

VILNIAUS UNIVERSITETAS

Darius Stučinskas

**Šiluminio lęšio charakterizavimas bei jo įtakos mažinimas
išilginio diodinio kaupinimo lazeriuose**

Daktaro disertacijos santrauka

Fizikiniai mokslai, fizika (02 P)

Vilnius, 2010

Disertacija rengta 2005-2009 metais Vilniaus universitete

Mokslinis vadovas:

Dr. Arūnas Varanavičius (Vilniaus universitetas, fiziniai mokslai, fizika – 02P)

Disertacija ginama Vilniaus universiteto Fizikos mokslo krypties taryboje:

Pirmininkas: prof. habil. dr. Algis Petras Piskarskas (Vilniaus universitetas, fiziniai mokslai, fizika –02 P)

Nariai:

prof. habil. dr. Algirdas Audzijonis (Vilniaus pedagoginis universitetas, fiziniai mokslai, fizika –02 P)

prof. habil. dr. Gintautas Jurgis Babonas (Puslaidininkų fizikos institutas, fiziniai mokslai, fizika –02 P)

dr. Gintaras Tamošauskas (Vilniaus universitetas, fiziniai mokslai, fizika –02 P)

dr. Virgilijus Vaičaitis (Vilniaus universitetas, fiziniai mokslai, fizika –02 P)

Oponentai:

dr. Rimantas Grigonis (Vilniaus universitetas, fiziniai mokslai, fizika –02 P)

dr. Edmundas Širmulis (Puslaidininkų fizikos institutas, fiziniai mokslai, fizika –02 P)

Disertacija bus ginama viešame Fizikos mokslo krypties tarybos posėdyje 2010m vasario mėn. 24 d. 15 val. Vilniaus universiteto Fizikos fakulteto 510 auditorijoje.

Adresas: Saulėtekio 9, LT – 10222, Vilnius, Lietuva.

Disertacijos santrauka išsiuntinėta 2010 m. sausio mėn. 23 d.

Disertaciją galima peržiūrėti Vilniaus universiteto ir Fizikos instituto bibliotekose.

VILNIUS UNIVERSITY

Darius Stučinskas

**Thermal lens diagnostics and mitigation in diode end
pumped lasers**

Doctoral dissertation

Physical sciences, Physics (02 P)

Vilnius, 2010

This research was performed in 2005-2009 at Vilnius University

Scientific supervisor:

Dr. Arūnas Varanavičius (Vilnius University, Physical sciences, Physics – 02P)

Doctoral committee:

Chairman:

prof. habil. dr. Algis Petras (Vilnius University, Physical sciences, Physics –02 P)

Members:

prof. habil. dr. Algirdas Audzijonis (Vilnius Pedagogical University, Physical sciences, Physics –02 P)

prof. habil. dr. Gintautas Jurgis Babonas (Semiconductor Physics Institute, Physical sciences, Physics –02 P)

dr. Gintaras Tamošauskas (Vilnius University, Physical sciences, Physics –02 P)

dr. Virgilijus Vaičaitis (Vilnius University, physical sciences, Physics –02 P)

Opponents:

dr. Rimantas Grigonis (Vilnius University, Physical sciences, Physics –02 P)

dr. Edmundas Širmulis (Semiconductor Physics Institute, Physical sciences, Physics – 02 P)

The dissertation will be defended under open consideration in the Council of physics on the 24th of February, 2010, 3 p.m. at the Faculty of Physics of Vilnius University, room 510.

Address: Saulėtekio ave. 9, LT – 10222, Vilnius Lithuania.

The Summary of the dissertation was distributed on 23th of January.

The dissertation is available at Vilnius University Library and the library of the Institute of Physics.

Įvadas

Efektyvus lazerių, kaip ir bet kurių prietaisų veikimas, yra ribojamas termo-optinių reiškinių. Dėl kaupinimo spinduliuotės ir išspinduliuojamų fotonų energijų skirtumo (kvantinio defekto), vykstant fononiniams šuoliams į žemesnius lygmenis, išsiskiria šiluma. Kristale esantys defektai, dislokacijos taip pat turi įtakos šilumos išsiskyrimui, kadangi sukuria papildomus energetinius lygmenis [1]. Susidarę termo-optiniai iškreipymai stipriai įtakoja lazerio spinduliuotės erdvines charakteristikas. Per pastaruosius keturis dešimtmečius buvo sukurta daug įvairių metodikų, skirtų šios fundamentalios problemos padarinių sušvelninimui, tačiau iki šių dienų šiluminis lęšis dauguma atvejų lieka vienu iš pagrindinių faktorių, ribojančiu lazerinių sistemų galią ir/ arba pluošto kokybę.

Didelio skaisčio diodinių kaupinimo šaltinių sukūrimas atvėrė naujas galimybes kietakūnių lazerių kūrimui. Išlydžio lempų pakeitimas lazeriniais diodais tapo tikru proveržiu didelės vidutinės galios lazerių kūrime [2,3]. Iš tikrųjų, kaupinimas tiesiogiai į sugerties juostą, lyginant su plačiajuosčiu išlydžio lempų kaupinimu, turi daugybę privalumų tokių kaip didesnis efektyvumas, konstrukcijos paprastumas, kompaktiškumas, patikimumas ir kaina [3]. Šis proveržis lazerių gamyboje sudarė sąlygas atsirasti naujoms lazerių panaudojimo sritims tiek mokslinėse srityse, tiek ir pramoniniuose taikymuose.

Pademonstruota, kad difrakciškai ribotas išvadinio pluošto erdvines charakteristikas galima pasiekti didelės vidutinės galios šviesolaidiniuose lazeriuose [4]. Pagrindinis tokių sistemų trūkumas – maža stiprinančiosios terpės apertūra ribojanti smailinę impulsų galią, kadangi netiesiniai reiškiniai ir optiniai pažeidimai pasireiškia prie sąlyginai mažų impulsų energijų [5]. Vienas iš svarbiausių žingsnių siekiant aukštesnių išvadinių galių buvo plonų diskinių lazerių sukūrimas [6]. Ši konstrukcija yra tinkama itin aukštų galių lazeriams: pademonstruota ~500 W išvadinė galia nuolatinės veikos lazeryje su vienu aktyviuoju elementu bei 1 kW su dviem aktyviaisiais elementais [7]. Didžiausia išvadinė galia pasiekta diskiniuose lazeriuose impulsiniame režime siekia 80W [8,9], kai impulsų

energija $>20 \mu\text{J}$, o impulsų trukmė sub-pikosekundžių eilės [10]. Tačiau, šio tipo lazerių konstrukcija yra sudėtinga, nes būtinas daugkartinis trumpo kristalo praėjimas, norint pasiekti aukštą efektyvumą. Tai yra pagrindinis faktorius, ribojantis diskinių lazerių paplitimą pramoniniuose taikymuose.

Išilginis kaupinimas įgalina paprastesnių, patikimesnių bei pigesnių lazerių sukūrimą, kurių optinis našumas – daugiau kaip 40% [11,12]. Ši konfigūracija itin gerai tinka sąlyginai mažų vidutinių galių lazeriams dėl gero erdvinio kaupinimo ir generacijos modų persiklojimo, kas leidžia sukurti aukšto efektyvumo ir gerų išvadinių pluošto erdvinių charakteristikų kietakūnius lazerius. Pagrindinis veiksnys, ribojantis maksimalią išvadinę išilginio diodinio kaupinimo lazerių galią yra šilumos išsiskyrimas mažame kristalo tūryje, dėl kurio atsiranda erdviniai temperatūros gradientai, vidiniai įtempimai aktyviajame elemente ir kristalo galų išsigaubimas [13]. Dėl aktyviajame elemente indukuoto šiluminio lęšio atsiranda spinduliuotės iškraipymai, depoliarizaciniai nuostoliai dėl įtempimų sukkelto dvejojo lūžio. Kritiniu atveju, kai įtempimai viršija kristalo tempimo stiprumo ribą, kristalas sutrūksta.

Šiai dienai sukurta daug skirtingų metodų skirtų šiluminio lęšio kompensavimui: a) pasinaudojant bangos fronto apgrąža priverstinės Briujeno sklaidos metu [14,15], b) rezonatoriuje patalpinant medžiagas su neigiamu dn/dT [16], c) adaptyvūs veidrodžiai [16], d) veidrodžiai, kurių kreivumas valdomas šiluma [17,18], e) asferiniai optiniai komponentai [19]. Tačiau nei vienas išvardintų metodų nelaikomas „standartiniu“, skirtu šiluminio lęšio įtakai sumažinti. Kuriant didelės vidutinės galios ir/ arba aukštų spinduliuotės erdvinių parametrų lazerius, kiekvienu atveju tenka iš naujo įvertinti šiluminius reiškinius.

Šiluminiai reiškiniai lazerių aktyviuosiuose elementuose gali būti įvertinti atliekant modeliavimą [20,21,22,23] su tam tikromis kraštinėmis sąlygomis, atsižvelgiant į kristalo geometriją, šaldymo geometriją, kaupinimo profilį. Tačiau kartais vien matematinių modeliavimų nepakanka. Pavyzdžiui iterbiu legiruotiems KGW ir KYW kristalams [24] turime žinoti ne mažiau kaip 36 koeficientus, kad galėtume apskaičiuoti lūžio rodiklio

elipsoidą duotajame kristalo taške. Deja, dauguma šių koeficientų nėra žinomi, taigi, net pasitelkus sudėtingus baigtinių elementų skaičiavimo algoritmus matematinis modeliavimas neleidžia nustatyti tikslų šiluminio lęšio parametrų, todėl eksperimentiniai šiluminio lęšio matavimai išlieka labai svarbūs.

Šiluminio lęšio matavimai lazeriuose su Nd:YAG aktyviaisiais elementais buvo atlikti skirtingose konfigūracijose bei aprašomi daugelyje darbų [25,26,27,28], tačiau per du paskutinius dešimtmečius publikuota vos keletas darbų, aprašančių šiluminio lęšio matavimus Yb:KGW arba Yb:KYW, medžiagose kurios yra dažniausiai sutinkamos kietakūniuose femtosekundiniuose lazeriuose [29,30]. Kituose darbuose, susijusiuose su šiluminiais reiškiniais Yb:KGW pateikiami netiesioginiais būdais nustatyti šiluminio lęšio stipriai [12,31].

Šios disertacijos **tikslas** – didelio tikslumo matuoklio, skirto šiluminio lęšio lazerių aktyviuosiuose elementuose matavimams sukūrimas bei įvairių metodų, skirtų šiluminio lęšio įtakos mažinimui, tyrimas. Pagrindinį dėmesį skyrėme metodams, kurie būtų tinkami kuriant pramonei skirtas lazerines sistemas, pasižyminčias paprastumu, kompaktiškumu bei ilgalaikio darbo patikimumu.

Siekiant šio tikslo įgyvendinimo, buvo iškeltos **užduotys**:

- Sukonstruoti Shack'o ir Harmann'o bangos fronto matuoklį, pritaikytą šiluminio lęšio matavimams išilginio diodinio kaupinimo lazeriuose.
- Eksperimentiškai ištirti naujos konstrukcijos šiluminio lęšio aberacijos kompensatorių, pagamintą pasitelkiant plonasienių dangų užgarinimo technologiją.
- Ištirti šiluminį lęšį lazeryje su eliptine kaupinimo ir generacijos moda.
- Eksperimentiškai ištirti šiluminį lęšį skirtingos orientacijos Yb:KGW aktyviuosiuose elementuose, siekiant rasti tinkamiausią orientaciją didelės vidutinės galios femtosekundinių lazerių kūrimui.
- Ištirti Yb:KGW lazerio galios didinimo galimybes panaudojant 2 aktyviuosius elementus rezonatoriuje.

Šio **darbo naujumą** patvirtina tai, kad:

- Pirmą kartą pademonstruotas šiluminio lęšio aberacijos kompensatorius, pagamintas pasitelkiant plonasienių dangų užgarinimo technologiją. Taip pat pademonstruota, kad tokios konstrukcijos kompensatorius pagerina lazerio erdvines charakteristikas plačiame kaupinimo galių diapazone.
- Pirmą kartą pademonstruoti šiluminio lęšio matavimų rezultatai Yb:LAG lazeryje su eliptine moda.
- Įvertinta kristalo galų išsigaubimo įtaka N_g orientacijos Yb:KGW aktyviuosiuose elementuose, taip pat tirtas šiluminis lęšis $\angle z:N_g=44^\circ$ „atermalinės“ orientacijos Yb:KGW kristaluose. Šie duomenys buvo publikuoti pirmą kartą. Taip pat, pirmą kartą pademonstruoti šiluminio lęšio matavimo rezultatai Yb:KGW lazeryuose aukštesnėms negu 10W kaupinimo galioms (maksimali kaupinimo galia – 100W).
- Pademonstruota didžiausia išvadinė galia pasiekta Yb:KGW lazeryje su dviem plokštelės formos aktyviaisiais elementais.

Disertacijos **ginamieji teiginiai**:

1. Šiluminio lęšio kompensatoriaus, pagaminto plonasienių dangų užgarinimo būdu, panaudojimas leidžia iki 70% sumažinti lazerio generacijos slenkstį bei tuo pačiu iki 25% pagerinant pluošto kokybės parametą M^2 plačiame kaupinimo galių diapazone.
2. Eliptinės modos panaudojimas ultratrumpųjų impulsų lazeryuose leidžia kelis kartus padidinti išvadinė impulsų energiją, tuo pačiu išlaikant pluošto kokybės parametą M^2 artimą 1.
3. Nepaisant didesnio šiluminio lęšio, negu atermaliniuose kristaluose, N_g orientacijos Yb:KGW kristalas pasižymi patraukliausiu termo-optinių bei optinių savybių rinkiniu, įgalinančiu ultratrumpųjų lazerinių impulsų sistemų, pasižyminčių geromis erdvinėmis pluošto charakteristikomis esant didelėms išvadinėms galioms, sukūrimą.
4. Išvadinė Yb:KGW lazerio galia gali būti praktiškai padvigubinta panaudojant simetrišką rezonatorių su dviem aktyviaisiais elementais. Tokiu būdu pasiekėme

didžiausią išvadinę galią pademonstruotą Yb:KGW lazeriais, siekiančią 44 W, išlaikant geras pluošto erdvines charakteristikas.

Disertacijos apimtis – 94 puslapiai. Joje yra 62 iliustracijos. Disertacija suskirstyta į tokias sudedamąsias dalis: įvadas, literatūros apžvalga, darbo metodika, keturios dalys aprašančios gautuosius rezultatus, išvados ir literatūros, kuria buvo naudotasi, sąrašas. Pirmajame skyriuje apžvelgiamos šiluminio lęšio atsiradimo priežastys bei pateikiama trumpa matavimo metodikų apžvalga. Antrajame skyriuje aprašomas eksperimentinis Shack'o ir Hartmann'o bangos fronto matuoklis naudotas šiluminio lęšio matavimuose. Trečiajame skyriuje pateikiami šiluminio lęšio kompensavimo rezultatai didelės vidutinės galios Nd:YVO₄ lazeryje. Kompensatorius buvo pagamintas plonasienių dangų užgarinimo būdu, remiantis šiluminio lęšio aberacijų matavimais lazerio aktyviajame elemente. Ketvirtajame skyriuje pateikiami Yb:LAG lazerio su eliptine moda tyrimo rezultatai. Matematinis lazerio rezonatoriaus modeliavimas buvo atliekamas remiantis astigmatiško šiluminio lęšio matavimais. Taip pat pateikiami išvadiniai lazerio parametrai nuolatinės veikos bei moduluotos kokybės režimuose. Penktajame skyriuje lyginami dviejų skirtingų orientacijų Yb:KGW kristalai. Pateikiamos šiluminio lęšio stiprio vertės N_g ir „atermalinės“ orientacijos kristaluose, palyginamas lazerių efektyvumas bei išvadinių pluoštų erdviniai skirstiniai. Pateikiami lazerio aktyviojo elemento galų išsigaubimo įtakos suminiam šiluminiam lęšiui N_g orientacijos kristale įvertinimai. Šeštajame skyriuje aprašomi vidutinės galios didinimo rezultatai gauti tiriant simetrišką rezonatorių su dviem Yb:KGW aktyviaisiais elementais.

Asmeninis autoriaus indėlis:

- Shack'o ir Hartmann'o bangos fronto matuoklio pritaikymas šiluminio lęšio matavimams išilginio diodinio kaupinimo lazeriuose. Autorius parašė MatLab programos aplinkoje veikiantį algoritmą, skirtą bangos fronto pokyčio matavimams;
- Šiluminio lęšio ir lazerio parametrų matavimas;
- Gautųjų duomenų analizė, interpretavimas bei viešinimas.

