaičiuojama [17]

$$NA = \sin(\alpha_m) = \sqrt{n_{\text{šerd}}^2 - n_{\text{apvask}}^2} \quad (3.1.1)$$

Kur $n_{\text{šerd}}$ – šviesolaidžio šerdies lūžio rodiklis, n_{apvask} – šviesolaidžio apvaskalo lūžio rodiklis, α_m – kritinis kampas.

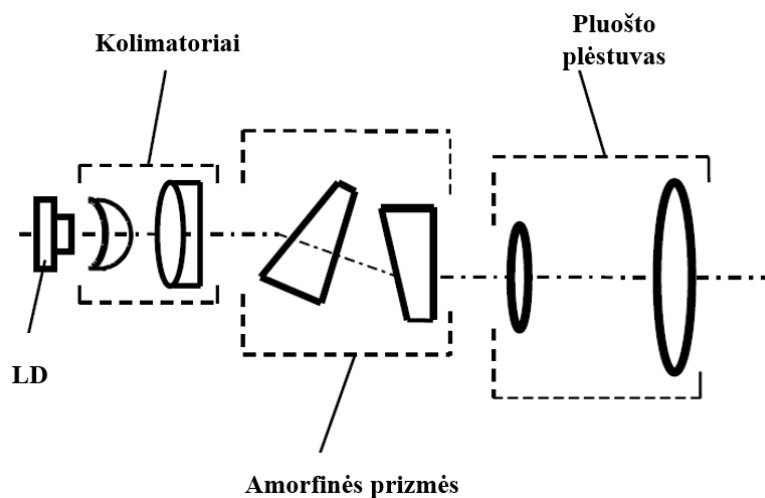
Įprastai, vienmodžių šviesolaidžių šerdies diametras yra 8-10,5 μm , o daugiamodžių – 50-62,5 μm . Norint, kad įvedimas būtų optimalus, lazerio pluošto $NA_{\text{laz}} < NA_{\text{šviesol}}$. Gauso pluošto TEM₀₀ modai skaitinė apertūra apskaičiuojama

$$NA \approx \frac{\lambda_0}{\pi \omega_0} \quad (3.1.2)$$

Kur λ_0 – spinduliuotės bangos ilgis vakuume, $2\omega_0$ – pluošto demės diametras sąsmaukoje $1/e^2$ aukštyje.

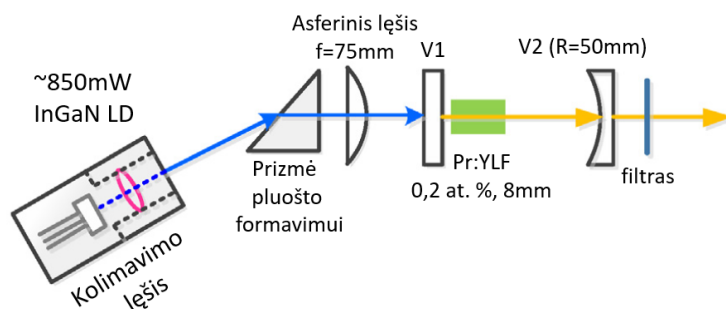
Taigi, žinant šviesolaidžio skaitinę apertūrą, šerdies diametrą, galima sužinoti, koku maksimaliu kampu galimas šviesos priėmimas. Įvedamai spinduliuotei tinkamai parinkus lęšį ar objektyvą, galima įvesti daugiau negu 80% spinduliuotes [18].

3.2. Lazerinio pluošto formavimo sistema



5 pav. Lazerinio diodo pluošto formavimo principas: pluošto skirtingos ašys yra kolimuojamos, amorfinių prizmių pagalba pluoštas suapvalinamas, o vėliau išplečiamas, kad pasireikštų mažesnė skėstis [19].

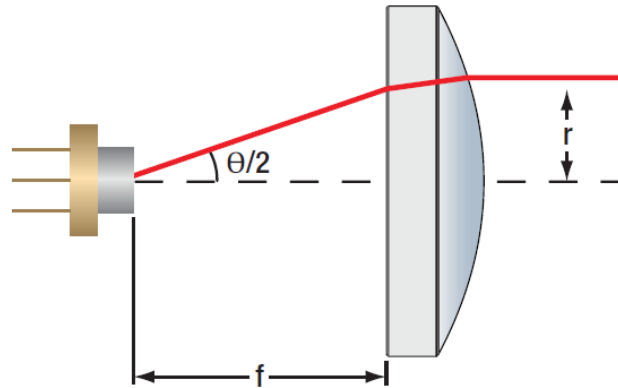
Tuo atveju, kai lazerinio diodo pluošto kokybė, poliarizacijos kryptis ir kontrastas yra svarbūs, šviesolaidžių naudojimas yra netinkamas. Tuomet yra naudojamos sudėtingos optinės sistemos: asferiniai, cilindriniai lęšiai, prizmės, amorfinių prizmių poros (5 pav.). Pluoštas, išeinantis iš puslaidininkio diodo, kolimuojamas abejomis ašimis, o skirtingų ašių pluošto matmenys yra sulyginami, kad būtų simetriniai (6 pav.).



6 pav. Lazerinio diodo pluošto formavimo sistema. Pluoštas yra sukolimuojamas asferiniu lęšiu, o eliptiškumas sumažinamas naudojant prizmę [20].

Norint kokybiškai sukolimuoti pluoštą, atsižvelgiama į komą, astigmatizmą, sferines aberacijas. Siekiama, kad bangos fronto kreivumo spindulys būtų kuo artimesnis plokščiai bangai, o ir spinduliuotė, praėjusi pro optinę sistemą, patirtų kaip galima mažiau nuostolių. Kai diodinio lazerio pluošto skėstis abejoms ašims yra artima, galima naudoti asferinį lęšį, kuris sukolimuoja

abi ašis, tuo pačiu neįnešdamas sferinės aberacijos į sistemą. Dažniausiai naudojam 1-20 mm židinio nuotolio asferiniai lęšiai.

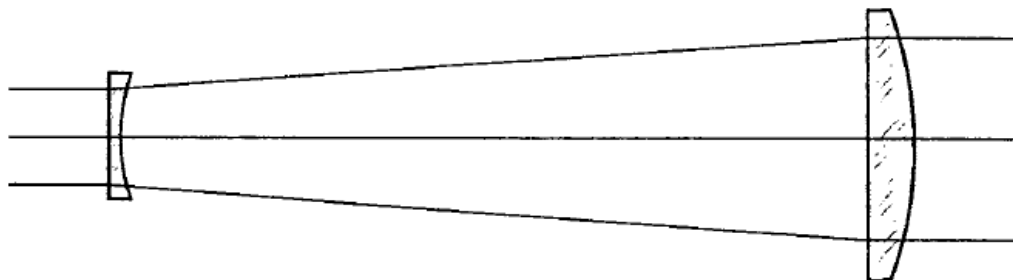


7 pav. Lazerinio diodo pluošto kolimavimo sistema naudojant cilindrinis, asferinius, sferinius lęšius (f - optinio elemento židinio nuotolis, r - pluošto radiusas ant optinio elemento, θ - pluošto skėsties kampas) [21].

Tuo atveju, kai skėstis skirtingoms ašims smarkiai skiriasi, pluošto kolimavimui naudojami išgaubti cilindriniai lęšiai. Siekiant surinkti maksimalų kiekį spinduliuotės, pirmiausiai yra kolimuojama greitoji ašis. Siekiant turėti kuo mažesnes aberacijas, lęšiai statomi plokščiu paviršiumi į lazerinį diodą, atstumu, lygiu židinio nuotoliui (7 pav.). Cilindrinių lęšių židinio nuotoliai parenkami pagal formulę:

$$f = \frac{r}{\tan\left(\frac{\theta}{2}\right)} \quad (3.2.1)$$

Kur f - lęšio židinio nuotolis, r – pluošto diametras už lęšio, θ – skėsties kampas.



8 pav. Galilėjo pluošto plėstuvo pavyzdys [22].

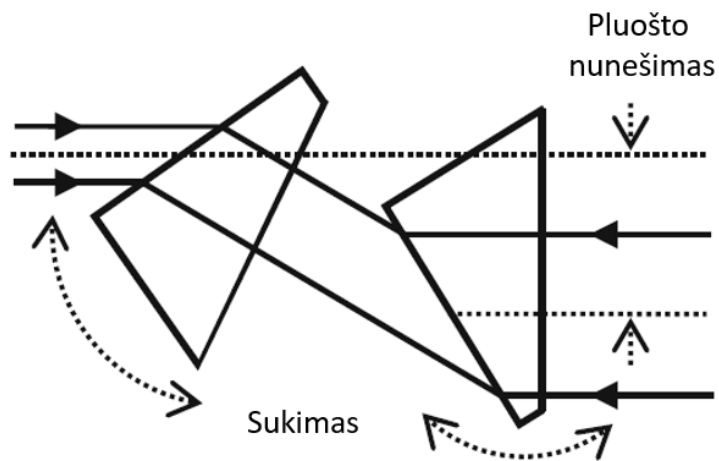
Cilindrinių lęšių pora yra vienas iš populiariausių būdų pluoštui išplėsti vienoje ašyje (8 pav.). Dažniausiai naudojamas Galilėjo tipo pluošto plėstuvas, kurį sudaro įgaubti ir išgaubti lęšiai.

Priklausomai, ar pluoštas yra simetrinis ar ne, galima išplėsti pluošto vieną arba dvi ašis. Spinduliuotė, praėjusi pro įgaubtą lęšį, diverguoja, o vėliau yra sukolimuojama išgaubto lęšio pagalba. Plėstuvo lęšiai yra parenkami pagal norimą didinimą

$$Didinimas = -\frac{f_1}{f_2} \quad (3.2.2)$$

Kur f_1, f_2 - pirmo ir antro lęšio židinio nuotolis.

Dėl mažesnių sferinių aberacijų, pluoštas krinta statmenai išlinkusiam optiniam paviršiui, o optiniai elementai išstatomi atstumu lygiu jų židinio nuotolio sumai. Sferinių ir cilindrinų lęšių plėstuvai nėra universalūs.



9 pav. Amorfinių prizmių poros panaudojimas išplečiant pluoštą vienoje ašyje [16].

Amorfinės prizmės yra naudojamos modifikuojant pluošto diametrą vienoje ašyje (9 pav.). Tai prizmės, kurios nėra simetrinės, vienas kampas būna nupjautas statmenai sienai. Lazero pluoštas krinta į prizmės paviršių, yra išplečiamas, arba suspaudžiamas, o antros prizmės pagalba kompensuojama skėstis, judėjimo kryptis. Įprastai, pluoštas gali būti išplėstas ar suspaustas 2-6 kartus sukant prizmę. Suformuotas pluoštas turi būti apkarpytas naudojant apskritiminę apertūrą. Dėl to galima netekti sąlyginai nedidelę dalį galios, tačiau intensyvumo pasiskirstymas vis vien būtų šiek tiek eliptiškas. Tokių prizmių panaudojimas galimas skirtingiems diodiniams lazeriams, kurių bangos ilgis, pluošto diametras yra skirtingas. Užtenka pakeisti prizmių pozicijas pluošto atžvilgiu ir nereikia pirkti naujos optikos. Lyginant su pluoštų plėstuvais, kuriuose naudojami lęšiai, amorfinių prizmių poros yra kompaktiškesnės, nereikalauja centravimo lazerinio pluošto atžvilgiu.

4. Kristalinio būvio Pr:YLF medžiagos aptarimas

Medžiagos legiruotos prazeodimiu (Pr^{3+}) yra labai įdomios trumpų bangos ilgių kieto kūno lazerių regimajame spektre panaudojimui (2 pav.)[23]. Dėl panašių atomo matmenų iterbis, tulinis, holmis, neodimis, prazeodimis naudojami kaip retieji žemės elementai legiruojant itrio ličio fluorida gardele (YLiF_4 , trumpinys - YLF). Legiruojant prazeodimiu, energetinių lygmenų schema parodo, jog galimos kelios fluorescencijos ir lazerinio šuolio linijos mėlynajame (apie 485 nm, ${}^3P_0 \rightarrow {}^3H_4$), žaliajame (apie 525 nm, ${}^3P_0 \rightarrow {}^3H_5$), oranžiniame (apie 605 nm, ${}^3P_0 \rightarrow {}^3H_6$), raudonajame (apie 640 nm, ${}^3P_0 \rightarrow {}^3F_2$) ir giliame raudonajame (apie 695 nm, 720 nm, ${}^3P_0 \rightarrow {}^3F_3 + {}^3F_4$) spektro diapazonuose. Žalio, oranžinio, raudono ir giliojo raudono spektro srityse pasireiškia keturių lygmenų sistema. Metastabilaus energijos lygmens gyvavimo trukmė (1 lent.) yra pakankamai ilga, dėl to naudojant kokybišką kristalą yra tikimasi mažų generacijos slenksčių.

YLF yra dvejojpo lūžio rodiklio, dėl to yra eliminuojami depoliarizacijos nuostoliai. Stiprinimas (skirtumas tarp stiprinimų gali būti 20 kartų) ir spinduliuojamas bangos ilgis smarkiai priklauso nuo poliarizacijos: pavyzdžiui aktyvioji medžiaga spinduliuoja 640 nm, kai σ poliarizacija, o 638 nm, kai π poliarizacija. Rezonatoriuje esančios šviesos poliarizacijos kryptis turi būti kontroliuojama pasitelkiant įvairius metodus - dedant kristalą briustelio kampų, naudojant poliarizatorius, arba termiškai reguliuojant kristalo temperatūrą. Nekontrliuojant stiprinamos spinduliuotės poliarizacijos krypties, lazerinė spinduliuotė gali būti nestabili.

