

Vilniaus universiteto  
Fizikos fakulteto  
Lazerinių tyrimų centras

Raimundas Burokas

DEPOLIARIZACIJOS, INDUKUOTOS DIDELĖS GALIOS YB:YAG STIPRINTUVO,  
KOMPENSAVIMAS PANAUDOJANT NANOSTRUKTŪRINIUS OPTINIUS ELEMENTUS

Magistrantūros studijų baigiamasis darbas

Lazerinės technologijos  
studijų programa

Studentas

Raimundas Burokas

Leista ginti

2021-05-21

Darbo vadovas

dr. Andrejus Michailovas

Lazerinių tyrimų centro direktorius

prof. dr. Aidas Matijošius

Vilnius 2021

# Turinys

1. Įvadas .....	3
2. Literatūros apžvalga .....	4
2.1. Trijų ir keturių lygmenų lazeriai .....	4
2.2. Depoliarizacijos susidarymas kristaluose.....	6
2.3. Depoliarizacijos kompensavimo metodai .....	9
2.4. Nanostruktūriniai optiniai elementai .....	10
2.5. Jones' o matricos .....	11
3. Tyrimo metodika .....	14
3.1. Yb:YAG 2 lėkių stiprintuvo schema .....	14
3.2. Depoliarizacijos kompensatorių tyrimo metodika .....	16
3.3. Stiprinimo, depoliarizacijos ir pluošto savybių charakterizavimo metodika .....	19
3.4. Teorinis depoliarizacijos kompensatorių modeliavimas .....	21
4. Eksperimento rezultatai .....	23
4.1. Yb:YAG stiprintuvo parametrai be depoliarizacijos kompensatorių .....	23
4.2. Depoliarizacijos kompensatorių rezultatai .....	27
4.3. Depoliarizacijos kompensatorių veikimas Yb:YAG stiprintuve .....	32
5. Pagrindiniai rezultatai ir išvados .....	38
Literatūros sąrašas .....	39
Santrauka .....	42
Summary .....	43

# 1. Įvadas

Pastaraisiais metais, ultratrumpųjų impulsų lazeriniai šaltiniai įrodė savo privalumus skaidrių ir neskaidrių medžiagų mikroapdirbime bei oftalmologijoje, ypač aukštos kokybės reikalaujančiuose procesuose. Rinkai plečiantis, atsiranda ir nauji taikymai su dideliu potencialu biologijoje, medicinoje, daugiafotoninėje mikroskopijoje [1]. Kitaip nei nuolatinės veikos ar nanosekundiniuose lazeriuose, ultratrumpųjų impulsų lazerių privalumai yra minimaliai šilumos paveikta sritis, didelis impulsų smailinis intensyvumas, didelės skyros mikroapdirbimas bei didelis apdirbimo našumas naudojant aukšto pasikartojimo dažnio impulsus [2].

Didelio smailinio intensyvumo ir didelės vidutinės galios femtosekundinėse lazerinėse sistemose yra naudojama didelė kaupinimo galia, kuri iššaukia netiesinius ir šiluminius reiškinius aktyviajame elemente. Netiesiniai reiškiniai, tokie kaip impulsų fazės savimoduliacija ar Kero efektas [3] gali būti sumažinti naudojant čirpuotų impulsų stiprinimo technologiją (*angl.* Chirped Pulse Amplification - CPA), kuomet prieš stiprinimą impulsai yra išplečiami laike, tada stiprinami, o vėliau vėl suspaudžiami iki femtosekundinių impulso trukmių [4]. Šiluminiai reiškiniai medžiagoje atsiranda tuomet, kai dalis kaupinimo spinduliuotės virsta šiluma ir dėl netolygaus šilumos pasiskirstymo kristale sukuriama temperatūriniai gradientai, kurie savo ruožtu lemia termolūžio, depoliarizacijos ir bifokusavimo atsiradimą aktyviojoje terpėje.

Depoliarizuota šviesa sklisdama pro poliarizuojančius elementus sistemoje virsta nuostoliais, be to pasižymi erdviniu netolygumu. Depoliarizacijos išaugimas ir pluošto profilio suplastėjimas smarkiai apriboja didelės galios lazerių gamybą ir jų panaudojimą. Siekiant minimizuoti depoliarizacijos kiekį, sistemoje taikomi įvairūs depoliarizacijos kompensavimo būdai [5-9]. Vienas iš būdų yra panaudoti optinį elementą, kuris sukurtų tokį patį fazės vėlinimo profilį, kaip ir indukuotas lazeriniame strype, tik su priešingu ženklu.

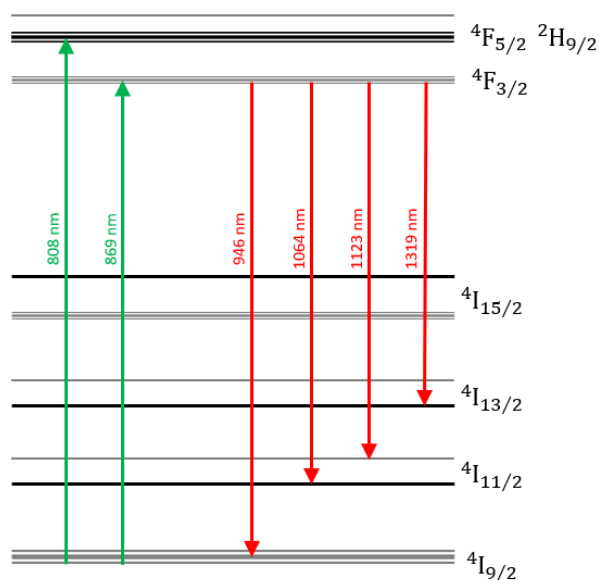
Šio darbo tikslas yra kompensuoti depoliarizaciją, atsirandančią 270 W galia kaupinamame dviejų lėkių Yb:YAG stiprintuve. Depoliarizacijai kompensuoti panaudoti lydytame kvarce įrašytas nanostruktūras, kurios sukuria fazės vėlinimo profilį, atkartojantį šilumos indukuotą Yb:YAG kristale, tik priešingo ženklo. Taip pat nustatyti depoliarizacijos laipsnio ir pluošto profilio pokyčius, panaudojant tokį depoliarizacijos kompensatorių.

## 2. Literatūros apžvalga

### 2.1. Trijų ir keturių lygmenų lazeriai

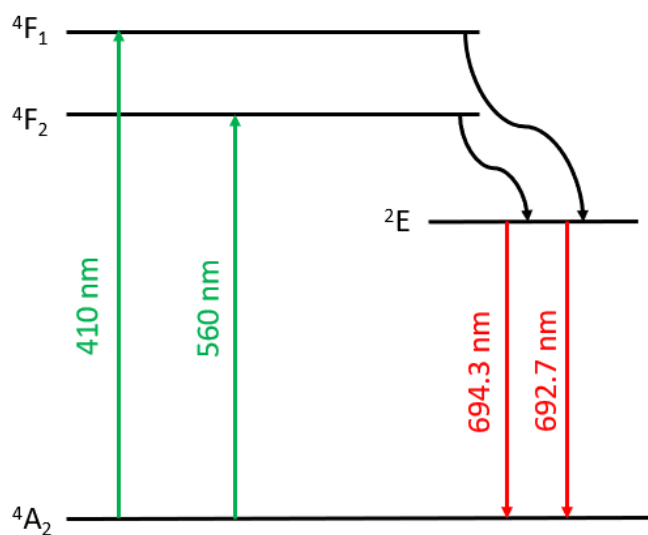
Šiame skyriuje trumpai aptariamos keturių, trijų ir kvazi-trijų lygmenų lazerinės sistemos bei pagrindiniai jų privalumai ir trūkumai.