Pagrindiniai disertacijoje aprašytų mokslinių tyrimų bendraautorai yra:

Dr. A. Varanavičius, R. Antipenkov, M. Grishin, J.Kodz , A. Melninkaitis ir A. Vanagas.

Dr. Arūnas Varanavičius – laboratorijos vedėjas, kuris iš vykdomų projektų biudžeto finansavo didžiosios dalies prietaisų ir medžiagų reikalingų atliktiems tyrimams, įsigijimą. Jis dalyvavo formuluojant užduotis, interpretuojant ir pristatant gautus duomenis.

Romanas Antipenkov dalyvavo ir padėjo atliekant bei interpretuojant didžiąją dalį matavimų. Jis prisidėjo sukurdamas grafinę vartotojo sąsają Shack'o ir Hartmann'o bangos fronto matuokliui. Jis parašė algoritmus, supaprastinusius išmatuotų bangos frontų analizę. *Romanas Antipenkov* atliko eksperimentus moduliuotos kokybės ir femtosekundinių impulsų stiprinimo režimuose aprašytus [A1].

Michail Grišin padėjo surenkant įrangą, būtiną atlikti eksperimentams aprašytiems [A4, C7]. Jis taip pat prisidėjo vertingomis mintimis ir patarimais susijusiais su šiluminio lęšio matavimais ir rezultatų interpretavimu.

Jaroslavas Kodz padėjo atliekant dalį eksperimentų, aprašytų [A4, C7].

Andrius Melninkaitis ir *Andrius Vanagas* atliko kompensatorių profilio matavimus, aprašytus [A4, C7].

Darbo aprobacija:

Autorius iš viso publikavo 4 straipsnius periodinėje mokslinėje spaudoje [A1-A4]. Taip pat paruošė 7 pranešimus įvairiose konferencijose [C1-C7].

Publikacijos:

[A1] D. Stučinskas, R. Antipenkov, and A. Varanavičius “30 W dual active element Yb:KGW regenerative amplifier for amplification of sub - 500fs pulses”, Proc. SPIE **6731**, 67312Y (2007).

[A2] R. Antipenkov, D. Stučinskas, and A. Varanavičius “~5 W output power Q-switched Yb:YAG laser with elliptical mode geometry”, Proc. SPIE **6731**, 67312Z (2007).

[A3] R. Antipenkov, D. Stučinskas, and A. Varanavičius “CW and Q-switched performance of end-pumped Yb:YAG laser with elliptical mode geometry”, Lithuanian Journal of Physics, Vol. **49**, No. 2, pp. 163-170 (2009).

[A4] D. Stučinskas, R. Antipenkov, A. Varanavičius M. Grishin, J.Kodz , A. Melninkaitis and A. Vanagas “Thermal lens compensation in high average power diode pumped Nd:YVO₄ laser using aspheric optical element”, Lithuanian Journal of Physics, Vol. **49**, No. 4, pp. 433-438 (2009).

Recenzuojamos publikacijos:

[B1] D. Stučinskas, R. Antipenkov, A. Varanavičius “Thermal lensing in high-power diode-pumped Yb:KGW laser”, Lithuanian Journal of Physics

Pranešimai konferencijose:

[C1] R. Antipenkov, D. Stučinskas, A. Varanavičius, “5 W Output Power Q-Switched Yb:YAG. Laser With Elliptical Mode Geometry”, ICONO/LAT 2007 conference, Minsk, (2007).

[C2] D. Stučinskas , R. Antipenkov, and A. Varanavičius “30 W dual active element Yb:KGW regenerative amplifier for amplification of sub - 500fs pulses”, ICONO/LAT 2007 conference, Minsk, (2007).

[C3] R. Antipenkov, D. Stučinskas, L. Giniūnas, S. Jacinavičius, “Termolėšis ir jo aberacijos išilginio diodinio kaupinimo Nd:YVO₄ Lazeryje”, LNFK 36, Vilnius, (2005).

[C4] D. Stučinskas, R. Antipenkov, A. Varanavičius, “Didelės vidutinės galios Yb:KGW regeneratyvinis stiprintuvas femtosekundinių impulsų stiprinimui”, LNFK 37, Vilnius, (2007).

[C5] R. Antipenkov, D. Stučinskas, A. Varanavičius, “Išilginio diodinio kaupinamo elipsinės modos Yb:YAG lazeris”, LNFK 37, Vilnius, (2007).

[C6] D. Stučinskas, R. Antipenkov, A. Varanavičius, “Termolėšio tyrimas diodinio kaupinimo Yb:KGW lazeriuose su skirtingos optinės orientacijos aktyviaisiais elementais”, LNFK 38, Vilnius, (2009).

[C7] D. Stučinskas, A. Varanavičius, M. Grishin, J. Kodz , A. Melninkaitis, A. Vanagas, “Termolėšio kompensavimas diodinio kaupinimo didelės vidutinės galios Nd:YVO4 lazeryje”, LNFK 38, Vilnius, (2009).

1. Šiluminio lęšio susidarymo priežastys ir jo matavimo metodika

Skyriai, kurie apima pirmąją dalį, sudaryti iš dviejų poskyrių. Pirmajame aprašomos fundamentalios šiluminio lęšio atsiradimo priežastys. Taip pat aprašoma šiluminių gradientų specifika išilginio diodinio kaupinimo lazeriuose bei šiluminio lęšio aberacijų atsiradimo priežastys. Didžioji šilumos dalis išsiskiria dėl kvantinio defekto - sugerto ir priverstinai išspinduliuoto fotono energijos neatitikimo. Kristale esantys defektai, dislokacijos taip pat turi įtakos šilumos išsiskyrimui, kadangi sukuria papildomus energetinius lygmenis, per kuriuos vyksta nespindulinė relaksacija [28]. Dėl kristale išsiskiriančios šilumos, atsiranda šiluminiai gradientai, kuriuos galima aprašyti šia priklausomybe [13]:

$$T(r) = T(r_0) + \left(\frac{Q}{4T} \right) (r_0^2 - r^2) \quad (1.1)$$

Kur Q - šilumos išsiskyrimo sparta tūrio vienetui, r_0 - strypo spindulys bei $T(r_0)$ - temperatūra strypo paviršiuje. Iš (1.1) lygties matome, kad temperatūros pasiskirstymas - parabolinis, o aukščiausia temperatūra strypo centre. Temperatūros pasiskirstymas strypo viduje nepriklauso nuo temperatūros strypo paviršiuje $T(r_0)$. Dėl medžiagos lūžio rodiklio priklausomybės nuo temperatūros (dn/dT parametro) pasikeičia medžiagos optinės savybės. Parabolinis lūžio rodiklio pasiskirstymas medžiagoje gali būti nagrinėjamas kaip sferinis lęšis, kurio židinio nuotolis bei ženklas priklauso nuo medžiagos fizikinių savybių. Dėl atsiradusio temperatūrų gradiento aktyviame elemente atsiranda įtempimai, kuomet įkaitusi sritis plečiasi sparčiau negu žemesnę temperatūrą turinčios kristalo sritys. Šie įtempimai taip pat įtakoja šiluminio lęšio susidarymą. Dėl šiluminio plėtimosi gali pasikeisti aktyvaus elemento galų forma, t. y. prieš tai buvęs plokščias paviršius gali išsigaubti. Medžiagos lūžio rodiklis taip pat priklauso nuo įtempimų. Ši priklausomybė vadinama fotoelastiniu reiškiniu. Deja, jo poveikis yra sudėtingai skaičiuojamas, kadangi reikia įvertinti tai, jog šiluminiai įtempimai kiekviename aktyvaus elemento taške yra tenzoriniai dydžiai [13]. Apibendrintą šiluminio lęšio išraišką galime užrašyti:

$$f = \frac{KA}{P_a} \left(\frac{1}{2} \frac{dn}{dT} + \alpha C_{r,\phi} n_0^3 + \frac{\alpha r_0 (n_0 - 1)}{L} \right)^{-1} \quad (1.2)$$

Čia f – šiluminio lęšio židinio nuotolis, A – strypo skerspjūvio plotas, P_a – strype išsiskirianti šiluma, $C_{r,\phi}$ - fotoelastinis koeficientas, α – šiluminio plėtimosi koeficientas, L – strypo ilgis, K – šiluminis laidumas. Šiluminio lęšio formulėje (1.2) galime išskirti tris narius – pirmasis, priklauso nuo dn/dT , antrasis narys priklauso nuo įtempimų sukeltų lūžio rodiklio pokyčių kristale, ir trečiasis - kristalo galų išsigaubimas. Šią šiluminio lęšio išraišką galime taikyti tik idealiu atveju - tai yra kai šilumos išsiskyrimas ir kristalo šaldymas tolygūs, tačiau praktikoje šios sąlygos negali būti patenkinamos. Lokalizotas šilumos išsiskyrimas veda prie stipriai nehomogeniško ir sudėtingo temperatūros bei įtempimų pasiskirstymo aktyviojo lazerio elemento viduje, o taip pat įtakoja šiluminio lęšio aberacijų atsiradimą. Šiluminio lęšio, neturinčio aberacijų, įtaka gali būti nesunkiai sumažinta, parenkant tinkamą rezonatoriaus konfigūraciją bei sferinių elementų parametrus. Šiluminio lęšio aberacijos įneša difrakcinius nuostolius, mažina išvadinio pluošto kokybę jį iškraipydamos [32]. Šiai dienai publikuota nemažai darbų, susijusių su šiluminių reiškinių lazerių aktyviuosiuose elementuose skaitmeniniais modeliavimais [20,21,22,23], su tam tikromis kraštinėmis sąlygomis, atsižvelgiant į kristalo geometriją, šaldymo geometriją bei kaupinimo profilį. Tačiau kartais vien matematinių modeliavimų nepakanka. Pavyzdžiui iterbiu legiruotiems KGW ir KYW kristalams [24] turime žinoti ne mažiau kaip 36 koeficientus, kad galėtume apskaičiuoti lūžio rodiklio elipsoidą duotajame kristalo taške. Deja, dauguma šių koeficientų nėra žinomi, taigi net pasitelkus sudėtingus baigtinių elementų skaičiavimo algoritmus matematinis modeliavimas šiai dienai yra neįmanomas. Šis pavyzdys parodo eksperimentinių šiluminio lęšio matavimų svarbą.

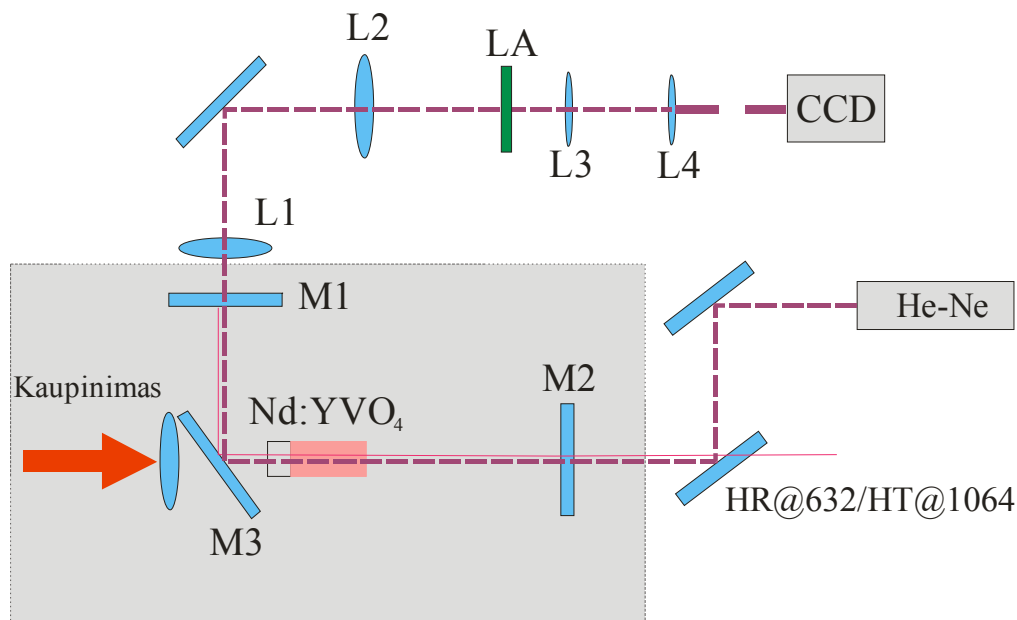
Antroje dalyje trumpai apžvelgiamos šiluminio lęšio matavimo metodikos. Vieni paprasčiausių šiluminio lęšio matavimo metodų – geometriniai, kuomet židinio nuotolis nustatomas randant besifokusuojančio zonduojančio pluošto sąsmauką [33]. Šis metodas yra tik apytikslis, nes neleidžia nustatyti šiluminio lęšio aberacijų. Šio metodo atmaina – šiluminio lęšio skersinis zondavimas mažų matmenų pluošteliu [34]. Šis

metodas gali būti laikomas taškiniu Shack'o ir Hartmann'o matuoklio analogu. Vienas netiesioginių šiluminio lęšio matavimo būdų – panaudojant lazerio stabilumo zonas. Keičiant rezonatoriaus ilgį, randamas lazerio stabilumo riba. Lyginant eksperimentinius duomenis, su rezonatoriaus modeliavimo duomenimis, apytiksliai nustatomas šiluminio lęšio židinio nuotolis [35,36]. Šio metodo paklaida siekia 15% kai lazeris generuoja TEM₀₀ modą, tačiau kitais atvejais gali siekti net 60% [36]. Klasikiniai interferometrai (pvz. Mikelsono arba Mach'o Zehnder'io) taip pat buvo panaudoti šiluminio lęšio matavimams [37,38]. Tačiau šie interferometrai sunkiai pritaikomi matavimams išilginio diodinio kaupinimo lazeriuose. Dėl mažų šiluminio lęšio matmenų ir mažų fazės pokyčių, jo parametrai turi būti nustatyti iš vos keleto interferencinių juostų [39]. Šie trūkumai pašalinti poslinkio interferometruose. Šio tipo interferometrai nesunkiai pritaikomi šiluminio lęšio matavimams išilginio diodinio kaupinimo lazeriuose [40] dėl aukšto tikslumo, kuris siekia $\lambda/50$ [41], o kai kuriais atvejais net $\lambda/200$ [42]. Ko gero stipriausias poslinkio interferometro konkurentas - Shack'o ir Hartmann'o (toliau S-H) bangos fronto matuoklis [43]. Lyginant su interferometriniams bangos fronto matuokliams, S-H matuoklio esminis trūkumas – mažas bangos fronto taškų skaičius. Šis trūkumas iš dalies pašalinamas matematinių algoritmų pagalba interpoliuojant tarpines vertes. Bangos fronto matavimo tikslumu S-H matuoklis nenusileidžia interferometriniams matuokliams. Buvo atliktas palyginamasis darbas lyginant S-H ir Twyman'o ir Green'o interferometrą [44]. Abiem atvejais buvo matuojamas atspindys nuo žinomo kreivumo radiuso sferinio paviršiaus. Abiejų matavimų rezultatai buvo labai artimi, ir kvadratinis nuokrypis siekė $\sim\lambda/1000$. Didžiąja dalimi interferometrinio matavimo paklaidą įtakojo interferencinių juostų padėties/ formos nustatymo paklaida, ieškant aukščiausių/ žemiausių verčių. Kita vertus S-H matuoklio paklaidą didžiąja dalimi nulėmė mažas bangos fronto taškų skaičius ir fronto atstatymo algoritmas [44].

Lyginant S-H ir poslinkio interferometrą buvo nustatyta, kad esant geram apšviestumui ir išnaudojant beveik visą CCD dinaminį diapazoną, tiek S-H, tiek poslinkio interferometro rezultatai labai artimi [45], tačiau sumažėjus apšviestumo intensyvumui, smarkiai išauga interferometrinio matuoklio daromų klaidų skaičius.