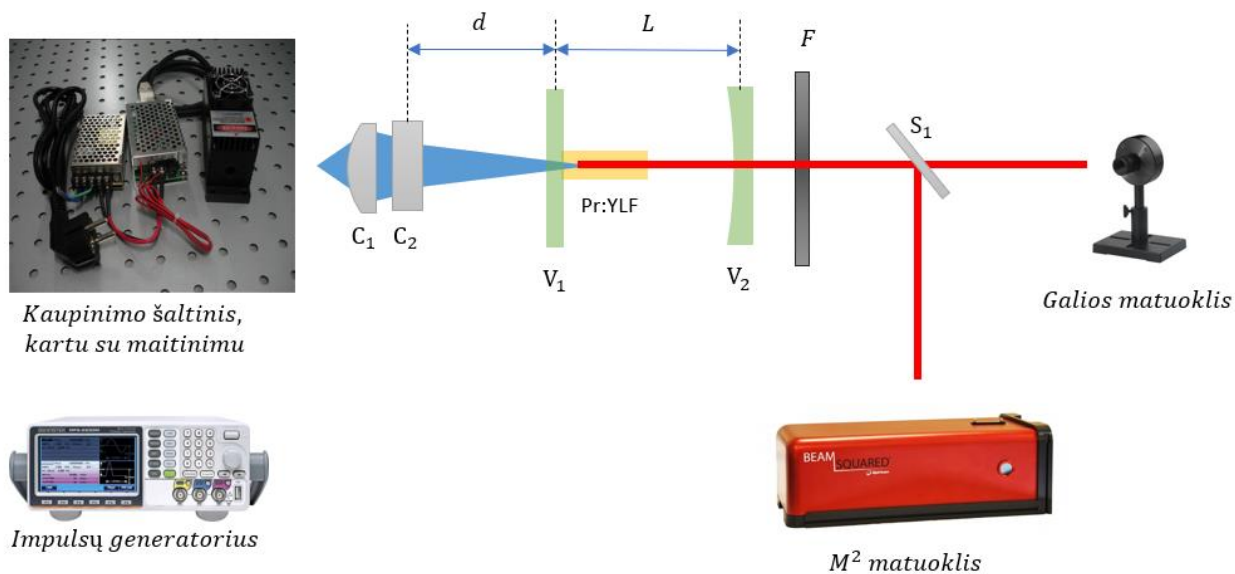
Termo-optinis YLF medžiagos koeficientas dn/dT yra neigiamas (1 lent.), todėl dėl spinduliuotės sukiamų šiluminių efektų, praėjusi aktyviają terpę šviesa, bus išsklaidoma. Tokiu būdu susidarys sklaidomasis termo lęšis, kuris gali būti kompensuotas aktyviosios terpės paviršius darant išlenktais į išorę, arba naudojant įgaubtus rezonatoriaus veidrodžius. Neigiamo termo-lęšio susidarymas leidžia pasiekti aukštesnės kokybės lazerinį pluoštą, lyginant su Fabri ir Pero rezonatoriumi [24]. Dėl YLF kristalo skaidrumo UV srityje galima kaupinimui naudoti ksenono išlydžio lempą, ar kitus UV šaltinius.

1 lent. Pr: YLF kristalo optiniai, termo-mechaniniai parametrai.

Didžiausios sugerties bangos ilgis, nm	444,2
Sugerties skerspjūvis ties didžiausia sugertimi, cm ²	3x10 ⁻¹⁹
Sugerties skerspjūvis ties didžiausia sugertimi, nm	~5
Spinduliuojami bangos ilgiai, nm	485, 525, 607, 640, 720
³ P ₀ lygmens gyvavimo trukmė, μs	50
Spinduliavimo skerspjūvis (640 nm), cm ²	2,5x10 ⁻²⁰
Lūžio rodiklis ties 1064 nm	n ₀ =1,448, n _e =1,47
Kristalo struktūra	Tetragoninė
Tankis, g/cm ³	3,95
Kietumas (pagal Moso skale)	5
Šiluminis laidumas, W/(m*K)	6
$\frac{dn}{dT}, K^{-1}$	-5,2x10 ⁻⁶ (//c), -7,6*10 ⁻⁶ (//a)
Terminis plėtimosi koeficientas, K ⁻¹	~16x10 ⁻⁶
Įprastas legiravimo kiekis, %	<1

5. Tyrimu metodika

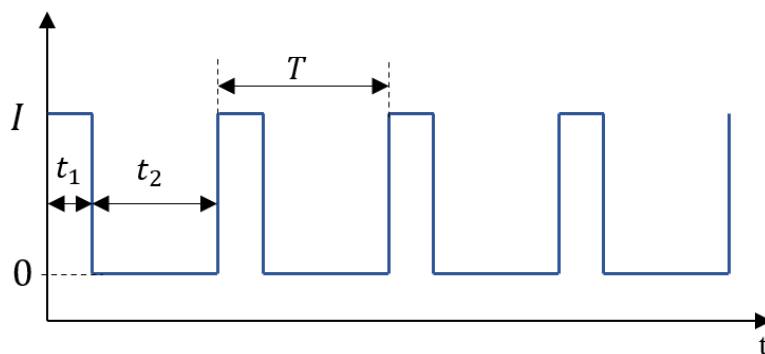
5.1. Eksperimento schema



10 pav. Principinė eksperimento schema (C_1 , C_2 - +25mm židinio nuotolio cilindriniai lęšiai, d - atstumas nuo fokusuojančių lęšių iki rezonatoriaus įvadinio veidrodžio V_1 , L – rezonatoriaus ilgis nuo V_1 iki V_2 , F - spalvotas filtras, S_1 -neskaidrintas langelis)

Pagrindinė eksperimento schema pavaizduota 10 paveiksle. Ji susideda iš impulsų generatoriaus, lazerinio diodo, maitinimo šaltinio, cilindrinė lęšių poros C_1 ir C_2 , įvadinio veidrodžio V_1 , išvadinio veidrodžio V_2 , filtro OG-12, Pr:YLF kristalo, išvadinio veidrodžio, stikliuko, galios, M^2 bei matuoklio. Detalios šių elementų specifikacijos pateiktos 2 lentelėje.

Lazerinis diodas yra aušinamas ventiliatoriumi, impulsu generatoriumi keičiamas diodo darbinis ciklas, taip keičiasi kaupinimo spinduliuotės galia ir spektras. Į diodą paduodamos srovės laikinė forma pavaizduota 11 pav.. Laiko atkarpą t_1 srovė teka ir laiko tarpą t_2 srovė neteka(11 pav).

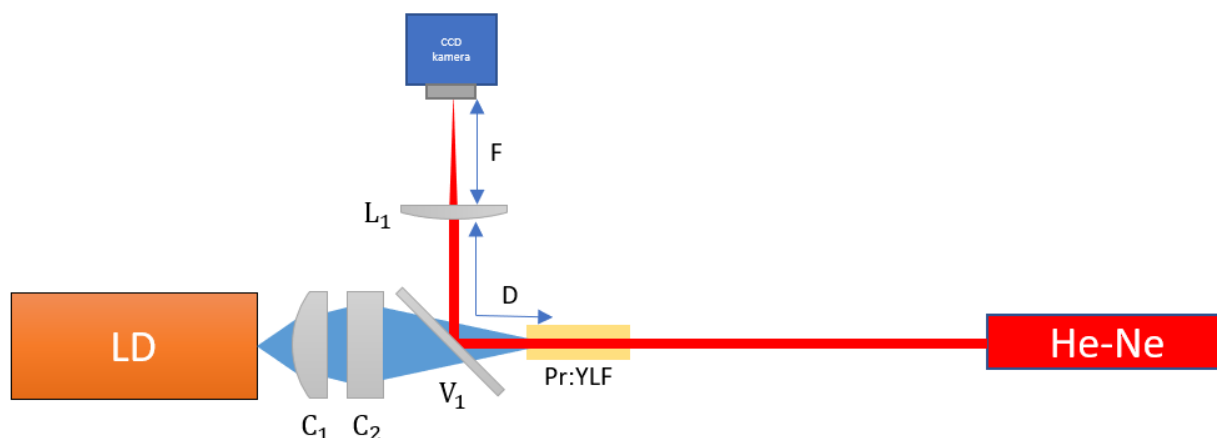


11 pav. Impulsų generatoriumi periodiškai keičiama diodu tekanti srovė (t_1 – laiko tarpas, kai srovė teka diodu, t_2 – laiko tarpas, kai diodu srovė neteka, T – periodas)

2 lent. Optinių elementų ir prietaisų, pateiktų schemoje 10 pav., charakteristikos.

Elementas	Charakteristikos
Impulsų generatorius	Modelis: GW Instek MFG-2230M, impulso priekinio/užpakalinio fronto trukmė: 15 ns
Kaupinimo šaltinis	Modelis: LSR445SD-2, 445±5 nm, pluošto matmenys ties diodo korpusu 4x2 mm
Cilindriniai lęšiai	Židinio nuotolis +25 mm, 5x5x4 mm, be dangų
Įvadinis veidrodis	Abu paviršiai plokšti. Veidrodžio paviršius S1 padengtas AR@445 nm danga Veidrodžio paviršius S2 padengtas HR@480-760 nm, R>99,7% ir HT@445 nm, R<1% danga
Kristalas	2x2x6 mm 0.6 at. % Pr:YLF kristalas, a cut. S1 ir S2 paviršiai padengti AR@ 440-760 nm, R< 0,3%
Išvadinis veidrodis	S1 paviršius plokščias, S2 įgaubtas (naudotų veidrodžių kreivumo radiusas – 25 mm, -50 mm, -75 mm, -100 mm, -150 mm) Veidrodžio paviršius S1 padengtas AR@640 nm danga Veidrodžio paviršius S2 padengtas PR@640 nm, R=98% danga
Filtras	OC-12, praleidžia spinduliuotę nuo 560 nm
Galios matuoklis	Modelis: Ophir 3AP/N7Z02621, Matuoja galią ribuose 10 μW-3W
M ₂ matuoklis	Modelis: Spiricon BSQ-SP300, fokusuoja pluoštą +400 mm lęšiu, eigos skirtumas 364 – 1100 mm, sensoriaus matmenys 7,1 x 5,3 mm.

5.2. Termo lęšio matavimo schema



12 pav. Principinė termolęšio matavimo schema. (C_1, C_2 - lazerinio diodo fokusavimas cilindriniai lęšiai, V_1 - 45 laipsnių kampu išstatytas veidrodis, L_1 - +100 mm židinio nuotolio lęšis, D - atstumas nuo kristale fokusuojamo diodo pluošto sąsmaukos iki lęšio, F - atstumas nuo lęšio iki stebimo fokusavimo židinio)

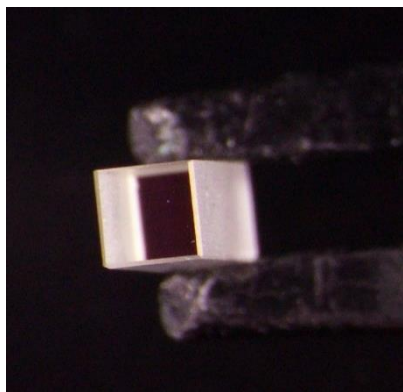
Principinė termo lęšio matavimo schema pavaizduota 12 pav. Kaupinimo spinduliuotė fokusuojama į kristalo centrą. Tarp lazerinio diodo ir kristalo statomas veidrodis, kuris yra pasuktas 45 laipsnių kampu. He-Ne lazerio pluoštas praeina pro kristalą. Dalis spinduliuotės atsispindi nuo V_1 veidrodžio, praeina pro 100 mm židinio nuotolio L_1 lęšį ir yra fokusuojama ant CCD kameros matricos. Keičiantis termolęšio vertei kristale, kinta atstumas F . Išilgai optinės ašies stumdant CCD kamerą, registruojamas He-Ne lazerio dėmės dydis, taip nustatoma vieta, kur dėmės dydis mažiausias ir įvertinamas atstumas F . Termo lęšio židinio nuotolį randame pasinaudoję tokia išraiška:

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{D}{f_1 f_2}, \quad f_2 = \frac{f_1 - D}{\frac{f_1}{F} - 1} \quad (5.2.1)$$

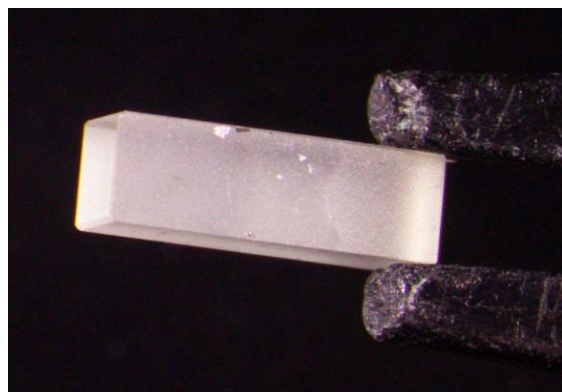
Kur f_1 - L_1 lęšio židinio nuotolis, f_2 - termo lęšio židinio nuotolis, F - efektyvus židinio nuotolis, D - optinis kelias nuo kristale esančio termo lęšio iki L_1 sferinio lęšio.

6. Tyrimo rezultatai

6.1. 0,6 at. % Pr:YLF kristalo tyrimas



a)



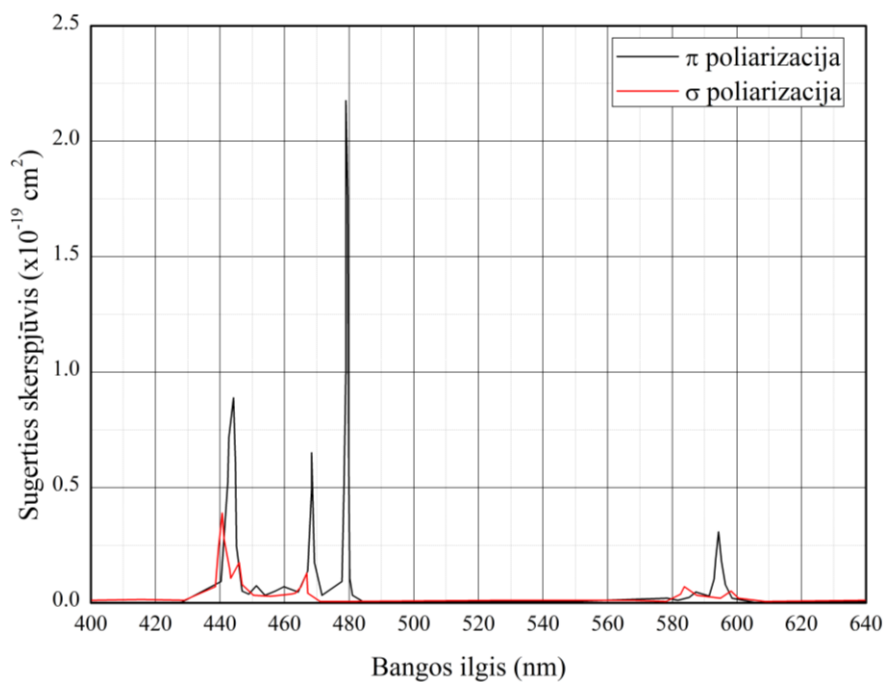
b)

13 pav. 2x2x6 mm Pr:YLF kristalo vaizdas, žiūrint iš priekio (a) ir statmenai (b).