Dauguma lazerių naudoja aktyviają terpę, turinčią keturis energetinius lygmenis. Tokiose sistemose svarbiausia užtikrinti greitą nespindulinį gęsimą iš aukščiausiojo lygmens, dar vadinamo kaupinimo juosta, į viršutinį lazerinį lygmenį ir greitą apatinio lazerinio lygmens depopuliaciją. Taip pat, apatinis lazerinis lygmuo turi būti pakankamai atskirtas nuo pagrindinės būsenos, kad nebūtų jokio šiluminio užpildymo  $\Delta E_{01} \gg k_B T$ . Sparčiai sužadinant aktyviosios terpės atomus į kaupinimo juostą, nesunkiai pasiekama užpildos apgraža ir žemas lazerinės generacijos slenkstis. Keturių lygmenų sistemose užtenka nedidelės kaupinimo galios, kad pasiekti lazerinę generaciją. Nespindulinių šuolių metu energija yra perduodama kristalo gardelei ir virsta šiluma. Šilumos kiekį nusako energijos skirtumas tarp sužadinto lygmens ir viršutinio lazerinio lygmens, plus skirtumas tarp apatinio lazerinio lygmens ir pagrindinės būsenos. Šie energijos skirtumai, kurie dažniausiai virsta šiluma, vadinami kvantiniu medžiagos defektu. Dažniausiai keturių lygmenų sistemoje yra didesnis kvantinis defektas nei trijų lygmenų sistemose, todėl jose išsiskiria daugiau šilumos. Keturių lygmenų sistemos pavyzdys yra Nd:YAG lazeris. NdYAG kristalo lygmenų struktūra pateikta 2.1 pav. [10]. Nd:YAG aktyvioji terpė turi daug sugerties juostų matomoje ir infraraudonojoje srityje, todėl gali būti kaupinama lempomis ir lazeriniais diodais spinduliuojančiais ~808 nm bangos ilgio šviesą. Nd:YAG lazerių emisijos maksimumas yra ties 1064 nm bangos ilgiu.



2.1 Pav. 4 lygmenų sistemos pavyzdys Nd:YAG lazerio lygmenų sistema [10].

Trijų lygmenų sistemos esminis skirtumas nuo keturių lygmenų sistemos yra tas, kad apatinis lazerinis lygmuo sutampa su pagrindine būseną. Šis skirtumas lemia gerokai mažesnius kvantinius defektus ir dėl to atsirandančius mažesnius šiluminius nuostolius trijų lygmenų sistemose, lyginant jas su keturių lygmenų sistemomis. Iš kitos pusės, norint pasiekti užpildos apgražą, reikia sužadinti daugiau nei pusę aktyvios terpės jonų iš pagrindinio lygmens į viršutinį lazerinį lygmenį. Tai lemia aukštą lazerinės generacijos slenkstį ir tai galime pasiekti tik su efektyviu kaupinimu. Trijų lygmenų sistemos trūkumas yra tai, kad neužkaupintos aktyviosios terpės dalis sugeria lazerinę spinduliuotę. Nors sugerta spinduliuotė gali būti vėl išspinduliuota, tačiau dažniausiai tai mažina lazerio efektyvumą. Norinti sumažinti neužkaupintos terpės dalį turime naudoti trumpesnę kristalą ir efektyviai kaupinti aktyviają terpę. Tačiau dėl tokio kaupinimo turime didelį sužadintų būsenų tankį, o tai lemia papildomus nuostolius, dėl fluorescencijos. Trijų lygmenų sistemos pavyzdys yra rubino ( $\text{Cr}^{3+}:\text{Al}_2\text{O}_3$ ) lazeris. Aktyvioji terpė turi dvi sugerties juostas ties 410 nm ir 560 nm bangos ilgiais. Sužadinus terpę, jonai pereina į metastabilią būseną, kuri yra viršutinis lazerinis lygmuo. Iš metastabilios būsenos  $^2\text{E}$  jonai relaksuoja į pagrindinę būseną, emituodami 694,3 nm arba 692,7 nm bangos ilgio šviesą.



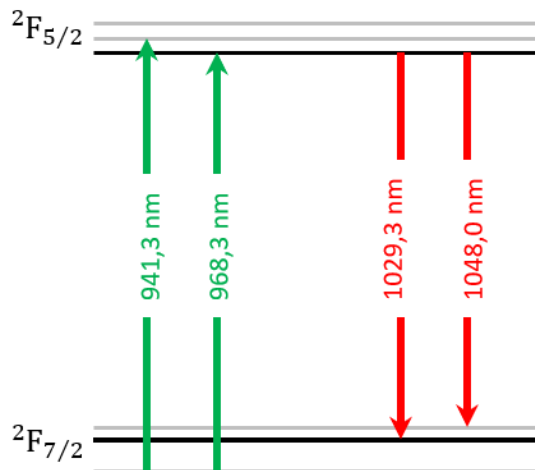
**2.2 Pav.** 3 lygmenų sistemos pavyzdys: rubino lazerio lygmenų sistema.

Kvazi-trijų lygmenų sistemose apatinis lazerinis lygmuo yra atskirtas nuo pagrindinio lygmens nedideliu energijos tarpu  $\Delta E_{01} \sim k_B T$ . Taip išnaudojami trijų ir keturių lygmenų sistemų privalumai: gaunamas mažas kvantinis defektas, lyginant su keturių lygmenų sistema, o pasiekti lazerinei generacijai nereikia sužadinti daugiau nei pusės aktyviųjų jonų iš pagrindinio lygmens, kaip yra trijų lygmenų sistemose.

Kvazi-trijų lygmenų sistemose apatinio lazerinio lygmens užpildymas priklauso nuo temperatūros:

$$N_1 = N_0 \exp\left(-\frac{\Delta E_{01}}{k_b T}\right). \quad (1)$$

Taigi lazerinės spinduliuotės generacijos slenkstis ir efektyvumas priklauso nuo aplinkos temperatūros. Mažinant aktyviojo elemento temperatūrą artėjama prie keturių lygmenų sistemos atvejo ir lazeriniai stiprintuvai veikia efektyviau. Kvazi trijų lygmenų sistemos pavyzdys yra Yb:YAG lazeris[10]. Yb:YAG aktyvioji terpė turi dvi sugerties juostas ties 941,3 nm ir 968,3 nm bangos ilgiais. Emisijos juostos yra ties 1029,3 nm ir 1048,0 nm bangos ilgiais.



**2.3 Pav.** Kvazi- trijų lygmenų sistemos pavyzdys: Yb:YAG lazerio lygmenų sistema [11].

## 2.2. Depolarizacijos susidarymas kristaluose

Šiame skyriuje pasigilinsime, kokie reiškiniai lemia depolarizacijos atsiradimą lazerinių stiprintuvų kietakūniuose kristaluose, kokie susidaro depolarizacijos profiliai ir kokie yra tipiniai depolarizacijos laipsniai Yb:YAG ir Nd:YAG kristaluose.

Lazerinėse sistemose naudojami optiniai elementai dažnai yra jautrūs šviesos poliarizacijai. Taip pat lazerio spinduliuotė dažnai naudojama netiesiniams reiškiniams, kurie irgi priklauso nuo šviesos poliarizacijos krypties. Taigi, lazerinėse sistemose dažniausiai naudojama tiesiškai poliarizuota šviesa, o šviesos dalis nukrypusi nuo tiesiškai poliarizuota šviesos, vadinama depolarizuota šviesa arba depolarizacija. Depolarizuota šviesa sistemoje su poliarizuojančiais elementais veikia kaip nuostoliai, be to pasižymi netolygiu profiliu ir taip pakeičia pradinį pluošto profilį.

