

**VILNIAUS UNIVERSITETAS**  
**FIZIKOS FAKULTETAS**  
**KVANTINĖS ELEKTRONIKOS KATEDRA**

Justas Girskis

**KERAMIKINIO Yb:YAG LAZERIO GENERACIJOS YPATUMŲ TYRIMAS**

Pagrindinių studijų bakalaурinis darbas

Fizikos studijų programa

Studentas

Justas Girskis

Darbo vadovas

Prof. habil. Dr. Valerijus Smilgevičius

Recenzentas

Arūnas Čiburys

Katedros vedėjas

Prof. habil. Dr. Valdas Sirutkaitis

Vilnius 2017

# Turinys

|  |    |
|--|----|
| Įvadas .....   | 3  |
| 1. Kieto kūno lazerio veikimo principai .....          | 4  |
| 1.1 Optiniai rezonatoriai .....                        | 5  |
| 1.2 Diodinis kaupinimas .....                          | 7  |
| 1.3 Nuolatinės veikos lazerio veikimo būdas .....      | 8  |
| 2. Pluošto kokybės įvertinimas .....                   | 9  |
| 3. Keraminių aktyvių terpių literatūros apžvalga ..... | 12 |
| 3.1 YAG keramikos gamyba .....                         | 12 |
| 3.2 Keramikos ir monokristalo palyginimas .....        | 12 |
| 4. Eksperimento metodika .....                         | 14 |
| 4.1 Naudojami prietaisai .....                         | 14 |
| 4.2 Tyrimo schema .....                                | 15 |
| 5. Eksperimento rezultatai .....                       | 16 |
| 5.1 Tiriamieji bandiniai .....                         | 16 |
| 5.2 Lazerinio diodo tyrimas .....                      | 17 |
| 5.3 Lazerio išėjimo galios tyrimas .....               | 19 |
| 5.4 Spinduliuotės poliarizacijos tyrimas .....         | 21 |
| 5.5 Skėsties tyrimas .....                             | 22 |
| 5.6 Bangos ilgio tyrimas .....                         | 23 |
| Pagrindiniai rezultatai ir išvados .....               | 24 |
| Literatūra .....                                       | 25 |
| Santrauka .....  | 27 |
| Summary .....  | 28 |

## **Ivadas**

Pirmąjį lazerį sukonstravo Theodoras Haroldas Maimanas 1960 - tais metais. Nuo to laiko mokslininkai stengiasi pagerinti spinduliuojamos spinduliuotės pluošto kokybę, spektrines charakteristikas, ieško naujų medžiagų, kurios spinduliuotų skirtingo dažnio elektromagnetines bangas. Tobulėjančios lazerinės sistemos pritaikomos moksliniuose tyrimuose, medicinoje, pramonėje, kariuomenėje[1,2].

Labai svarbu, kad aktyvioji medžiaga, kuri spinduliuoja lazerinę spinduliuotę, pasižymėtų dideliu šiluminiu laidumu, cheminiu stabilumu, atsparumu mechaniniams virpesiams. Tokiomis savybėmis pasižymi monokristalai, tačiau jų gamybos procesas yra sudėtingas ir brangus. Vos po keturių metų, kai buvo sukurtas pirmas lazeris, mokslininkai aktyviajam elementui panaudojo keramiką ir sėkmingai generavo lazerinę spinduliuotę [3]. Vis dėl to tuometė keramika turėjo daug defektų: mažą šviesos pralaidumą, nes buvo sudaryta iš mažų grūdelių, kurių dydis buvo nuo kelių dešimčių iki šimtų mikronų, tačiau granuliuotose tarpuose dėl nešvarios gamybos žaliavos likdavo priemaišų. Keraminių elementų gamybos procesas tobulinamas dar ir šiandien: mažėja nereikalingų medžiagų kiekis elemente, didinamas šiluminis elementų laidumas. 1995 metais buvo sukonstruotas pirmasis keraminius itrio aliuminio granato lazeris, kurio efektyvumas mažai kuo skyrėsi nuo monokristalinio lazerio[4]. Tobulėjant keramikos gamybos procesui, pagaminami vis kokybiškesni elementai, kurie nuolat bandomi siekiant rasti optimaliausią, efektyviausią variantą.

Šio darbo tikslas buvo: ištirti legiruoto iterbio jonais turimų keramikinio itrio aliuminio granato pavyzdėlių generacines savybes bei gautus rezultatus palyginti su literatūroje esančiais duomenimis.

Darbo užduotys:

- Apžvelgti keraminių itrio aliuminio granato, legiruoto iterbio jonais, lazerių charakteristikas.
- Sukonstruoti lazerinį modulį naudojant keramiską Yb:YAG aktyviąsias terpes bei išmatuoti jų generacines charakteristikas
- Palyginti rezultatus su Yb:YAG monokristalo charakteristikomis.

## 1. Kieto kūno lazerio veikimo principai

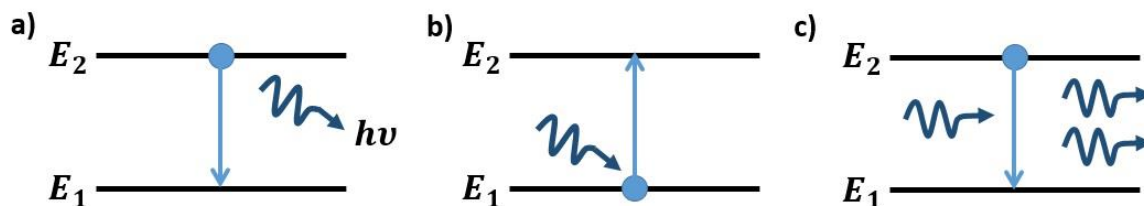
Nilsas Boras ir Ernestas Rezerfordas 1913 metais paskelbė straipsnį apie atomo spinduliavimo teoriją [5]. Pagal ją, atomas sudarytas iš stacionarių energijos būsenų, kuriuose elektronams svyruojant nevyksta spinduliavimas. Įvykus šuoliui iš vienos stacionarios būsenos į kitą yra arba išspinduliuojamas, arba sugeriamas fotonas, kurio energijos kvantas yra stacionarių būsenų energijų skirtumas:

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

Kiek vėliau, 1916 metais, Albertas Einšteinas papildė kolegų teoriją teigdamas, jog egzistuoja savaiminė spinduliuotė, sugertis ir priverstinė spinduliuotė [6]. Einšteinas savaiminę spinduliuotę apibūdino kaip spontanišką elektrono šuolį iš aukštesnio lygmens į žemesnį, kurio metu yra išspinduliuojamas fotonas, kurio energija yra  $E_2 - E_1$ . Dėl šuolių atsitiktinumo tokios spinduliuotės negalima tiksliai nusakyti. Be to, spinduliuotė nekoherentinė, nes fotonų fazės nesuderintos tarpusavyje, o spinduliavimo kryptis ir poliarizacija - atsitiktinės.

Sugertimi Albertas Einšteinas apibūdino procesą, kurio metu nesužadinti, žemiausioje energetinėje būsenoje esantys atomai sugeria elektromagnetinę spinduliuotę ir atomo elektronai įgauna  $h\nu$  dydžio energijos kvantą. Elektronas proceso metu peršoka į aukštesnį lygmenį, kurio energija gali būti nustatyta pagal 1.1 formulę. Tame lygmenyje elektronas gyvuos tol, kol įvyks savaiminis spinduliavimas arba iki kol elektronas bus paveiktas elektromagnetinės spinduliuotės ir įvyks priverstinis spinduliavimas.

Priverstinę spinduliuotę vokiečiai apibūdino kaip procesą, kurio metu atomas, veikiamas išorinės elektromagnetinės spinduliuotės, gali išspinduliuoti fotoną, kurio energija lygi  $h\nu$ . Elektronas, peršokdamas į žemesnį lygmenį, išspinduliuoja energijos kvantą lygų žadinusio fotono energijai. Atsiradęs fotonas turi tokią pačią fazę, dažnį, poliarizaciją ir kryptį kaip ir sugertasis. Visi trys procesai pavaizduoti 1 pav.



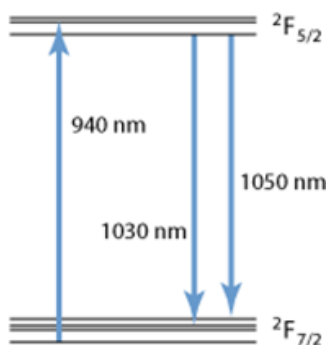
1 pav. Šviesos sugerties ir spinduliavimo schemas: a) savaiminė spinduliuotė, b) sugertis, c) priverstinė spinduliuotė.

Dviejų lygmenų sistemos dalelių pasiskirstymą aprašo Bolzmano pasiskirstymo funkcija:

$$\frac{n_2}{g_2} = \frac{n_1}{g_1} \exp\left(-\frac{E_2 - E_1}{kT}\right) \quad (1.2)$$

čia  $n$  – užpilda,  $g$  – lygmenų išsigimimo kartotinumai.

Dviejų lygmenų pusiausvyrosios sistemos atveju lazerinio stiprinimo būti negali, nes elektromagnetinė spinduliuotė yra sugerama. Todėl lazerinės spinduliuotės stiprinimui reikia nepusiausvyrinės sistemos. Tokia sistema pasižymi itrio aliuminio granatas legiruotas iterbio jonais.

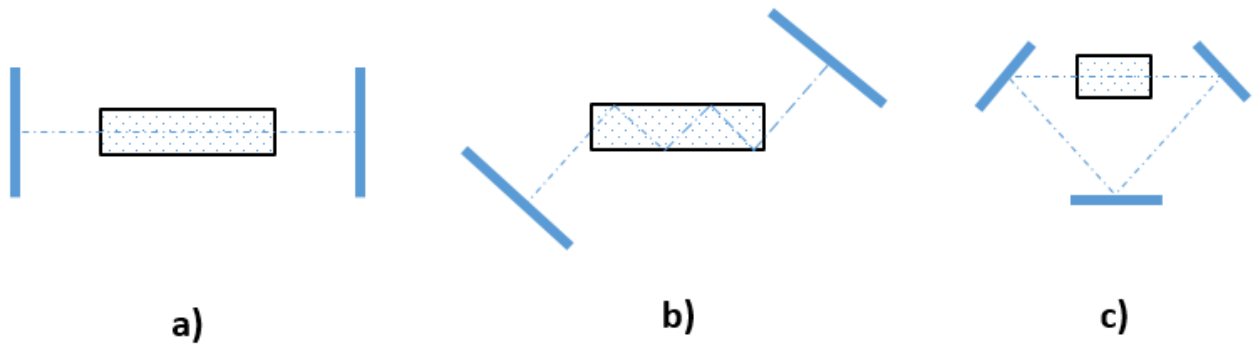


2 pav. Dviejų energijos lygmenų santykinė užpilda pusiausvyroje sistemoje[7].