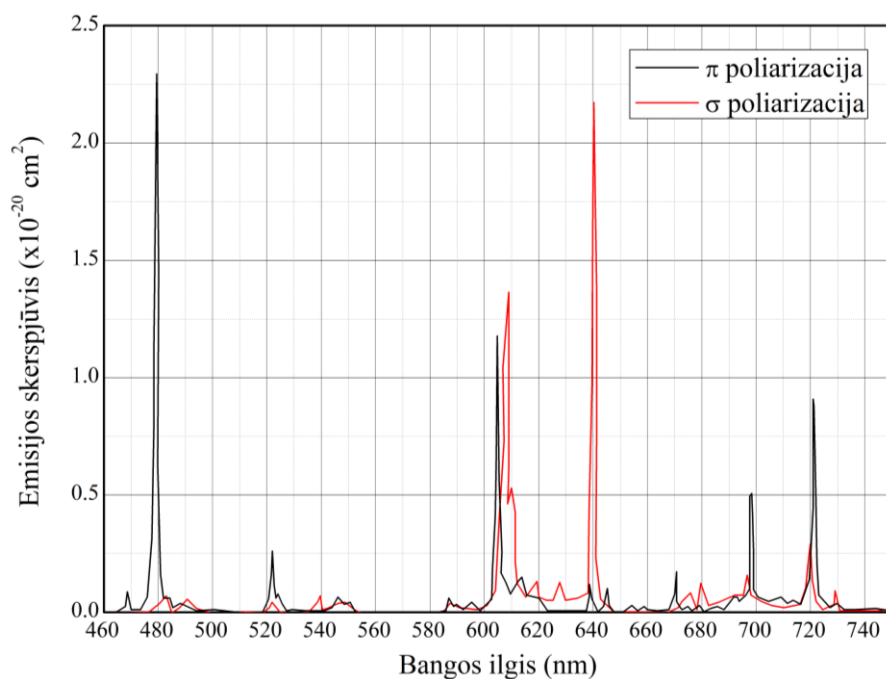
Šita tyrimų serija buvo skirta Pr:YLF kristalinės terpės tyrimui. Darbe ištirtas nominalaus 0,6 at. % legiravimo Pr:YLF kristalas. Naudotas kristalas yra stačiakampio formos (2x2x6 mm), šoninės sienos yra matinės, o darbiniai paviršiai dengti skaidrinančia danga, AR@ 440-760 nm, $R < 0,3\%$ (13 pav.). Dangos uždėtos siekiant sumažinti kaupinimo ir generuojamos spinduliuotės patiriamus nuostolius rezonatoriuje, gauti žemą generacijos slenkstį ir maksimalią išvadinės spinduliuotės galią. Gamintojo pateiktos sugerties, emisijos skerspjūvių kreivės pavaizduotos 14 ir 15 paveiksle.

Iš sugerties kreivės galima matyti, jog naudotas kristalas gali sugerti kelių bangos ilgių spinduliuotę, plačiausias sugerties spektras atitinka 444 nm bangos ilgio π poliarizacijos šviesą, šios sugerties linijos plotis pusės aukštyje yra lygus 2,9 nm. Spektriniame taške sugerties skerspjūvis yra lygus $0,887 * 10^{-19} \text{ cm}^2$. Didžiausią sugerties skerspjūvį π poliarizacijai atitinka 479 nm bangos ilgio spektrinė sritis, sugerties skerspjūvis lygus $2,17 * 10^{-19} \text{ cm}^2$, visgi šios linijos sugerties plotis yra kurkas mažesnis (pusės aukštyje = 0,7 nm). Žinoma, jog daugiamodžiai diodiniai lazeriai generuoja pakankamai plačius spektrus, dėl to siekiant užgeneruoti Pr:YLF kristalą naudingiau naudoti 444 nm bangos ilgį generuojantį daugiamodį puslaidininkinį lazerį, tokiu būdu kaupinimo spinduliuotės nuostoliai bus mažiausi. Dėl platesnio sugerties spektro įmanoma nustatyti stabilesnę lazerio veikimo būseną, reikia mažiau atsižvelgti į mechaninių elementų išstatymo netobulumus, o taip pat diodo, kristalo temperatūros nestabilumus. Kaupinimo ir sugerties spektrai gali nesutapti, dėl to sugeriamos kaupinimo lazerinės spinduliuotės gali gali

kisti laike, išvadinės spinduliuotės galia bus nestabili. Taigi, tinkamiausia yra kaupinti 444 nm bangos ilgio lazeriniu diodu, kurio spektro plotis turėtų būti siauresnis negu 3 nm.



14 pav. YLF kristalo su 0,6 at. % Pr priemaišų sugerties kreivė π , σ poliarizacijai.

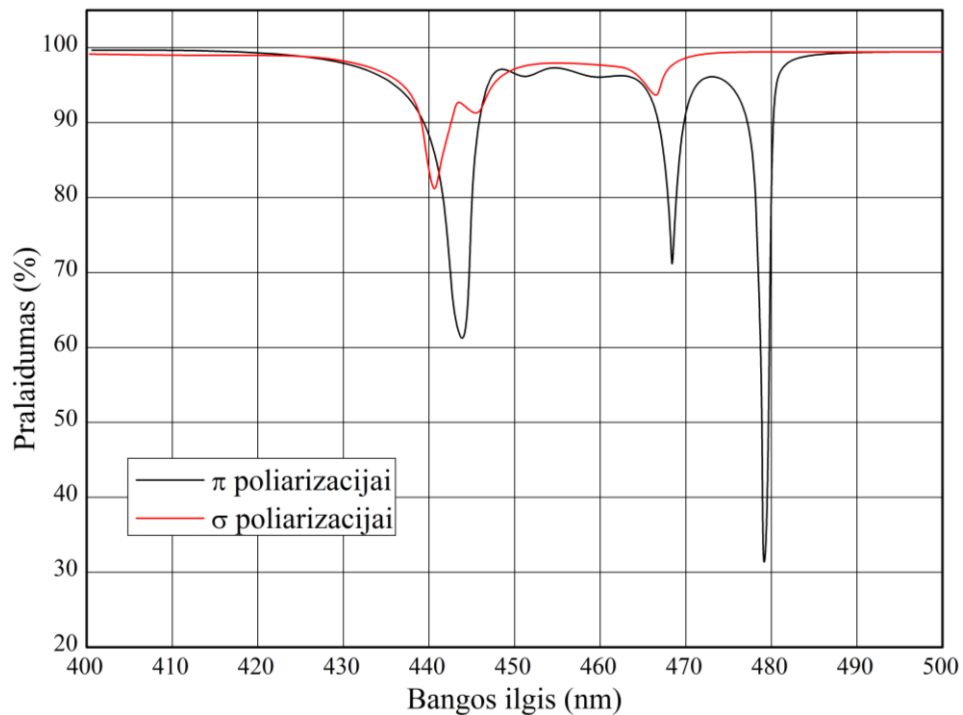


15 pav. YLF kristalo su 0,6 at. % PR priemaišų emisijos kreivė π , σ poliarizacijai .

Kalbant apie emisijos spektrą, galima išskirti aiškias 5 linijas π poliarizacijai, ir 3 linijas σ poliarizacijai, kai emisijos skerspjūvis yra didesnis už $0,25 * 10^{-20} \text{ cm}^2$. Taigi tinkamai išstačius

rezonatorių, galima generuoti 8 skirtingų bangos ilgių lazerinę spinduliuotę. Didžiausia tikimybė, jog generuojama lazerinė spinduliuotė bus ties 479,5 nm bangos ilgiu π poliarizacijai, arba 640 nm bangos ilgiui σ poliarizacijai (atitinkamai emisijos skerspjūvis yra $2,17 * 10^{-20}$ ir $2,29 * 10^{-20} \text{ cm}^2$). Lazerinės spinduliuotės bangos ilgis kurią generuosime priklausys nuo rezonatoriuje esančios spinduliuotės poliarizacijos.

Naudojant Photon RT Essentoptics spektrofotometrą buvo nustatyta 0,6 at. % 6 mm Pr:YLF kristalo pralaidumo kreivė spektro ruože 400-500 nm (16 pav.). Didžiausi nuostoliai π poliarizacijai pasireiškė ties 444,5 nm ir 478,5 nm bangos ilgio spinduliuote. Atitinkamai, pralaidumas buvo 61% ir 31%. Didžiausi nuostoliai atitinka 444 ir 479nm bangos ilgius, o tai atitinka sugerties linijas pateiktas gamintojo. Didžiausi nuostoliai σ poliarizacijai pasireiškė 440 nm bangos ilgio spinduliuote. Pralaidumas buvo 72%. Atsižvelgus į aptartus kristalo sugerties ypatumus, kaip kaupinimo šaltinį nuspręsta naudoti 444-446 nm bangos ilgius gebantį generuoti diodinį lazerį ir atliktas jo tyrimas.



16 pav. 6mm ilgio 0,6 at. % Pr:YLF kristalo pralaidumo kreivė srityje 400-500 nm (σ, π poliarizacijai).

6.2. Diodo lazerio tyrimas



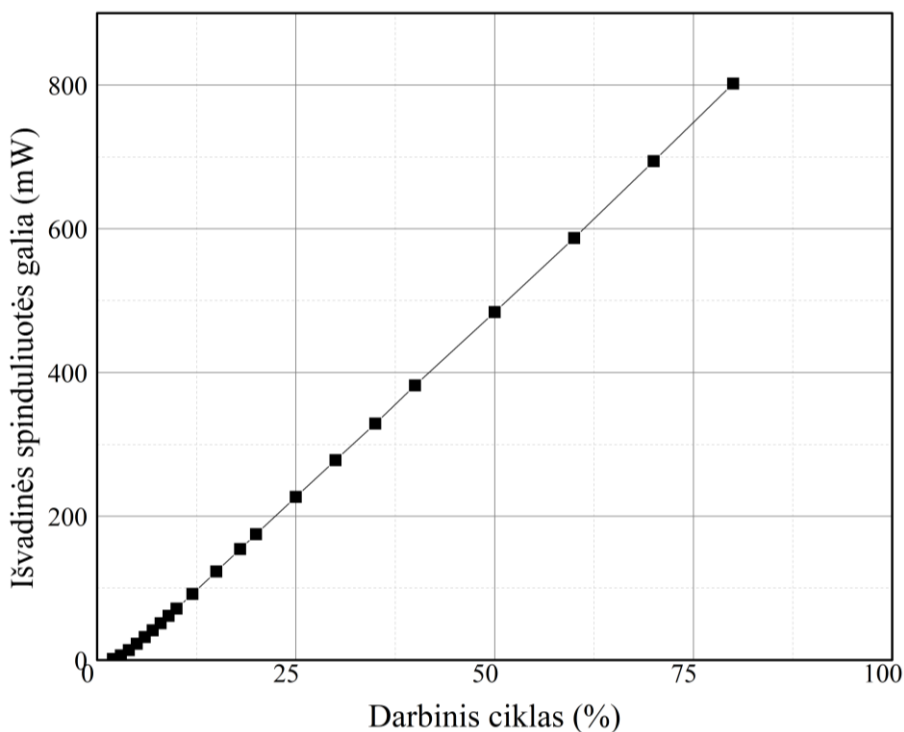
17 pav. Tiriamasis diodinis lazeris (443-446 nm).

Naudingiausias puslaidininkinių lazerių privalumas yra didelis jų efektyvumas. Kietojo kūno lazeriams kaupinti naudojami daugelio išilginių modų puslaidininkiniai lazeriai, kurių spektrų plotis pusės aukštyje (angliškai FWHM - Full width at half maximum) yra 2-5 nm. Siauras spektras, kuris atitinka kietojo kūno lazerio sugerties juostos plotį leidžia efektyviai perduoti kaupinimo lazerio spinduliuotę, dėl to kristale smarkiai sumažinami neigiami šiluminiai efektai.

Šiame darbe buvo ištirtas 17 paveiksle pavaizduotas diodinis lazeris, kurio generuojamos spinduliuotės centrinis bangos ilgis atitinka 443-446 nm, o spektro plotis pusės aukštyje yra 2,7 nm. Lazerinis pluoštas yra asimetrinis, horizontalia ašimi pluoštas fokusuojasi 80 cm nuo korpuso, o vertikalia ašimi 1 m. Aušinamas ventiliatoriumi, lazerinio diodo korpuso viršuje.

Norit žinoti į aktyviają terpę krisiančios kaupinimo spinduliuotės galią, diodinio lazerio šviesa buvo praleidžiama pro du cilindrinis lęšius ir įvadinį rezonatoriaus veidrodį. Išvadinės spinduliuotės galia buvo keičiama impulsų generatoriumi keičiant diodinį lazerį maitinančios elektros srovės darbinį ciklą (angliškai - duty cycle) (18 pav.). Darbinis ciklas apibrėžiamas, kaip santykis, tarp trukmės t_1 , kai į diodinį lazerį paduodama maitinanti srovė ir viso impulso trukmės:

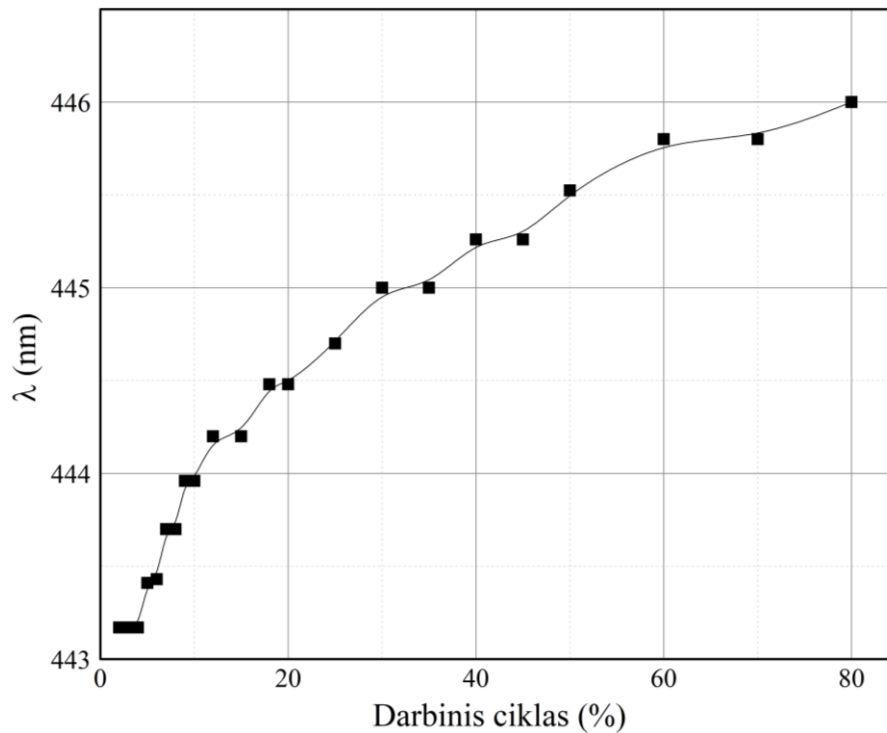
$t_1/(t_1 + t_2) \times 100\% = t_1/T \times 100\%$ (11 pav.). T buvo išlaikoma vienoda, atitiko 1 ms, tai atitinka 1 kHz impulsų pasikartojimo dažnį, o pakeičiamas t_1 , nuo 50 iki 800. Laikant, jog srovė perduodama akimirksniu ir generacija vyksta be liekamųjų reiškinių t_1 trukmė atitinka išvadinės kaupinimo spinduliuotės trukmes. Matoma, jog išvadinės kaupinimo lazerio spinduliuotės galia yra tiesiškai priklausoma nuo darbinio ciklo vertės. Tai yra kur kas daugiau, negu lyginant su 3P_0 lygmens gyvavimo trukme (50 μ s), iš kurios vyksta spindulinis šuolis išspinduliuojant 640 nm fotoną.