2. Shack'o ir Hartmann'o bangos fronto matuoklis mažų matmenų šiluminio lęšio charakterizavimui

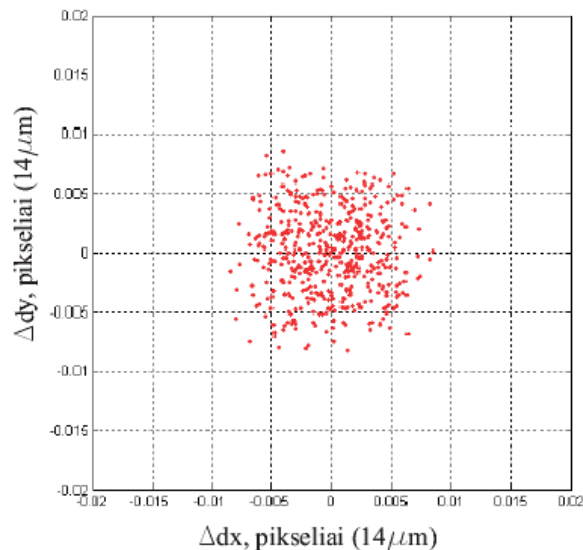
Darbo metu surinktame sensoriuje naudojama 4.607mm židinio nuotolio mikrolęšių matrica (gamintojas WaveFront Sciences). Atstumas tarp lęšių centrų 108 μm . Ši lęšių matrica pagaminta fotolitografiniu būdu. Matricos matmenys 9*11mm (~80*100 lęšiukų). Matavimams pasirinkta Dalsa SMD-1M15 CCD kamera, dėl gero signalas/triukšmas santykio (1:3000), didelio matuoklio ploto (14x14 mm) bei patogaus kameros valdymo. Pikselio dydis – 14x14 μm , rezoliucija – 1024x1024. Kamera jautri 350-1100 nm bangos ilgių diapazone. Zondavimui naudojamas 5 mW He-Ne lazeris, bangos ilgis – 632 nm. Sukonstruoto šiluminio lęšio matavimo Shack'o ir Hartmann'o bangos fronto matuoklio schema pateikiama 2.1 pav. Kristalo išvadinis paviršius atvaizduojamas į lęšiukų matricą 4f sistemos pagalba (lęšiai L1 ir L2). Šios sistemos didinimas parenkamas atsižvelgiant į matuojamo šiluminio lęšio dydį.



2.1 pav. Šiluminio lęšio matavimo Shack'o ir Hartmann'o bangos fronto matuokliu schema. M1-M3 rezonatoriaus veidrodžiai, M2 – išvadinis lazerio veidrodis. LA – lęšiukų matrica, L1 ir L2 yra pirmosios 4f sistemos lęšiai, kuri skirta su didinimu atvaizduoti kristalo išvadinį paviršius į lęšiukų matricą. L3 ir L4 yra antrosios 4f sistemos lęšiai, skirti su didinimu atvaizduoti lęšiukų matricos židinio plokštumą į CCD kamerą.

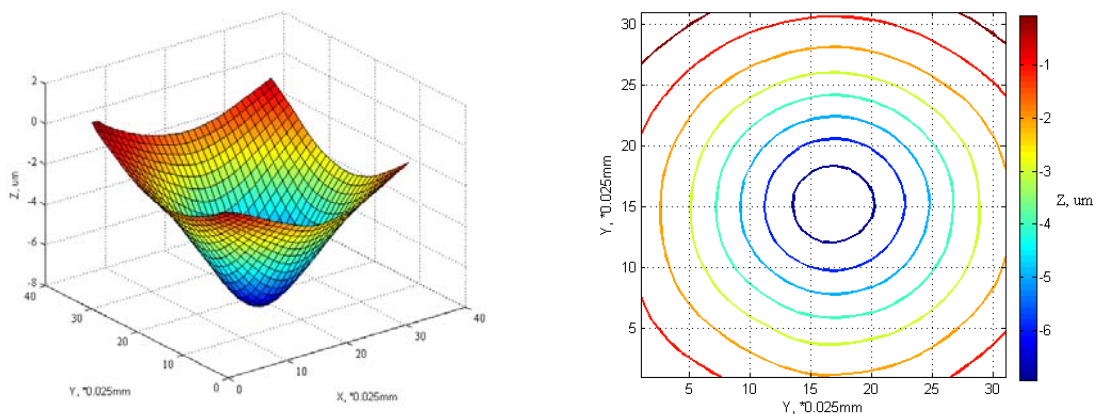
Darbo metu bangos fronto matuoklis buvo papildytas didinančia 4f atvaizdavimo sistema. Kadangi lęšiukų matricos periodo ir CCD matricos pikselio dydžio santykis $\sim 7,7$, vienai dėmelei tektų apytiksliai 2-3 pikseliai. Padidinus lęšiukų matricos židinyje esantį vaizdą 2-3 kartus gerokai padidėja matuoklio jautrumas, kadangi kiekvienai atskirai dėmelei tenka daugiau CCD matricos pikselių.

Ko gero svarbiausia matuoklio dalis – programinė įranga. Nuo jos priklauso matuoklio veikimo tikslumas, patikimumas bei sparta. Darbo metu sukurta bangos fronto matavimo programa, veikianti MatLab aplinkoje. Viena svarbiausių programos užduočių – difrakcinių dėmelių centrų paieška. Dėmelės centro koordinatės x ir y kryptimi ieškomos atskirai, randant maksimumą. Kad padidinti tikslumą, maksimumo ieškoma imant eilutę, kurioje yra maksimumas, ir keletą greta esančių eilučių. Tokiu būdu randama keletas maksimumų, po to apskaičiuojamas jų aritmetinis vidurkis. Siekiant padidinti taškų skaičių, kiekvienoje eilutėje, kurioje ieškoma maksimumo, interpoliuojama daugiau taškų. Bandymai parodė, kad Spline algoritmas labai gerai atstato tolygiai kintančias funkcijas, kai turima mažai žinomų taškų. Ieškant dėmelės centro keliose eilutėse, su interpoliuotais taškais, ir suvidurkinus gautą rezultatą, gaunamas koordinatės centro nustatymas su 1/100 pikselio tikslumu (2.2 pav.).



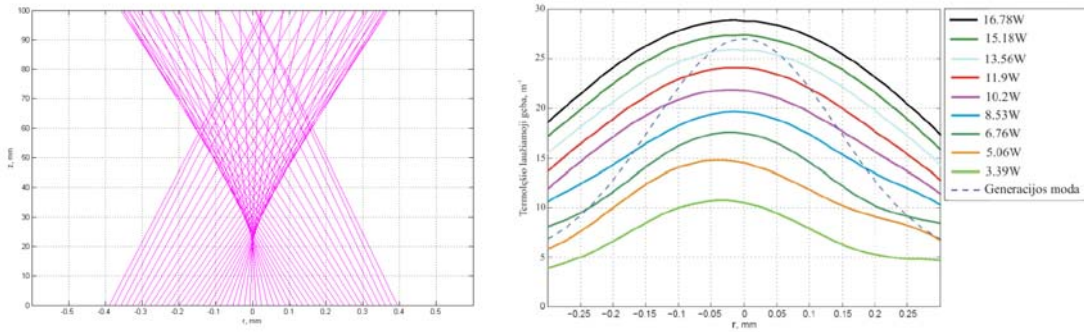
2.2 pav. Dėmelės centro radimo paklaida. Raudoni taškai žymi surastą dėmelės padėtį (taškas (0,0) atitinka tikrąją).

Centrų nustatymo algoritmas buvo patikrintas matuojant „bandomąsias“ dėmeles, kurios buvo sugeneruotos pagal difrakcinės dėmelės intensyvumo pasiskirstymo funkciją. Siekiant kad sugeneruotos dėmelės būtų kaip galima artimesnės toms, kokios gaunamas matavimų metu, pridamas triukšmas, kelis kartus didesnis negu kameros signalas/ triukšmas santykis. Bangos fronto atstatymui naudojamas Southwell rekonstrukcijos algoritmas [46]. Išmatuotas bangos frontas pavaizduotas 2.3 paveiksle. Dešinėje paveikslo dalyje pavaizduoti bangos fronto pjūviai x-y plokštumoje, iš kurių matome, kad išmatuotas šiluminis lęšis – simetriškas.



2.3 pav. Skaitmeniniu algoritmu atkurtas bangos fronto pokytis, išmatuotas zondojuojančiam pluošteliiui praėjus kaupinamą Nd:YVO₄ strypą (kaupinimo galia 17W).

Tam, kad įvertinti šiluminio lęšio parametrus, matavimų duomenys apdorojami pagalbinėmis programomis. Išmatuotų bangos frontų pjūviai interpoliuojami polinomu, tokiu būdu padidinant taškų skaičių. Spindulių sklidimo kryptis kiekviename bangos fronto taške nustatoma pagal fronto pokrypį. Apskaičiavus spindulių sklidimo kryptį nustatomas šiluminio lęšio židinio nuotolis, kuris pateikiamas 2.4a pav. Tam, kad palengvinti rezultatų interpretavimą, nubrėžiama šiluminio lęšio židinio nuotolio priklausomybė nuo skersinės koordinatės, kuri pavaizduota 2.4b pav.



2.4 pav. a) Zonduojančio pluošto spindulių sklaidimas už šiluminio lęšio, b) šiluminio lęšio laužiamosios gebos priklausomybė nuo skersinės koordinatės, esant skirtingai kaupinimo galiai (kaupinimas 17W).

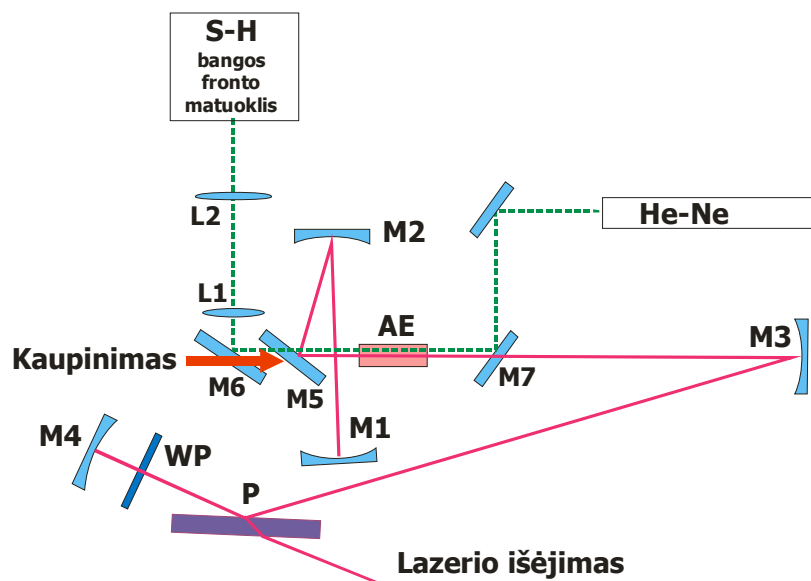
3. Šiluminio lęšio kompensavimas asferiniu veidrodžiu diodinio kaupinimo didelės vidutinės galios Nd:YVO₄ lazeryje

Didelės vidutinės galios pikosekundiniai lazeriai yra labai perspektyvūs taikymams tokiose industrinėse srityse kaip lazerinis mikro-apdirbimas [47,48,49], tikslių kiaurymių gręžimas kuro purkštukams [50], lazeriniams procesams saulės elementų gamyboje [51]. Šiems taikymams reikalingi galingi, didelio pasikartojimo dažnio lazeriai, pasižymintys geromis erdvinėmis pluošto charakteristikomis. Kuriant tokius lazerius, neišvengiamai susiduriama su šiluminiu lęšiu bei jo aberacijomis.

Šiai dienai pademonstruota daug skirtingų metodų skirtų šiluminio lęšio kompensavimui: a) pasinaudojant bangos fronto apgrąža priverstinės Briujeno sklaidos metu [14,15], b) rezonatoriuje patalpinant medžiagas su neigiamu dn/dT [16], c) adaptyvūs veidrodžiai [16], d) veidrodžiai, kurių kreivumas valdomas šiluma [17,18], e) asferiniai optiniai komponentai [19]. Kuriant lazerius skirtus pramonei, itin svarbu pasirinkti paprastą ir patikimą būdą sumažinanti šiluminio lęšio įtaką, todėl atliekant šį darbą, buvo pasirinkta statinio šiluminio lęšio aberacijos kompensatoriaus koncepcija. Nusprendėme išmėginti naujos konstrukcijos aberacijos kompensatorius, pagamintus plonasienių dangų užgarinimo metodu.

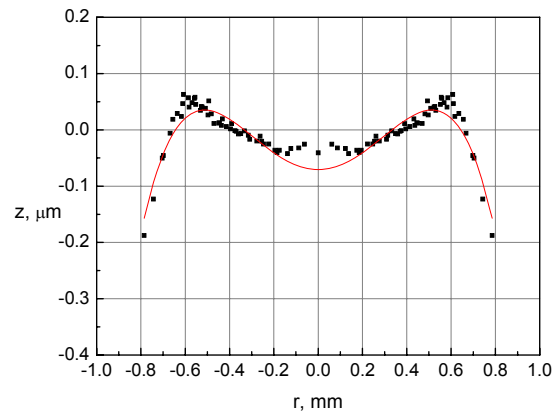
Matavimai buvo atliekami lazeryje, savo rezonatoriaus konstrukcija analogiškame lazerinės sistemos PL10100 (UAB „Ekspla“) regeneratyviam stiprintuvui. PL10100 pasižymi aukšta 10ps impulsų energija (iki 200 μ J), geru pluošto kokybės parametru $M^2 < 1.5$ ir aukštu pasikartojimo dažniu (iki 100 kHz)[52]. Tačiau, šio lazerio parametrai buvo optimizuojami maksimaliai išvadinei galiai, ko pasėkoje generacijos slenkstis – aukštas, o pluošto kokybės parametras padidėja, prie mažesnių kaupinimo galių.

Siekiant suprojektuoti tinkamą šiluminio lęšio aberacijos kompensatorių buvo atlikti šiluminio lęšio matavimai esant aukščiausiai kaupinimo galiai. Eksperimentinė šiluminio lęšio matavimo schema pateikiama 3.1 paveiksle. Lazeryje naudojamas 14 mm ilgio Nd:YVO₄ aktyvusis elementas (AE), kurio legiravimo koncentracija - 0.3%. Naudotas kristalas kompozicinis, jo galuose priaugintos neligeruotos sritys, kurių ilgis po 3mm. Kristalo apertūra - 3x3mm. Kristalas kaupinamas iš dviejų pusių, šviesolaidiniais kaupinimo moduliais.



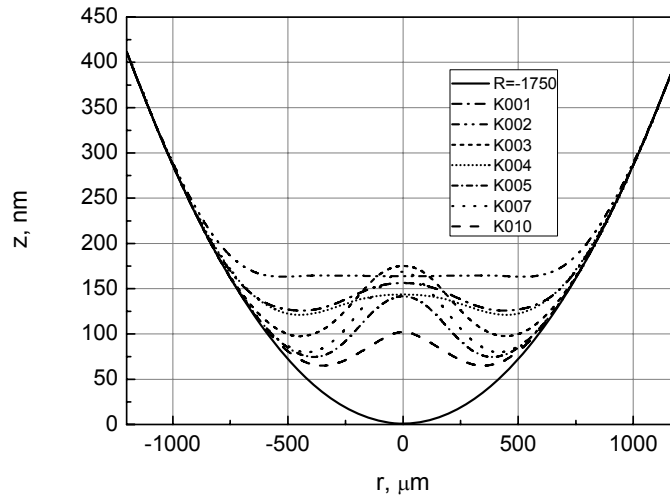
3.1 pav. Šiluminio lęšio matavimo lazeryje aktyviajame elemente Shack'o ir Hartmann'o bangos fronto matuokliu schema. M1, M2, M3 ir M4 – rezonatoriaus veidrodžiai (M1=-1275 mm, M2 – R=4000 mm, M3 – R=-340 mm, M4 – R=-333 mm), P – poliarizatorius, WP – $\lambda/4$ banginė plokštelė, M5 – kaupinimo įvadinis veidrodis, M6 ir M7 – HT@1064 HR@632 veidrodžiai, skirti zondojančio spindulio įvedimui/išvedimui iš lazerio rezonatoriaus. L1 ir L2 yra 4f sistemos lęšiai, atvaizduojantys kristalo išvadinį paviršių į S-H matuoklio įėjimą.

Šiluminio lęšio matavimus atlikome S-H matuokliu, aprašytu antrajame skyriuje. Išmatavome, kad esant maksimaliai kaupinimo galiai, šiluminio lęšio židinio nuotolis siekė 230mm. Iš išmatuoto bangos fronto, atėmę sferinę dalį, atitinkančia $r=230$ mm apskaičiavome šiluminio lęšio aberaciją, kurios pjūvis pateiktas 3.2 paveiksle. Taškai žymi išmatuotus taškus, ištisinė linija atitinka Zernike polinomą, aprašantį sferinę aberaciją.