2 pav. parodyta kvazi-trijų lygmenų itro aliuminio granato, legiruoto iterbio jonais, energijos lygmenų sistema. Tokią sistemą sudaro dvejų lygmenų grupės, kurie turi daug lygmenų, atskirtų mažais energijos tarpais. Žadinant 940 nm bangos ilgio spinduliuote sistema pereina iš  ${}^2F_{7/2}$  į  ${}^2F_{5/2}$  lygmenį, o dvejų bangos ilgių - 1030 nm ir 1050 nm - priverstinė spinduliuotė - vykstant šuoliui iš žemiausio viršutinės grupės lygmens į žemesnę grupę.

## 1.1 Optiniai rezonatoriai

Rezonatoriaus - tai teigiamą grįžtamąjį ryšį užtikrinanti lazerio dalis, būtina spinduliuotės stiprinimui. Grįžtamasis ryšys formuojamas grąžinant dalį sklindančios spinduliuotės atgal į aktyvų elementą. Tai yra pasiekama naudojant atspindinčius paviršius, įvairių formų veidrodžius: plokščius, paraboloidinius, sferinius ir visiško atspindžio prizmes. Kelios galimos rezonatorių konfigūracijos pateiktos 3 pav. [6]



3 pav. Galimos rezonatorių konfigūracijos: a) plokščiasis, b) su zig-zaginiu optiniu keliu lazeriniame elemente, c) žiedinis. (mėlyna spalva pažymėti veidrodžiai, juodų kontūrų stačiakampis - aktyvusis elementas).

Siekiant didelio lazerio efektyvumo, reikia atsižvelgti į rezonatoriaus veidrodžių dangas. Norint išlaikyti mažą generacijos slenkstį, įvadinis veidrodis turi būti padengtas didelio atspindžio koeficiento dielektrine danga. Įprastai tokių dangų atspindžio koeficientas labai didelis ( $> 99,8\%$ ), o sugertis maža.

Tinkamo rezonatoriaus parinkimas yra labai svarbus, nes nuo to priklauso spinduliuojamos spinduliuotės savybės: monochromatiškumas, galia, koherentiškumas, kryptingumas bei generuojamos spinduliuotės erdvinis skirstinys.

Fotonams sklindant į priešingas kryptis susidaro stovinčios bangos, todėl iš stiprinimo kontūro išskiriami tam tikri bangos ilgiai, kuriems esant ir vyksta generacija. Tačiau dar didesnę įtaką rezonatoriui daro lazerio spinduliuotei, nes formuojasi spinduliavimo lauko būsenos, kurios vadinamos modomis.

Renkantis rezonatoriaus tipą svarbu atsižvelgti į pluošto dydžio rezonatoriuje pastovumą, t.y. atsispindėjusi šviesa po keleto ciklų neišsiplėstų taip, jog galėtų išeiti iš rezonatoriaus.

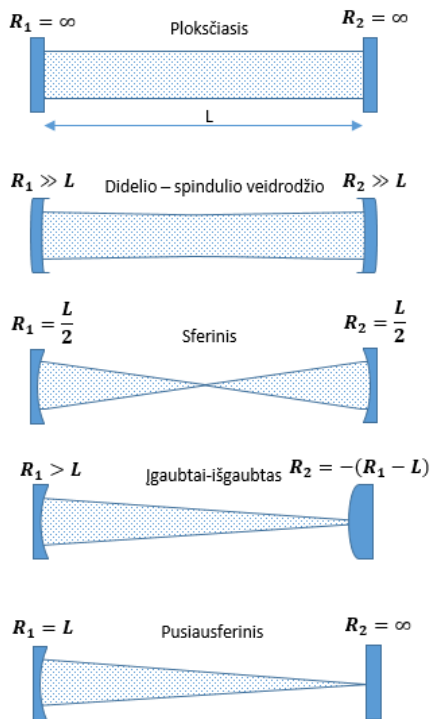
Panagrinėkime rezonatorių, sudarytą iš dviejų sferinių paviršių. Norint sužinoti ar rezonatorius bus stabilus, reikia žinoti sferinių veidrodžių kreivumo spindulius ir atstumą tarp jų. Neskaičiuojant elektromagnetinio lauko pasiskirstymo ant veidrodžių, difracinių nuostolių ir fazės poslinkio sudėtingomis formulėmis, galima įvertinti optinį rezonatoriaus stabilumą įvedant stabilumo parametrus  $g_1$  ir  $g_2$  [6]:

$$g_{1,2} = 1 - \frac{L}{R_{1,2}} \quad (1.1.1)$$

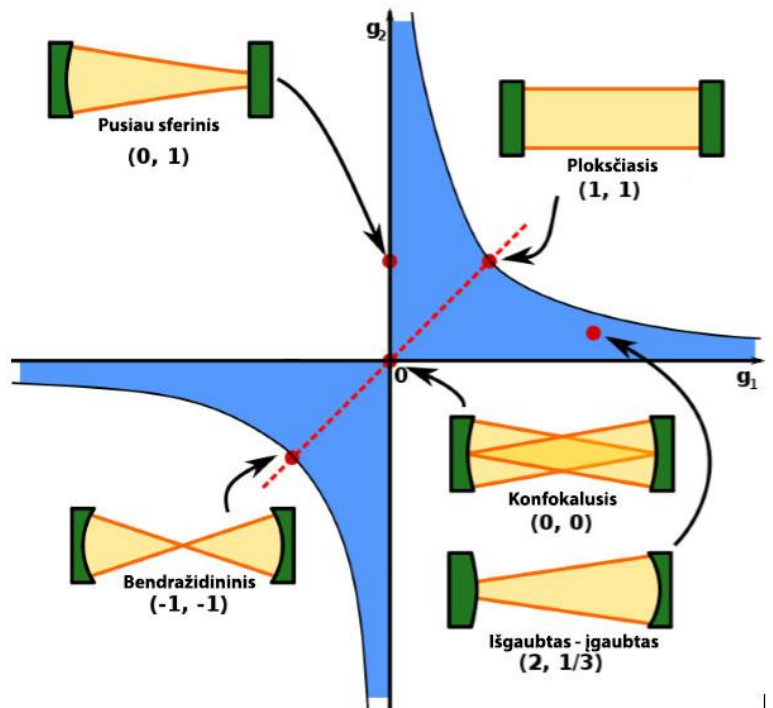
čia  $L$  – atstumas tarp rezonatoriaus veidrodžių,  $R_{1,2}$  – veidrodžių kreivumo spinduliai.

Žinant juos galima įvertinti rezonatoriaus difracinius nuostolius:

$$0 \leq g_1 g_2 \leq 1 \quad (1.1.2)$$



4 pav. Dažniausiai naudojamos kieto kūno lazerio rezonatorių konfigūracijos.



5 pav. Stabilumo diagrama dviejų veidrodžių optiniame rezonatoriuje (užtūšuota sritis žymo stabilų rezonatorių)[9].

Rezonatorius dažnai apibūdinamas tašku  $(g_1, g_2)$  koordinatų sistemoje (5 pav.). Sritis, kuri yra užtūšuota, atitinka mažų difrakcinių nuostolių sritį. Šioje srityje yra tenkinama  $0 \leq g_1 g_2 \leq 1$  sąlyga, todėl rezonatorius yra stabilus ir gali generuoti lazerinę spinduliuotę. Bendru atveju pastovūs optiniai rezonatoriai yra tie, kurių pluošto ir veidrodžių kreivumas yra suderintas. Kitos sritys, kai  $-1 \leq g_1 g_2 \leq 0$ , yra nestabilios, ten susidaro dideli difrakciniai nuostoliai. Kieto kūno lazeriuose plačiausiai naudojamos rezonatorių konfigūracijos pateiktos 4 pav.

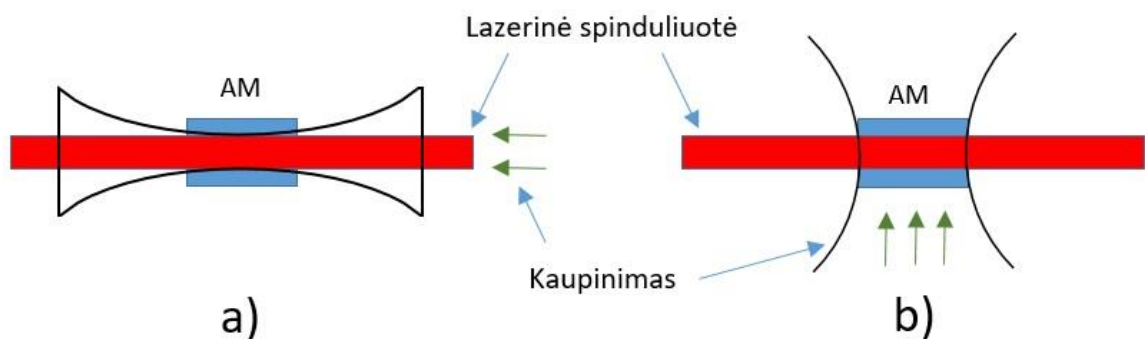
## 1.2 Diodinis kaupinimas

Puslaidininkiniai lazeriai puikiai tinka kietų kūnų lazerių kaupinimui. Lyginant su kaupinimo lempomis, puslaidininkiniai lazeriai pasižymi ilgaamžiškumu, siauru spinduliuotės spektru, mažais matmenimis. Keičiant darbinę diodo temperatūrą, galima derinti centrinį bangos ilgį, todėl įmanoma derinti spinduliavimo spektro juostos maksimumą su kaupinamo elemento sugerties juosta. Įprastai tik 2-3% kaupinimo lempų galios paverčiama lazerine spinduliuote, o kaupinant puslaidininkiniais lazeriais pasiektas 65% galios keitimo efektyvumas [10]. Pagrindiniai skirtumai tarp kaupinimo lempų ir puslaidininkinių lazerių naudojamų aktyviųjų lazerinių terpių kaupinimui pateikti 1- oje lentelėje.