18 pav. Diodo išvadinės spinduliuotės charakteristika.

Toliau buvo atlikti diodinio lazerio generuojamos spinduliuotės spektro matavimai, šiam tikslui naudotas Ocean Optics kompanijos HR4000CG-UV-NIR spektrometras. Tyrimų metu pastebėta, jog keičiant impulsų generatoriaus darbinį ciklą, keičiasi išvadinės spinduliuotės centrinis bangos ilgis (19 pav.). Didinant darbinį ciklą nuo 4 % iki 80 %, diodo emisijos smailės spektras slenka nuo 443,2 nm link 446 nm (14 pav.), o spektro plotis pusės aukštyje 2,7 nm. Šis kitimas gali būti paaiškintas galimais diodo temperatūros pokyčiais. Matoma, jog parinkus tinkamą režimą, šis diodinis lazeris gali būti efektyviai panaudotas kaupinti Pr:YLF kristalą, kurio sugerties centras π poliarizacijai yra ties 444-445 nm. Keičiant darbinį ciklą, galima sudaryti sąlygas, kad kaupinimo spinduliuotės emisijos smailė sutaptų su Pr:YLF kristalo sugerties centru. Iš aptartų rezultatų, galima teigti, jog kaupinimo šviesa kristale bus sugerta efektyviausiai, kai pasirenkamas 10-30 %

darbinis ciklas. Dirbant su didesniu diodo darbiniu ciklu, kristų optinis efektyvumas. Vis dėl to, dalis diodo spinduliuotės nebus sugerta kristale, todėl, kad diodo emisijos spektro plotis yra didesnis už kristalo sugerties spektro plotį.

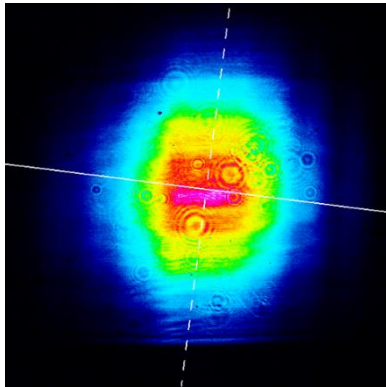


19 pav. Diodo emisijos smailės bangos ilgio priklausomybė nuo diodo darbinio ciklo.

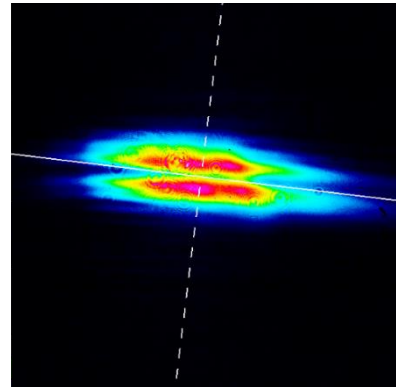
Naudojamo lazerinio diodo pluoštas nėra simetrinis, greitoji ir lėtoji ašis plečiasi skirtingais greičiais, o sąsmaukos padėtyje pluoštas nėra apvalus. Priklausomai nuo atstumo nuo lazerinio diodo, pluošto matmenys kinta neproporcingai. Taigi, tokio pluošto naudojimas eksperimentams yra sudėtingas ir nepalankus. Tolimajame lauke pluoštas yra panašus į brūkšnį (15 pav.). Buvo išmatuotas lazerinio diodo pluošto kitimas erdvėje iškart už korpuso, prieš sąsmauką. Pagal užfiksuotą pluošto diametro kitimą nustatytas pluošto skėsties kampas, kuris horizontalia ašimi yra 1,2 mrad, o vertikalioji ašimi 2,1 mrad. Gana mažas pluošto matmenų kitimas abejoms ašims nustatytas todėl, jog pluoštas, išeinantis iš puslaidininkio emiterio, gamintojo papildomai yra kolimuojamas cilindriniais, arba sferiniais lęšiais.

Naudojant M^2 matuoklį išmatuota lazerinio diodo pluošto kokybė. Nustatyta, jog M^2 horizontalioji ašimi lygus 4,2, o vertikalioji 1,6. Dėl M^2 skirtumo skirtingoms ašims, pluošto fokusavimas į simetrinio dydžio dėmę tampa sudėtingas, nebeužtenka vieno asferinio ar sferinio lęšio. Šiuo atveju, norint turėti sąsmaukos padėtyje simetrinę dėmę reikia naudoti cilindrinį lęšių porą.

Naudojant polirizatorių, galios matuoklį, išmatuota diodo poliarizacija. Nustatyta, kad diodo spinduliuotė yra horizontaliai poliarizuota, kontrastas didesnis už 100.



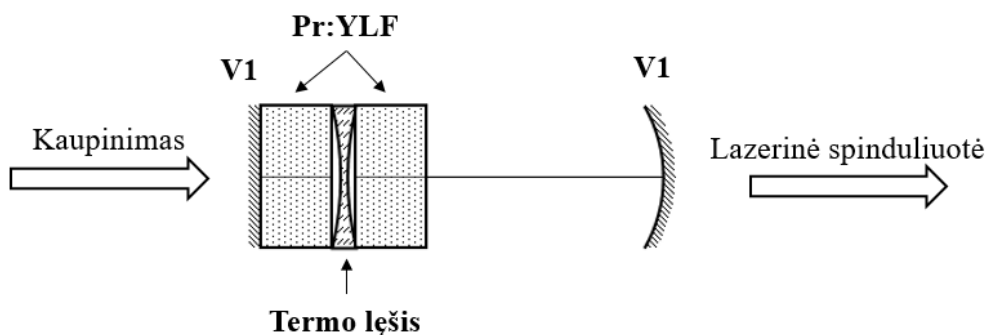
a)



b)

20 pav. Tirtu lazerinio diodo (0,8 W, 445 nm) pluoštas atstumu 3 cm ir 92 cm nuo korpuso. A) pluošto plotis $1/e^2$ aukštyje 2670 x 2220 μm , o b) 3250 x 841 μm .

6.3. Lazero optinio rezonatoriaus modeliavimas



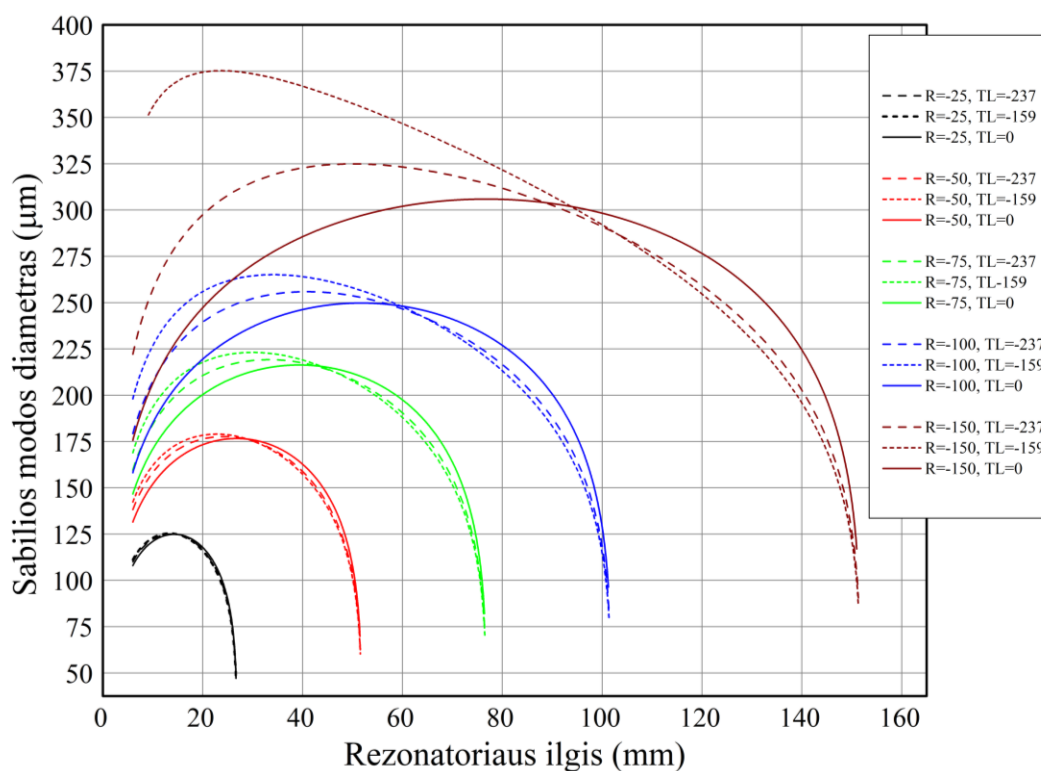
21 pav. Pusiau sferinė rezonatoriaus konfigūracija (atstumai neatitinka mastelio).

Pr:YLF lazerio rezonatoriaus skaičiavimai atlikti naudojant 1,7 versijos „Rezonator“ programinį paketą. Naudojant programą buvo pasirinktas tinkamas rezonatoriaus tipas, elementų išdėstymas, išilginės modos diametras.

Tetragoninės struktūros Pr:YLF kristalo termo-optinis koeficientas yra neigiamas, dėl to pluoštas, praėjęs pro kristalą, yra defokusuojamas. Dėl šios priežasties Fabri ir Pero rezonatorius (su plokščiais veidrodžiais) neužtikrintų grįžtamojo ryšio – lazerinė spinduliuotė nebūtų gaunama. Taigi, buvo pasirinkta naudoti pusiau sferinę rezonatoriaus konfigūraciją: įvadinis veidrodis plokščias, o išvadinis – įgaubtas (21 pav.). Kristalas buvo kaupinamas išilgai, siekiant gauti didesnį efektyvumą. Pasirinkta naudoti penkis skirtingus išvadinius veidrodžius, kurių paviršių kreivumų radiusai lygūs -25, -50, -75, -100 ir -150 mm. Visų išvadinių veidrodžių atspindžio koeficientas 639 nm spinduliuotei buvo vienodas ir lygus 98%. Kristalas yra talpinamas kuo arčiau plokščio veidrodžio paviršiaus, kristalo padėtis eksperimentų metu nebuvo keičiama. Termo lęšis susidaręs kristale prie plokščio veidrodžio apskaičiuojamas pagal formulę:

$$f = \frac{2\kappa A}{\frac{dn}{dT} P_{\text{šiluminė}}}, \quad (6.3.1.)$$

kur κ – šiluminis laidumas, A – lazerinio pluošto plotas, $\frac{dn}{dT}$ – termo-optinis koeficientas, $P_{\text{šiluminė}}$ – sugertos spinduliuotės galia.



22 pav. Aktyviosios terpės pradžioje susidariusios modos diametro kitimas, kai naudojami penki skirtingi išvadiniai veidrodžiai.

Siekiant sužinoti, kokia šiluminė kaupinimo galia susidaro kristale, buvo atliktas tyrimas: išmatuota kaupinimo galia kai spinduliuotė sufokusuojama į 145 μm dėmę. Vėliau, spinduliuotės kelyje pastatomas Pr:YLF kristalas, ir fiksuojama galia už kristalo. Nustatyta, kad nuostoliai kristale yra 75 %. Tai gali būti dėl to, jog dalis kaupinimo spinduliuotės yra sugerama ir virsta šiluma, dalis yra išspinduliuojama fluorescencijos būdu, dalis atsispindi nuo paviršių, arba išsklaidoma kristale dėl tūrinių defektų. Kokia dalis spinduliuotės virsta šiluma, priklauso nuo kristalo. Todėl atliekant skaičiavimus buvo imami du variantai, kai šiluma visiškai neišsiskiria kristale ir kai visa prarasta kaupinimo spinduliuotės galia būna sugerta. Kristalas buvo kaupintas su 227 mW lazerine spinduliuote, o už aktyviosios medžiagos fiksuota 55 mW praėjusi kaupinimo spinduliuotės galia. Taigi, padarius prielaidą, jog pagrindinis nuostolių šaltinis kristale yra sugertis, o dėl to visa nepraeinanti pro kristalą lazerinė kaupinimo spinduliuotė yra sugerama ir virsta šiluma, sugertas šilumos kiekis yra lygus 172 mW. Taip pat pastebėta, jog sukant Pr:YLF kristalą išilgai optinės ašies, pralaidumo vertė drastiškai kinta. Taip yra dėl to, jog kaupinimo spinduliuotė yra labai poliarizuota.

Taip pat yra žinoma, jog termo-optinis koeficientas skirtingomis ašimis yra skirtingas. Horizontalia ašimi $-7,6 \cdot 10^{-6} K^{-1}$, vertikalia ašimi $-5,2 \cdot 10^{-6} K^{-1}$. Skaičiuojant termo lęšio

verte, buvo imama abejos termo-optinio koeficiento vertes. Nustatyta, jog jeigu kristalas sugeria 172 mW galios, kaupinimo pluošto sąsmaukos diametras yra lygus 145x143 μm , o šiluminis kristalo laidumas yra $6 \text{ W}/(\text{mK})$, tai susidariusio termo-lęšio židinio nuotolis horizontalia ašimi -159 mm, vertikalia ašimi -237 mm. Suskaičiuotos vertės yra kraštutiniai atvejai, kai visa kaupinimo spinduliuotė virsta šiluminė. Realybėje nustatytas susidaręs termo lęšis yra kur kas mažesnis. Įskaitant termo-lęšį buvo apskaičiuota rezonatoriaus pastovios modos kitimo tendencija priklausomai nuo rezonatoriaus ilgio, kai naudojami penki skirtingi išvadiniai veidrodžiai (22 pav.).