3.2 pav. Išmatuota šiluminio lęšio aberacija (Taškai žymi išmatuotus taškus, ištisinė linija atitinka Zernike polinomą, aprašantį sferinę aberaciją).

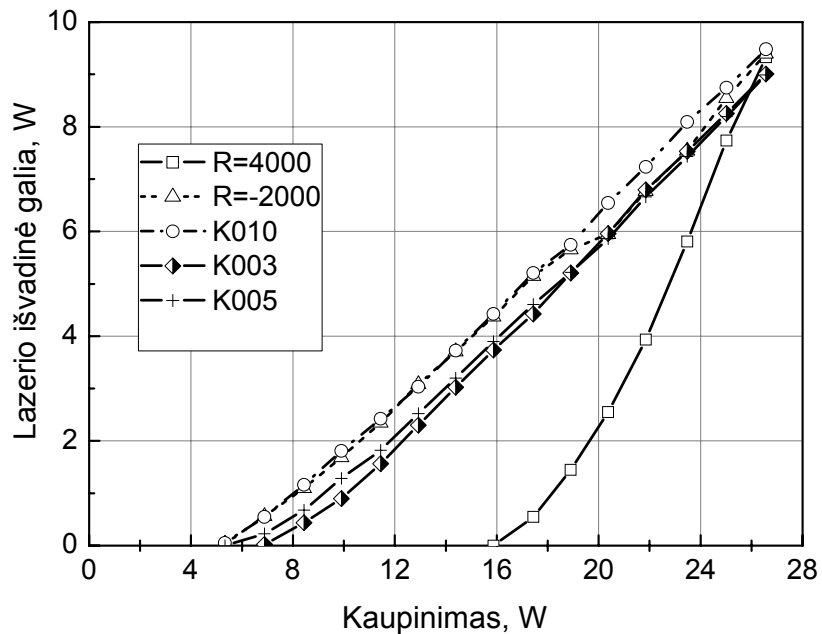
Tam, kad gauti profilį reikalingą sferinės aberacijos kompensavimui, Gauso formos kalvelės buvo užgarinamos ant įgaubto ($R=-1750$ mm) BK7 pagrindėlio (analogiška technologija naudojama gaminant Gausinius veidrodžius). Iš viso buvo pagaminta 10 kompensatorių tarpusavyje besiskiriančių užgarintos kalvelės parametrais – aukščiu ir pločiu. Visi kompensatoriai buvo padengti aukšto atspindžio danga, optimizuota $\lambda = 1064$ nm bangos ilgiui. Išmatuoti pagamintų kompensatorių skerspjūviai pateikiami 3.3 paveiksle. Mūsų vertinimais, kompensatorius K010 geriausiai atitinka išmatuotą šiluminio lęšio aberaciją.



3.3 pav. Išmatuotų kompensatorių skerspjūviai.

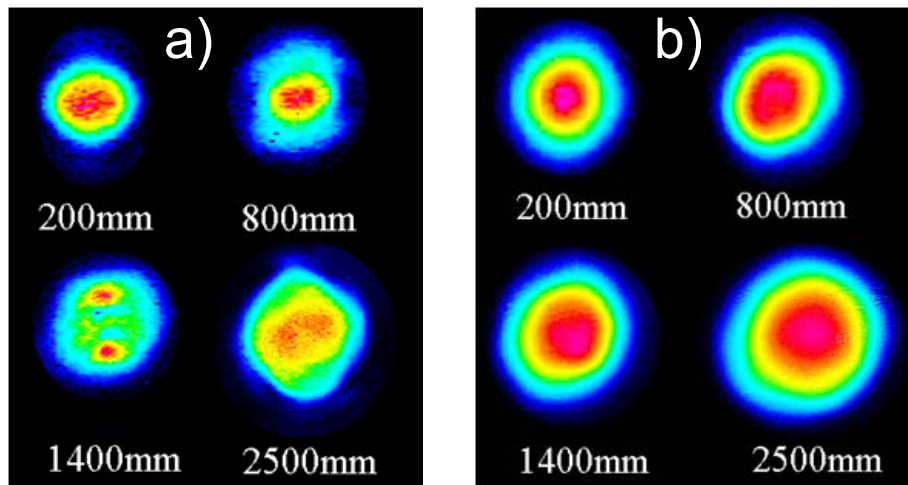
Rezonatoriaus veidrodis M2 (žr. 3.1 pav.) buvo pakeistas aberacijos kompensatoriumi. Tam, kad tinkamai orientuoti aberacijos kompensatorių, kinematinį veidrodžio laikiklį pritvirtinome ant XYZ postūmio stalo. Ieškant optimalios kompensatoriaus padėties rezonatoriuje vadovavomės šiais kriterijais: TEM₀₀ lazerio moda, pluošto kokybės parametras M² esant aukščiausiai lazerio išvadinei galiai. Tam, kad patikrinti, ar lazerio parametrai pasikeitė dėl naudojamo kompensatoriaus, ar dėl pakitusio kreivumo M2 veidrodžio (kompensatoriai užgarinti ant įgaubtų pagrindėlių, o „standartinėje“ konfigūracijoje veidrodis M2 – išgaubtas, R=4000). Mūsų konstrukcijos aberacijos kompensatorių galima vertinti kaip įgaubtą veidrodį + sferinę aberaciją. Atėmus išmatuotas sferinės aberacijos profilį, iš išmatuoto K010 kompensatoriaus profilio, gavome, kad įgaubtas R=-2000 veidrodis yra artimiausias K010 kompensatoriui.

Iš pradžių, išmatavome lazerio parametrus naudojant išgaubtą R=4000 mm M2 veidrodį, kuris standartiškai naudojamas PL10100 lazeryje. Lazerio išvadinės galios priklausomybė pateikiama 3.4 paveiksle. Naudojant R=4000 mm veidrodį, gautas didžiausias kaupinimo/ išvadinės galios charakteristikos statusas. Maksimali lazerio galia siekė 9..9.5 W su visais bandiniais, tačiau generacijos slenkstis naudojant kompensatorių K010 ir R= -2000 mm veidrodį yra praktiškai 3 kartus mažesnis, negu naudojant R=4000 mm veidrodį.



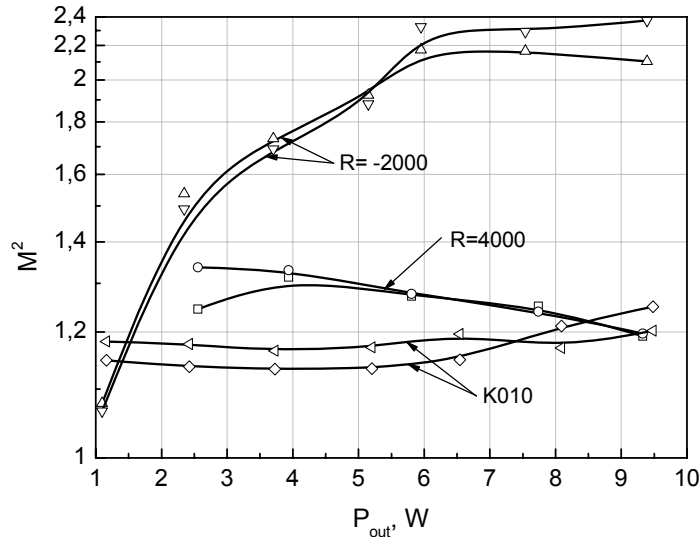
3.4 pav. Lazerio išvadinės galios priklausomybė nuo kaupinimo nuolatinės veikos režime.

Lazerio pluošto erdviniai skirstiniai išmatuoti 200÷2500 mm atstumu nuo lazerio išvadinio veidrodžio pateikiami 3.5 paveiksle. Matavimai buvo atliekami esant maksimaliai kaupinimo galiai. Naudojant R=4000 mm veidrodį, pluošto skirstinys artimajame lauke yra artimas Gausiniam. Tačiau dėl šiluminio lęšio aberacijų stebimas pluošto erdvinio pasiskirstymo iškraipymai 1-2 metrų atstume nuo išvadinio veidrodžio. Pakeitus veidrodį M2 aberacijos kompensatoriumi, stebimas ženklus pluošto erdvinio skirstinio pagerinimas (3.5b pav.).



3.5 pav. Lazero pluošto erdviniai skirstiniai, skirtingu atstumu nuo išvadinio veidrodžio, naudojant: a) R=4000 veidrodį, b) K010 aberacijos kompensatorių.

Išvadinio pluošto kokybės parametras M^2 buvo matuojamas Spiricon M2-200 matuokliu. Pluošto kokybės parametro M^2 priklausomybės nuo kaupinimo galios matavimai pateikiami 3.6 paveiksle.



3.6 pav. Pluošto kokybės parametro M^2 priklausomybės nuo kaupinimo galios.

Naudodami R=4000 mm veidrodį pasiekta ~9,5W išvadinė lazerio galią bei pluošto kokybės parametras $M^2=1.2$. Tačiau 1-2 metrų atstumu nuo išvadinio veidrodžio stebimi pluošto erdvinio skirstinio iškraipymai yra nepageidautini. Industriniuose taikymuose,

kur reikalinga maksimali lazerio galia, lazerio slenkstis nėra svarbus, tačiau tuomet, kai reikalinga mažesnė galia, lazerio efektyvumas sparčiai krenta. Pakeitus $R=4000$ mm įgaubtu $R=-2000$ mm veidrodžiu, generacijos slenkstis sumažėja tris kartus, tačiau pluošto kokybės parametras M^2 ženkliai pablogėja ir viršija 2 prie aukštesnių kaupinimo galių. Tuo tarpu naudojant aberacijos kompensatorių K010 pagerinami visi aukščiau išvardintieji parametrai. Nors maksimali išvadinė galia padidėja vos keliais procentais, generacijos slenkstis sumažėja 3 kartus, o pluošto kokybės parametras M^2 mažesnis negu 1,2 visame lazerio veikimo diapazone. Be to, naudojant kompensatorių, ženkliai pagerinamas lazerio pluošto erdvinis skirstinys.

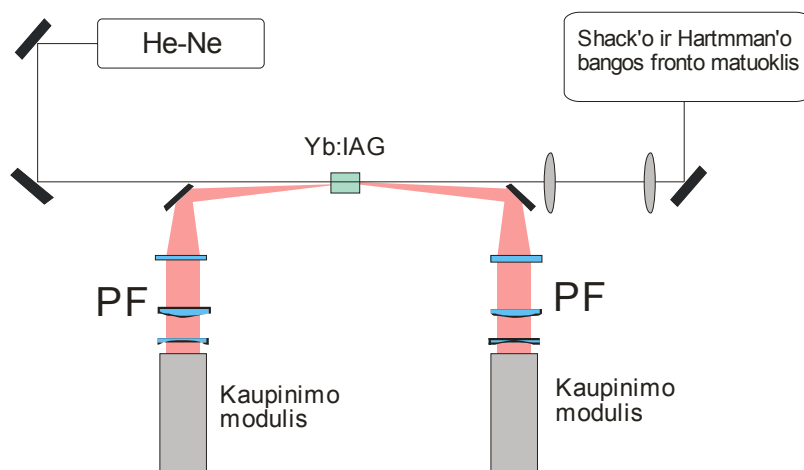
4. Išilginio diodinio kaupinamo elipsinės modos Yb:LAG lazeris

Plokštelės formos aktyviųjų elementų panaudojimas didelės vidutinės galios lazeriuose termo-optinių efektų požiūriu turi eilę privalumų lyginant su cilindrinės formos elementų naudojimu [53]. Tokios formos aktyviųjų elementų šaldymas techniškai yra mažiau komplikotas, kadangi nesunkiai galima realizuoti tiesioginį kristalo plokštumos ir radiatoriaus šiluminį kontaktą. Kadangi aktyvaus elemento matmenys šaldymo kryptimi yra maži, realizuojamas žymiai geresnis elemento šaldymas lyginant su to paties skersinio ploto cilindrinės formos aktyviaisiais elementais. Dar labiau plokštelės formos elementų pranašumai išryškėja naudojant elipsinio erdvinio profilio kaupinimo pluoštus. Mažinant aktyvaus elemento aukščio ir pločio santykį ir parenkant kaupinimo profilį gerai užpildantį elemento apertūrą galima efektyviai mažinti kaupinimo sugertos spinduliuotės aktyviajame elemente atsirandančių temperatūros gradientus, o tuo pačiu mažinant termo-optinių efektų poveikį lazerio generuojamų šviesos pluoštų kokybei [54,55]. Efektyvus Yb:LAG lazeris su eliptine moda buvo pademonstruotas [54], tačiau šiame darbe buvo nagrinėjamas lazeris osciliatoriaus režime, taip pat, nepateikiami šiluminio lęšio matavimai.

Šalia neabejotinų eliptinio profilio kaupinimo pluoštelių naudojimo privalumų iškyla ir tam tikrų problemų. Šiuo atveju reikia naudoti astigmatinius rezonatorius, kurių jautrumas indukuotam šiluminiam lęšiui x ir y kryptimis yra skirtingas. Taip pat iškyla ir išvadinės spinduliuotės simetrizavimo problemos, kadangi bendru atveju išvadinis

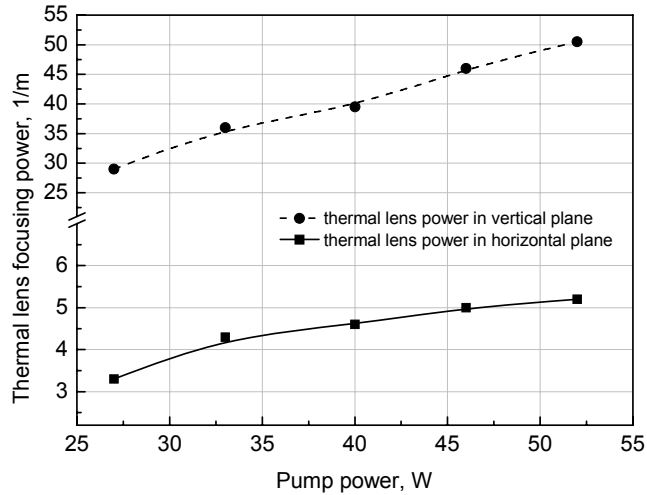
pluošteliis turi skirtingą skėstį x ir y kryptimis. Nors šiluminio lęšio matavimo Yb:LAG lazeriuose duomenys jau buvo publikuoti [30], matavimai buvo atlikti tik simetrine lazerio modai bei kaupinimo galioms neviršijant 6 W. Siekiant atlikti skaitmeninį rezonatoriaus su eliptine moda modeliavimą, buvo atlikti šiluminio lęšio matavimai. Eksperimentinė matavimų schema pateikiama 4.1 paveiksle.

Eksperimente buvo naudojamas 1mm storio, 7 mm pločio ir 5mm ilgio Yb:LAG 5% koncentracijos aktyvusis elementas. Aktyvusis elementas buvo įdėtas tarp dviejų safyro plokštelių, prilituotų prie varinių, vandeniu aušinamų radiatorių. Aktyvusis elementas buvo kaupinamas dviem 940 nm bangos ilgio, 40 W galios diodinių lazerių (pagamintais UAB „Šviesos konversija“). Elipsiniam kaupinimo intensyvumo skirstiniui Yb:LAG kristale suformuoti buvo surinkti pluoštelių formuotuvai PF, kuriuos sudarė neigiamas sferinis lęšis ir du teigiami cilindriniai lęšiai. Kadangi šiame eksperimente pluoštelių formavimui buvo naudojami keli nuostolius įnešantys elementai bendra maksimali kaupinimo galia siekė tik 52 W.



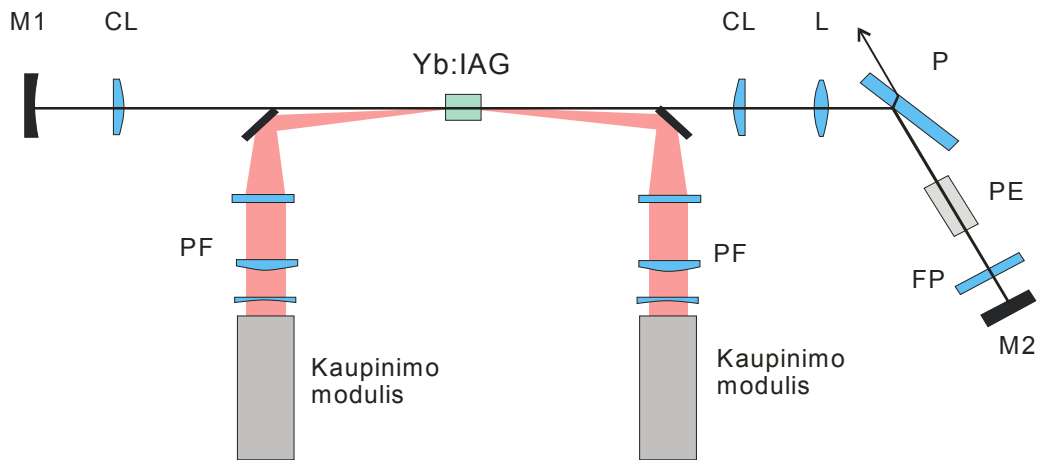
4.1 pav. Šiluminio lęšio matavimų su Shack'o ir Hartmann'o bangos fronto matuokliu schema.