1 lentelė. Kaupinimo lempų ir puslaidininkinių lazerių parametrai[6].

| Parametras               | Kaupinimo lempa | Puslaidininkinis lazeris |
|--------------------------|-----------------|--------------------------|
| Darbo laikas, val        | 500-1000        | 10000-50000              |
| Maitinimo įtampa, V      | 2000-5000       | 2-4                      |
| Maitinimo šaltinis       | Didelis         | Mažas                    |
| Spektrinė emisija        | Plati           | Siaura, derinama         |
| Perdavimo efektyvumas, % | 4-8             | ≈100                     |
| Lazerio efektyvumas, %   | 0,5-2           | 10-40                    |

Žadinant puslaidininkinių lazerių spinduliuote naudojamos išilginio ir skersinio kaupinimo schemos (6 pav.). Išilginio kaupinimo atveju vyksta efektyvesnis energijos perdavimas. Taip pat lengviau generuoti  $TEM_{00}$  modą, tačiau dėl nevienodo kaupinimo pluošto intensyvumo pasiskirtymo skersinėse koordinatėse aktyviojoje medžiagoje pasireiškia termo-optiniai reiškiniai, kurie trukdo pasiekti didesnės galios lazerinę spinduliuotę.



6 pav. Diodinio kaupinimo schemos: a) išilginio kaupinimo schema, b) skersinio kaupinimo schema (AM-aktyvioji medžiaga)[10].

### 1.3 Nuolatinės veikos lazerio veikimo būdas

Pagal galios spinduliavimo pobūdį lazeriai skirstomi į nuolatinės ir impulsinės veikos. Kai sudaroma pastovi užpildos apgrąža aktyviojoje medžiagoje, lazeris veikia nuolatinės veikos režimu, t.y.

nuolatos spinduliuoja elektromagnetines bangas. Šiai veikai svarbu, jog aktyvusis elementas būtų geras šilumos laidininkas. Nuolatinės veikos fotonų skaičius rezonatoriuje[6]:

$$F = \frac{M_2}{1/(\kappa\tau_c) - M_2} \quad (1.3.1)$$

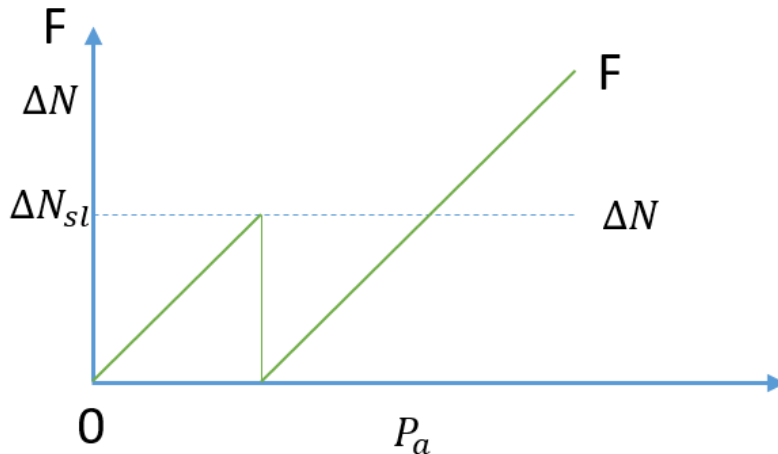
čia  $F$  – fotonų skaičius,  $M_2$  - lazerinių lygmenų užpilda

Kol viršutinio lazerinio lygmens užpilda yra mažesnė negu  $M_2 < 1/(\kappa\tau_c)$ , tol fotonų skaičius rezonatoriuje yra mažas ir sunkiai išskiriamas iš rezonatoriaus triukšmo lygio. Viršijus slenkstinę ribą  $M_2^{sl} = 1/(\kappa\tau_c)$ , rezonatoriuje esančių fotonų skaičius ima didėti eksponentiškai. O viršijus slenkstinę kaupinimo spartą, fotonų skaičius aprašomas:

$$F = \left[ \frac{P_a}{P_a^{sl}} - 1 \right] \quad (1.3.2)$$

čia  $P_a$  – kaupinimo sparta,  $P_a^{sl}$  – slenkstinė kaupinimo sparta.

Tuo metu, kai viršijamas generavimo slenkstis, didinama kaupinimo sparta, fotonų skaičius rezonatoriuje didėja tiesiškai (7 pav.).

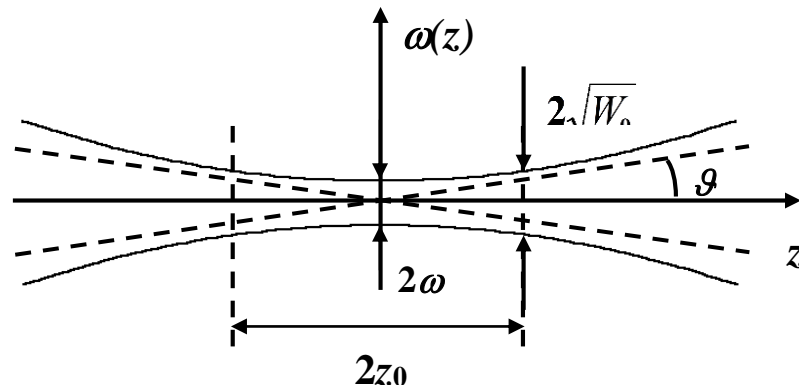


7 pav. Užpildos apgrąžos  $\Delta N$  ir generuojamų fotonų skaičiaus  $F$  priklausomybės nuo kaupinimo galios  $P_a$

## 2. Pluošto kokybės įvertinimas

Vienas iš svarbiausių lazerio parametrų yra pluošto kokybė. Priklausomai nuo pritaikymo srities, gali būti svarbu sufokusuoti spinduliuotę į kuo mažesnę dėmę, kitur - sumažinti pluošto skėstį ir palikti puoštą kaip galima nekintantį. Pramonėje naudojamose lazeriuose pluoštas yra sufokusuojamas kaip galima į mažesnę dėmę, jog virinimo, pjovimo darbai vyktų kuo greičiau ir efektyviau. Telekomunikacijose svarbu, jog signalas neišplistų, neišsisklaidytų ir būtų perduotas gavėjui.

Kadangi lazerinei spinduliuotei generuoti reikalingas rezonatorius, kuriame šviesa atsispindi nuo vieno veidrodžio iki kito, pluoštas išplinta dėl difrakcijos, tai vienas iš siekiamiausių skersinės šviesos darinių yra Gauso pluoštas. Parametrai, kurie nusako tokio pluošto savybes, yra  $w_0$  – siauriausias Gauso pluošto dėmės dydis židinyje,  $z_R$  – Relėjaus atstumas (kuriame pluošto spindulys padidėja  $\sqrt{2}$  karto lyginant su sąsmauka),  $\theta$  – skėsties kampas.



8 pav. Gauso pluošto vaizdinys ties sąsmauka[11]

Gauso pluošto spindulys  $w_0$  yra susijęs su Relėjaus atstumu:

$$w(z) = w_0 \left[ 1 + \left( \frac{z}{z_0} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.1)$$

Didėjant Relėjaus atstumui didėja Gauso pluošto spindulys, todėl mažiausia sufokusuota dėmė, kai  $z_0$ . Esant  $z \gg z_0$  reikšmėms galima suskaičiuoti skėsties kampą, kuris yra aprašomas:

$$\theta_0 = \frac{2}{\pi} \frac{\lambda}{2w_0} \quad (2.2)$$

Skėsties kampas priklauso nuo bangos ilgio ir sąsmaukos diametro santykio. Didėjant sąsmaukos diametru skėstis mažėja, todėl naudojami pluoštų plėstuvai, kad signalai būtų perduoti didelius atstumus su maža skėstimi.

Mažiausia sufokusuota Gauso pluošto dėmė, kai  $z_0$  (8 pav.), o vertei kintant didėja pluošto spindulys. Atstumas, kuriame pluošto spindulys yra  $\sqrt{2}$  kartus didesnis už mažiausią sufokusuotą dėmę vadinamas pluošto fokusavimo gyliu, išraiška parodyta formulėje:

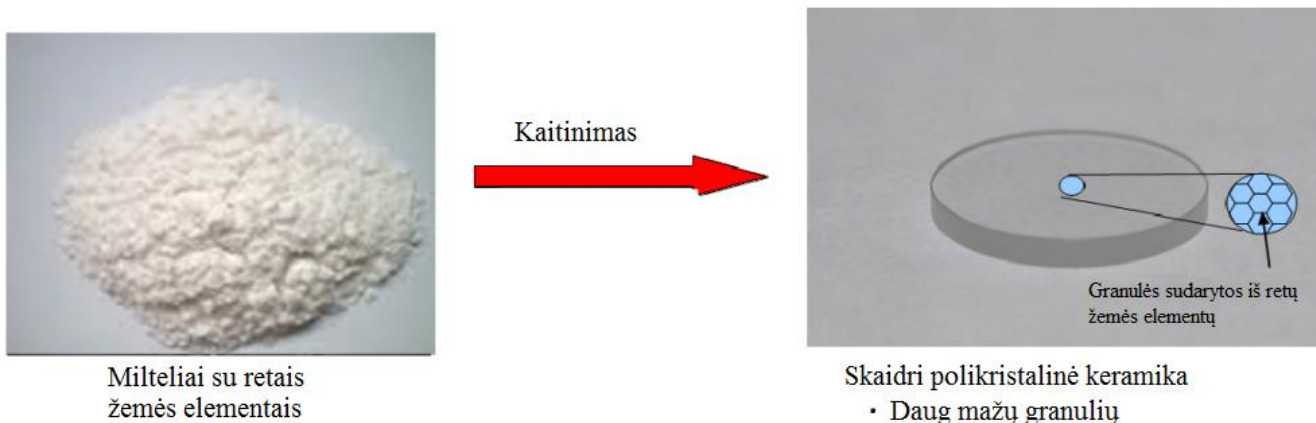
$$2z_0 = \frac{2\pi w_0^2}{\lambda} \quad (2.3)$$

Didėjant sąsmaukos diametrai, didėja ir fokusavimo gylis  $2z_0$ . Iš to galima spręsti, jog neįmanoma vienu metu rasti sąlygas, kurios užtikrintų mažą sufokusuotą dėmę ir ilgą pluošto fokusavimo gylį.