Intensyviai kaupinant kietakūnius kristalus, dalis kaupinimo spinduliuotės yra panaudojama signalo stiprinimui, tačiau neišvengiamai atsiranda dalis, kuri virsta šiluma. Šilumos atsiradimo priežastys yra kelios [12]:

- Kvantinio defekto, atsirandančio dėl kaupinimo ir signalo fotonų energijos skirtumo.
- Sužadintų būsenų relaksacijos nespinduliniu kanalu.
- Defektų, sugeriančių lazerinę spinduliuotę.

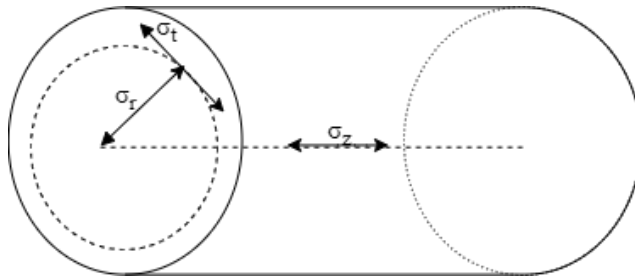
Dėl šilumos išsiskyrimo aktyviajame elemente susidaro temperatūriniai gradientai, kurie sukelia trijų rūšių mechaninius kristalo įtempimus: ašinį  $\sigma_z$ , radialinį  $\sigma_r$  ir tangentinį  $\sigma_t$ , pavaizduotus 2.4 pav. Cilindrinio strypo atveju, kuomet temperatūros skirstinys yra parabolinis su didžiausia verte ties cilindro centru, šie koeficientai gali būti aprašyti formulėmis [13]:

$$\sigma_z(r) = 2QS(2r^2 - r_0^2), (2)$$

$$\sigma_r(r) = QS(r^2 - r_0^2), (3)$$

$$\sigma_t(r) = QS(3r^2 - r_0^2), (4)$$

Kur  $S = \frac{\alpha E}{16K(1-\nu)}$  koeficientas priklausantis nuo medžiagos parametų,  $Q$  – išsiskyrusios šilumos kiekis.



**2.4 pav.** Mechaninių įtempimų rūšys: ašinis  $\sigma_z$ , radialinis  $\sigma_r$  ir tangentinis  $\sigma_t$  [13].

Taigi medžiagoje atsiranda įtempimai, kurie taip pat turi parabolinį skirstinį, be to skirtingomis kryptimis turi skirtingus verčių kitimus. Atsiradę įtempimai, dėl fotoelastinio efekto, įneša nedidelius medžiagos formos ir dydžio pokyčius, kurie lemia lūžio rodiklio pokytį [13]:

$$\Delta n_R = -\frac{1}{2} n_0^3 \frac{\alpha Q}{K} C_R r^2, (5)$$

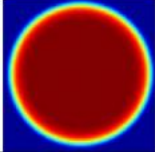
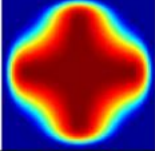
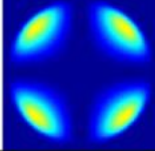
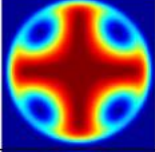
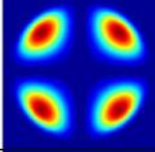
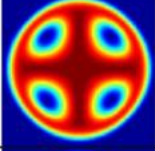
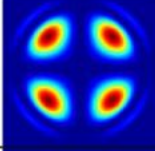
$$\Delta n_T = -\frac{1}{2} n_0^3 \frac{\alpha Q}{K} C_T r^2, (6)$$

Kur  $K$  – šiluminis medžiagos laidumas, o  $C_R$  ir  $C_T$  yra elastooptinių koeficientų funkcijos. Terminiškai indukuotas dvejetainis dvišakumas kristale lemia keletą reiškinų: dvejetainį židinio nuotolį statmenoms poliarizacijos kryptimis ir depoliarizacijos atsiradimą. Dvejetainis židinio nuotolis susidaro, kuomet į kristalą ateinanti poliarizuota šviesa mato skirtingus lūžio rodiklio skirstinius

radialine ir tangentine kryptimis, kurie tolstant nuo ašies keičiasi pagal kvadratinį radiuso dėsnį: (5) ir (6) formulės. Poliarizacijai sutampant su radialine kryptimi šviesa laužiama vienaip, o poliarizacijai sutampant su tangentine kryptimi laužiama kitaip. Tarpinėse padėtyse šviesos poliarizacijos būseną yra keičiama ir lemia depoliarizuotos šviesos atsiradimą. Didžiausias poliarizacijos būsenos kitimas gaunamas tarpinėse padėtyse, kuomet šviesos poliarizacijos kryptis sudaro  $45^\circ$  su radialine ir tangentine ašimis. Dvejopalaūžiškumas dar gali būti aprašytas kaip fazės pokytis  $\delta$  tarp radialinės ir tangentinės poliarizacijos kristale:

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} l(\Delta n_T - \Delta n_R), (7)$$

Kur  $l$  – kristalo ilgis, o  $\lambda$  – spinduliuotės bangos ilgis. Kaip keičiasi pradinis šviesos profilis  $|E_y|^2$  ir depoliarizuotos šviesos profilis  $|E_x|^2$  ir depoliarizacijos laipsnis  $\gamma$  priklausomai nuo indukuoto fazės pokyčio  $\delta$  galime pamatyti **2.5 pav.**

$\delta(r = R)$	$ E_y ^2$ , rel. un.	$ E_x ^2$ , rel. un.	$\gamma$
0		0	0.00
$\pi$			0.18
$2\pi$			0.29
$3\pi$			0.23

**2.5 pav.** Pradinio šviesos profilio (kai  $\delta=0$ ), depoliarizuotos šviesos ir depoliarizacijos laipsnio kitimas nuo indukuoto fazės pokyčio.[8]

Depoliarizaciniai nuostoliai, intensyviai kaupiamose lazerinėse sistemose, kuriose nėra naudojami depoliarizacijos kompensavimo elementai ir naudojami Yb:YAG ar Nd:YAG kristalai, gali siekti iki 30%, priklausomai nuo kristalų orientacijos [14-16]. Kristalai, kurių orientacija [111] turi 6 kartus didesnius depoliarizacijos nuostolius nei [100] orientacijos kristalai. Vis dėlto [100] orientacijos kristaluose bifokusavimasis išlieka, o tai lemia eliptinį pluošto profilį po stiprinimo.



## 2.3. Depoliarizacijos kompensavimo metodai

Šiame skyriuje apžvelgsime kokie yra naudojami metodai depoliarizacijai, susidarančiai termiškai apkrautose aktyviosiose terpėse, kompensuoti, kokie jų privalumai ir trūkumai.

Vienas iš būdų kompensuoti termiškai indukuotą depoliarizaciją yra naudoti dvi aktyviašias terpes, kurios turi skirtingus atsakus į temperatūrinį poveikį. Dėl skirtingų medžiagų, skirtingų termooptinių koeficientų, terpėse sukuriama priešingo ženklo fazės pokytis tarp statmenų poliarizacijų. Norint pilnai kompensuoti depoliarizaciją, būtinas tikslus aktyviųjų elementų ilgių ir apkrovų galių parinkimas juose. Galimos medžiagų kombinacijos: stiklas ir [111] orientacijos kristalas, stiklas ir keramika, leidžia kompensuoti ne tik depoliarizaciją, bet ir bifokusavimąsi. [5] darbe pademonstruotas depoliarizacijos sumažėjimas 4,6 karto, esant 200 W spinduliuotės galiai.