Šiluminio lęšio matavimus atlikome S-H matuokliu, aprašytu antrajame skyriuje. 4.2 paveiksle pateikiama išmatuota šiluminio lęšio stiprio priklausomybė nuo kaupinimo galios. Matome, kad vertikaloje ir horizontalioje kryptyse šiluminio lęšio stipris skiriasi daugiau kaip 10 kartų esant didžiausiai kaupinimo galiai. Atsižvelgiant į matavimų rezultatus, buvo atlikti matematiniai rezonatoriaus su eliptine moda skaičiavimai.

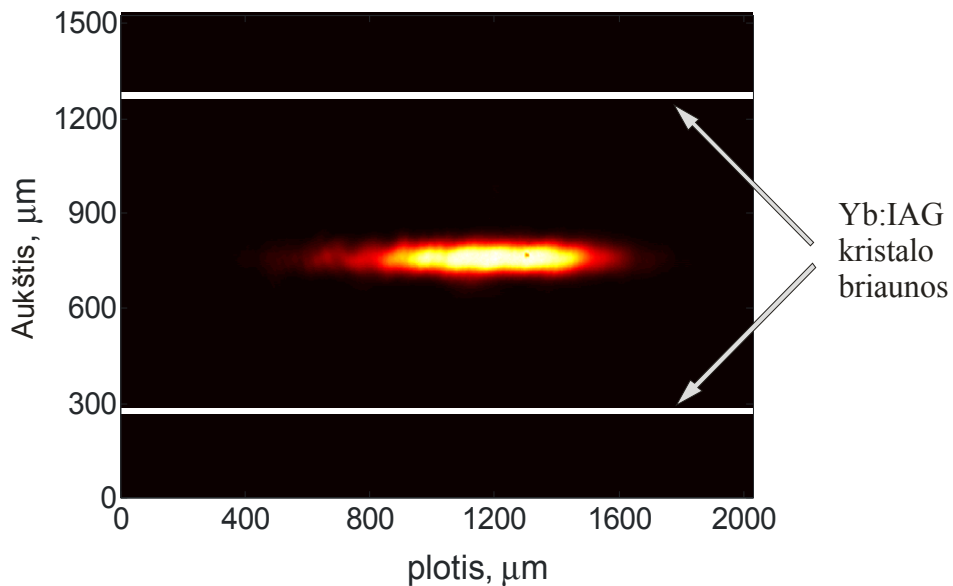


4.2 pav. Šiluminio lęšio stiprio priklausomybė nuo kaupinimo galios horizontalioje (kristalo plotis) ir vertikalioje (kristalo aukštis) plokštumose.

Lazerio schema pavaizduota 4.3 paveiksle. Rezonatorių sudarė veidrodžiai V1 ($r=1500$ mm, $R=100\%$), V2 ($R=-99\%$) ir poliarizatorius P orientuotas maksimaliam vertikalios poliarizacijos atspindžiui. Elipsinio skersinio profilio modos gerai persiklojančios su kaupinimo pluošteliais aktyviajame elemente formavimui į rezonatorių buvo patalpinti $f=200$ mm židinio nuotolio cilindriniai lęšiai CL ir $f=500$ mm sferinis lęšis L. Rezonatoriuje taip pat buvo talpinama $\lambda/4$ fazinė plokštelė FP, kurios pagalba buvo galima keisti efektyvųjį lazerio išvadinio veidrodžio atspindžio koeficientą. Pokelso elementas PE BBO kristalo pagrindu buvo naudojamas tik kai lazeris buvo tiriamas kokybės moduliacijos režime.



4.3 pav. Yb:YAG lazerio kaupinamo eliptiniais pluošteliais schema., V1 ir V2 , CL cilindriniai lęšiai, L – sferinis lęšis, P- dielektrinis poliarizatorius, FP – fazinė plokštelė, PF – eliptinių kaupinimo pluoštelių formuotuvai, PE – Pokelso elementas.

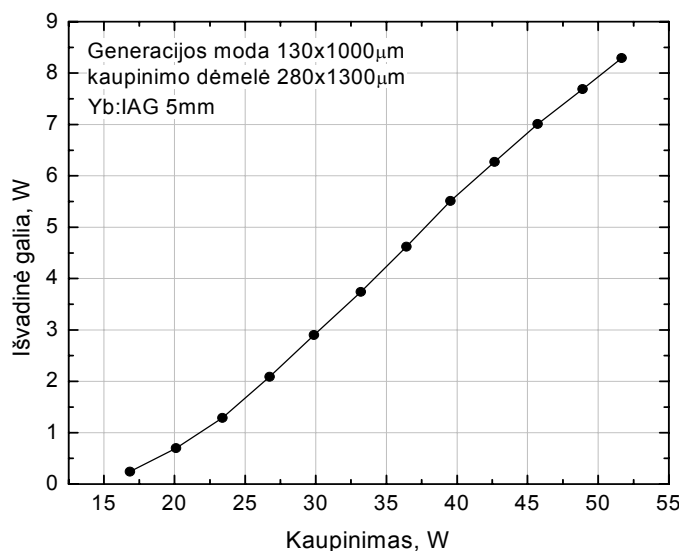


4.4 pav. Yb:YAG lazerio modos kristale erdvinis skirstinys. Pluoštelio matmenys - 150x1000 μm.

4.4 paveiksle pateiktas lazerio modos intensyvumo erdvinis skirstinys aktyvaus elemento plokštumoje. Jis buvo išmatuotas atvaizduojant kristalo paviršių į CCD kameros jėjimą vykstant lazerio generacijai.

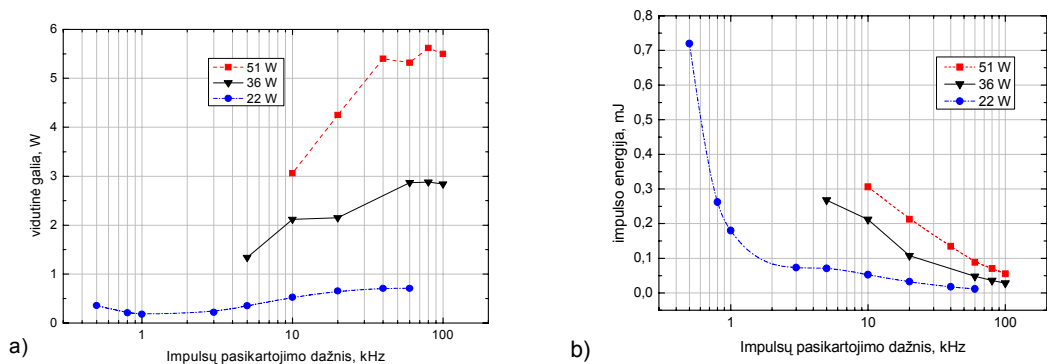
Visų pirma lazerio veika buvo optimizuota jam dirbant laisvosios generacijos režime. 4.5 paveiksle pateikta išmatuota lazerio vidutinės išvadinės galios priklausomybė nuo kaupinimo galios. Pasiiekta maksimali lazerio išvadinė galia – 8,3W (generuojamas

bangos ilgis 1030 nm) esant 52 W kaupinimui. Šie rezultatai sulyginami su kitų grupių gautais rezultatais [53,54].



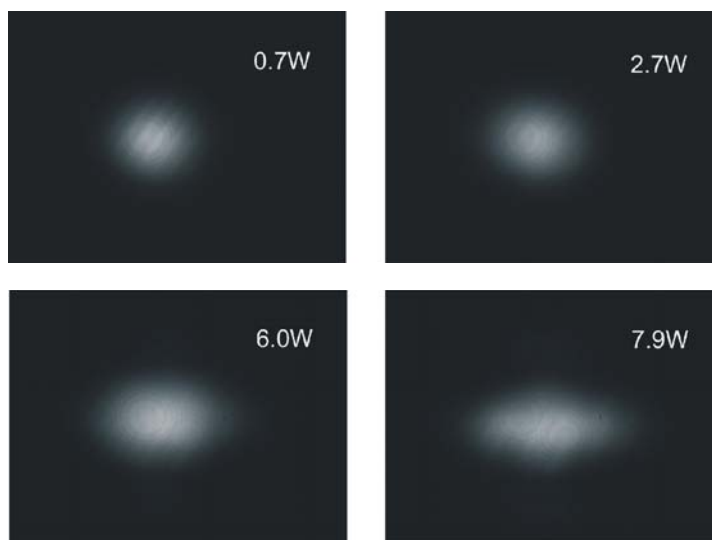
4.5 pav. Yb:LAG lazerio išvadinės galios priklausomybė nuo kaupinimo galios laisvosios generacijos režime.

Toliau Yb:LAG lazeris kaupinamas elipsinio profilio lazerinių diodų pluoštais buvo išbandytas kokybės moduliacijos veikos režime. Tam tikslui į rezonatorių buvo patalpintas elektrooptinis moduliatorius (Pokelso elementas BBO kristalo pagrindu). Impulsiškai pridant ~ 2 kV įtampą prie Pokelso elemento elektrodų lazeris generavo kelių dešimčių nanosekundžių trukmės impulsus, kurių pasikartojimo dažnis yra derinamas keičiant rezonatoriaus optinės kokybės moduliacijos dažnį. Buvo registruojama lazerio vidutinė galia, iš kurios yra lengva perskaičiuoti generuojamų impulsų energiją. Pastebėsime, kad siekiant išvengti aktyviojo elemento optinio pramušimo matavimai prie mažų pasikartojimo dažnių buvo atliekami tik sumažinus kaupinimo intensyvumą. Lazerio vidutinės galios ir impulsų energijos dažninės priklausomybės yra pavaizduotos 4.6a ir 4.6b paveiksluose. Nustatyta, kad perėjus prie kokybės moduliacijos režimo, lazerio vidutinė galia tam pačiam kaupinimui tampa mažesnė apie 1,5 karto lyginant su laisvos generacijos režimu. Užregistruota 0,7 mJ impulso energija prie 500 Hz pasikartojimo dažnio ir esant 22 W kaupinimui.



4.6 pav. Lazero parametrai moduluotos kokybės režime: a) vidutinės galios priklausomybė nuo impulsų pasikartojimo dažnio, skirtingoms kaupinimo vertėms; b) impulso energijos priklausomybė nuo impulsų pasikartojimo dažnio, skirtingoms kaupinimo vertėms.

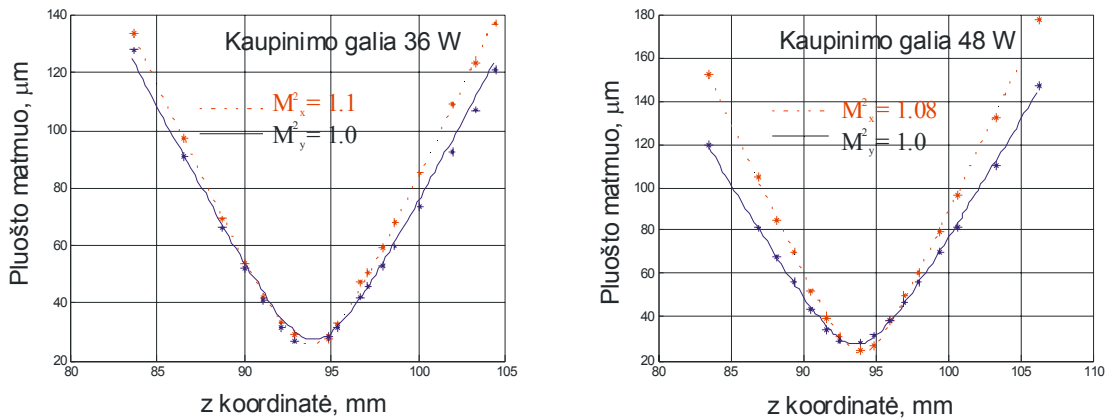
Lazero išvadinės spinduliuotės erdviniai skirstiniai buvo registruojami už ~4 m atstumo nuo išvadinio veidrodžio. Jie yra pateikti 4.7 paveiksle.



4.7 pav. Lazero spinduliuotės intensyvumo erdviniai skirstiniai skirtingoms išvadinėms galioms.

Siekiant įvertinti tiriamo lazerio išvadinio pluoštelių kokybę buvo išmatuotas taip vadinamas kokybės parametras M^2 . 4.8 paveiksle simboliškai pateikti matavimų rezultatai dviem kaupinimo spinduliuotės galioms. Eksperimentiniai taškai buvo aproksimuoti teorinėmis Gauso pluoštų matmenų kitimo priklausomybėmis varijuojant

šių pluoštų kokybės parametą M^2 . Kaip matosi iš paveikslo, eksperimente naudotoms kaupinimo galioms lazerio išvadiniai pluoštai yra artimi difrakciškai ribotiems.



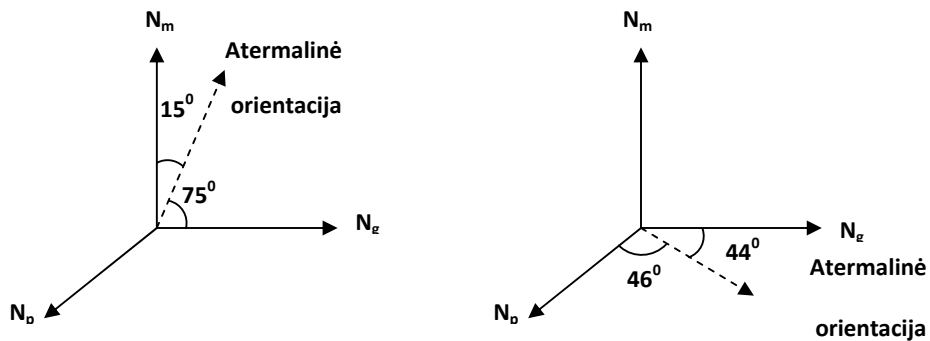
4.8 pav. Yb: IAG lazerio generuojamos spinduliuotės M^2 matavimų rezultatai skirtingoms kaupinimo galioms.

Ištirtas Yb:IAG lazeris, kaupinamas elipsinio profilio lazerinių diodų pluoštais, laisvosios veikos ir kokybės moduliacijos režimuose. Pademonstruota geros erdvinės kokybės ($M^2 \approx 1$) spinduliuotės generacija naudojant astigmatinius rezonatorius ir realizuojant santykinai didelio skersinio ploto elipsinio profilio modą aktyviajame elemente. Ši koncepcija yra perspektyvi kuriant didelių impulsų energijų lazerines sistemas.

5. Šiluminio lęšio savybės didelės vidutinės galios Yb:KGW lazeryje

Yb:KGW yra monoklininis kristalas, pasižymintis didele anizotropija optinėse ir terminėse charakteristikose [56]. Ortogonalios optinės ašys m , n ir g charakterizuojamos smarkiai išsiskiriančiais emisijos ir sugerties spektrais, lūžio rodikliais bei termo-optiniais koeficientais. Todėl Yb:KGW lazerio tiek energinės, tiek jo spinduliuotės erdvinės charakteristikos ženkliai priklauso nuo naudojamo kristalo orientacijos, lazerio darbo režimo. Šiluminio plėtimosi koeficientų reikšmės skirtingomis kryptimis kristale gali skirtis iki ~ 10 kartų ($6.3 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$, $2.4 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$, $21.7 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ ašims X_1 , X_2 ir X_3 [56]). dn/dT vertės skirtingų autorių duomenimis taip pat skiriasi kelis kartus skirtingoms kristalo kryptims [56,57,58]. Biswall ir kt. darbe [56] nurodoma, kad egzistuoja atermalinės Yb:KGW kristalo orientacijos (žr. 5.1 pav.), kuriose termo-optiniai ir šiluminio plėtimosi įtakoti lūžio rodiklio pokyčiai yra priešingų ženklų ir kompensuoja vienas kitą. Spinduliuotei sklindant kristale atermaline kryptimi, optinis kelias kristale

nekinta, kai kristalas kaitinamas tolygiai. Tokia kristalo orientacija yra patraukli didelės vidutinės galios lazerinių sistemų kūrimui. Šiai dienai yra tik keletas (publikuotų) bandymų panaudoti Yb:KGW kristalą tokioje orientacijoje [31]. Atlikti tyrimai parodė, kad šiluminis lęšis atermaline kryptimi, kuri pavaizduota 5.1 pav. kairiajame piešinyje ($E || p$), yra ženkliai mažesnis, negu įprastiniame b orientacijos kristale (šviesa sklinda išilgai N_g ašies). Taip pat parodyta, kad atermaliniame kristale šiluminis lęšis simetriškas, kai b orientacijos atveju – elipsinis (astigmatiškas). Tačiau $E || m$ atermalinėje konfigūracijoje sugerties ir emisijos skerspjūviai yra ženkliai didesni. Remiantis šiais duomenimis, nusprendėme išbandyti Yb:KGW kristalus išpjautus kryptimi, kuri yra pavaizduota 5.1 pav. dešiniajame piešinyje. Šiuo atveju spinduliuotė sklinda išilgai N_g ašies, kaupinimo poliarizacijos plokštuma lygiagreti N_m ašiai, o generacijos poliarizacijos plokštuma lygiagreti N_p ašiai.