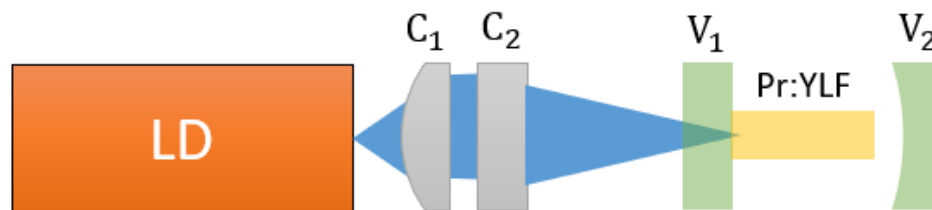
Visais atvejais stabilios modos diametro kitimo tendencija, priklausomai nuo rezonatoriaus ilgio, yra panaši skirtingiems kreivumo radiuso išvadiniams veidrodžiams. Kai termo lęšio vertė nėra artima, ar mažesnė už išvadinio veidrodžio kreivumo radiuso vertę, didžiausia stabilios modos diametro vertė yra tada, kai rezonatoriaus ilgis yra apie puse kreivumo radiuso išvadinio veidrodžio vertei. Didžiausios stabilios modos diametro vertės, priklausomai nuo naudojamo išvadinio veidrodžio kreivumo radiuso ir rezonatoriaus ilgio, pateiktos 3 lentelėje. Toliau didinant rezonatoriaus ilgį, stabilios modos diametras mažėja. Ties sritimi, kai dar lazeris turėtų veikti, stabilios modos diametras yra apie 2,5-3 karto mažesnis, negu pati didžiausios stabilios rezonatoriaus modos diametro vertė.

3 lent. Didžiausios stabilios rezonatoriaus modos diametro vertės, kai keičiamas išvadinio veidrodžio kreivumo radiusas.

Išvadinio veidrodžio kreivumo radiusas, mm	Termo lęšis, mm	Rezonatoriaus ilgis, mm	Stabilios modos diametras y ašimi, μm
-25	-237	13	125
-25	-159	13	125
-50	-237	24	177
-50	-159	22,7	179
-75	-237	34	219
-75	-159	30	223
-100	-237	41	256
-100	-159	34	265
-150	-237	50	325
-150	-159	24	375

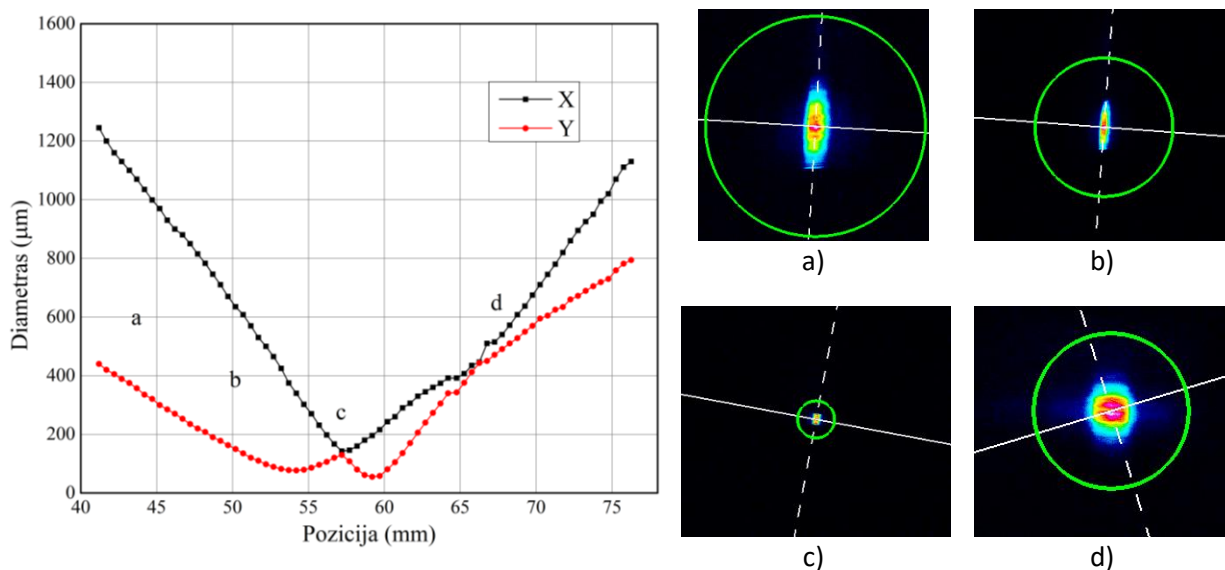
Kaip buvo prieš tai minėta, susidaręs Pr:YLF kristale sklaidomasis lęšis neleidžia naudoti plokščio Fabri ir Pero rezonatoriaus. Todėl buvo pasirinkta naudoti pusiau konfokalų rezonatorių. Susidaręs ilgo židinio nuotolio termo lęšis kristale nedaro didelės įtakos stabilios modos diametru, lyginant su rezonatoriumi be termo lęšio. Visgi, kai termo lęšio židinio nuotolis yra artimas ar mažesnis, už išvadinio veidrodžio židinio nuotolį, tada rezonatoriaus stabilumo zona sutrumpėja. Išvadinis veidrodis nebesugeba surinkti visos spinduliuotės rezonatoriuje, todėl konfigūracija, kai kreivas veidrodis statomas prie pat kristalo nėra tinkamas. Tokiu metu lazerinė spinduliuotė negalima, nes toks rezonatorius nėra stabilus. Esant dideliems termo-lęšiams, reikalingi didelio kreivumo radiuso išvadiniai veidrodžiai, kad pajėgtų sukolimuoti išeinančią spinduliuotę.

6.5. Lazerinės spinduliuotės generacijos tyrimas

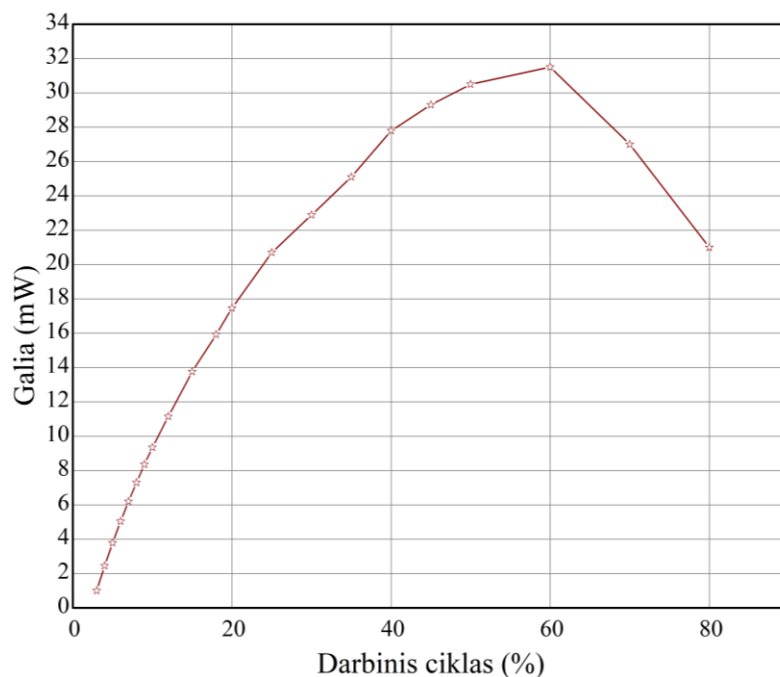


23 pav. Eksperimento schema. Diodo spinduliuotė tiesiogiai fokusuojama į aktyviąją medžiagą (LD – lazerinis diodas, C_1 , C_2 – +25 mm židinio nuotolio cilindriniai lęšiai, V_1 – didelio atspindžio koeficiento 480-760 nm įvadinis rezonatoriaus veidrodis, V_2 – įgaubtas išvadinis rezonatoriaus veidrodis, kurio kreivumo radiusas -25 mm, -50 mm, -75 mm, -100 mm, -150 mm. Paviršius dengtas 98 % atspindžio danga 640 nm spinduliuotei)

Ištyrus Pr:YLF terpę, kaupinimo diodinį lazerį bei atlikus optinio rezonatoriaus teorinius modeliavimo darbus buvo sukonstruota 23 paveiksle pateikta optinė schema, bei atliktas Pr:YLF lazerio generacijos tyrimas. Diodo spinduliuotė buvo tiesiogiai fokusuojama į aktyviąją terpę ir siekiama gauti lazerinę spinduliuotę. Iš diodo išėjusi spinduliuotė buvo fokusuojama dviem cilindriniais lęšiais, kurių židinio nuotolis lygus +25 mm. Abu lęšiai stovi kreivu paviršiu atsuktu į diodo korpusą. Pirmas lęšis stovi 6 mm atstumu nuo diodo korpuso, fokusuoja pluoštą horizontaliai, antras lęšis 14 mm atstumu, fokusuoja pluoštą vertikaliai. Lazerinio diodo pluošto erdviųjų parametrų kitimas aplink sąsmaukos padėtyje pavaizduotas 24 pav. Sąsmaukoje diodo spinduliuotės skirstinys yra asimetrinis. Pluoštas yra fokusuojamas į 145x143 um dėmę, kuri yra nutolusi 57,2 mm nuo diodo korpuso. Dėl to, jog pluoštas išeinantis iš diodo yra nesimetrinis, nehomogeniškas, todėl matavimas CCD kamera nėra tikslus. Šituo atveju buvo naudota 4σ pluošto aproksimacija.



24 pav. Lazerinio diodo pluošto diametro kitimas. Papildomai pateikta ir pluošto profiliai skirtingose pozicijose.

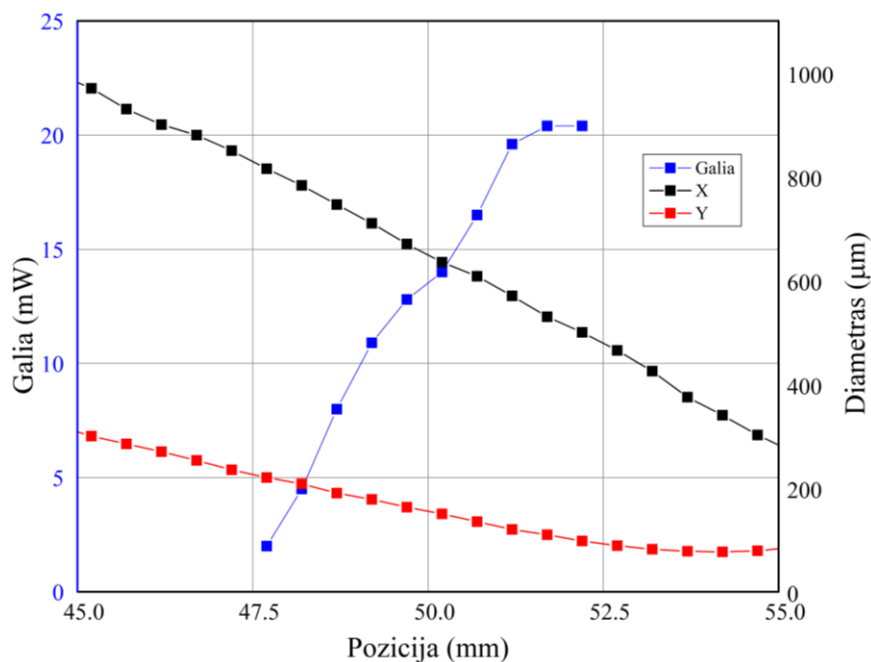


25 pav. Generuojamos išvadinės spinduliuotės priklausomybė nuo kaupinančio diodo darbinio ciklo (Naudotas -150 mm kreivumo radiuso išvadinis veidrodis, rezonatoriaus ilgis 142,5 mm)

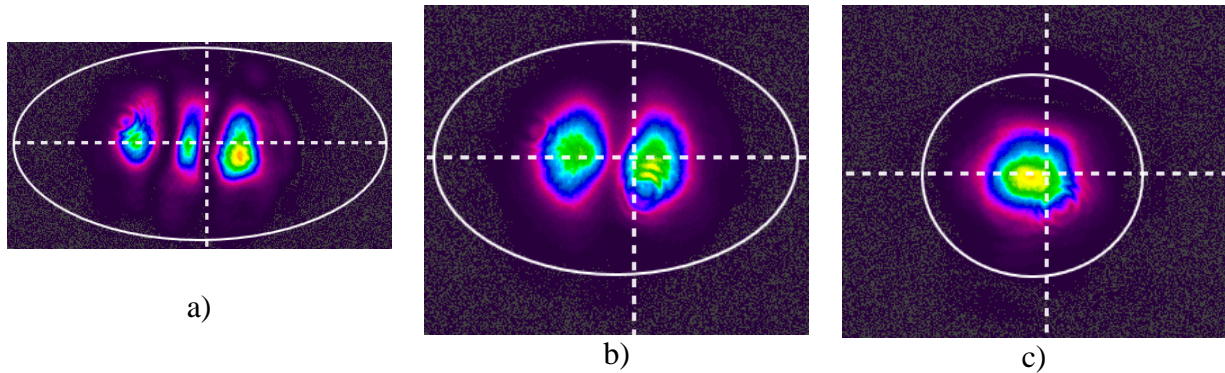
Šiuo atveju buvo realizuota Pr:YLF lazerio generacija. Kristalo temperatūra, naudojant šaldymo elementą, laikyta 25°C. Pradžioje buvo nustatyta, kaip keičiant kaupinimo parametrus, šiuo atveju, darbinį ciklą, keičiasi išvadinės spinduliuotės galia (25 pav). Nustatyta, jog didinant diodo darbinį ciklą iki 60 %, išvadinės spinduliuotės galia didėja ir pasiekia 31,4 mW. Vėliau, dar didinat darbinį ciklą, lazerio emisijos galia krenta. Taip yra dėl to, kad didinant darbinio ciklo vertę,

spektras slenka link ilgesniųjų bangų ilgių, todėl kristale diodo spinduliuotė yra vis prasčiau sugerama ir krenta efektyvumas. Nustatyta, jog efektyviausiai Pr:YLF lazeris veikia tada, kai darbinis ciklas yra 5-30 %. Tuomet kaupinimo galios keitimo efektyvumas siekia 9-10 %. Todėl siekiant ištirti Pr:YLF lazerį, kristalo kaupinimui buvo pasirinkta naudoti 25 % darbinį ciklą.