Kitas, plačiai naudojamas depoliarizacijos kompensavimo metodas, remiasi dvejomis vienodomis aktyviosiomis terpėmis arba viena, tačiau pluoštas per ją praeina du kartus pirmyn ir atgal. Tarp aktyviųjų elementų patalpinamas kvarcinis arba magnetooptinis (Faradėjaus) rotatorius, kuris suka poliarizaciją  $90^\circ$ . Tokiu būdu, radialine kryptimi orientuota poliarizacijos dedamoji pasukama tangentine kryptimi ir atvirkščiai. Toliau pluoštas patenka į kitą arba tą patį aktyvųjį elementą ir fazės vėlinimas tarp radialinės ir tangentinės komponentių bus kompensuojamas. Viename darbe [6] pademonstruotas depoliarizacijos sumažėjimas iki 1,6% panaudojant du aktyviusius elementus su  $90^\circ$  poliarizaciją sukančiu kvarciniu rotatoriumi tarp jų. Toks depoliarizacijos kompensavimo realizavimas reikalauja dviejų aktyviųjų elementų su vienodomis šiluminėmis apkrovomis, o erdvinės pluošto sklaidimo trajektorijos turi būti suderintos abėjuose elementuose vienodai. Kitame darbe [7], demonstruojamas depoliarizacijos kompensavimas iki 5%, kuomet naudojamas vienas lazerinis strypas ir Faradėjaus rotatorius, sukantis poliarizaciją  $45^\circ$ , o spindulys apgręžiamas atgal ir per du praėjimus gaunamas  $90^\circ$  poliarizacijos pasukimas. Depoliarizacijos kompensavimas realizuojamas tame pačiame lazeriniame strype. Nors šiuo atveju užteko tik vieno aktyvaus elemento, bet išlaikyti vienodas pluošto erdvines savybes elemente tampa dar sunkiau.

Dar vienas būdas depoliarizacijai kompensuoti, paremtas erdvinio šviesos modulatoriaus (*angl.* spatial light modulator SLM) panaudojimu, kurį sudaro skystųjų kristalų matrica. Skystieji kristalai pasižymi optine anizotropija, o jų orientaciją galima valdyti išoriniu elektriniu lauku. Taip įmanoma sukurti norimą fazės vėlinimo profilį, kurį galima keisti išoriniu elektriniu signalu. Vis dėlto SLM turi aibę trūkumų, kurie apriboja jų pritaikymą didelės galios sistemose: žemas pramušimo slenkstis ( $50 \text{ mJ/cm}^2$  1 ns impulsams), ribotas dydis (10-15 mm) ir įnešami 5-10% energijos nuostoliai [8].

Kitas metodas depoliarizacijai kompensuoti, remiasi tiesioginiu lazeriniu rašymu lydytame kvarce. Indukuojamos nanostruktūros, pasižymi optine anizotropija ir gali būti išnaudojamos depoliarizacijai ir bifokusavimuisi kompensuoti. Plačiau nanostruktūriniai optiniai elementai aprašyti 2.4 skyriuje. Pagrindinis tokių elementų privalumas yra naudojama medžiaga: lydytas kvarcas, kuris pasižymi puikiomis optinėmis savybėmis, reikalingomis didelio intensyvumo lazeriams. Tai yra aukštas pramušimo slenkstis [10-40 J/cm<sup>2</sup> 100-1000 ps impulsams [17]) ir mažas netiesinis lūžio rodiklis ( $2.7 \times 10^{-16}$  cm<sup>2</sup>/W [18]).

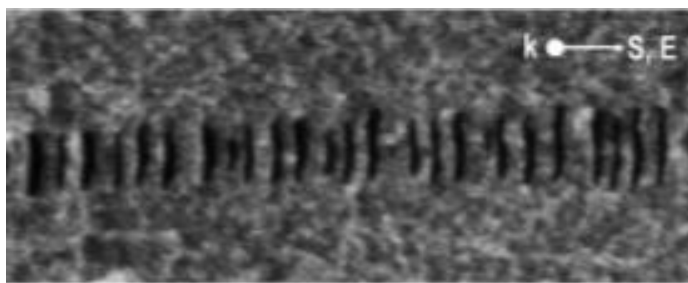
## 2.4. Nanostruktūriniai optiniai elementai

Šiame skyriuje pasiaiškinsime, kokie reiškiniai lemia nanostruktūrų susidarymą skaidriose medžiagose paveiktose intensyviais lazerio impulsais, kokios tokių nanostruktūrų optinės savybės ir kaip jas galime išnaudoti depoliarizacijos kompensavimui.

Sufokusuoti femtosekundiniai impulsai skaidriame dielektriko tūryje priklausomai nuo intensyvumo gali vienaip ar kitaip modifikuoti medžiagos lūžio rodiklį. Kai spinduliuotės intensyvumas viršija slenkstį, pradeda formotis modifikuoto lūžio rodiklio zonos, dar labiau didinant intensyvumą susiformuoja mažesnių nei bangos ilgis matmenų periodinė struktūra – savitvarkės nanogardelės, turinčios dvigubo šviesos lūžimo savybes [19-23]. Didinant intensyvumą dar labiau, medžiagoje susiformuoja mikroertmės [23].

Nanostruktūrų susidarymas nėra iki galo aiškus, tačiau yra nustatyta, kad paveiktoje lydyto kvarco srityje susidaro deguonies koncentracijos periodinė moduliacija sutampanti su nanogardelių periodu [21]. Deguonies atomų persiskirstymas gali būti aiškinamas tuo, kad sufokusuotas intensyvus impulsas lydytame kvarce sukelia daugiafotonę jonizaciją, o jos metu sugeneruojama elektronų plazma ir nutraukiami tarpatominiai ryšiai tarp deguonies ir silicio atomų. Išlaisvinti deguonies atomai yra judrus, todėl lengvai gali difunduoti iš didelės jų koncentracijos, o neigiami deguonies jonai yra atstumiami nuo didelės elektronų koncentracijos [22].

Savitvarkių nanogardelių nuotrauką galima matyti 2.6 pav. Nanogardelių orientacija yra statmena kritusio pluošto poliarizacijos kryptčiai ir jos pasižymi dvejų šviesos lūžimu. Tokių nanostruktūrų elgesį galima išnaudoti sukuriant fazės vėlinimą tarp statmenų poliarizacijos komponentų. Nanogardelės visuomet elgsis kaip neigiamas vienašis kristalas, kurio tipinis lūžio rodiklio skirtumas tarp statmenų poliarizacijų  $n_e - n_o$  yra  $-(2-4 \times 10^{-3})$  [21].



**2.6 pav.** Nanogardelių, indukuotų femtosekundiniais impulsais, susidarymas skaidriame dielektrike [21].

Dvejopalauiškumas gali būti aprašytas dviem parametrais: įnešamu fazės vėlinimu  $\phi$  ir greitosios ašies kampų  $\theta$ . Įnešamas fazės vėlinimas priklauso nuo impulsų energijos, intensyvumo ir nuo poveikio trukmės arba impulsų skaičiaus. Fazės vėlinimas taip pat gali būti didinamas įrašant nanogardelius vieną po kitos išilgai spindulio sklaidimo krypties  $z$ . Taigi, keičiant kritusio pluošto poliarizaciją ir pluošto padėtį skaidriame dielektrike  $x$ ,  $y$  ir  $z$  koordinatėmis galima įrašyti norimo profilio struktūrą su tolygiai kintančiomis per jos skerspjūvį poliarizacinėmis savybėmis. Žinant kristalo sukuriama depoliarizaciją profilį, galima jį atkartoti optiniame elemente tik su priešingo ženklo fazės vėlinimu. Toks optinis elementas išlygintų fazės vėlinimo profilį, panaikintų kristale atsirandančią depoliarizaciją ir bifokusavimąsi. O dėl šių jo savybių, tokį optinį elementą galime vadinti depoliarizacijos kompensatoriumi.