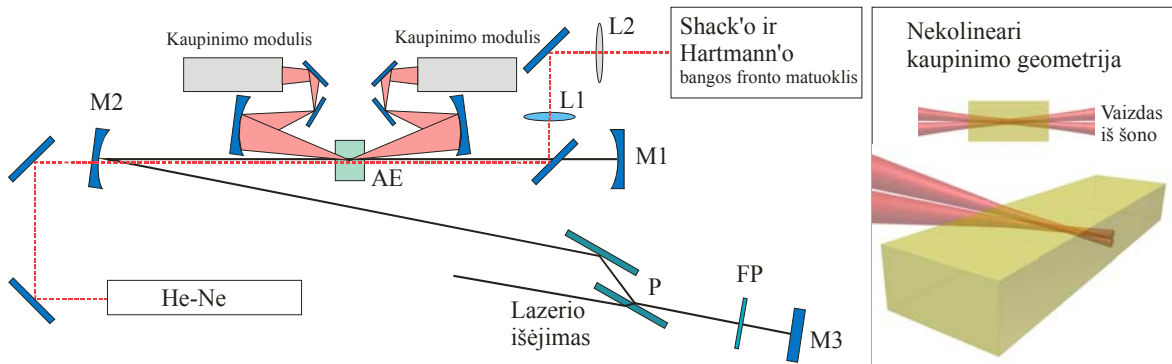


5.1 pav. Atermalinės Yb:KGW orientacijos (kairėje $E || p$, dešinėje $E || m$)

Šiai dienai yra publikuota vos keletas darbų, aprašančių šiluminio lęšio matavimus šioje medžiagoje [29,30]. Nors šiuose darbuose pateikiami duomenys ir apie šiluminio lęšio matavimus N_g orientacijos kristaluose, matavimai buvo atlikti su palyginus žemomis (iki 10 W) kaupinimo galiomis, o taip pat nepateikiami duomenys apie šiluminio lęšio astigmatiškumą. Šiame skyriuje pristatomi šiluminio lęšio matavimai N_g , ir atermalines orientacijos Yb:KGW aktyviuosiuose elementuose. Taip pat, pateikiami kristalo galų išsigaubimo įtakos suminiam šiluminiam lęšiui matavimų rezultatai.

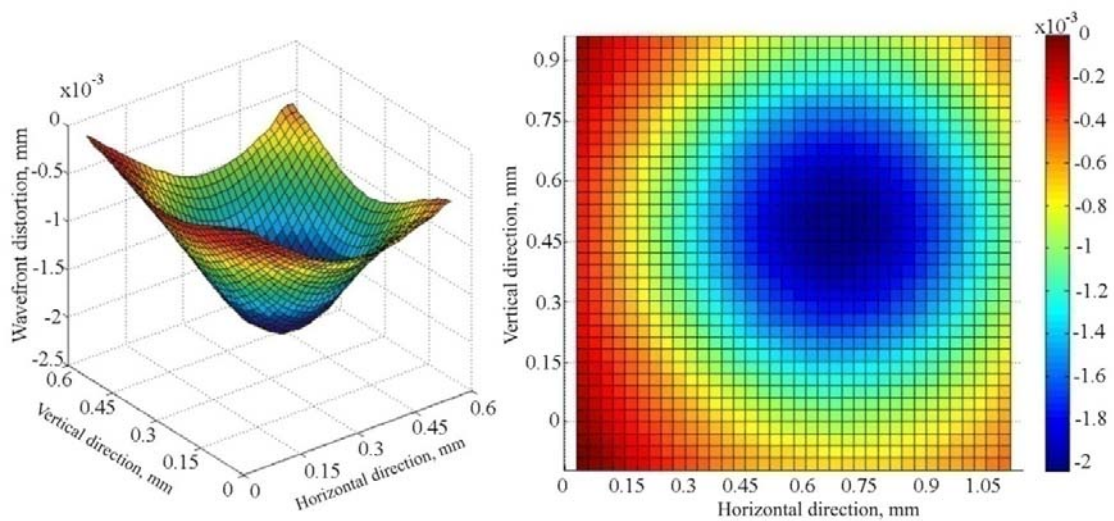
5.2 paveiksle pateikta matavimo optinė schema. Zonduojantis He-Ne lazerio pluoštas pagalbinių veidrodžių pagalba praleidžiamas per kristalą toje pačioje vietoje ir ta pačia

kryptimi, kuria vyksta generacija kristale. Lęšiai L1 ir L2 sudaro 4f atvaizdavimo sistemą, kuria bangos frontas praėjęs aktyvųjį elementą atvaizduojamas Shack'o ir Hartmann'o bangos fronto matuoklio jėjime. Šiluminio lęšio matavimus atlikome S-H matuokliu, aprašytu antrajame skyriuje.



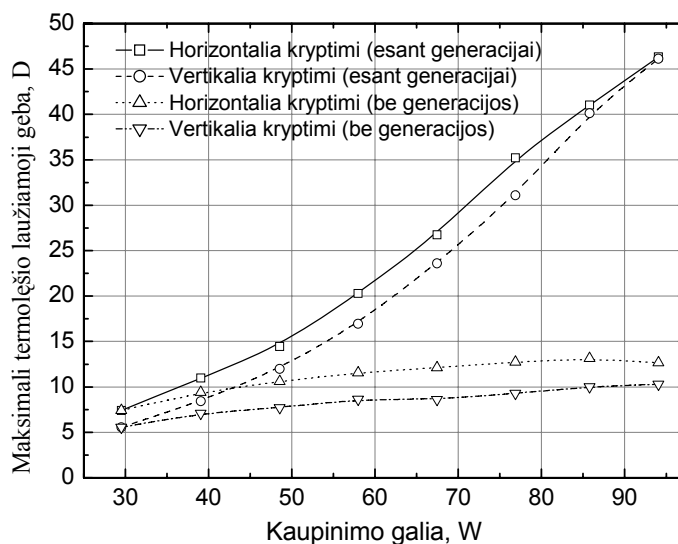
5.2 pav. Šiluminio lęšio matavimo Yb:KGW lazeryje schema. M1-M3 rezonatoriaus veidrodžiai, P – poliarizatorių pora, FP- $\lambda/4$ fazinė plokštelė, AE- Yb:KGW aktyvusis elementas. Dešinėje pavaizduotas nekolinearus kristalo kaupinimas dviem kaupinimo moduliais iš skirtingų kristalo galų. Matome, kad kaupinimo profilis arti kristalo galų yra asimetriškas, ovalo formos.

Šiluminio lęšio parametrai nustatomi iš zonduojančios bangos fronto pokyčio (atžvilgiu to paties pluošto, praėjusio per šaltą kristalą (kai kaupinimas išjungtas)). Išmatuotas bangos frontas pateiktas 5.3 paveiksle.



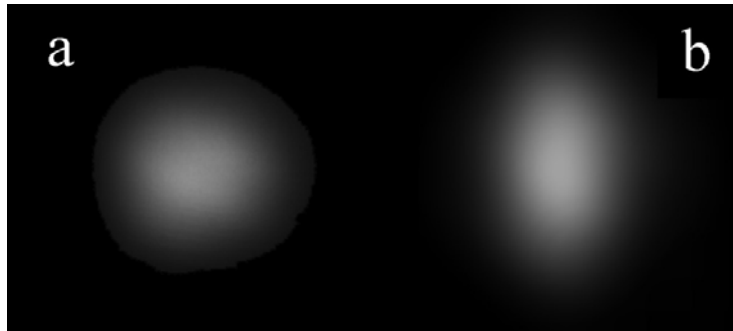
5.3 pav. Išmatuotas bangos frontas. Spindulių sklaidimo kryptis išilgai N_g ašies. Kaupinimo galia – 94W.

Maksimalaus šiluminio lęšio stiprio priklausomybė nuo kaupinimo galios pateikta 5.4-ame paveiksle. Be generacijos, šiluminis lęšis yra astigmatiškas ir prie aukštų kaupinimo galių praskaidrėjus kristalui kinta nežymiai. Tuo tarpu lazeriui generuojant, didinant kaupinimo galią lęšio astigmatiškumas mažėja, kol prie maksimalios kaupinimo galios tampa simetrišku. Šiluminio lęšio stipris didėja beveik tiesiškai, didinant kaupinimo galią.



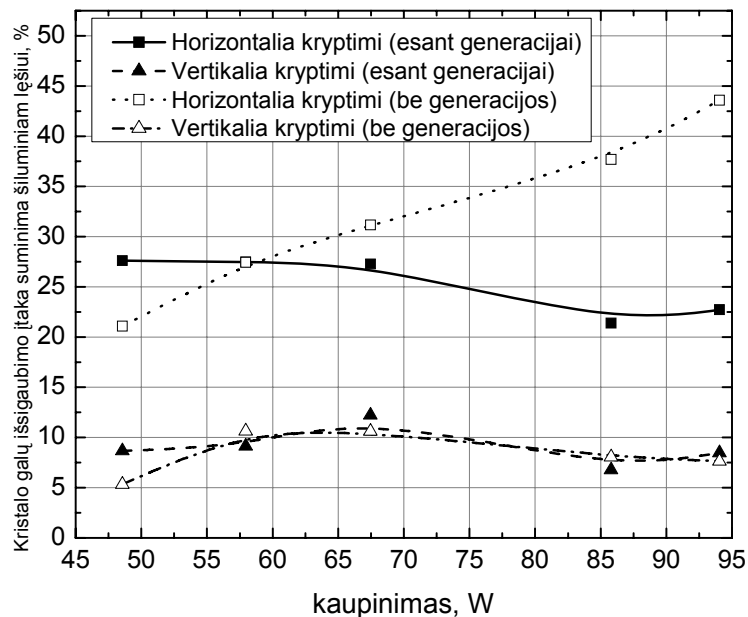
5.4 pav. pav. Šiluminio lęšio stiprio priklausomybė nuo kaupinimo galios esant generacijai ir be jos (z | Ng orientacijos Yb:KGW aktyviajame elemente).

Kartu su šiluminio lęšio matavimais buvo registruojami ir lazerio generuojamos spinduliuotės erdviniai skirstiniai artimajame lauke (~1 m atstumu nuo išvadinio veidrodžio). Lazerio pluošto erdviniai intensyvumo skirstiniai pateikti 5.5 paveiksle. Prie mažesnių nei 80W kaupinimo galių generuojamos spinduliuotės skirstinys artimajame lauke yra simetriškas. Toliau didinant kaupinimo galią, pluošto intensyvumo skirstinys artimajame lauke tampa eliptišku. Tam didžiausią įtaką turi asimetrinės kaupinimo kanalo charakteristikos, sugerties ir stiprinimo įsotinimas bei rezonatoriaus stabilumo parametrai.



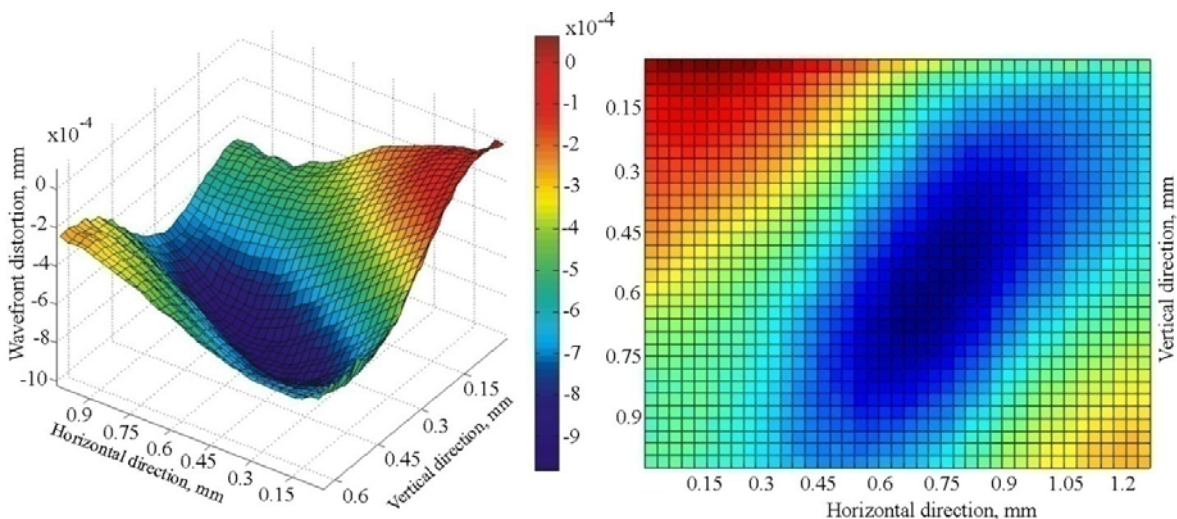
5.5 pav. Lazero išvadinio pluošto erdviniai intensyvumo skirstiniai esant (a) 77W ir (b) 86 W kaupinimui.

Taip pat atlikome N_g orientacijos kristalo galų išsigaubimo matavimus. 5.2 paveiksle pateikta schema buvo modifikuota tokiu būdu: zonduojantis He-Ne lazerio pluoštelis, pro M2 veidrodį mažu kampu buvo įleistas į rezonatorių, o jo atspindys nuo pirmojo kristalo paviršiaus buvo nukreiptas į Shack'o ir Hartmann'o bangos fronto matuoklį. Gauti rezultatai pateikiami 5.6 paveiksle.



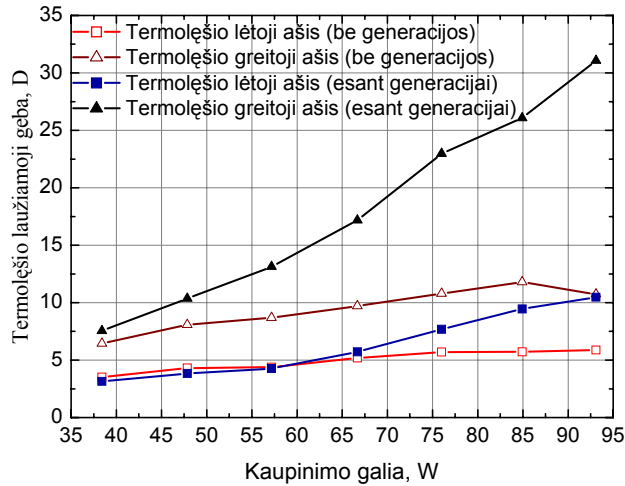
5.6 pav. Kristalo galų išsigaubimo įtaka suminiam šiluminiam lęšiui vertikalioje ir horizontalioje plokštumose.

Kristalo galų deformacija stipriai priklauso nuo kaupinimo geometrijos. Neženkliai pakeitus kaupinimo pluoštelių suvedimo kampą galima nesunkiai keisti šiluminio lęšio židinio nuotolį bei jo astigmatiškumą. Tokia lazerio „reakcija“ į kaupinimo profilio pokyčius atitinka kituose darbuose publikuotus rezultatus [12].