### 3. Keraminių aktyvių terpių literatūros apžvalga

#### 3.1. YAG keramikos gamyba

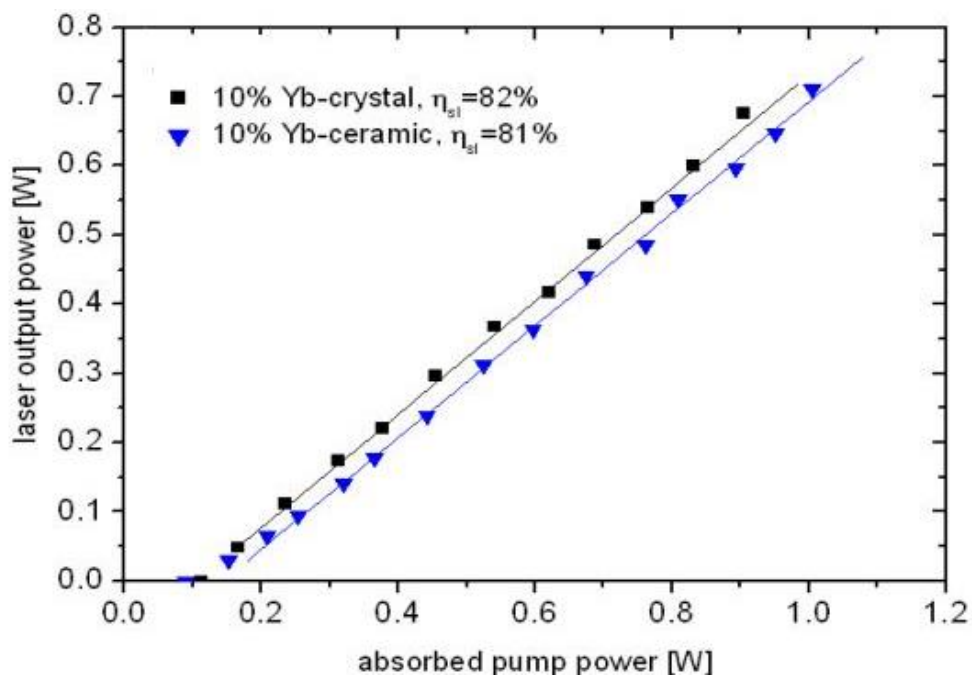
Vienas iš populiariausių YAG keramikos gamybos būdų yra Konoshima metodas [12]. Pradžioje yra pagaminama YAG granulės, kurios susmulkinamos iki nanometrų dydžio grūdelių. Gauti milteliai apdorojami aukštoje, apie 1700° temperatūroje, ir gaunama kieto būvio permatoma polikristalinė keraminė medžiaga (9 pav.) [4]. Keramika apdorojama 5÷20 valandų, iki tol kol medžiagos optinis pralaidumas pasidaro didelis. Keramikos bandiniai gali būti gaminami didelių matmenų, jų sukūrimui reikalingas trumpas laikas. Nors keramika atrodo kaip monokristalas, tačiau yra sudaryta iš granuliu, kurių dydis yra nuo kelių iki kelių šimtų mikronų. Jeigu granulėse, tarpuose tarp jų, nėra priemaišų, keramikos optinis pralaidumas yra didelis ir medžiaga mažai sklaido spinduliuotę.



9 pav. Keramikos gamybos proceso dalis, kai milteliai, sudaryti iš retų žemės elementų, verčiami į kietos būsenos polikristalinę keramiką. Adaptuota pagal [4].

#### 3.2. Keramikos ir monokristalo palyginimas

Keramikiniai Yb:YAG elementai puikiai tinka didelės galios lazeriams [13], nes šiluminis keramikos laidumas yra didelis, medžiaga yra kietesnė ir atsparesnė mechaniniam poveikiui už monokristalus. Be to, keramika yra pigesnė, greičiau pagaminama, o didesnių matmenų elementą pagaminti yra lengviau negu tokio paties dydžio monokristalą [14,15]. Gaminant keramiką lengviau įterpti didesnę kiekį Yb<sup>3+</sup> jonų, todėl sugertis yra didesnė ir tokia medžiaga yra tinkamesnė didelių galių lazerinėms sistemoms [14].



10 pav. 10% Yb<sup>3+</sup> koncentracijos Yb:YAG keramikos ir monokristalo išvadinės galios priklausomybė nuo sugertos žadinančios galios [14]

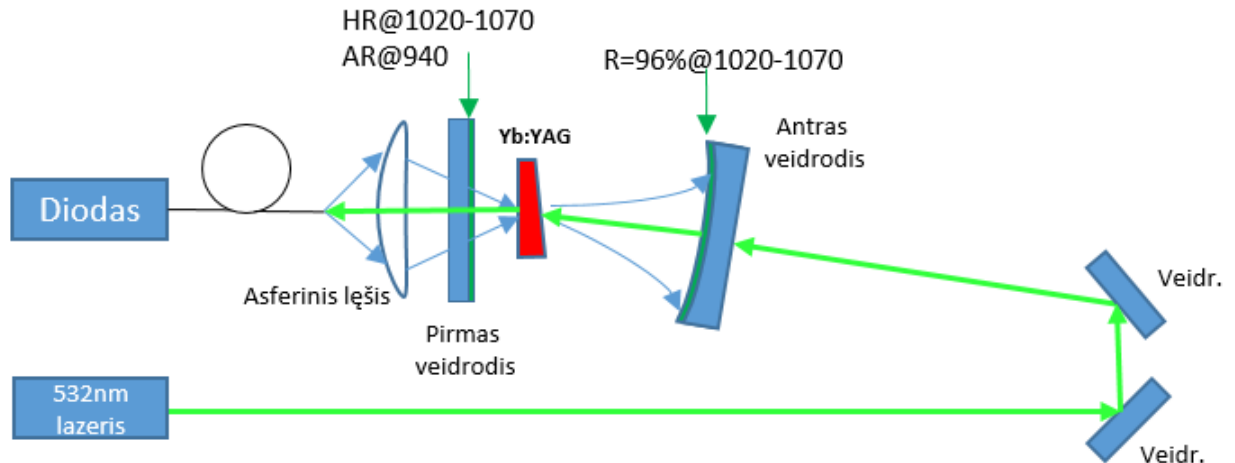
Lyginant tos pačios koncentracijos Yb:YAG keramiką ir monokristalą, slenkstinė kaupinimo galia yra panaši, tačiau keramikos išvadinė galia yra šiek tiek mažesnė lyginant su monokristalu (10 pav.), kadangi keramikos gamybos technologijos yra ne tokios efektyvios kaip monokristalų, be to, gali būti priemaišų elemente.

## 4. Eksperimento metodika

### 4.1 Naudojami prietaisai

1. Du Peltier elementai (15x15mm);
2. Du termistoriai (TH10K);
3. Du radiatoriai skirti diodo ir aktyvaus elemento šilumos nunešimui;
4. WOP tiny LDD valdiklis, skirtas palaikyti stabilią diodo temperatūrą;
5. Diodo maitinimo šaltinis Manson SDP2803;
6. Diodas BMU10A-940-01-R (1,9V11A, 940nm);
7. Šviesolaidis (skersmuo – 270 $\mu$ m, NA – 0,15);
8. Yb:YAG keramika (Yb koncentracija 5, 10, 15 at. %.);
9. Yb:YAG monokristalas (Yb koncentracija 10%);
10. Asferinis lęšis ( NA=0,4 , f=+6,24);
11. Plokščias pirmas rezonatoriaus veidrodis, kurio viena siena padengta 940 nm bangos ilgio didelio pralaidumo danga, o kita – didelio atspindžio 1020-1070nm danga;
12. Įgaubtas išvadinis veidrodis, kurio viena puse atspindį 96,5% 1020-1070nm spinduliuotės, o kreivumo spindulys 202mm;
13. Galios detektorius Spectra-Physics 407A;
14. Mikroskopas Olympus SZX7.
15. CMOS kamera CMOS-1.001-Nano-RT (iš anglų kalbos *CMOS - Complementary Metal Oxide Semiconductor*);
16. Spektrometras Ocean Optics HR2000CG-UV-NIR;
17. Spektrometras analitikjena SPECORD® PLUS;
18. Goniometras Moller- Wedel Optical Goniomat A-HR;
19. 532 nm bangos ilgio lazeris;
20. Komponentų laikikliai;
21. Derinimui skirti veidrodžiai.

## 4.2 Tyrimo schema



11 pav. Tyrimo schema tiek Yb:YAG keramikos bandiniams, tiek Yb:YAG monokristalui

Yb:YAG pagrindu kuriamo lazerio tyrimams buvo pasirinkta pusiausferinė rezonatoriaus konfigūracija su plokščiu ir įgaubtu veidrodžiais. Kadangi išvadinio veidrodžio kreivumo spindulys yra 202mm, parinktas 102 mm atstumas tarp rezonatoriaus veidrodžių. Šis rezonatorius yra stabilus, nes suskaičiavus stabilumo koeficientą pagal 1.1.1. formulę gauti rezultatai atitinka 5 pav. parodytą stabilią mėlyną zoną. Kad būtų pasiektas didžiausias lazerio veikos efektyvumas, aktyvioji medžiaga buvo įtvirtinta kuo arčiau plokščiojo veidrodžio. Rezonatoriaus optiniai elementai buvo derinti naudojantis dvejais veidrodžiais, diafragma ir 532 nm bangos ilgio lazeriu.