Yra žinoma, jog kaupinimo sąsmaukos padėtis daro labai didelę įtaką lazerinės spinduliuotės išvadinei galiai. Jeigu kaupinimo dėmė yra per didelė, lyginant su stabilios modos diametru, kristalas yra perkaupinamas (yra generuojamos papildomos skersinės modos), o jeigu kaupinimo dėmė per maža - lazerinės spinduliuotė nesigeneruoja. Šiuo atveju, naudojant cilindrinį lęšių porą, keisti dėmės dydį kristale yra sudėtinga, tačiau galima keisti sąsmaukos padėtį kristale. Todėl buvo ištirta, kaip nuo kaupinimo padėties priklauso išvadinės spinduliuotės galia. Rezultatai pateikti 26 pav. Matyti, jog išvadinės spinduliuotės galia didžiausia, kai kaupinimo pluošto matmuo kristalo pradžioje yra 450x100 μm . Galima manyti, jog sąsmauka yra netoli kristalo vidurio. Didinant kaupinimo pluošto matmenis kristalo pradžioje, sąsmauka stumiamą toliau nuo įvadinio veidrodžio, o galia krenta. Matomą tendenciją galima paaiškinti tuo, jog didėjant pluošto matmenims kristalo pradžioje, intensyvumas į ploto vienetą krenta, ir dėl to mažėja sugertis kristale. Taip pat pastebėta, jog didinant kaupinimo pluošto matmenis kristalo pradžioje, generuojamame pluošte susidaro antros ir trečios eilės skersinės modos (27 pav).

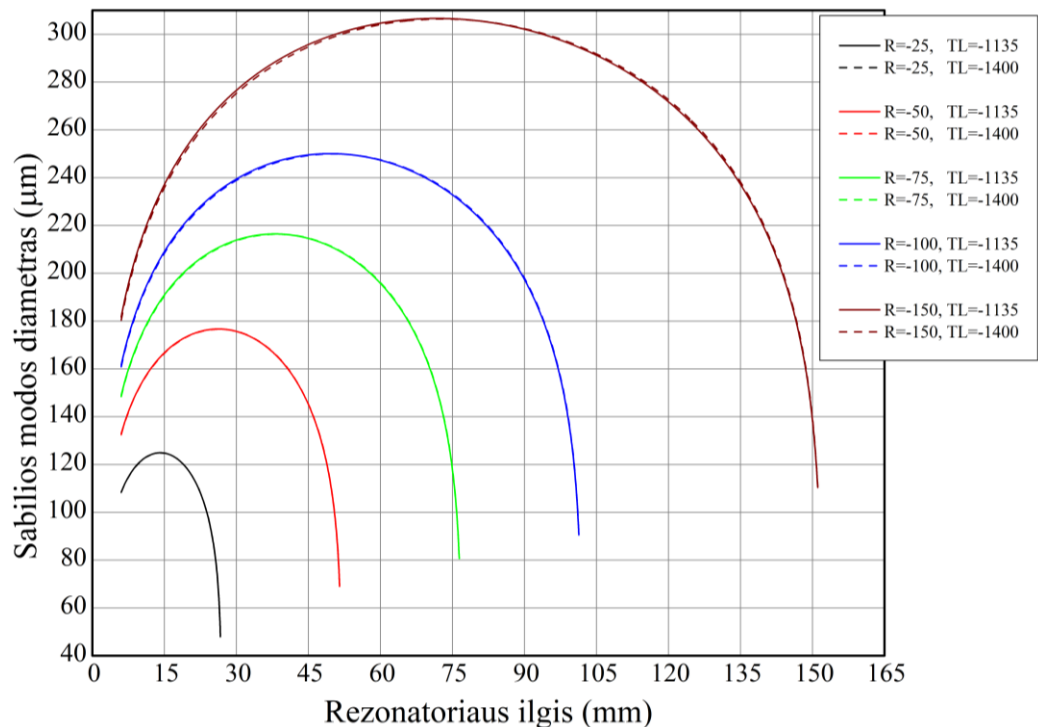


26 pav. Išvadinės lazerinės spinduliuotės galios priklausomybė, kai keičiama kaupinimo pozicija kristalo pradžioje. Taip pat pavaizduota lazerinio diodo pluošto matmenų kitimas aplink sąsmaukos padėtį. Naudotas -150 mm kreivumo radiuso išvadinis veidrodis, rezonatoriaus ilgis 142,5 mm.



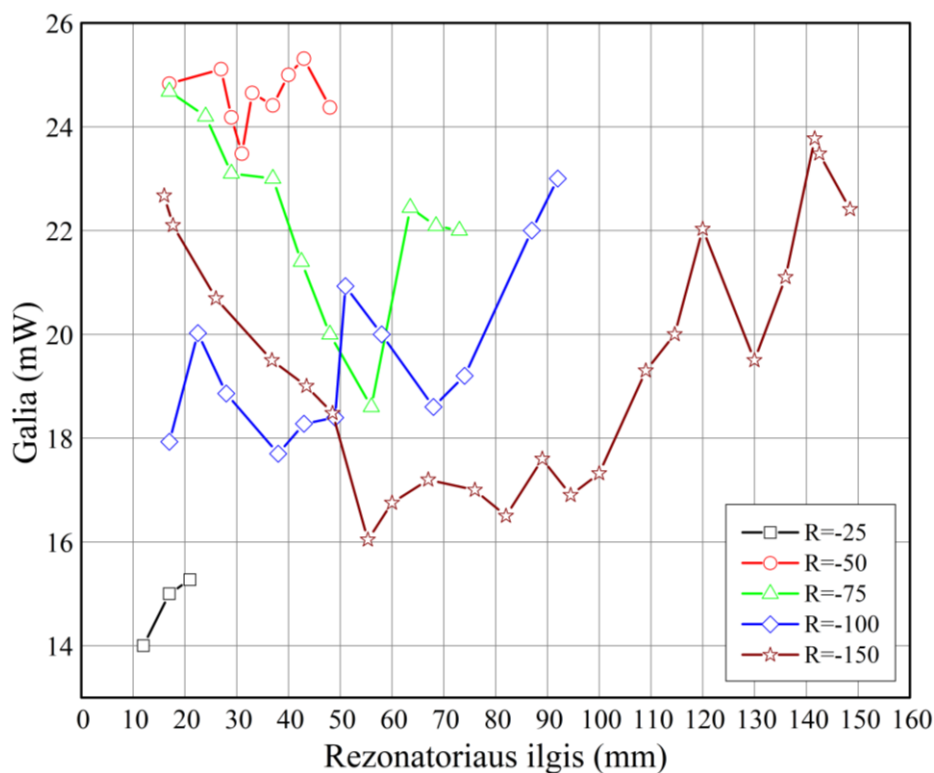
27 pav. Pr:YLF lazerio pluošto skirstinio priklausomybė, nuo kaupinimo dėmės dydžio. Rezonatoriaus ilgis 142,5 mm, išvadinio veidrodžio kreivumo radiusas -150 mm. Kaupinimo dėmės dydis kristalo paviršiuje: a) 760x220 μm , b) 600x150 μm , c) 300x100 μm .

Naudojant 12 pav. schemą išmatuotas susidarančio termo lęšio židinio nuotolis. Stebėta, kaip pasikeičia He-Ne lazerio pluošto fokusavimas, kai Pr:YLF kristalas nėra kaupinamas ir kai įjungiamas 227 mW galios 444,5 nm bangos ilgio kaupinimo lazeris. Nustatytas termo lęšio židinio nuotolis $f_x = -1135$ mm ir $f_y = -1400$ mm. Nustatytos vertės yra kur kas didesnės, lyginant su modeliavimo metu naudotomis termo lęšio vertėmis. Taip yra dėl to, jog modeliavimo metu buvo teigta, kad visa spinduliuotė yra sugerama kristale ir jį šildo. Dalis sugertos spinduliuotės perspinduliuojama kaip fluorescencija, taip pat, išsklaidoma bei atspindima nuo paviršių. Vis dėl to, nustatytas gana mažo kreivumo radiuso termo lęšis nedaro didelės įtakos eksperimento rezultatams (28 pav.). Naudojant 6.3.1 formulę, apskaičiuota 30 mW šilumos galia, išsiskyrusi kristale. Realus stabilios modos diametras rezonatoriuje yra artimas modeliui. Termo lęšio židinio nuotoliai abejomis ašimis gali būti skirtingi dėl to, jog kaupinimo spinduliuotė fokusuojama skirtingais greičiais. Dėl laikiklio konstrukcijos horizontalia ašimi šiluma yra nuvedama simetriškiau, negu horizontalia ašimi.

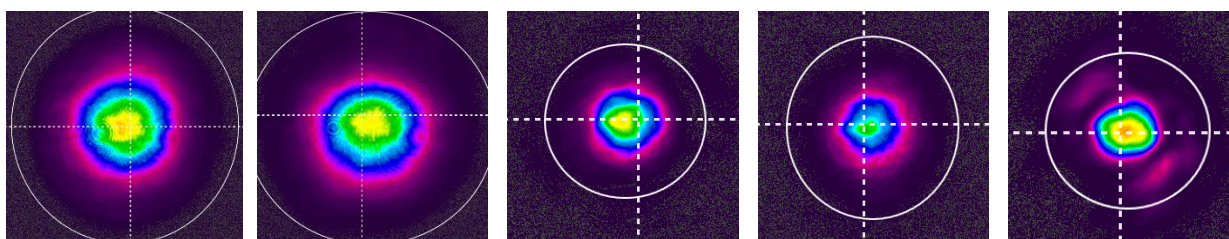


28 pav. Aktyviosios terpės pradžioje susidariusios modos diametro kitimas, kai naudojami penki skirtingi išvadiniai veidrodžiai.

Toliau buvo atlikta tyrimų serija, kurios metu buvo ištirta išvadinio veidrodžio kreivumo radiuso įtaka lazerio generuojamos spinduliuotės galiai. Emisijos galia išmatuota ties skirtingais rezonatoriaus ilgiais, tol, kol lazerio spinduliuotė buvo registruojama. Rezultatai pateikti 29 pav. Kaupinimo į kristalą pozicija visais atvejais buvo vienoda. Kaupinimo dėmės dydis kristale $145 \times 143 \mu\text{m}$, galia 227 mW. Didžiausia išvadinės spinduliuotės galia pasiekta naudojant – 50 mm kreivumo radiuso išvadinį veidrodį. Užfiksuota 25,5 mW galia, efektyvumas siekė 11 %, kai rezonatoriaus ilgis 42 mm. Ties kitais rezonatoriaus ilgiais, galios vertė išlieka panaši. Didžiausias galios kritimas užregistruotas rezonatoriaus ilgiui esant 31 mm. Tada išmatuota 23,5 mW galios vertė. Mažiausia išvadinės spinduliuotės galia išmatuota naudojant – 25 mm kreivumo radiuso veidrodį. Užfiksuota 14 mW galia, efektyvumas siekė 6,2 %, kai rezonatoriaus ilgis 12 mm. Didinant rezonatoriaus ilgiui išvadinės spinduliuotės galia išaugo iki 15,2 mW. Naudojant -75 mm, -100 mm ir -150 mm kreivumo radiuso išvadinius veidrodžius, didžiausia galia užfiksuota atitinkamai 24,7 mW, 23 mW ir 23,8 mW. Pr:YLF lazerio pluošto skirstiniai pateikti 30 pav.



29 pav. Išvadinės spinduliuotės galios priklausomybė nuo rezonatoriaus ilgio, kai naudojami skirtingo kreivumo radiuso R išvadiniai veidrodžiai.



a) KR -25 mm, RI 17 mm b) KR -50 mm, RI 17 mm c) KR -75 mm, RI 48 mm d) KR -100 mm, RI 89 mm e) KR -150 mm, RI 76 mm

30 pav. Pr:YLF lazerio pluošto skirstiniai (KR- išvadinio veidrodžio kreivumo radiusas, RI – rezonatoriaus ilgis)

Keičiant išvadinių veidrodžių kreivumo radiusus buvo matuota ne vien spinduliuotės galia, bet ir pluošto kokybės parametras M^2 , bei skėstis (31, 32 pav.). Nustatyta, jog M^2 parametras horizontalia ir vertikalia ašimi skiriasi. Taip gali būti dėl to, jog kristalas dėl laikiklio konstrukcijos horizontalia ašimi yra tolygiau šaldomas, negu vertikalia kryptimi dėl laikiklio konstrukcijos. Naudojant -75 mm, -100 mm, -150 mm kreivumo radiuso išvadininius veidrodžius, didinant rezonatoriaus ilgį, M^2 parametras mažėja. Mažiausias M^2 nustatytas, kai naudotas -100 mm kreivumo radiuso veidrodis, rezonatoriaus ilgis 89 mm, tada M^2 horizontalia ašimi lygus 1,06, o vertikalia 1,08. Tai yra puikus rezultatas, nes tokio pluošto kokybė yra labai artima idealiam Gauso

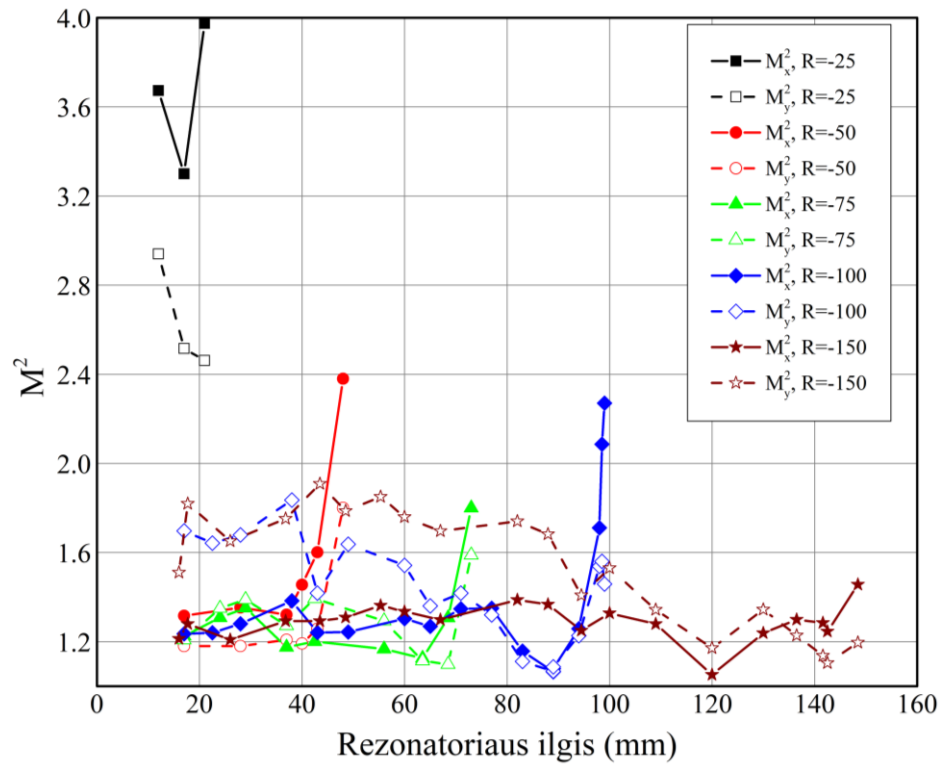
pluoštui ir iš esmės prilygta dujinių lazerių pluošto kokybei (kaip pvz.: HeNe 632,8 nm $M^2=1,02$). Prasčiausias Pr:YLF lazerio pluošto kokybės parametras nustatytas, kai naudotas -25 mm kreivumo radiuso išvadinis veidrodis. Tada M^2 parametras horizontalia ašimi didesnis už 3,5, o vertikalia 2,4. Didinant rezonatoriaus ilgį, artėjant prie stabilumo zonos galo, M^2 reikšmė smarkiai išauga. Viena iš priežasčių, kodėl tai vyksta, gali būti dėl to, jog kaupiamos spinduliuotės diametras yra smarkiai didesnis už stabilios modos diametrą. Todėl generuojamos antros, trečios eilės skersinė modos, kas lemia išaugusią M^2 reikšmę.