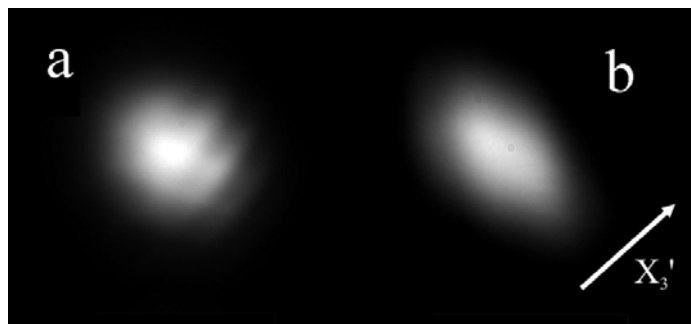
5.7 pav. Išmatuotas bangos frontas praėjęs „atermalinį“ kristalą. Kaupinimo galia – 94W.

Trečias šių tyrimų etapas buvo šiluminio lęšio tyrimas atermalinės orientacijos Yb:KGW kristaluose. Tipiškas matuojamas bangos frontas pateiktas 5.7 paveiksle. Kaip matyti šiai kristalo orientacijai yra stebimas stiprus šiluminio lęšio astigmatizmas. Maksimalaus šiluminio lęšio stiprio priklausomybė nuo kaupinimo galios pateikta 5.8-ame paveiksle. Kadangi šiluminis lęšis eliptiškas ir jo ašys nesutampa su kristalo plokštumomis, ašis pavadiname greitąja ir lėtąja. 2.13 paveiksle matome, kad nesant generacijos, šiluminio lęšio laužiamoji geba skiriasi beveik 2 kartus skirtingose ašyse. Didinant kaupinimo intensyvumą šis santykis praktiškai nekinta. Tuo tarpu lazeriui generuojant, prie maksimalių kaupinimo galių stebimas 3 kartus stipresnis šiluminis lęšis greitojoje ašyje, negu lėtojoje.



5.8 pav. Atermalinio kristalo šiluminio lėšio laužiamosios gebos priklausomybė nuo kaupinimo galios esant generacija ir be jos.

Lazerio išvadinio pluošto erdviniai intensyvumo skirstiniai pateikti 5.9-ame paveiksle. Prie mažesnių nei 40W kaupinimo galių generuojama moda simetriška. Toliau didinant kaupinimo galią, pluošto intensyvumo skirstinys artimajame lauke tampa eliptišku. Matome, kad generacijos modos pokrypis artimas stipriausios šiluminio plėtimosi krypties X_3' projekcijai kristale (5.9b pav.).



5.9 pav. Lazerio išvadinio pluošto erdviniai intensyvumo skirstiniai esant skirtingoms kaupinimo galioms (a) 39W ir (b) 86 W (rodyklė žymi šiluminio plėtimosi ašies X_3' projekcija).

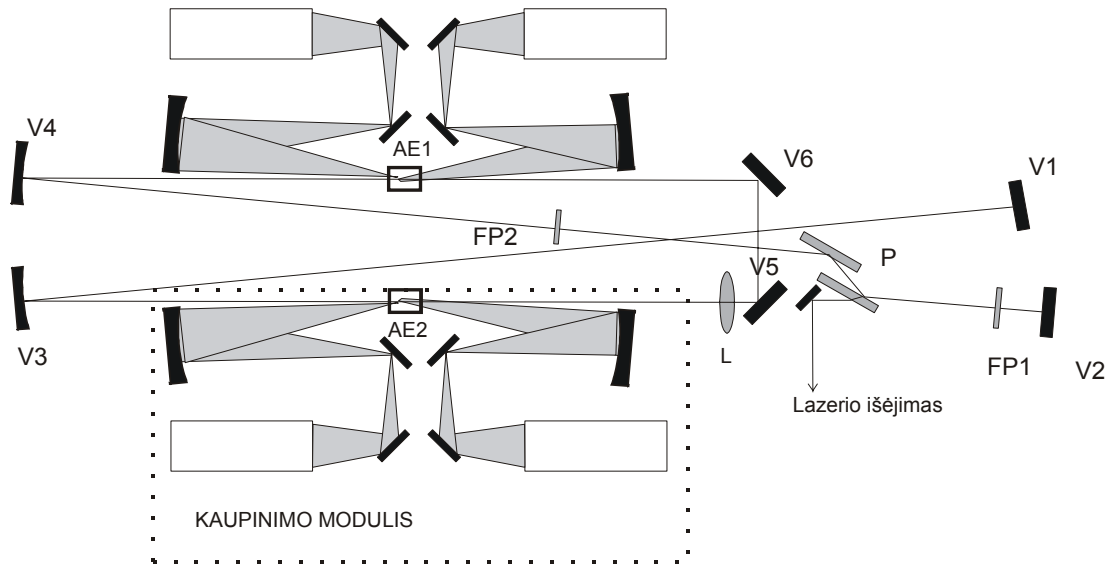
Atlikti tyrimai parodė, kad išbandyta „atermalinė“ kristalo orientacija nėra tinkama išilginio diodinio kaupinimo didelės vidutinės galios lazerinėms sistemoms. Nors maksimalus šiluminio lėšio stipris yra mažesnis negu kristale, kuriame šviesa sklido

išilgai N_g ašies, tačiau jis yra stipriai astigmatiškas (esant maksimaliai kaupinimo galiai šiluminio lęšio laužiamoji geba skirtingoms ašims skyrėsi daugiau nei 3 kartus). Manome, kad šiluminio lęšio eliptiškumas įtakojamas didelio šiluminių plėtimosi koeficientų anizotropiškumo. Naudojant kristalą, kuriame šviesa sklido išilgai N_g optinės ašies, didžiausią šiluminį plėtimosi koeficientą turinti ašis X_3 buvo orientuota mažu kampu (12°) šviesos sklidimo kryptčiai, kai „atermalinėje“ orientacijoje šis kampas gaunasi gerokai didesnis. Naudojant „atermalinį“ kristalą maksimali lazerio išvadinė galia buvo dvigubai mažesnė ($\sim 8,5$ W), negu naudojant kristalą, kuriame šviesa sklido išilgai N_g optinės ašies.

6. Didelės vidutinės galios Yb:KGW lazeris su dviem, plokštelės formos, aktyviaisiais elementais

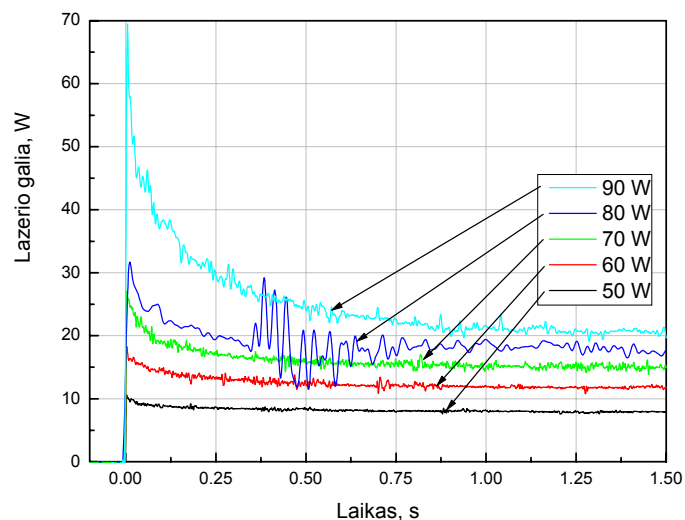
5-ajame skyriuje aptarėme šiluminio lęšio savybes Yb:KGW aktyviuosiuose elementuose. Tokio tipo lazeriu vidutinės galios didinimą riboja termo-optiniai reiškiniai. Jų įtaką galima sumažinti, padidinus kristalo tūrį, užimamą generacijos modos. Modos ploto didinimas aktyviajame elemente reikalauja plokštelės storio didinimo, kas turint omenyje prasta Yb:KGW šiluminį laidumą, nėra pageidautina. Patraukli išeitis – simetriškas rezonatorius su dviem aktyviaisiais elementais [59,60,60]. Šios geometrijos rezonatorius, leistų padidinti lazerio vidutinę galią išlaikant tą pačią šiluminę apkrovą kristale.

Lazerio schema pateikiama 6.1 paveiksle. Lazerio rezonatoriuje buvo patalpinti du plokštelės formos Yb:KGW kristalai. Pirmajame kristale AE1 iterbio jonų koncentracija – 2%, kristalo ilgis 5 mm, o jo apertūra – $6 \times 1,4$ mm. Antrojo kristalo AE2 koncentracija – 1,6%, ilgis 6 mm, apertūra- 6×1 mm. Bendra maksimali aktyviųjų elementų kaupinimo galia siekė 200 W. Rezonatorių sudarė plokšti veidrodžiai V2, V5, V6 ($R=100\%$), V1 ($R=98\%$) ir du įgaubti veidrodžiai V3, V4 ($r=500$ mm, $R=100\%$). Į rezonatorių taip pat buvo patalpinta $f=500$ mm sferinis lęšis L, $\lambda/4$ fazinė plokštelė FP1 ir poliarizatorių pora P. Spinduliuotės rezonatoriuje poliarizacijos plokštumos orientacijai keisti buvo naudojama $\lambda/2$ fazinė plokštelė FP2.



6.1 pav. Lazerio su dviem aktyviaisiais elementais schema.

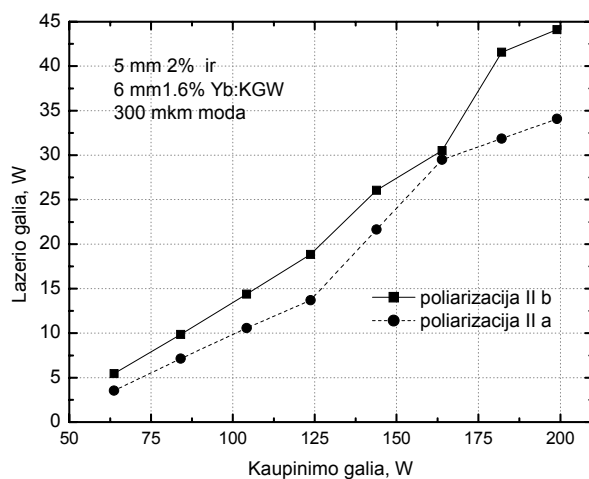
Visų pirma buvo išbandyta šiek tiek supaprastinta šio lazerio schema. Buvo naudojamas tik vienas AE1 aktyvusis elementas, o lęšis L pakeistas įgaubtu 100% atspindžio veidrodžiu. Tiriant lazerio veiką pastebėta, kad tiek lazerio moda, tiek jo galia generacijos pradžioje patiria pakankamai ryškius pokyčius. Greitai atidarius užblokuotą lazerio rezonatorių ir registruojant lazerio išvadinės galios laikinį kitimą oscilografu (žr. 6.2 paveikslą) buvo stebimas išvadinės galios intensyvumo šuolis, kurio amplitudės santykis su nusistovėjusio signalo verte didėja augant kaupinimo galiai.



6.2 pav. Yb:KGW lazerio generacijos dinamika, skirtingoms kaupinimo galios vertėms.

Po to lazerio išvadinė galia per sekundės dalis eksponentiškai relaksuoja į nusistovėjusio režimo galios vertę. Tokia lazerio galios dinamika rodo žymią rezonatoriuje stiprinamos spinduliuotės indukuoto šiluminio lęšio įtaką.

Antrajame bandymų etape buvo išbandyta lazerio schema su dviem aktyviaisiais elementais. Išmatuota lazerio išvadinės galios priklausomybė nuo kaupinimo galios abejoms aktyviajame elemente stiprinamos spinduliuotės poliarizacijos yra pateikta 6.3 paveiksle. Maksimali išmatuota lazerio generuojama galia 44 W buvo stebėta, kai kaupinimo ir generuojamos spinduliuotės poliarizacijos plokštumos buvo statmenos.

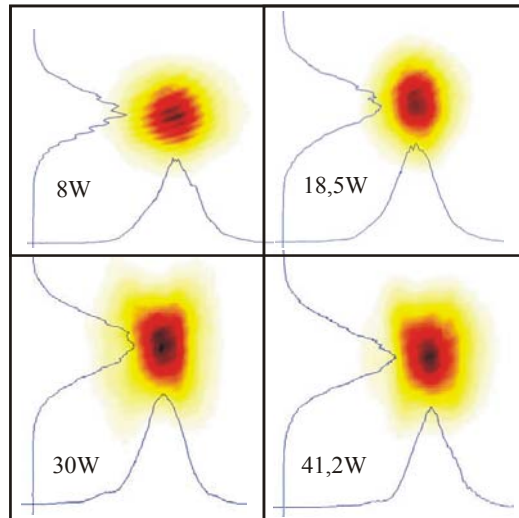


6.3 pav. Lazerio su dviem aktyviaisiais elementais išvadinės galios priklausomybė nuo kaupinimo galios.

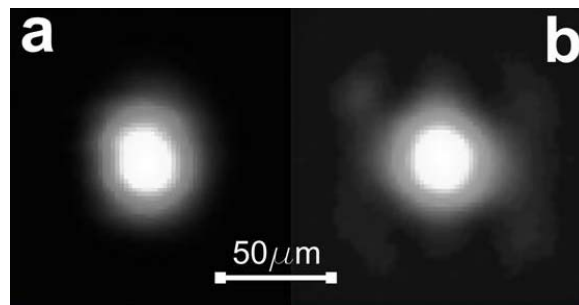
Registruojant lazerio išvadinės spinduliuotės erdvinius skirstinius už ~2 m nuo lazerio išvadinio veidrodžio (žr. 6.4 paveikslą) nustatyta, kad didinant lazerio išvadinę galią, simetriška artima Gauso skirstiniui moda transformuojasi į šiek tiek elipsinę lazerio modą, tačiau, kaip matosi iš paveikslo, jos intensyvumo skirstiniai x ir y kryptimis išlieka glotnūs ir artimi Gauso skirstiniui.

6.5 paveiksle pateikti lazerio išvadinės spinduliuotės erdviniai skirstiniai $f=100$ mm lęšio židinio plokštumoje, kurie atitinka išvadinių pluoštelių tolimąjį lauką. Pradiniai

pluoštelio kokybės įvertinimai rodo, kad jos kokybės parametras M^2 yra ne didesni nei 1,5.



6.4 pav. Lazero spinduliuotės intensyvumo skirstiniai.



6.5 pav. Lazero spinduliuotės intensyvumo skirstiniai $f=100$ mm lęšio židinio plokštumoje.

Yb:KGW lazeris su dviem aktyviaisiais elementais buvo išmėgintas regeneratyvinio stiprintuvo režime. Užkratui buvo panaudoti išplėsti femtosekundinio Yb:KGW osciliatoriaus impulsai (iš lazerinės sistemos „Pharos“). Regeneratyvinio stiprintuvo režime išvadinė galia siekė daugiau kaip 30W esant 200W kaupinimo intensyvumui.

Apibendrinant, šiame skyriuje pademonstruotos išvadinės galios didinimo galimybės Yb:KGW lazeryje su simetrišku rezonatorium ir dviem aktyviaisiais elementais. Didinant lazerio išvadinę galią simetriška, artima Gauso skirstiniui, moda transformuojasi į šiek tiek elipsinę, tačiau jos intensyvumo skirstiniai x ir y kryptimis išlieka glotnūs ir artimi Gauso skirstiniui. Išmatuotas pluošto kokybės parametras M^2 yra mažesnis negu 1,5 net prie didžiausių lazerio galių.