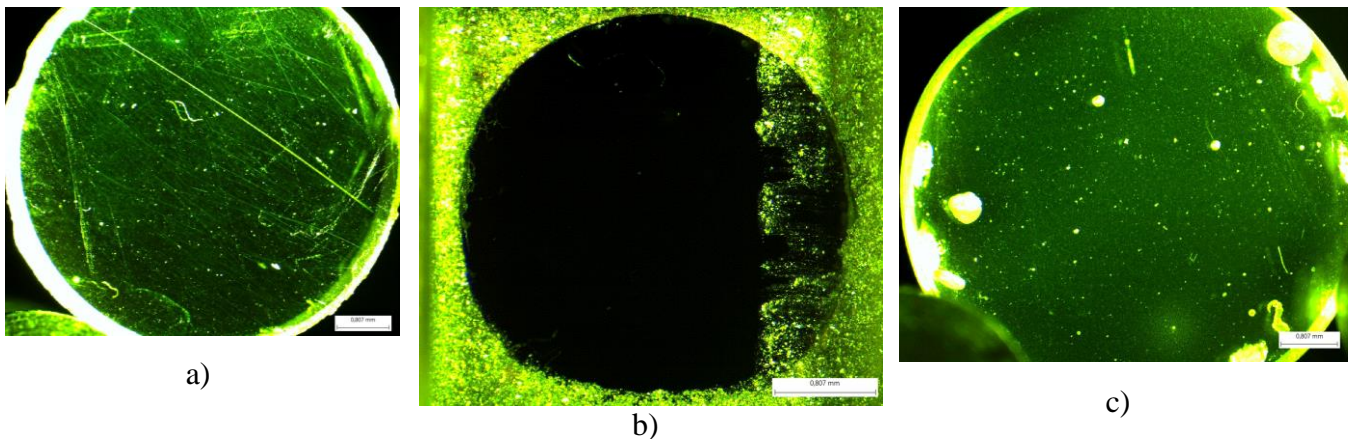
## 5. Eksperimento rezultatai

### 5.1 Tiriamieji bandiniai

- 1) Yb:YAG keramika su 10%  $\text{Yb}^{3+}$  koncentracija, 8 mm skersmens, 2 mm storio, be skaidrinančių dangų, paviršių lygiagretumo nuokrypis  $\sim 8'$  ( $0,13^\circ$ ).
- 2) Yb:YAG keramika su 5, 5, 10,10, 15, 15 at. %  $\text{Yb}^{3+}$  koncentracija, 8 mm skersmens, 1,2mm storio, be skaidrinančių dangų, paviršių lygiagretumo nuokrypis apie  $\sim 8'$  ( $0,13^\circ$ ). Keramikos buvo pagamintos tos pačios gamybos metu.
- 3) Yb:YAG monokristalas su 10%  $\text{Yb}^{3+}$  koncentracija, matmenys 5x5x2,5 mm, be skaidrinančių dangų, paviršių lygiagretumo nuokrypis  $<30''$  ( $<0.008^\circ$ ).

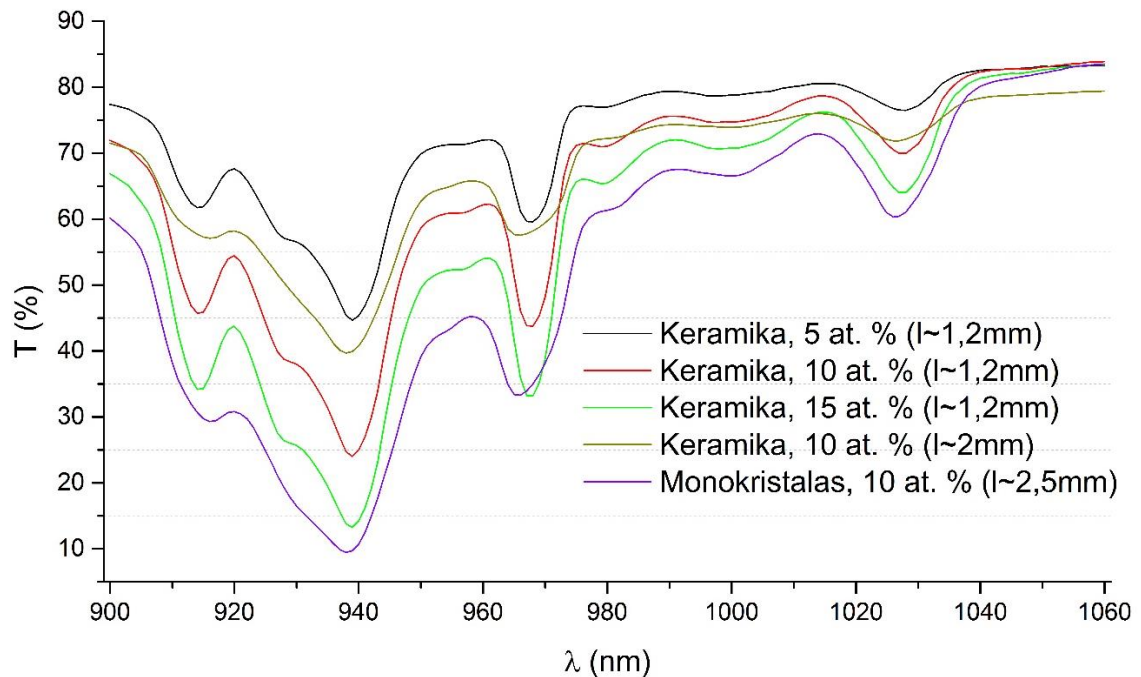
$\sim 1,7$  mm storio keramikos plokštelės buvo gautos pavasario viduryje. Pradžioje jas reikėjo paruošti darbui. Polikristalinės medžiagos buvo nušlifuotos iš abiejų pusių, dėl ko storis sumažėjo iki  $\sim 1,3$  mm. Vėliau sekė poliravimas, kurio metu rėžių gylis buvo sumažintas iki  $1\mu\text{m}$ . Gautos keramikos plokštelės, kurių storiai apie 1,2 mm.

Naudojant mikroskopą buvo padarytos keramikos pavyzdėlių bei monokristalo dirbinių paviršių nuotraukos (12 pav.). Matosi, jog keramikos pavyzdėliuose kaip paviršiuje taip ir tūryje yra defektai. Ant plonesnio keramikos paviršiaus yra įbrėžimų, kurie plika akimi sunkiai įžiūrimi. Ko gero dėl prasto medžiagų paruošimo, keramikos iškepimo, tūryje susidarė defektai, kurie labai sklaido šviesą. Monokristalinėje medžiagoje tokių defektų nebuvo pastebėta.



12 pav. a)  $\sim 1,2$  mm storio Yb:YAG keramikos vaizdas naudojant mikroskopą, b) 2,5 mm storio Yb:YAG monokristalo vaizdas naudojant mikroskopą, c) 2 mm storio Yb:YAG keramikos vaizdas naudojant mikroskopą.

Toliau sekė bandinių pralaidumo tyrimai naudojant spektrofotometrą. Buvo pamatuoti 7 vienetai keramikos tiriamųjų bandinių ir vienas monokristalas. Nustatyta, jog keramikos spektro kreivės atitinka itrio aliuminio granato legiruoto iterbio jonais monokristalo spektrą. Didžiausia sugertis yra ties 940nm. Plonesnių keramikos plokštelių su vienoda iterbio jonų priemaišų spektrai yra identiški. Taip yra dėl to, jog keramiką buvo gaminama iš to pačio mišinio, kepama tuo pačiu metu. Didėjant Yb keramikos koncentracijai sugertis didėja, o ties kaupinimo bangos ilgiu (940nm) 15 at. % keramika praleidžia apie 13,25% spinduliuotės. Tiriamųjų bandinių pralaidumo spektrai pateikti 13 pav.



13 pav. Yb:YAG keramikos ir monokristalo pralaidumo spektrai nuo 900 iki 1060nm spektro ruože.

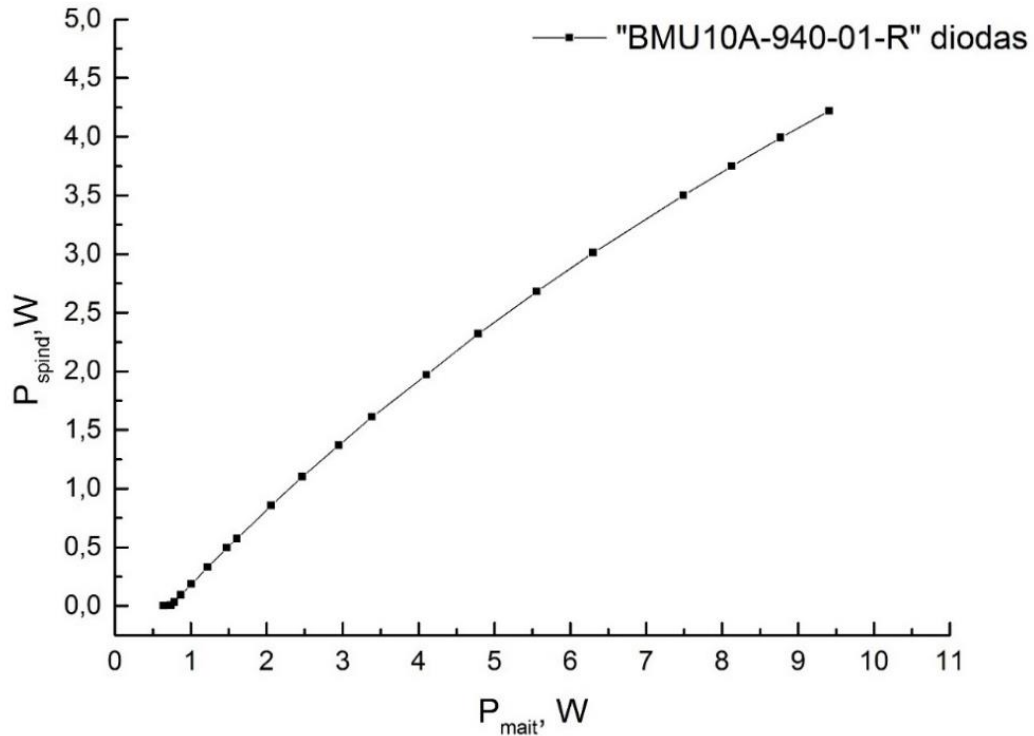
Keraminės aktyviosios terpės darinių paviršių tikslaus nelygiagretumo nepavyko nustatyti. Problema iškilo dėl tūrinių defektų, nes lazerinio pluošto atspindys nuo antros sienelės visą laiką yra išplitęs. Dėl to paviršių lygiagretumo kampą galima nusakyti netiksliai.

Bandyta nustatyti paviršių plokštiškumą naudojant interferometrą. Dėl paviršinių defektų, po poliravimo likusių įbrėžimų, plokštiškumo nustatyti nepavyko.