Išmatuotos pilno kampo skėsties vertės dydį galima paaiškinti nagrinėjant rezonatoriuje formuojamos modos diametrą. Pusės kampo skėstis aprašoma pagal formulę:

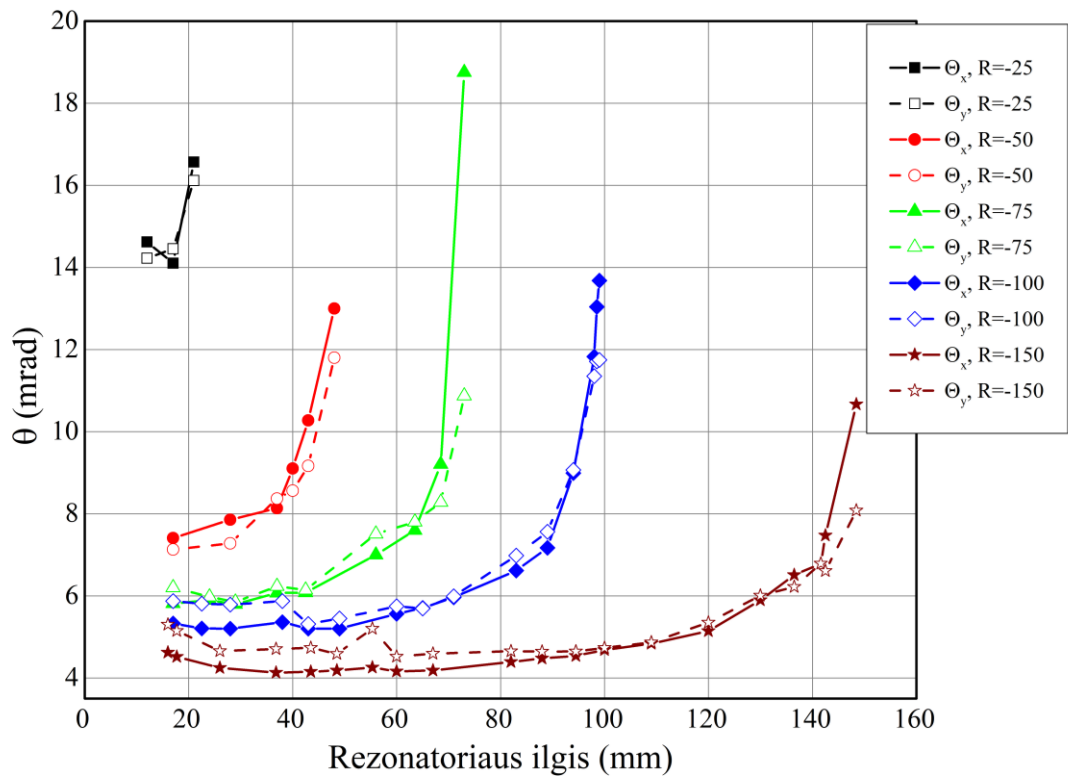
$$\theta = \frac{\lambda}{\pi\omega_0}, \quad (6.5.1)$$

Kur λ -lazerio bangos ilgis, ω_0 – pluošto radiusas.

Taigi, kuo mažesnio diametro stabili moda yra rezonatoriuje, tuo skėstis yra didesnė. Kadangi dėl skirtingu išvadinių veidrodžių kreivumo radiuso rezonatoriuje susidaro skirtingo diametro modos $2\omega_0$, todėl ir skėstis visais atvejais yra skirtinga. Naudojant mažesnio kreivumo radiuso veidrodį, generuojamas stabili moda labiau fokusuojama, todėl skėstis yra didesnė ir atvirkščiai, kai veidrodžio kreivumo radiusas yra didesnis, generuojama moda yra mažiau fokusuojama, dėl to skėstis yra mažesnė. Ilginant rezonatorių, artėjant prie nestabilios rezonatoriaus konfigūracijos, visais atvejais skėstis pradeda didėti. Taip yra todėl, kad stabilios modos dydis mažėja. Jeigu atstumas yra dar didinamas, lazerio pluošto skėstis labai išauga, kol galiausia lazerinė generacija nutrūksta.



31 pav. Lazerinio pluošto kokybės parametro priklausomybė nuo naudojamo išvadinio veidrodžio kreivumo radiuso R , ir rezonatoriaus ilgio.

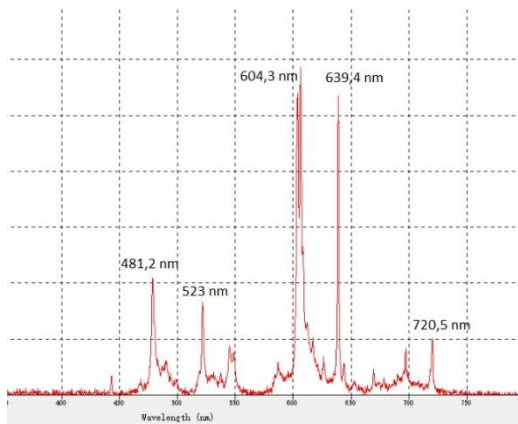


32 pav. Išvadinės spinduliuotės pilno lauko skėties priklausomybė nuo naudojamo išvadinio veidrodžio kreivumo radiuso R , ir rezonatoriaus ilgio.

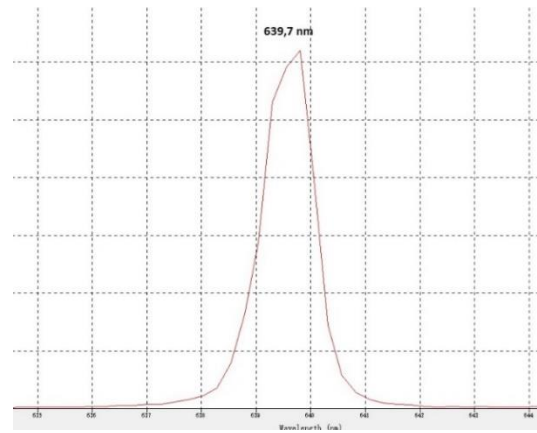
Naudojant poliarizatorių ir gal galios matuoklį įvertinta išvadinės Pr:YLF lazerio spinduliuotės poliarizacija. Nustatyta, jog generuojama spinduliuotė yra tiesiškai poliarizuota, o jos kryptis sutampa su kaupinimo šaltinio kryptimi ir yra horizontali. Poliarizacijos kontrastas didesnis už 100:1.

Naudojant spektrometrą, užregistruotas Pr:YLF kristalo fluorescencijos spektras (33 pav.). Taip pat nustatytas generuojamos išvadinės spinduliuotės centrinis bangos ilgis lygus 639,7 nm (34 pav.). Kitų bangos ilgių spinduliuotė nebuvo generuojama.

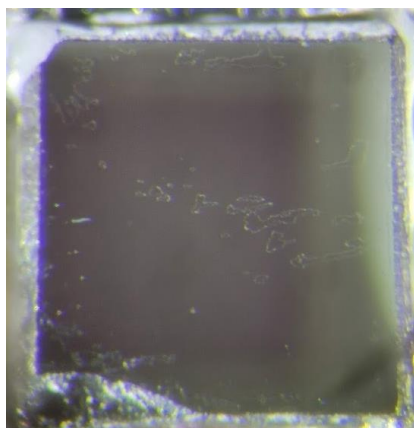
Po tyrimo buvo atlikta kristalo apžiūra. Pastebėta, jog kristalo danga nebėra vienalytė (35 pav.). Matosi, jog danga yra atsilupusi. Tai galėjo nutikti dėl prastos dangos kokybės, arba fizinio kontakto su įvadininiu veidrodžiu. Buvo siekiama, kad įvadininis veidrodis ir kristalas būtų kaip galima arčiau vienas kito.



33 pav. Pr:YLF kristalo fluorescencijos spektras.



34 pav. Pr:YLF lazerio emisijos spinduliuotės bangos ilgis.



35 pav. Po eksperimento pastebėti kristalo dangos netolygumai.

Pagrindiniai rezultatai

Darbe ištirti 443–446 nm spektro srityje generuojančio diodo lazerio parametrai bei išmatuoti itrio ličio fluorida, legiruoto prazeodimio jonais, optiniai parametrai. Taip pat buvo atlikti teoriniai, plokščio - įgaubto veidrodžio porų, rezonatoriaus skaičiavimai. Nustatyta, jog išlaikant vienodą rezonatoriaus ilgį ir didinant išvadinio veidrodžio kreivumo radiusą - R, stabilios modos diametras d didėja. (pvz.: rezonatoriaus ilgiui esant 50 mm, naudojant išvadinį veidrodį su R=-50 mm, stabilios modos diametras kristalo pradžioje yra d=100 μm, R=-75 mm - d=215 μm, R=150 mm - d=280 μm). Nustatyta, jog kristale susidariusio neigiamo-termo lęšio vertės yra tokios, jog sferinės konfigūracijos rezonatoriaus stabilumui didelės įtakos neturi.

Nustatyta diodinio lazerio generuojamos spinduliuotės parametrų priklausomybė nuo diodinių lazerį maitinančios srovės darbinio ciklo. Didinant darbinio ciklo vertę, diodinio lazerio generuojamas bangos ilgis slenkasi į ilgesnių bangos ilgių pusę, generuojama galia didėja (pvz. darbinio ciklo vertei esant 25 % - generuojamas centrinis bangos ilgis yra lygus 444,5 nm, galia 227 mW, darbinio ciklo vertei esant 80 % - 446 nm ir 800 mW). Nustatyta, kad pluoštas yra horizontaliai poliarizuotas, santykis >100:1. Lazerinio diodo pluoštas yra prastos kokybės, nehomogeniškas, asimetrinis. Sufokusavus cilindriniais lęšiais, sąsmaukos padėtyje spinduliuotės dėmės dydis yra 145x142 μm.

Naudojant penkis skirtingo kreivumo radiuso išvadinius veidrodžius (R=-25, R=-50, R=-75, R=-100, R=-150) suderinti rezonatoriai ir Pr:YLF kristalą kaupinant 227 mW galios, 444,5 nm centrinio bangos ilgio spinduliuote gauta 639,7 nm bangos ilgio lazerinė generacija. Įvertinti generuojamos spinduliuotės parametrai (galia, bangos ilgis, pluošto kokybės parametras M^2 , pluošto skėstis) nuo išvadinio veidrodžio kreivumo radiuso vertės bei rezonatoriaus ilgio.

Didžiausi išmatuota išvadinės spinduliuotės galia yra lygi 25,5 mW, tai pasiekta naudojant - 50 mm kreivumo radiuso veidrodį, kai rezonatoriaus yra lygus 42 mm. Šiuo atveju optinis efektyvumas siekia 11 %. Mažiausia išmatuota išvadinės spinduliuotės galia yra lygi 14 mW, tai pasiekta naudojant -25 mm kreivumo radiuso veidrodį, kai rezonatoriaus ilgis yra lygus 12 mm. Tada kaupinimo spinduliuotės vertimo į lazerinės spinduliuotės efektyvumas 6,2 %. Pastebėta, kad naudojant -50 mm, -75 mm, -100 mm, -150 mm kreivumo radiuso veidrodžius, mažiausia generuojama išvadinės spinduliuotės galia pasiekama tada, kai atstumas tarp veidrodžių daugmaž lygus apie pusė veidrodžio kreivumo radiuso vertės. Po eksperimento buvo pastebėta, jog Pr:YLF kristalo danga yra pažeista. Centrinėje dalyje danga yra atsilupusi, todėl atlikti galios matavimai

gali turėti tam tikrų netikslumų. Neaišku, ar matavimo metu lazerinė spinduliuotė rezonatoriuje vaikščiojo pro skaidrintą paviršių ar ne. Visgi, jeigu spinduliuotė judėjo pro neskaidrintą kristalo paviršių, atsiradę nuostoliai dėl papildomų atspindžių rezonatoriuje turėjo didelės įtakos išvadinės spinduliuotės galiai.

Mažiausia M^2 vertė nustatyta, kai naudotas -100 mm kreivumo radiuso išvadinis veidrodis, rezonatoriaus ilgis 89 mm, tokiu atveju M^2 horizontalia ašimi yra lygus 1,06, o vertikalioji - 1,08. Didžiausia M^2 vertė nustatyta naudojant -25 mm kreivumo radiuso išvadinį veidrodį. Horizontalioji ašimi M^2 vertė didesnė už 3,5, o vertikalioji - 2,4. Kitais atvejais M^2 parametras skirtingiems išvadiniams veidrodžiams yra ne didesnis už 1,5 horizontalioji ašimi ir 1,9 vertikalioji ašimi. Pastebėta, jog didinant rezonatoriaus ilgį, M^2 vertė iš pradžių mažėja, o rezonatoriaus ilgiui priartėjus prie naudojamo veidrodžio kreivumo vertės, M^2 vertė smarkiai išauga.