## 2.5. Jones'o matricos

Šiame skyriuje apžvelgsime, kaip matematiškai galime aprašyti šviesos poliarizaciją ir optinius elementus bei šviesos poliarizacijos pokytį praėjus vieną ar kelis optinius elementus.

Optikoje, poliarizuotos šviesos poliarizacijos būseną gali būti aprašytas Jones'o vektoriais  $\mathbf{J}$  [24]:

$$\mathbf{J} = \begin{pmatrix} E_x(t) \\ E_y(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_{x0} e^{i\phi_x} \\ E_{y0} e^{i\phi_y} \end{pmatrix}, \quad (8)$$

kur  $E_x(t)$  ir  $E_y(t)$  elektrinio lauko svyravimai  $x$  ir  $y$  kryptimis. Pagrindiniai normalizuoti Jones'o vektoriai pateikti **2.1 lentelėje**.

Šviesos poliarizaciją veikiančius optinius elementus galima aprašyti Jones'o matricomis, kurios yra Jones'o vektorių operatoriai. Pagrindinės optinių elementų Jones'o matricos pateiktos **2.2 lentelėje**.

**2.1 lentelė.** Pagrindiniai normalizuoti Jones'o vektoriai

Tiesiškai poliarizuota x kryptimi, arba horizontali poliarizacija.	$\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$
Tiesiškai poliarizuota y kryptimi, arba vertikali poliarizacija.	$\begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$
Tiesiškai poliarizuota $\theta$ kampu su x ašimi.	$\begin{pmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{pmatrix}$
Dešininė apskritiminė poliarizacija	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ i \end{pmatrix}$
Kairinė apskritiminė poliarizacija	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ -i \end{pmatrix}$

**2.2 lentelė.** Pagrindinių elementų Jones'o matricos.

Poliarizatorius, praleidžiantis tiesiškai, x kryptimi, poliarizuotą šviesą.	$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$
Poliarizatorius, praleidžiantis tiesiškai, y kryptimi, poliarizuotą šviesą.	$\begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$
Poliarizatorius, praleidžiantis tiesiškai, $\theta$ kampu su x ašimi, poliarizuotą šviesą.	$\begin{pmatrix} \cos^2 \theta & \cos \theta \sin \theta \\ \cos \theta \sin \theta & \sin^2 \theta \end{pmatrix}$
Ketvirčio bangos ilgio fazinė plokštelė, kurios greitoji ašis horizontali.	$e^{-\frac{i\pi}{4}} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & i \end{pmatrix}$
Pusės bangos ilgio fazinė plokštelė, kurios greitoji ašis vertikali.	$e^{\frac{i\pi}{2}} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -i \end{pmatrix}$
Elementas, įnešantis $\delta$ fazės pokytį ir kurio greitoji ašis vertikali.	$e^{i\delta} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -i \end{pmatrix}$

Šviesai, praėjus kelis optinius elementus, jos poliarizaciją apibūdins Jones'o vektorius  $J_1$ , kurį galima apskaičiuoti sudauginus optinių elementų Jones'o matricas su pradiniu šviesos Jones'o vektoriumi:

$$J_1 = T_3 * T_2 * T_1 * J_0 \quad (9),$$

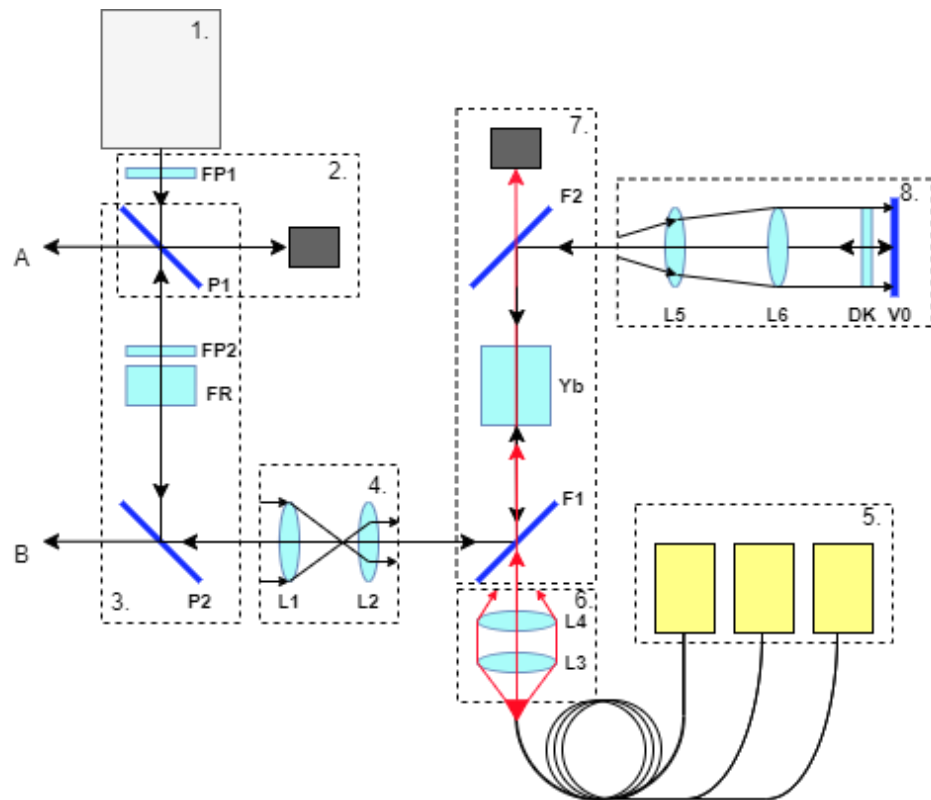
kur  $J_1$  – pradinis šviesos poliarizacijos vektorius,  $T_1, T_2, T_3$  -iš eilės einančių optinių elementų Jones'o matricos. Čia svarbu atkreipti dėmesį į dauginimo eiliškumą, kadangi pradedame nuo paskutinio optinio elemento ir baigiame pirmu.

Naudojantis Jones'o vektoriais, matricomis bei jų daugyba galima nesunkiai aprašyti sklindančios šviesos poliarizaciją, praėjusią pro kelis optinius elementus. Matematiškai dauginant pradinį šviesos poliarizacijos vektorių su optinių elementų matricomis, gausime šviesos, praėjusios optinių elementų sistemą, poliarizacijos vektorių.

# 3. Tyrimo metodika

## 3.1. Yb:YAG 2 lėkių stiprintuvo schema

Šiame darbe buvo tiriamas depoliarizacijos susidarymas Yb:YAG kristale, o vėliau ir jos kompensavimas panaudojant stikle įrašytus nanostruktūrinius elementus. Pirmiausia buvo surinktas ir charakterizuotas Yb:YAG dviejų lėkių stiprintuvas be depoliarizacijos kompensatorių, kurio pagrindiniai stiprinimo ir depoliarizacijos, atsirandančios po stiprinimo rezultatai pateikti 4.1 skyriuje.

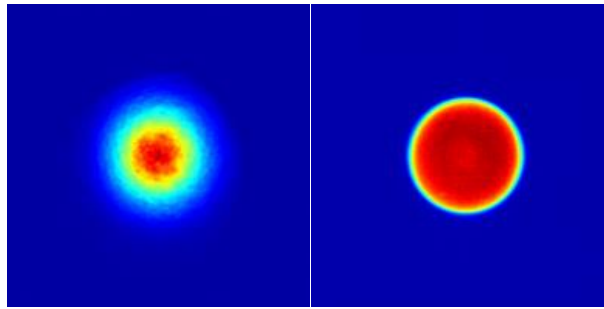


**3.1 pav.** Yb:YAG 2 lėkių stiprintuvo schema ir pagrindinės jos dalys: 1. Lazerinis šaltinis; 2. Galios atenuatorius; 3. Faradėjaus izoliatorius; 4. Teleskopas; 5. Kaupinimo diodai; 6. Kaupinimo fokusatorius; 7. Yb:YAG stiprintuvas; 8. Šiluminio lėšio kompensavimo, vaizdo pernešimo ir grąžinimo optika.