## 5.2 Lazerinio diodo tyrimas

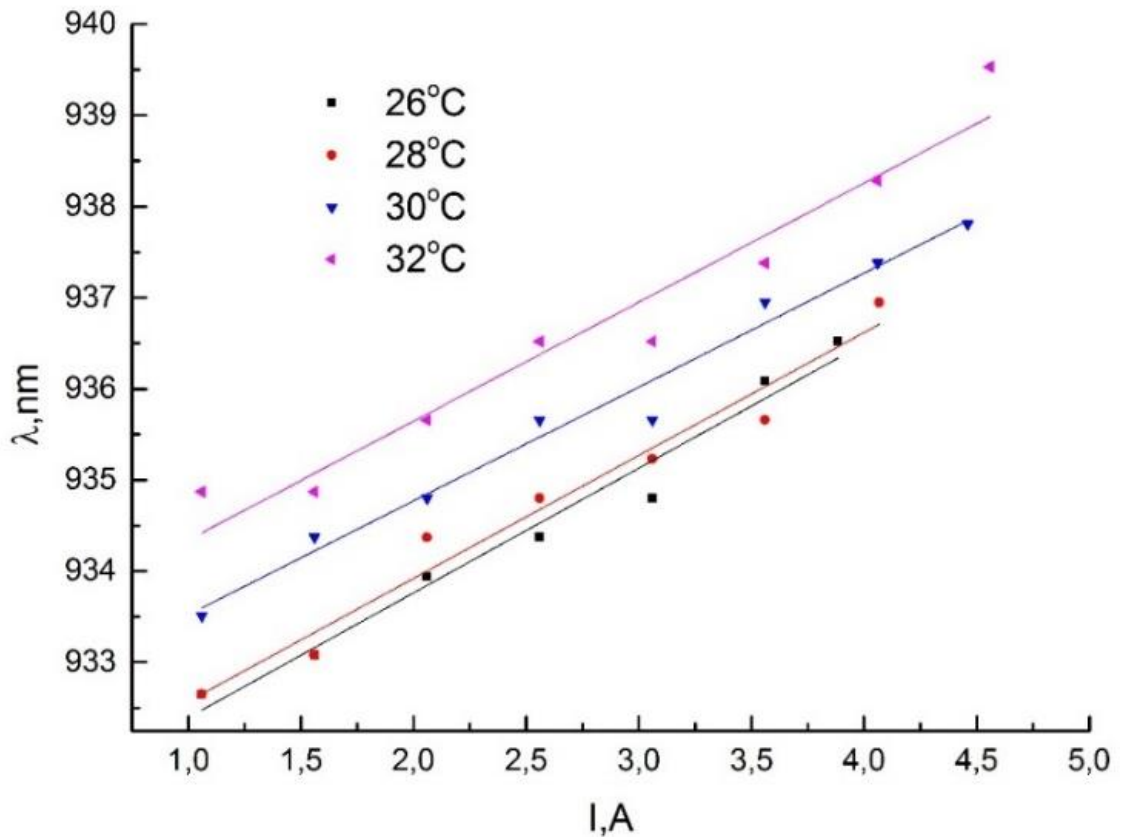
Lazerio aktyviosios terpės kaupinimui tyrime buvo naudotas "The Oclaro" kompanijos 9W BMU10A-940-01-R lazerinis diodas. Kad eksperimento metu būtų žinoma aktyviojo elemento

kaupinimo galia, reikia nustatyti išvadinės spinduliuotės galią. 14 pav. pateikta išvadinės diodo spinduliuotės galios priklausomybė nuo maitinimo galios.



14 pav. Lazerinio BMU10A-940-01-R diodo išvadinės spinduliuotės galios priklausomybė nuo maitinimo srovės ir įtampos daugiklio.

Kitas labai svarbus parametras yra lazerinio diodo darbinė temperatūra, nuo kurios priklauso lazerinės spinduliuotės dažnis. 15 pav. pateikta išeinančios spinduliuotės bangos ilgio priklausomybės nuo diodu tekančios srovės stiprio esant įvairioms temperatūroms. Didėjant diodo temperatūrai spinduliuotės bangos ilgis didėja, artėja prie 940 nm. Tai įgalina keičiant lazerinio diodo temperatūrą keisti spinduliuotės bangos ilgį, kad jis sutaptų su Yb sugerties juosta.



15 pav. BMU10A-940-01-R diodo išeinančios spinduliuotės bangos ilgio priklausomybės nuo diodu tekančios srovės stiprio esant įvairioms temperatūroms

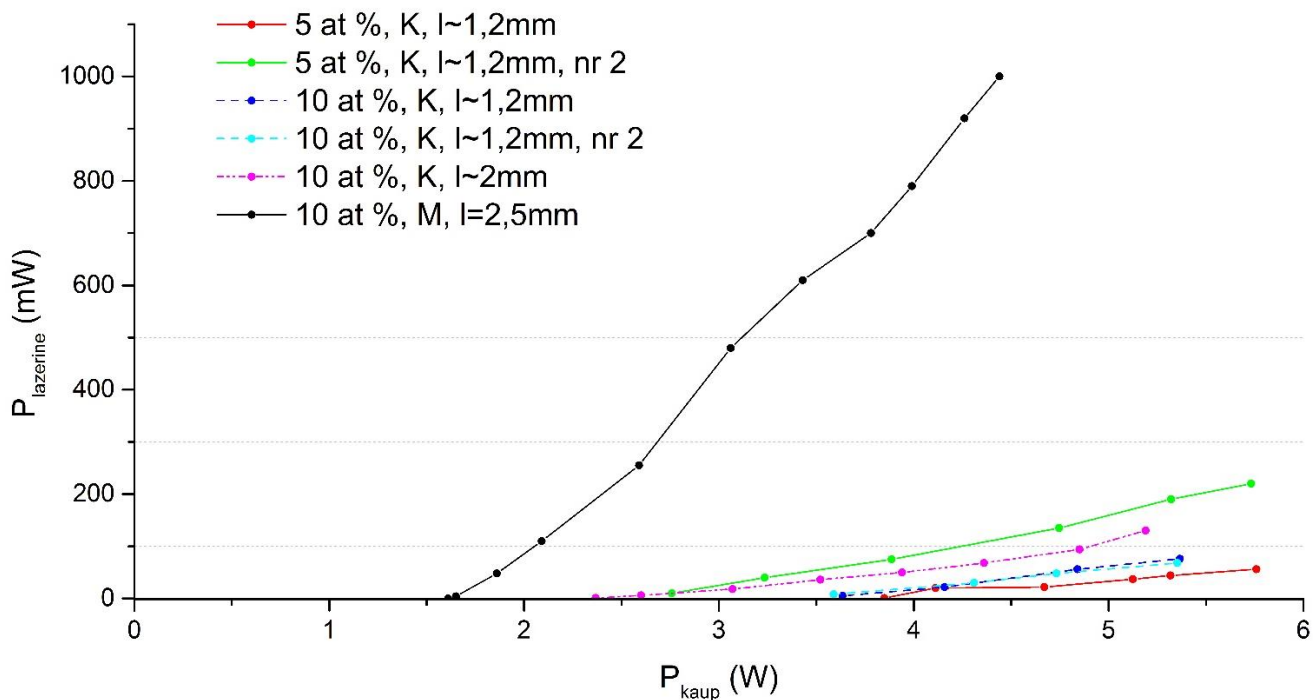
### 5.3 Lazerio išėjimo galios tyrimas

Pirmiausia buvo nustatyti tirtų lazerių generacijos slenksčiai, efektyvumai ir maksimalios išvadinės spinduliuotės galios. Tyrimai atlikti naudojant tiek Yb:YAG monokristalą, tiek turimas keramikas. Visais atvejais naudoti tie patys rezonatoriaus veidrodžiai, aktyvaus elemento pozicija rezonatoriuje buvo ta pati. Aktyvioji medžiaga buvo patalpinta 1 mm atstumu nuo plokščiojo rezonatoriaus veidrodžio. Generacijos galios priklausomybė nuo kaupinimo galios pateikta 16 pav.

Lazerinė generacija buvo pasiekta su monokristalu ir 5, 10 at. % Yb:YAG keramikomis. Nustatyta, jog mažiausią generacijos slenkstį lygų 1,61W turi 10 at. % monokristalas. Buvo pasiektas apie 22,5% efektyvumas. Polikristalinių medžiagų atveju, efektyviausia buvo 10 at. %, 2 mm storio keramika, kurios generacijos slenkstis yra 1,47 karto didesnis lyginant su monokristalu. Kitų keramikų generacijos slenkstis yra nuo 1,71 iki 2,39 karto didesnis, o efektyvumas nesiekia 4%. Nustatyti aktyviųjų medžiagų parametrai pateikti 2 lentelėje.

Lazerinės generacijos nepavyko pasiekti naudojant 15 at. % keramikos bandinius. Tai įvyko dėl prastos keramikos paviršiaus kokybės, rėžių, tūrinių defektų, priemaišų medžiagoje.

Pastebėta, jog keičiant keramikos bandinio vietą kaupinimo fokuso atžvilgiu, keičiasi ir generacijos slenkstinė galia, didžiausia išvadinė galia. Eksperimento metu buvo ieškoma efektyviausios aktyviųjų medžiagų pozicijos, stengiantis išvengti paviršinių, tūrinių defektų.

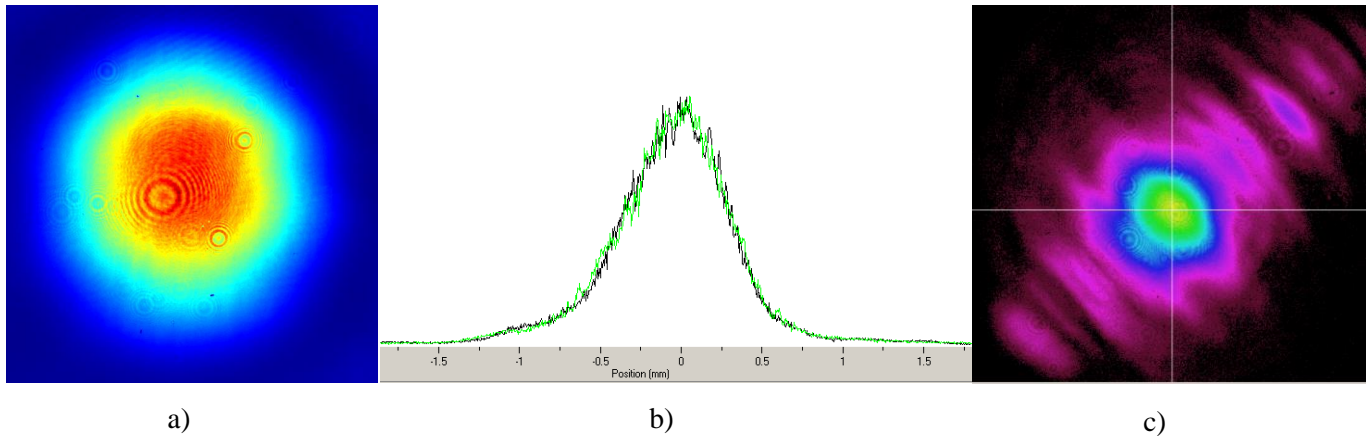


16 pav. Išvadinės lazerio spinduliuotės priklausomybė nuo kaupinimo galios, kai aktyvioji medžiaga Yb:YAG kristalas ir keramika ( K – keramika, M- monokristalas, l raide nurodytas aktyviosios medžiagos storis).