Išvados

1. Darbo metu surinktas ir matavimais aprobuotas Shack'o ir Hartmann'o bangos fronto matuoklis, pritaikytas mažų skersinių matmenų (<1x1 mm) šiluminio lęšio matavimams.
2. Pademonstruotas naujos konstrukcijos asferinis kompensatorius iš esmės mažinantis šiluminio lęšio aberacijų įtaką išilginio diodinio kaupinimo lazeriuose. Naudojant asferinį kompensatorių, generacijos slenkstis sumažėjo daugiau kaip 3 kartus, taip pat ženkliai pagerėjo lazerio pluošto intensyvumo skirstinys. Matuojant pluošto kokybės parametrus nustatyta, kad naudojant kompensatorius M^2 yra mažesnis nei 1,2 visame lazerio veikimo diapazone, tuo tarpu be kompensatoriaus M^2 kinta nuo 1,2 iki 1,4.
3. Parodyta, kad eliptinės modos panaudojimas Yb:LAG lazeryje leidžia kelis kartus padidinti stiprinamų impulsų energiją, išlaikant difrakciškai ribotus erdvinius pluošto parametrus. Taip pat, surasta lazerio rezonatoriaus konfigūracija, leidžianti palaikyti stipriai astigmatišką modą aktyviajame elemente, ir simetrišką lazerio išvadinę modą. Moduluotos kokybės režime lazeris generuoja 8 ns trukmės impulsus, o vidutinė galia siekia 5W. Tuo tarpu nuolatinės veikos režime, lazerio išvadinė galia siekia 8W (esant 52W kaupinimo galiai), o pluošto kokybės parametras M^2 neviršija 1,2 net esant maksimaliai kaupinimo galiai.
4. Išmatuotos indukuoto šiluminio lęšio charakteristikos atermalinės ir N_g orientacijos Yb:KGW kristaluose kaupinant juos diodinių lazerių spinduliuote, kurios galia siekė 100 W. Taip pat, parodėme, kad kristalo galų išsigaubimo įtaka N_g orientacijos Yb:KGW aktyviuosiuose elementuose gali siekti 50%. Atlikti tyrimai parodė, kad išbandyta „atermalinė“ kristalo orientacija nėra tinkama išilginio diodinio kaupinimo didelės vidutinės galios lazerinėms sistemoms. Nors maksimalus šiluminio lęšio stipris yra mažesnis negu kristale, kuriame šviesa sklido išilgai N_g ašies, tačiau jis yra stipriai astigmatiškas.
5. Ištirta šiluminio lęšio įtaka lazerio dinamikai. Pademonstruotas išvadinės Yb:KGW lazerio galios didinimo metodas, simetriškame rezonatoriuje patalpinant du plokštelės formos aktyviuosius elementus. Taip pat, pasiekta didžiausia išvadinė galia

Yb:KGW lazeryje, su plokštelės formos aktyviaisiais elementais, siekianti 44 W, bei išlaikant geras pluošto erdvines charakteristikas.

Literatūros saraksts

- [1] W. A. Clarkson, "Thermal effects and their mitigation in end-pumped solid-state lasers," *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 34, p. 2381–2395, 2001.
- [2] R. L. Byer, "Diode laser-pumped solid-state lasers," *Science*, vol. 239, p. 742, 1988.
- [3] D. C. Hanna and W. A. Clarkson, "A review of diode-pumped lasers," in *Advances in Lasers and Applications*, New York, 1999, pp. 1-18.
- [4] Y. Jeong, et al., "Power scaling of single-frequency ytterbium-doped fiber master oscillator power amplifier sources up to 500W," *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 13, no. 3, pp. 546-551, 2007.
- [5] L. Shah, et al., "High energy femtosecond Yb cubicon fiber amplifier," *Optics Express*, vol. 13, pp. 4717-4722, 2005.
- [6] A. Giesen and J. Speiser, "Fifteen Years of Work on Thin-Disk Lasers: Results and Scaling Laws," *IEEE J. Select Topics Quantum Electronics*, vol. 13, p. 598–609, 2007.
- [7] C. Stewen, K. Contag, M. Larionov, A. Giesen, and H. Hugel, "A 1-kW CW thin disc laser," *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 6, no. 4, pp. 650-657, 2000.
- [8] E. Innerhofer, et al., "60-W average power in 810-fs pulses from a thin-disk Yb:YAG laser," *Optics Letters*, vol. 28, no. 5, pp. 367-369, 2003.
- [9] F. Brunner, et al., "Powerful red-green-blue laser source pumped with a mode-locked thin disk laser," *Optics Letters*, vol. 29, no. 16, pp. 1921-1923, 2004.
- [10] J. Neuhaus, et al., "Subpicosecond thin-disk laser oscillator with pulse energies of up to 25.9 microjoules by use of an active multipass geometry," *Opt. Express*, vol. 16, pp. 20530-20539, 2008.
- [11] J. H. Hellstrom, V. Pasiskevicius, J. Liu, V. Petrov, and U. Griebner, "Efficient Yb:KGW laser end-pumped by high power diode bars," *Applied Physics B*, vol. 83, pp. 235-239, 2006.
- [12] F. Hoos, S. Li, T. P. Meyrath, B. Braun, and H. Giesen, "Thermal lensing in an end-pumped Yb:KGW slab laser with high power single emitter diodes," *Optics*

Express, vol. 16, no. 9, pp. 6041-6049, 2008.

- [13] W. Koechner, *Solid-state laser engineering*, 5th, Ed. Heidelberg: Springer-Verlag, 1999.
- [14] D. A. Rockwell, "A review of phase-conjugate solid-state lasers," *IEEE J. Quantum Electronics*, vol. 24, p. 1124–1140, 1988.
- [15] Y. Ojima, K. Nawata, and T. Omatsu, "Over 10-watt pico-second diffraction-limited output from a Nd:YVO₄ slab amplifier with a phase conjugate mirror," *Optics Express*, vol. 13, pp. 8993-8998, 2005.
- [16] E. Wyss, M. Roth, T. Graf, and H. P. Weber, "Thermooptical Compensation Methods for High-Power Lasers," *IEEE journal of Quantum Electronics*, vol. 38, no. 12, pp. 1620-1628, 2002.
- [17] F. Reinert and W. Lüthy, "13. , "Thermo-optically driven adaptive mirror based on thermal expansion: preparation and resolution," *Optics Express*, vol. 13, pp. 10749-10753, 2005.
- [18] F. Reinert, M. Gerber, W. Lüthy, and T. Graf, "Laser Resonator with a Thermo-Optically Driven Adaptive Mirror," in *Advanced Solid-State Photonics*, 2005.
- [19] J. J. Kasinski and R. L. Burnham, "Near-diffraction-limited, high-energy, high-power, diode-pumped laser using thermal aberration correction with aspheric diamond-turned optics," *Applied Optics*, vol. 35, pp. 5949-5954, 1996.
- [20] B. Chen, Y. Chen, J. Simmons, T. Y. Chung, and M. Bass, "Thermal Lensing of Edge-pumped Slab Lasers-I," *Applied Physics B: Lasers and Optics*, vol. 82, no. 3, pp. 413-418, 2006.
- [21] X. Yan, et al., "Numerical modeling of the thermal lensing effect in a grazing-incidence laser," *Optics Communications*, vol. 9, no. 1, pp. 1851-1857, 2009.
- [22] R. Lausten and P. Balling, "Thermal lensing in pulsed laser amplifiers: an analytical model," *J. Opt. Soc. Am. B*, vol. 20, no. 7, pp. 1479-1485, 2003.
- [23] J. Yu, H. Meng, and T. Jin, "Modeling of thermal lensing in cw end-pumped solid state lasers," in *Proceedings of SPIE*, vol. 2889, 1996, pp. 171-177.
- [24] A. Lucca, et al., "High power diode-pumped CW laser operation of Yb:CaF₂," in

CPD-A1 CLEO, 2004.

- [25] H. J. Eichler, A. Haase, R. Menzel, and A. Siemoneit, "Thermal lensing and depolarization in a highly pumped Nd:YAG laser amplifier," *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. 26, pp. 1884-1891, 1993.
- [26] H. Shao-yun, Z. Ming, Z. Yan, and F. Hong-ying, "Experimental study of thermal lensing of Nd: YAG laser," *Optoelectronics Letters*, vol. 2, no. 4, pp. 278-281, 2006.
- [27] A. Khizhnyak, G. Galich, and M. Lopiitchouk, "Characteristics of thermal lens induced in active rod of cw Nd:YAG laser," *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics*, vol. 2, no. 1, pp. 147-152, 1999.
- [28] W. Koechner, "Thermal lensing in a Nd:YAG laser rod," *Applied Optics*, vol. 9, pp. 2548-2553, 1970.
- [29] S. Chenais, et al., "Thermal lensing measurements in diode-pumped Yb-doped GdCOB, YCOB, YSO, YAG and KGW," *Optical materials*, vol. 22, pp. 129-137, 2003.
- [30] S. Chenais, F. Druon, F. Balembois, G. Lucas-Leclin, and P. Georges, "Thermal Lensing in Diode-Pumped Ytterbium Lasers—Part II: Evaluation of Quantum Efficiencies and Thermo-Optic Coefficients," *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 40, no. 9, pp. 1235-1242, 2004.
- [31] J. H. Hellstrom, S. Bjurshagen, and V. Pasiskevicius, "Laser performance and thermal lensing in high-power diode-pumped Yb;KGW with athermal orientation," *Applied Physics B*, vol. 83, pp. 55-59, 2006.
- [32] C. Liua, et al., "Influence of spherical aberrations on the performance of dynamically stable resonators," *Optics Communications*, vol. 281, p. 5222–5228, 2008.
- [33] D. Burnham, "Simple measurement of thermal lensing effects in laser rods," *Applied Optics*, vol. 9, no. 7, p. 1727–1728, 1970.
- [34] R. Misra and P. Banerjee, "Theoretical and experimental studies of pump-induced probe deflection in a thermal medium," *Applied Optics*, vol. 34, no. 18, p. 3358–3365, 1995.

- [35] H. Kogelnik and T. Li, "Laser beams and resonators," *Applied Optics*, vol. 5, p. 1550, 1966.
- [36] B. Neuenschwander, R. Weber, and H. Weber, "Determination of the thermal lens in solid-state lasers with stable cavities," *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 31, no. 6, p. 1082–1087, 1995.
- [37] A. Cabezas, L. Komai, and R. Treat, "Dynamic measurements of phase shifts in laser amplifiers," *Applied Optics*, vol. 5, no. 4, p. 647–651, 1966.
- [38] H. Welling and C. Bickart, "Spatial and temporal variation of the optical path length in flash-pumped laser rods," *Journal of the Optical Society of America*, vol. 56, no. 5, p. 611–618, 1966.
- [39] C. Pfistner, R. Weber, H. Weber, S. Merazzi, and R. Gruber, "Thermal beam distortions in end-pumped Nd: YAG, Nd: GSGG, and Nd: YLF Rods," *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 30, no. 7, p. 1605–1615, 1994.
- [40] A. Khizhnyak, G. Galich, and M. Lopiitchouk, "Characteristics of thermal lens induced in active rod of cw Nd: YAG laser," *Semiconductor Physics, Quantum Electronics and Optoelectronics*, vol. 2, no. 1, p. 147–152, 1999.
- [41] J. Blows, J. Dawes, and T. Omatsu, "Thermal lensing measurements in line-focus end-pumped neodymium yttrium aluminium garnet using holographic lateral shearing interferometry," *Journal of Applied Physics*, vol. 83, no. 6, p. 2901–2906, 1998.
- [42] J. Primot, "Three-wave lateral shearing interferometer," *Applied Optics*, vol. 32, no. 31, p. 6242–6249, 1993.
- [43] J. Hartmann, "Bemerkungen über den Bau und die Justirung von Spectrographen," *Zeitung Instrumentenkd*, vol. 20, p. 47, 1900.
- [44] J. Pfund, N. Lindlein, and J. Schwider, "Absolute sphericity measurement: a comparative study of the use of interferometry and a Shack–Hartmann sensor," *Opt. Lett.*, vol. 23, pp. 742–744, 1998.
- [45] B. M. Welsh and B. L. Ellerbroek, "Fundamental performance comparison of a Hartmann and a shearing interferometer wave-front sensor," *App Opt.*, vol. 34, 1995.

- [46] W. H. Southwell, "Wavefront estimation from wavefront slope measurements," *OSA*, vol. 70, pp. 998-1005, 1980.
- [47] D. M. Karnakis, M. R. H. Knowles, P. V. Petkov, T. Dobrev, and S. S. Dimov, "Surface integrity optimisation in ps-laser milling of advanced engineering materials," in *Proc. 4th International WLT Conference on Lasers in Manufacturing*, Munich, 2007.
- [48] C. Moorhouse, "Industrial applications of a fiber-based high-average-power picosecond laser," in *Proc. SPIE*, vol. 72010F, 2009.
- [49] "http://www.ekspla.com/repository/catalogue/infofiles/IL/application_notes/M1104%20short%20pulse%20lasers%20for%20microfabrication.pdf".
- [50] M. Kraus, S. Collmer, S. Sommer, and F. Dausinger, "Microdrilling in steel with frequency-doubled ultrashort pulsed laser radiation," in *Proc. the 8th Int. Symp. on Laser Precision Microfabrication*, Viena, 2007.
- [51] S. Haas, A. Gordijn, and H. Stiebig, "High speed laser processing for monolithical series connection of silicon thin-film modules," *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 16, pp. 195-203, 2008.
- [52] "EKSPLA, www.ekspla.com".
- [53] J. M. Eggleston, T. J. Kane, K. Kuhn, J. . Unternahner, and R. L. Byer, "The Slab Geometry Laser – Part I: Theory," *IEEE J. Quantum Electronics*, vol. 20, pp. 289-301, 1984.
- [54] J. Aus de Au, S. F. Schaer, R. Paschotta, C. Honninger, and U. Keller, "High-power diode-pumped passively mode-locked Yb:YAG lasers," *Optics Letters*, vol. 24, pp. 1281-1283, 1999.
- [55] R. Paschotta, et al., "Diode-pumped passively mode-locked lasers with high average power," *Applied Physics B*, vol. 70, pp. S25-S31, 2000.
- [56] S. Biswal, S. P. O'Connor, and S. R. Bowman, "Thermo-optical parameters measured in ytterbium-doped potassium gadolinium tungstate," *Applied Optics*, vol. 44, pp. 3093-3097, 2005.
- [57] M. C. Pujol, et al., "Structure, crystal growth and physical anisotropy of KYb(WO4)2, a new laser matrix," *J. Appl. Cryst.*, vol. 35, pp. 108-112, 2002.

- [58] V. Filippov, N. V. Kuleshov, and L. T. Bodnar, "Negative thermo-optical coefficients and athermal directions in monoclinic KGd(WO₄)₂ and KY(WO₄)₂ laser host crystals in the visible region," *Applied Physics B*, vol. 87, no. 4, pp. 611-614, 2007.
- [59] J. Z. H. Yang and B. C. Walker, "0.09-terawatt pulses with a 31% efficient, kilohertz repetition-rate Ti:sapphire regenerative amplifier," *Optic Letters*, vol. 26, pp. 453-455, 2001.
- [60] E. C. Honea, et al., "High-power dual-rod Yb:YAG laser," *Optic Letters*, vol. 25, pp. 805-807, 2000.

Summary

THERMAL LENS DIAGNOSTICS AND MITIGATION IN DIODE END PUMPED LASERS

In this thesis, analysis of thermal effects and various approaches for their mitigation in diode end pumped ultrafast lasers is presented. Experimental investigations were performed by employing Shack-Hartmann wavefront sensor which was adapted for measurements of thermal lens in diode end pumped lasers. During research, operation of high average power, diode-pumped, Nd:YVO₄ laser with aspheric aberration corrector was investigated. Actual thermal lens measurements were conducted in order to design properly shaped aberration corrector that was manufactured using a thin film deposition technology. This allows us to conclude that employment of proper thermal lens aberration compensator allowed for laser threshold reducing and ensured improved output beam quality parameter M^2 in wide pump power range. Prospects of output pulse energy scaling in diode end-pumped Yb:YAG laser by employing elliptical mode geometry was investigated. During our experiments, maximum average power in of ~ 5.5 W was obtained at repetition rates of 30-100 kHz, while in CW operation mode the 8 W output power was achieved. In spite of strongly astigmatic thermal lens due to optimized cavity design the output beam exhibits high spatial quality: beam quality parameter M^2 in both vertical and horizontal plane was close to unity. Detailed

comparative study of thermal effects in Yb doped KGW crystals with different orientation was performed. Measurements confirm, that anisotropic optical and thermal properties of Yb:KGW along with asymmetric cooling and pumping conditions for longitudinally pumped thin slab shaped active elements leads to formations highly asymmetric thermal lens. By varying parameters, such as crystal orientation, cooling geometry and pump channel shaping we can significantly reduce negative impact of thermal effects on laser characteristics. We have also shown, that end bulging contributes up to 50% to thermal lensing in end pumped Yb:KGW lasers. Moreover, we have investigated potential of laser output power scaling by implementation of symmetric cavity with two Yb:KGW active elements.

Trumpos žinios apie autorių

Vardas: Darius

Pavardė: Stučinskas

Gimimo data: 1981 04 05

Gimimo vieta: Vilnius

El. paštas: Darius.Stucinskas@ff.vu.lt

Išsilavinimas ir kvalifikacija:

1987-1999 Vilniaus Antano Vienuolio vidurinė mokykla (*brandos atestatas*).

1999-2003 Vilniaus Universitetas, Fizikos fakultetas, *Bakaluro kvalifikacinis laipsnis*.

2003-2005 Vilniaus Universitetas, Fizikos fakultetas, *Magistro kvalifikacinis laipsnis*.

2005-2009 Vilniaus Universitetas, Fizikos fakultetas, Kvantinės elektronikos katedra. *Doktorantūra*.