Eksperimentinė optinė schema pavaizduota **3.1 pav.**, o pagrindinės jos dalys yra šios:

1. Lazerinis šaltinis, kuris susideda iš šviesolaidinio užkrato šaltinio ir Yb:YAG dviejų lėkių stiprintuvo yra detaliau aprašytas kitame darbe [25], o jo pagrindiniai parametrai yra tokie: vidutinė galia  $P_{vid}=40$  W, pasikartojimo dažnis  $f=1$  MHz, centrinės bangos ilgis  $\lambda_s=1030$  nm, spektro plotis  $\Delta\lambda=3,3$  nm, impulso trukmė  $\tau=150$  ps, pluošto kokybės parametras  $M^2\sim 1,04$ , kolimuoto spindulio diametras išėjime  $d_0=2,7$  mm ( $4\sigma$  lygyje), poliarizacija - tiesinė vertikali, atžvilgiu optinio stalo, kurios kontrastas  $>1:1000$ .

2. Galios atenuatorius, kuriuo keičiama užkrato galia. Atenuatorių sudaro sudaro pusės bangos ilgio fazinė plokštelė  $\lambda/2$  **FP1**, poliarizatorius **P1** ir gaudyklė. Keičiant **FP1** padėtį, keičiama užkrato galia patenkanti į stiprintuvą.
3. Izoliatorius, susidedantis iš dviejų poliarizatorių, pusės bangos ilgio fazinės plokštelės  $\lambda/2$  **FP2** ir Faradėjaus rotatoriaus **Fr**. Pirmasis poliarizatorius **P1** praleidžia tik horizontalią poliarizaciją, tuomet **FP2** ir **FR** pasuka poliarizaciją į vertikalią, kuri yra atspindima antrojo poliarizatoriaus **P2**.
4. Teleskopas, kuris susideda iš dviejų teigiamų lęšių **L1** ( $f_1=400$  mm) ir **L2** ( $f_2=125$  mm), skirtas sumažinti pradinį pluošto diametrą iki 0,84 mm ( $4\sigma$  lygyje).
5. 3 šviesolaidiniai kaupinimo diodai apjungti šviesolaidiniu tankintuvu. Kaupinimas išvedamas per šviesolaidį, kurio šerdies diametras 200  $\mu\text{m}$ , o skaitinė apertūra  $NA=0.22$ , kaupinimo bangos ilgis  $\lambda_k=940$  nm. Kaupinimo galia  $P_{kaup}$  nuo 0 iki 270 W keičiama elektros srove.
6. Kaupinimo fokusatorius susideda iš dviejų teigiamų lęšių: **L3** ( $f_3=50$  mm) ir **L4** ( $f_4=150$  mm). **L3** lęšis kolimuoja kaupinimo pluoštą, o **L4** sufokusuoja kaupinimo pluoštą kristale į 0,78 mm ( $4\sigma$  lygyje) diametro dėmę.
7. Yb:YAG stiprintuvas, susidedantis iš iterbiu (1% Yb) legiruoto itrio aliuminio granato (YAG) kristalo **Yb**, dviejų filtrų: **F1** ir **F2** ir gaudyklės. Kristalas buvo įtvirtintas variniame laikiklyje, kuris aušinamas vandeniu ir palaikoma 20°C temperatūra. Optiniai filtrai **F1** ir **F2**, kurie padengti danga atspindinčia  $\lambda_s=1030$  nm ir praleidžiančia  $\lambda_k=940$  nm bangos ilgius skirti sukombinuoti, o vėliau atskirti signalą nuo kaupinimo. Signalo ir kaupinimo spinduliai erdvėje buvo perklojami naudojant CMOS (*angl.* complementary metal oxide semiconductor) kamera (CinCam CMOS Nano 1.001), o jų profiliai atvaizduojami programine įranga (RayCi professional) pateikti **3.2 pav.** Gaudyklė skirta nesugertam kristale kaupinimui.
8. Du teigiami lęšiai **L5** ( $f_5=75$  mm), **L6** ( $f_6=200$  mm) ir 0° veidrodis **V0** skirti kompensuoti kristale susidarantį šiluminį lęšį dėl intensyvaus kaupinimo, pernešti vaizdą iš kristalo ant **V0** ir apgręžti spindulį atgal. Optiniai elementai buvo statomi tokiu principu: lęšio **L5** priekinis židinytis kristalo centre, o lęšio **L6** galinis židinytis ant **V0**, tokiu būdu užtikrinamas vaizdo pernešimas nuo kristalo ant veidrodžio. Depolarizacijos kompensatorius **DK**, buvo statomas šalia veidrodžio **V0**, užtikrinant vaizdo pernešimą net tik ant galinio veidrodžio, bet ir ant depolarizacijos kompensatoriaus. Atstumtas tarp **L5** ir **L6** keičiamas taip, kad kompensuoti atsiradusi lęšį kristale. **V0** taip pat apgręžia spindulį, kuris eina tuo pačiu keliu kaip ir atėjo ir yra išmetamas per poliarizatorių **P1** išėjime **A** Grįžusio pluošto depolarizacija yra išfiltruojama per **P2** ir išmetama išėjime **B**.



**3.2 pav.** Išmatuoti signalo (kairėje) ir kaupinimo (dešinėje) profiliai kristalo vietoje.

## 3.2. Depolarizacijos kompensatorių tyrimo metodika

Šiame darbe depolarizacijos kompensavimui buvo pagaminti penki skirtingi depolarizacijos kompensatoriai pagal specialų užsakymą įmonėje UAB „Altechna R&D“. Depolarizacijos kompensatorių veikimas pagristas nanogardelių įrašymų lydytame kvarce, aprašytu 2.4 skyriuje. Visi elementai buvo pagaminti taip, kad įrašytų nanostruktūrų išsidėstymas turėtų radialinę simetriją, o greitoji ašis būtų orientuota tangentiškai. Taip gaunami optiniai elementai su tolygiai kintančiomis per jų skerspjūvį poliarizacinėmis savybėmis. Fazės vėlinimas  $\varphi$  tarp dviejų statmenų poliarizacijos komponentių visuose elementuose turėjo parabolinę priklausomybę, kuri gali būti aprašoma pagal formulę:

$$\varphi = M\left(\frac{r}{R}\right)^2, (10)$$

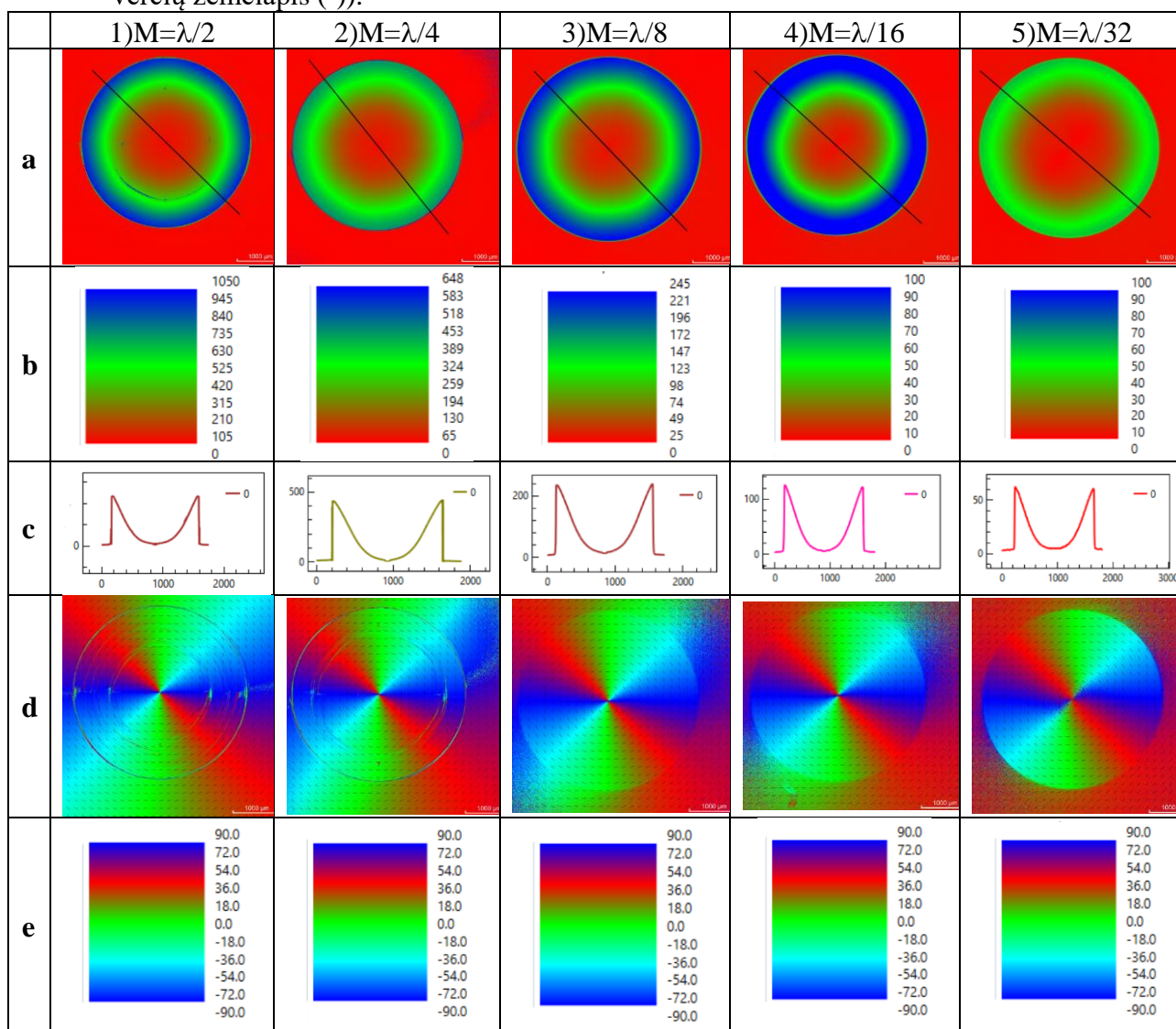
čia fazės vėlinimas  $\varphi$ , patogumo dėlei, išreikštas nanometrais,  $r$  – radialinė koordinatė,  $M$  – fazės vėlinimas atstume  $R$ , kuris visiems depolarizacijos kompensatoriams buvo pasirinktas vienodas  $R=1,5 \text{ mm}$ . Taigi, sukuriamas fazės vėlinimas tarp statmenų poliarizacijos komponentių konkrečiame elemento taške priklauso nuo radialinės koordinatės  $r$  ir parametro  $M$ . Užsakytiems penkiems depolarizacijos kompensatoriams buvo parinktos skirtingos  $M$  vertės:

1.  $M=\lambda/2$
2.  $M=\lambda/4$
3.  $M=\lambda/8$
4.  $M=\lambda/16$
5.  $M=\lambda/32$

Čia  $\lambda = 1030 \text{ nm}$ . Parametras  $M$  buvo užduodamas bangos ilgio vienetais. Fazinės kaukės buvo įrašytos į vieno colio diametro ir 6mm storio lydyto kvarco stiklą, o fazinės kaukės diametras buvo  $d=4 \text{ mm}$ . Žemiau pateiktoje 3.1 lentelėje vaizduojami pagrindiniai šių elementų parametrai, išmatuoti gamintojo.

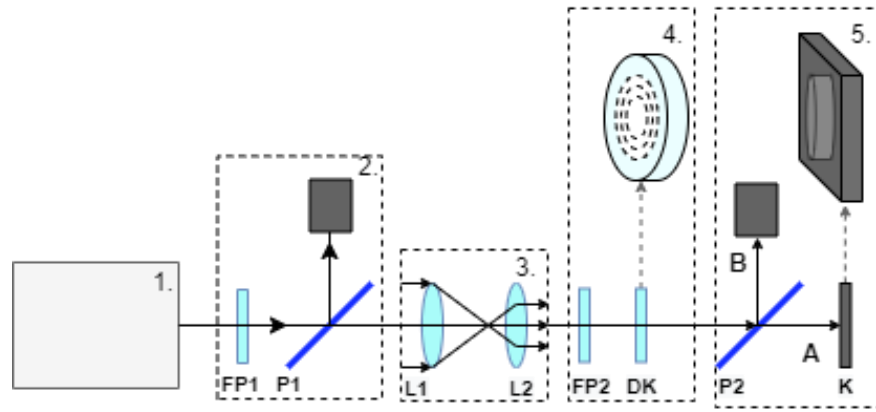


**3.1 lentelė.** Depolarizacijos kompensatorių parametrai (a – fazės vėlinimo žemėlapis, b – fazės vėlinimo verčių žemėlapis (nm), c – fazės vėlinimo profilis, atitinkantis juodą liniją a žemėlapyje, d – greitosios ašies pasiskirstymas elemente, e – greitosios ašies verčių žemėlapis (°)).



Prieš pradėdant naudoti depolarizacijos kompensatorius Yb:YAG stiprintuve, kompensatorių įtaką pluošto poliarizacinėms savybėms ir jų pasiskirstymui per profilį buvo ištirta atskirai. Tyrimams buvo surinkta atskira schema pavaizduota **3.3 pav.**, o pagrindinės jos dalys yra šios:

1. ir 2. Lazerinis šaltinis ir atenuatorius aprašyti 3.1 skyriuje.
3. Teleskopas, kuris susideda iš dviejų teigiamų lęšių **L1** ( $f_1=100$  mm) ir **L2** ( $f_2=75$  mm), skirtas sumažinti pradinį pluošto diametrą iki 2,1 mm ( $4\sigma$  lygyje).
4. Depolarizacijos indukavimas, susidedantis iš pusės bangos ilgio fazinės plokštelės  $\lambda/2$  **FP2** ir depolarizacijos kompensatoriaus **DK**, šiuo atveju skirti sukurti depolarizacijai.
5. Depolarizacijos analizatorius, tai poliarizatorius **P2**, skirtas atskirti dvi poliarizacijos dedamąsias. Jų profilio pasiskirstymas matuojamas CMOS kamera **K**.



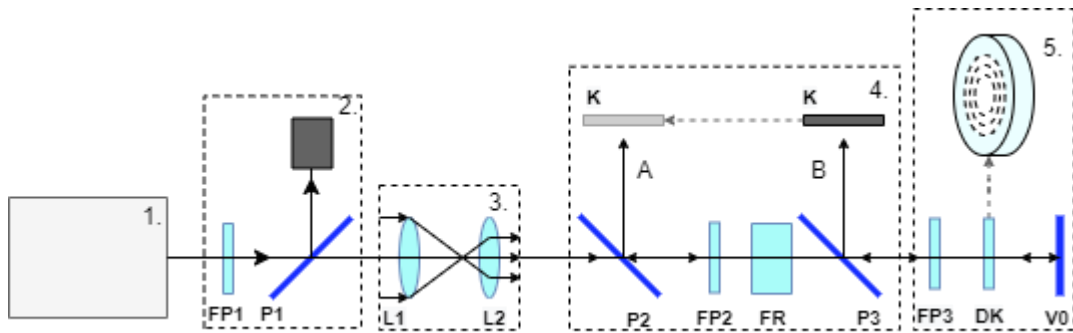
**3.3 pav.** Depolarizacijos kompensatorių tyrimo schema ir pagrindinės jos dalys: 1. Lazerinis šaltinis; 2. Atenuatorius 3. Teleskopas; 4. Depolarizacijos indukavimas 5. Depolarizacijos analizatorius.