2 lent. Yb:YAG keramikų, monokristalo generacijos tyrimo duomenys.

| Medžiaga      | Koncentracija, at. % | Storis, mm | Generacijos slenkstis, W | Efektyvumas, % |
|---------------|----------------------|------------|--------------------------|----------------|
| Kristalas     | 10                   | 2,5        | 1,61                     | 22,5           |
| Keramika      | 5                    | 1,2        | 3,84                     | 0,97           |
| Keramika, nr2 | 5                    | 1,2        | 2,75                     | 3,83           |
| Keramika      | 10                   | 1,2        | 3,63                     | 1,41           |
| Keramika, nr2 | 10                   | 1,2        | 3,58                     | 1,27           |
| Keramika      | 10                   | 2          | 2,36                     | 2,5            |
| Keramika      | 15                   | 1,2        | -                        | -              |
| Keramika, nr2 | 15                   | 1,2        | -                        | -              |

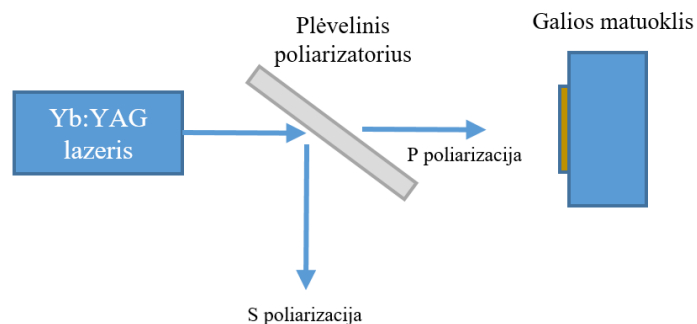
Naudojant CMOS kamerą užregistruotos monokristalo, 5 at. % antro keramikos bandinio skersinės modos (17 pav). Naudojant monokristalą, išvadinė lazerinės spinduliuotės skersinė moda yra TEM<sub>00</sub>, o eleptiškumo koeficientas 0,97. Keramikos atveju generuojama skersinė moda, kurios eleptiškumo koeficientas yra 0,95 1/e<sup>2</sup> aukštyje.



17 pav. Išvadinių Yb:YAG lazerių skersinių pluoštų profiliai, kai naudota Yb:YAG 10 at. % monokristalas(a), antras 5 at. % keramikos bandinys (b,c).

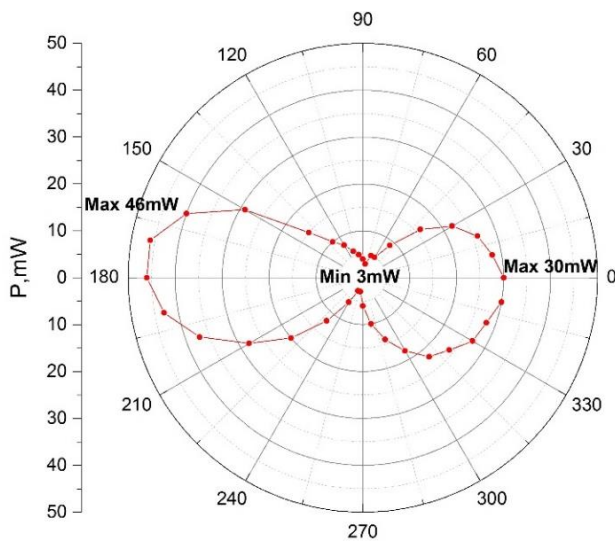
#### 5.4 Spinduliuotės poliarizacijos tyrimas

Šiuo tyrimu buvo siekiama nustatyti ar spinduliuotė, išeinanti iš rezonatoriaus, yra poliarizuota ar ne. Tam buvo naudojamas galios detektorius Spectra-Physics 407A ir plėvelinis poliarizatorius, pastatytas Briusterio kampu ( $\theta = 55,78^\circ$ ) (17 pav.).

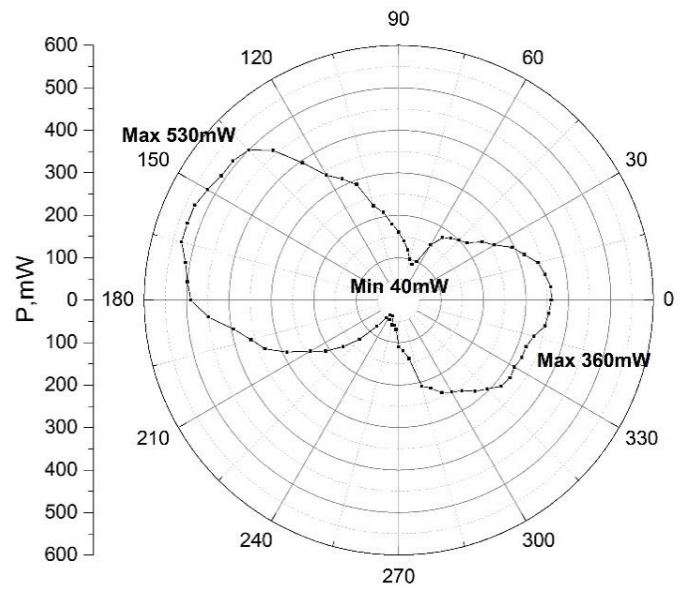


17 pav. Spinduliuotės poliarizacijos tyrimo schema

Briustelio kampu pastatyta plokštelė praleidžia tik statmeną poliarizaciją (P), o lygiagrečią (S) - atspindi. Sukant ją užregistruota poliarizuotos šviesos galios priklausomybė nuo kampo tiek Yb:YAG keramikai (10 at. %, 2 mm storio) (18 pav.), tiek monokristalui Yb:YAG (19 pav.). Nustatyta, jog abejais atvejais tai tiesiškai poliarizuota šviesa, o keramikos poliarizacijos kontrastas  $\frac{P_{max}}{P_{min}} = \frac{46}{3} \sim 15,3$ .

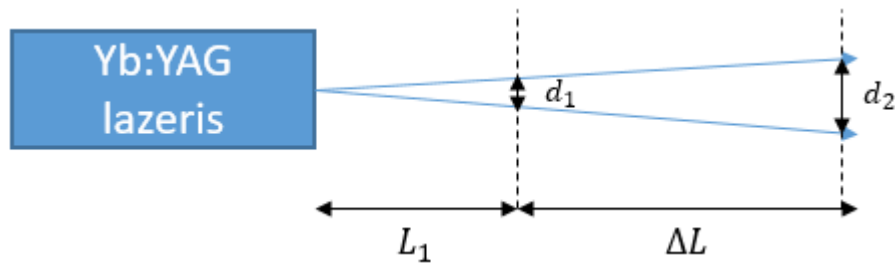


18 pav. Yb:YAG keramikinio (10 at. %, 2 mm storio) lazerio poliarizacijos indikatrė



19 pav. Yb:YAG kristalo lazerio poliarizacijos indikatrė

## 5.5 Skėsties tyrimas



20 pav. Skėsties tyrimo schema

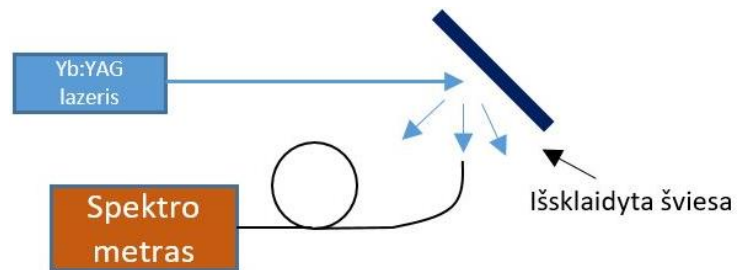
Nustatant pluošto skėstį buvo naudojama CMOS kamera. Atstumu  $L_1$  ir  $\Delta L + L_1$  nuo Yb:YAG keramikos (10 at. %, 2 mm storio) lazerio išmatuoti pluošto skersmenys  $d_1$  ir  $d_2$   $1/e^2$  gylyje. Skėstis apskaičiuota pagal:

$$2\theta = \frac{d_2 - d_1}{\Delta L} \quad (5.5.1)$$

Apskaičiuotoji lazerio skėstis  $\theta = 2,3$  mrad.

## 5.6 Bangos ilgio tyrimas

Naudojantis spektrometru Ocean Optics HR2000CG-UV-NIR buvo nustatyti Yb:YAG keramikos ir monokristalo lazerio bangos ilgiai. Tyrimo schema pateikta 21 paveiksliuke.



21 pav. Keramikos, monokristalo Yb:YAG lazerio bangos ilgio nustatymo schema.

Nustatyta, jog naudojant keramiką, visais atvejais išvadinės spinduliuotės bangos ilgis 1030 nm, o monokristalą – 1045 nm.

## **Pagrindiniai rezultatai ir išvados**

Sukonstruoti Yb<sup>3+</sup>:YAG keramikos ir monokristalo nuolatinės veikos lazeriai, ištirti jų parametrai. Lazerinė generacija pasiekta su monokristalu, ir 5,10 at. % keramikos bandiniais.