Didžiausia išvadinės spinduliuotės skėstis nustatyta naudojant -25 mm kreivumo radiuso veidrodį. Rezonatoriaus ilgiui esant 12 mm, skėstis horizontalioji ašimi yra lygi 14,2 mrad, o vertikalioji 14,6 mrad. Mažiausia skėstis nustatyta naudojant -150 mm kreivumo radiuso veidrodį. Rezonatoriaus ilgiui esant 60 mm, skėstis horizontalioji ašimi yra lygi 4,52 mrad, o vertikalioji 4,16 mrad.

Išmatuota Pr:YLF lazerio poliarizacija. Nustatyta, kad generuojamos spinduliuotės poliarizacijos kryptis sutampa su kaupinimo spinduliuotės poliarizacijos kryptimi ir yra horizontaliai poliarizuota, o kontrastas didesnis už >1:100.

Išmatuotas generuojamos spinduliuotės centrinis bangos ilgis yra lygus 639,7 nm. Kitų bangos ilgių spinduliuotės nepavyko gauti.

Išvados

- 1) Naudotas lazerinis diodas yra tinkamas 0,6 at. % Pr:YLF lazerio kaupimui, kai naudojama pusiau sferinė rezonatoriaus konfigūracija. Kaupinant 227 mW galia, 444,5 nm, fokusuojant į 145x143 μm dėmę kristale, didžiausia 25,5 mW išvadinės spinduliuotės galia pasiekta naudojant -50 mm kreivumo radiuso išvadinį veidrodį. Efektyvumas siekia 11 %. Bangos ilgis 639,7 nm.
- 2) Ištyrus galios priklausomybę nuo kaupinimo lazerio darbinio ciklo, nustatyta, kad didėjant darbinio ciklo vertei galia auga iki kol pasiekia didžiausią vertę, o tada pradeda mažėti. Tokią tendenciją lemia tai, kad auga kaupinimo galia ir kartu keičiasi aktyvios terpės temperatūra, o tai vėliau sąlygoja neefektyvų generacijos bangos ilgio spinduliuotės stiprinimą.
- 3) Didėjant rezonatoriaus ilgiui M^2 ir Θ didėja. Taip yra todėl, nes didėjant rezonatoriaus ilgiui einama prie nestabilios rezonatoriaus zonos krašto. Rezonatoriuje stabilios modos dydis mažėja, nebesutampa generuojamos ir kaupinamos modos dydžiai.
- 4) Siekiant generuoti kitų bangos ilgių spinduliuotę kuri yra lemiamą esančio sužadintoje būsenoje praeodimio energiniais šuoliais (480, 523, 607, 640, 698, 721 nm), būtina ne tik sumažinti bendrus nuostolius rezonatoriuje visiems bangos ilgiams, bet ir sukurti rezonatoriaus konfigūraciją kuri turėtų dispersinį elementą, kas nėra paprasta mažo ilgio konfokaliniuose ir pusiau konfokaliniuose rezonatoriuose.

Literatūra

- [1] Charles H. Townes, The first laser, pasiekiamas internetiniu adresu http://www.press.uchicago.edu/Misc/Chicago/284158_townes.html (žiūrėta 2020-05-01).
- [2] Anna P.M. Michel, Review: Applications of single-shot laser-induced breakdown spectroscopy, *Spectrochimica Acta Part B* 65, January 2010, 185–191 p.
- [3] The European X-Ray Laser Project XFEL, pasiekiamas internetiniu adresu <http://xfel.desy.de/> (žiūrėta 2020-05-01).
- [4] Akanksha Goyal, Blue Diode Pumped Pr:YLF Laser, Teaching and Operation Manual, ALKAAD Photonics, December 2014, 28 p.
- [5] L. Esterowitz, R. Allen, M. Kruer, F. Bartoli, L. S. Goldberg, H. P. Jenssen, A. Linz, V. O. Nicolai, Blue light emission by a Pr:LiYF₄ – laser operated at room temperature, *Journal of Applied Physics* 48, 1997.
- [6] Saiyu Luo, Xigun Yan, Qin Cui, Bin Xu, Huiying Xu, Zhiping Cai, Power scaling of blue-diode-pumped Pr:YLF lasers at 523.0, 604.1, 606.9, 639.4, 697.8 and 720.9 nm, *Optics Communications* 380, June 2016, 357-360p, <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2016.06.026>.
- [7] M Fibrich, J Šulc and H Jelínková, Pr:YLF orange laser investigation at cryogenic temperature, *Laser Phys. Lett.* 12, February 2015, 095801, doi:10.1088/1612-2011/12/9/095801.
- [8] Bohr model, pasiekiamas internetiniu adresu https://en.wikipedia.org/wiki/Bohr_model (žiūrėta 2020-05-10).
- [9] Eugenijus Gaižauskas, Valdas Sirutkaitis, Kietojo kūno lazeriai, Vilnius, Vilniaus universiteto leidykla, 2008, 978-9955-33-349-4.
- [10] Martin Fibrich, Jan Sulc, Helena Jelinkova, 1-W level diode pumped Pr:YLF orange laser, *Proc. SPIE 9726, Solid State Lasers XXV: Technology and Devices*, March 2016, 97261E, doi: 10.1117/12.2209535.
- [11] Ona Balachninitė, Algirdas Bargelis, Aleksandr Demetjev, Remigijus Jonušas, Gediminas Račiukaitis, Valdas Sirutkaitis, *Lazerinė Technologija*, Vilnius, Vilniaus universiteto leidykla 2008, 362 p.
- [12] James J. Coleman, The development of the semiconductor laser diode after the first demonstration in 1962, *Semiconductor Science and Technology*, Volume 27, Number 9, August 2012, 090207, <https://doi.org/10.1088/0268-1242/27/9/090207>.

- [13] Osamu Kumagai, Masao Ikeda, Masanobu Yamamoto, Application of Laser Diodes to Optical Disk Systems: The History of Laser Diode Development and Mass Production in Three Generations of Optical Disk Systems, Proceedings of the IEEE, Volume 101, Issue: 10, Oct. 2013, 2243 – 2254, doi: 10.1109/JPROC.2013.2275017.
- [14] Haro Fritsche, Fabio Ferrario, Ralf Koch, Bastian Kruschke, Ulrich Pahl, Silke Pflueger, Andreas Grohe, Wolfgang Gries, Florian Eibl, Stefanie Kohl, Michael Dobler, Direct diode lasers and their advantages for materials processing and other applications, roc. SPIE 9356, High-Power Laser Materials Processing: Lasers, Beam Delivery, Diagnostics, and Applications IV, March 2015, 93560, doi: 10.1117/12.2080208.
- [15] H.Wang, C.J.Tay, C.Quan, H.M.Shang, Study of collimating laser diode beam by a graded-index optical fibre, Optik - International Journal for Light and Electron Optics, Volume 112, Issue 11, November 2001, 531-535 p, <https://doi.org/10.1078/0030-4026-00092>.
- [16] Haiyin Sun, A Practical Guide to Handling Laser Diode Beams, Dordrecht : Springer, 2015, 136 p, ISBN 978-94-017-9782-5 , doi:10.1007/978-94-017-9783-2.
- [17] Daumantas Čiplys, Arūnas Krotkus, Valerijus Smilgevičius, Šviesolaidžių optika, Vilnius: Vilniaus universiteto leidykla, 2008, 185 p, ISBN 978-9955-33-342-5.
- [18] Keiji Kataoka, Estimation of coupling efficiency of optical fiber by far-field method, Optical Review, Volume 17, Issue 5, September 2010, 476–480 p, <https://doi.org/10.1007/s10043-010-0086-4>.
- [19] Naftaly Menn, Practical Optics 1st Edition, Academic Press, 2004, 336 p, ISBN 9780080492124.
- [20] B.Xu, Z.Liu, H.Xu, Z.Cai, C.Zeng, S.Huang, Y.Yan, F.Wang, P.Camy, J.L.Doualan, A.Braud, R.Moncorgé, Highly efficient InGaN-LD-pumped bulk Pr:YLF orange laser at 607 nm, Optics Communications, Volume 305, 15 September 2013, 96-99 p, <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2013.05.002>.
- [21] Beam Circularization Lab Fact, pasiekiamas internetiniu adresu https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=11426 (žiūrėta 2020-05-11)
- [22] Warren J. Smith, Modern Optical Engineering, The McGraw-Hill Companies, December 2007, 764 p, ISBN 978-0071476874, doi: 10.1036/0071476873.

- [23] Guenter Huber, André Richter, Ernst Heumann, Continuous wave Praseodymium solid-state lasers, Proc. SPIE 6451, Solid State Lasers XVI: Technology and Devices, February 2007, 645102, doi: 10.1117/12.708561.
- [24] U. Weichmann, A.R. Bellancourt, S. Gronenborn, U. Mackens, H. Moench, Blue diode-pumped Pr:YLF laser with planar resonator optics, Applied Physics B, Volume 101, Issue 4, December 2010, 747–751 p, <https://doi.org/10.1007/s00340-010-4083-x>

Santrauka

Justas Girskis

REGIMOSIOS SPEKTRO SRITIES PR:YLF LAZERIO TYRIMAS

SANTRAUKA

Šio darbo tikslas yra sukonstruoti Pr:YLF lazerio schemą, išsiaiškinti, kokių sąlygų reikia, jog vyktų Pr:YLF lazerio generacija bei nustatyti kaupinimo spinduliuotės parametrus įgalinančius generuoti lazerinę spinduliuotę. Pasirinkta naudoti pusiau sferinę rezonatoriaus konfigūraciją, kai prie plokščio veidrodžio statomas aktyvioji terpė, o išvadinis įgaubtas veidrodis judinamas išilgai optinės ašies. Eksperimento metu buvo iširtos penkios Pr:YLF lazerio konfigūracijos, kai naudojami -25 mm, -50 mm, -75 mm, -100 mm, -150 mm kreivumų radiusai išvadiniai veidrodžiai. Tirtas 0,6 at. % Pr:YLF kristalas, kurio ilgis 6 mm, išpjautas a kristaline ašimi. Pradžioje buvo atlikti diodo kalibravimo darbai, nustatyta, kaip kinta diodo spinduliavimo spektras nuo pasirinkto darbinio režimo, kai keičiama diodą maitinančios srovės trukmė prie pasirinkto 1kHz diodo darbinio dažnio.

Nustatyta, jog generacijos procesas yra efektyviausias, kai kaupinimo spinduliuotės centrinės bangos ilgis yra 444–444,7 nm. Diodo pluoštas fokusuotas cilindriniais lęšiais į 145x143 μm dėmę kristale. Pr:YLF lazerio spinduliuotę pavyko gauti naudojant visus skirtingus turimus išvadinius veidrodžius. Išmatuota M^2 , Θ , galia nuo rezonatoriaus ilgio ir išvadinio veidrodžio kreivumo radiuso. Didžiausia išvadinės spinduliuotės galia pasiekta naudojant – 50 mm kreivumo radiuso išvadinį veidrodį. Užfiksuota 25,5 mW galia, efektyvumas siekė 11 %, kai rezonatoriaus ilgis 42 mm. Mažiausia išvadinės spinduliuotės galia išmatuota naudojant – 25 mm kreivumo radiuso veidrodį. Užfiksuota 14 mW galia, efektyvumas siekė 6,2 %, kai rezonatoriaus ilgis 12 mm. Naudojant -75 mm, -100 mm, -150 mm kreivumo radiuso veidrodžius, didžiausia galia užfiksuota atitinkamai 24,7 mW, 23 mW, 23,8 mW. Išmatuotas termo lęšis $f_x=-1135$ mm ir $f_y=-1400$ mm. Naudojant -100 mm kreivumo radiuso išvadinį veidrodį, rezonatoriui esant 89 mm ilgiui, M^2 parametras horizontalia ašimi išmatuotas 1,06, vertikalioje 1,08. Užregistruotas spinduliuotės bangos ilgis 639,7 nm. Nustatyta, jog Pr:YLF lazeris yra horizontaliai poliarizuotas, o kontrastas siekia >100:1. Tyrimo pabaigoje pastebėta, kad kristalo danga centrinėje dalyje yra atsilupusi, tai turėjo įtakos eksperimento rezultatams.

Summary

Justas Girskis

Research of Visible Spectrum Pr:YLF Laser

SUMMARY

The aim of the research is to assemble Pr:YLF laser and find out what conditions are needed for generation of laser. Also, it is aimed to define the parameters of pump beam which generates laser emission. Hemispherical cavity configuration is used together with the plain mirror, while the active medium is positioned as close as possible to the flat mirror. In total five Pr:YLF laser configurations are used with different radius of curvature (ROC) of output couplers: -25 mm, -50 mm, -75 mm, -100 mm, -150 mm. The analysed Pr:YLF 0,6% crystal is 6 mm long, cut with A optical axis. Firstly, diode is calibrated, and analysis is done on how emission spectrum varies depending on the duty cycle.

Results of the research revealed that the process of laser generation is the most efficient when the central wavelength of pump current is 444–444,7 nm. Diode beam is focused into a waste in the crystal by using cylinder lens. Laser emission was obtained using five different output couplers: -25 mm, -50 mm, -75 mm, -100 mm, -150 mm. M^2 , divergence and laser power were measured taking into consideration in changes in optical cavity length and radius of curvature. Maximum output power was achieved when using -50 mm output coupler. With 42 mm long resonator - output power was 25,5 mW, efficiency - 11%. Minimum output power was achieved when using -25 mm ROC output coupler. With 12 mm long resonator - output power was 14 mW, efficiency – 6,2%. With -75 mm, -100 mm, -150 mm ROC output couplers, maximum output power was achieved accordingly: 24,7 mW, 23 mW, 23,8 mW. Focal length of thermal lens was measured $f_x=-1135$ mm and $f_y=-1400$ mm. M^2 parameter was measured on horizontal axis 1,06 and on vertical axis 1,08, with -100 mm ROC of output coupler and 89 mm long optical cavity. Measured laser wavelength was 639,7 nm. Results showed that Pr:YLF laser emission was horizontally polarized with a contrast bigger than 100:1. Also, after conducting the research, it was noticed that in the central part of the crystal aperture, coating was torn. It had impact on the results of the research.