Naudojant 10 at. % monokristalą didžiausia išvadinė galia buvo 1W, kai kaupinimo galia – 4,4W. Generacijos slenkstis buvo 1,61W, išvadinės spinduliuotės bangos ilgis 1045nm. Polikristalinės aktyviosios medžiagos atveju, lazerio efektyvumas tesiekė 0,97-3,83%, o generacijos slenkstis buvo 1,46-2,38 kartų didesnis, lyginant su monokristalu. Mažiausias generacijos slenkstis, polikristalinių medžiagų atveju, buvo 2,367W, kai buvo naudota 2 mm storio 10 at. % keramika. Išmatuota maksimali išvadinė lazerio galia buvo 130mW, kai kaupinta 5,19W. Didžiausia išvadinės lazerinės spinduliuotės galia pasiekta naudojant antrą, 1,2mm storio 5 at. % keramikos bandinį. Nustatyta, jog kaupinant 5,732W puslaidininkinio lazerio spinduliuote, Yb:YAG lazerinės spinduliuotės galia siekia 220mW. Visais atvejais, išvadinės spinduliuotės bangos ilgis buvo 1030nm.

Naudojant 2 mm storio, 10 at. % keramiką ir monokristalą išvadinė lazerinė spinduliuotė yra tiesiškai poliarizuota, o keramikos atveju poliarizacijos kontrastas - 1:15,3. Ištirta keramikos pluošto skėstis, gauta skėsties kampas, kuris lygus 2,3mrad.

Išvados:

- 1)** Keramikos pavyzdžių lazerio išvadinio pluošto skirstinys buvo prastos kokybės, nes polikristalinėje medžiagoje buvo tūrinių defektų, kurie sklaidė spinduliuotę.
- 2)** Visų keramikos pavyzdėlių atveju išvadinė spinduliuotė buvo 1030 nm bangos ilgio, o monokristalo atveju - 1045 nm. Taip gali būti dėl to, jog dėl bandinių storių, skirtingos vidinės struktūros, yra efektyviausia generuoti tam tikros bangos ilgio spinduliuotę, kuri nėra sugerama pačioje aktyviojoje terpėje.
- 3)** Tirti keramikos pavyzdžiai nepasižymėjo dideliu efektyvumu, turėjo aukštą generacijos slenkstį, lyginant su monokristalu. Tai yra dėl to, kad pavyzdėlių kokybė buvo prasta, turėjo tūrinių ir paviršinių defektų.

## Literatūra

- [1] Friedrich Dausinger, Friedemann Lichtner, Holger Lubatschowski, Femtosecond Technology for Technical and Medical Applications, Springer Science & Business Media, September 2004, 978-3-540-20114-4
- [2] Karsten Scholle, Samir Lamrini, Philipp Koopmann, Peter Fuhrberg, 2  $\mu\text{m}$  Laser Sources and Their Possible Applications, Frontiers in Guided Wave Optics and Optoelectronics, Bishnu Pal (Ed.), February 2010, 978-953-7619-82-4
- [3] S.E. Hatch, W.F. Parsons, R.J. Weagley, Hot-Pressed Polycrystalline  $\text{CaF}_2:\text{Dy}^{2+}$  Laser, Applied Physics Letters 5(8), , October 1964, 153-154.
- [4] Jasbinder Sanghera, Woohong Kim, Guillermo Villalobos, Brandon Shaw, Colin Baker, Jesse Frantz, Bryan Sadowski, Ishwar Aggarwal, Ceramic laser materials, 2012, Materials, 5, 258-277, 1996-1944
- [5] Joseph A. Angelo, Nuclear Technology, Greenwood Publishing Group, 2004, 124-tas puslapis.
- [6] Eugenijus Gaižauskas, Valdas Sirutkaitis, Kieto kūno lazeriai, Vilnius, Vilniaus universiteto leidykla, 2008, 978-9955-33-349-4.
- [7] Laser Selection Tutorial(2015), pasiekama adresu <http://laser.photoniction.com/tutorial/#2.1> (žiūrėta 2017-01-10).
- [8] H. Kogelnik and T. Li, Laser Beams and Resonators, Appl. Opt. 5, 1966, 1550-1567
- [9] Fdominec, Laser resonator stability, Čekija, Čekijos Technikos Universitetas, 2007
- [10] Jonas Pocius, Puslaidininkiniai lazeriai kaupinamo Yb:KGW femtosekundinio lazerio veikos dinamika ir spinduliuotės parametrų optimizavimas, daktaro disertacija, 2009, Vilnius
- [11] Valerijus Smilgevičius, Fotonikos pagrindų rinktiniai skyriai : (paskaitų konspektas), Vilniaus universitetas, Kvantinės elektronikos katedra, 2000, 76
- [12] Hao Yang, Jian Zhang, Dewei Luo, Hui Lin, Deyuan Shen, Dingyuan Tang, High Power Laser Science and Engineering, Volume 1, Issue 3-4, 2013, 138-147
- [13] Angela Pirri, Daniele Alderighi, Guido Toci and Matteo Vannini, High-efficiency, high-power and low threshold  $\text{Yb}^{3+}:\text{YAG}$  ceramic laser, Vol. 17, Issue 25, 2009, pp. 23344-23349
- [14] Edgar Pawlowski, Michael Kluge, Yvonne Menke, Ulrich Peuchert, Axel Engel, Yan Lin Aung, Akio Ikesue, Kolja Beil, Rigo Peters, Henning Kuehn, Klaus Petermann, Peter Heist, Yb:YAG composite ceramic laser, Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, February 2010

[15] Laura Esposito, Jan Hostaša, Andreana Piancastelli, Guido Toci, Daniele Alderighi, Matteo Vannini, Thierry Epicier, Annie Malchère, Guillaume Alombert-Goget, Georges Boulon, Multilayered YAG-Yb:YAG ceramics: manufacture and laser performance, *Journal of Materials Chemistry C*, 2014, 2, 10138–10148

## Santrauka

Justas Girskis

### KERAMIKINIO Yb:YAG LAZERIO GENERACIJOS YPATUMŲ TYRIMAS

#### SANTRAUKA

Darbo tikslas susipažinti su kieto kūno lazerių veikimo principais, literatūroje pateiktais eksperimentais, ir ištirti keramikinių Yb:YAG bandinių, su 5, 10, 15 at. % Yb priemaišomis generacines savybes, gautus rezultatus palyginti su 10 at. % Yb:YAG monokristalo lazerio savybėmis. Eksperimento metu buvo ištirti 7 vienetai keramikos (po 2 vienetus 5, 10, 15 at. %, kai bandinio storis 1,2mm ir 10 at. %, kai bandinio storis 2 mm) ir vienas monokristalo (10 at. %, 2,5 mm storio) pavyzdys be skaidrinančių dangų. Eksperimento metu naudota pusiausvyrinė rezonatoriaus konfigūracija, kai aktyvioji terpė yra 1mm atstumu nuo plokščio įvadinio veidrodžio, o atstumas tarp rezonatoriaus veidrodžių ~102mm. Pradžioje buvo atlikti diodo kalibravimo darbai, nustatyta, kaip spinduliavimo spektras kintamas nuo veikimo temperatūros, galios.

Naudojant Yb:YAG 10 at. % koncentracijos monokristalą pasiekta 1W optinė galia, 1,61W generacijos slenkstis, 22,5% naudingumo koeficientas. Išvadinio pluošto eliptiškumo koeficientas lygus 0,97. Vėliau sekė polikristalinių bandinių tyrimai. Nustatyta, jog keramikinių pavyzdžių generacijos slenkstis yra 1,46-2,38 kartų didesnis, lyginant su monokristalu. Didžiausia keramikos aktyviosios terpės išvadinė galia pasiekta naudojant 1,2mm storio, antrą 5 at. % bandinį. Nustatyta 220mW optinė galia, 2,75W generacijos slenkstis, 3,83% naudingumo koeficientas, pluošto eliptiškumas koeficientas 0,95  $1/e^2$  aukštyje. Mažiausias generacijos slenkstis pasiektas naudojant 2 mm 10 at. % polikristalą. Nustatyta, jog lazerinė spinduliuotė prasideda kai kaupinimo galia pasiekia 2,36W, o maksimali išvadinė spinduliuotė 130mW, 2,5% naudingumo koeficientas. Naudojant kitus bandinius, slenkstinė generacija visais atvejais yra aukštesnė, o efektyvumas mažesnis. Deja, tačiau lazerinės generacijos nepavyko gauti naudojant 15 at. % keramiką. Pasinaudojus CMOS kamera pavyko nustatyti 2 mm storio, 10 at. % polikristalo aktyviosios medžiagos išvadinės spinduliuotės skėsties kampą, kuris lygus 2,3mrad. Spektrometru nustatyti lazerinės spinduliuotės bangos ilgiai. Monokristalo atveju – 1045nm, o keramikos – 1030nm. Ištirta lazerinės spinduliuotės poliarizacija 2 mm storio 10 at. % keramikos ir monokristalo atveju. Nustatyta, jog išeinanti spinduliuotė yra tiesiškai poliarizuota, o keramikos atveju poliarizacijos kontrastas - 1:15,3.

## Summary

Justas Girskis

### RESEARCH OF CERAMIC Yb:YAG LASER GENERATION AND SPECIFICATIONS

#### SUMMARY

Goals of this work were to approach the difference between Yb:YAG monocrystalline and ceramics CW lasers, to study literature review on the basics of laser technologies. This experiment was done using 1,2 mm thickness 5, 10, 15 %, 2 mm thickness 10 % ceramics and 10% monocrystalline Yb:YAG with 102 mm optical resonator. During this attempt monocrystalline showed 1,61W generation threshold and 1W output power were reached with laser efficiency of 22,5%. Afterwards I continued with ceramics laser investigation. Ceramics showed 1,46-2,38 times higher generation threshold compared to monocrystalline. Second 5 % ceramic sample showed highest output power. During this attempt a 2,75W generation threshold and 220mW output power were achieved with laser efficiency of 3,83%. Lowest 2,36W generation threshold were achieved using 2 mm thickness 10% ceramic. Other polycrystalline samples showed higher generation threshold and lower efficiency. Unfortunately, generation was not achieved using 15 % ceramics due to volume and surface defects. Using CMOS camera 2,3mrad divergence was measured for 2 mm thickness 10% ceramics. Monocrystalline laser oscillation was at 1045nm while for ceramics at 1030nm. Furthermore, output beam for 2 mm thickness 10% ceramics was linear polarized and 15 fold difference between polarization waves were got.