Depolarizacijos kompensatorius turi radialinę simetriją, todėl eksperimento metu depolarizacijos kompensatoriaus ir spindulio centrai turėjo būti idealiai sutapatinami. Spindulys, praėjęs pro depolarizacijos kompensatorių, įgauna tam tikrą poliarizacijos kryptį pasiskirstymą, kuris priklauso nuo pradinės poliarizacijos krypties ir elemento įnešamo fazės vėlinimo bei greitos ašies kampo. Eksperimentai buvo atlikti su dviem skirtingomis pradinėmis poliarizacijos būsenomis: vertikalia ir horizontalia, atžvilgiu optinio stalo, kurios buvo keičiamos su **FP2**. Kai nustatoma vertikali poliarizacija, poliarizatorius **P2** didžiąją dalį spinduliuotės atspindi (išėjimas B), o praleidžia depolarizuotą dalį (išėjimas A). Išėjime A statoma CMOS kamera ir galios matuoklis pakaitomis ir registruojamas depolarizacijos profilis ir galia  $P_{dep}$ . Eksperimentas kartojamas su **FP2** nustačius horizontalią poliarizaciją. Šiuo atveju išėjime A registruojama nedepolarizuotas spindulio profilis ir galia  $P_{nedep}$ .

Iš išmatuotų galių apskaičiuojamas depolarizacijos laipsnis pagal formulę:

$$\gamma = \frac{P_{dep}}{P_{dep} + P_{nedep}}, \quad (11)$$

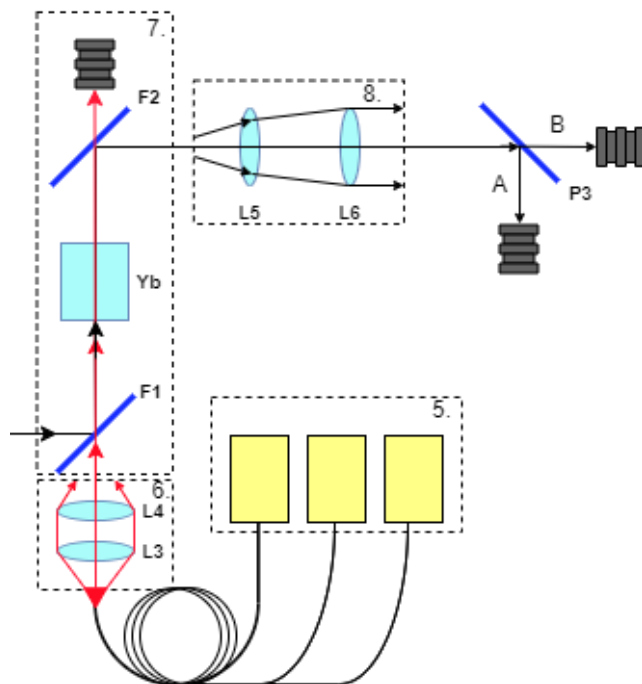
Depolarizacijos kompensatoriai gali būti ir šiame darbe taip pat bus naudojami dviejų praėjimų schemeje, todėl kompensatorių įtaka pluošto ir depolarizacijos savybėms buvo tiriama ir pluoštui praeinant du kartus per tą patį kompensatorių, o eksperimentinė schema pateikta **3.4pav.** Pagrindinis schemos skirtumas nuo **3.3 pav.** pateiktos yra tas, kad šiuo atveju du praėjimai per depolarizacijos kompensatorių **DK** gaunami apgręžiant pluoštą tuo pačiu keliu su  $0^\circ$  veidrodžiu **V0**, o pluošto atskyrimui naudojamas Faradėjaus rotatorius **FR** ir poliarizatoriai **P2** ir **P3**. Poliarizatorius **P3** atspindi depolarizuota spindulio dalį išėjime B, o nedepolarizuota dalis atspindima poliarizatoriaus **P2** išėjime A. Išėjimuose A ir B pakaitomis statoma kamera ir galios matuoklis, registruojami profiliai ir depolarizacijos laipsnis.



**3.4 pav.** Depoliarizacijos kompensatorių tyrimo schema su dviem praėjimais per kompensatorių. Pagrindinės dalys: 1. Lazerinis šaltinis; 2. Atenuatorius 3. Teleskopas; 4. Izoliatorius ir depoliarizacijos analizatorius. 5. Dvigubas depoliarizacijos indukavimas.

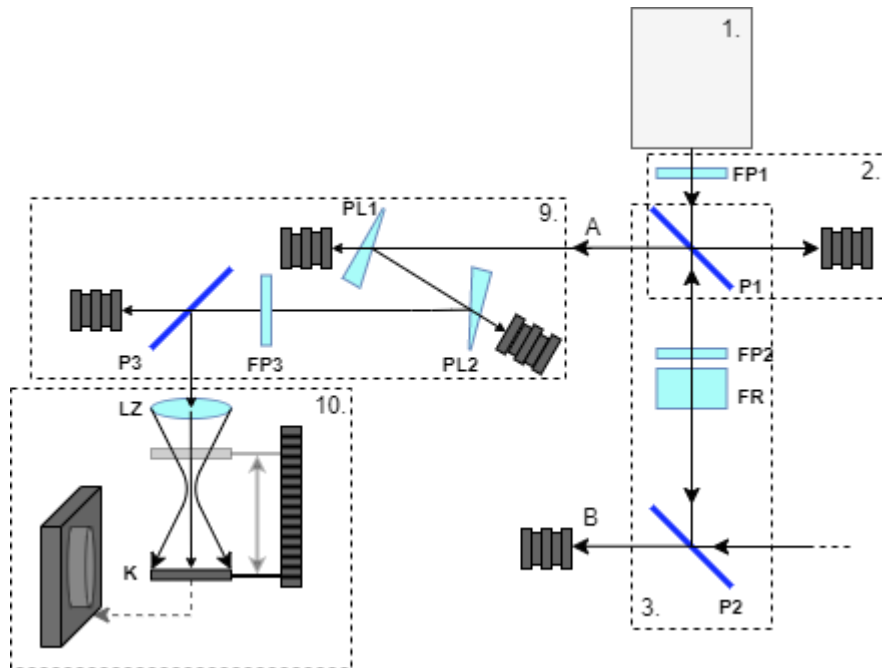
### 3.3. Stiprinimo, depoliarizacijos ir pluošto savybių charakterizavimo metodika

Šiame darbe buvo išmatuota stiprinimo, sustiprinto signalo galios ir depoliarizacijos laipsnio priklausomybė nuo užkrato galios, sustiprinto signalo galios ir depoliarizacijos laipsnio priklausomybė nuo kaupinimo galios po vieno ir dviejų praėjimų per Yb:YAG stiprintuvą. Eksperimentinė schema po dviejų praėjimų pateikta **3.1pav.**



**3.5 pav.** Stiprinimo ir depoliarizacijos matavimo schema po 1 praėjimo.

Vieno praėjimo schema pateikta **3.5 pav.**, o praktiškai gaunama iš dviejų praėjimų schemas išimant gražinantį veidrodį **V0**, o depoliarizacijai nustatyti, statomas papildomas poliarizatorius **P3**, kuris depoliarizuotą spinduliuotės dalį praleidžia išėjime B, o nedepoliarizuotą atspindi išėjime A.

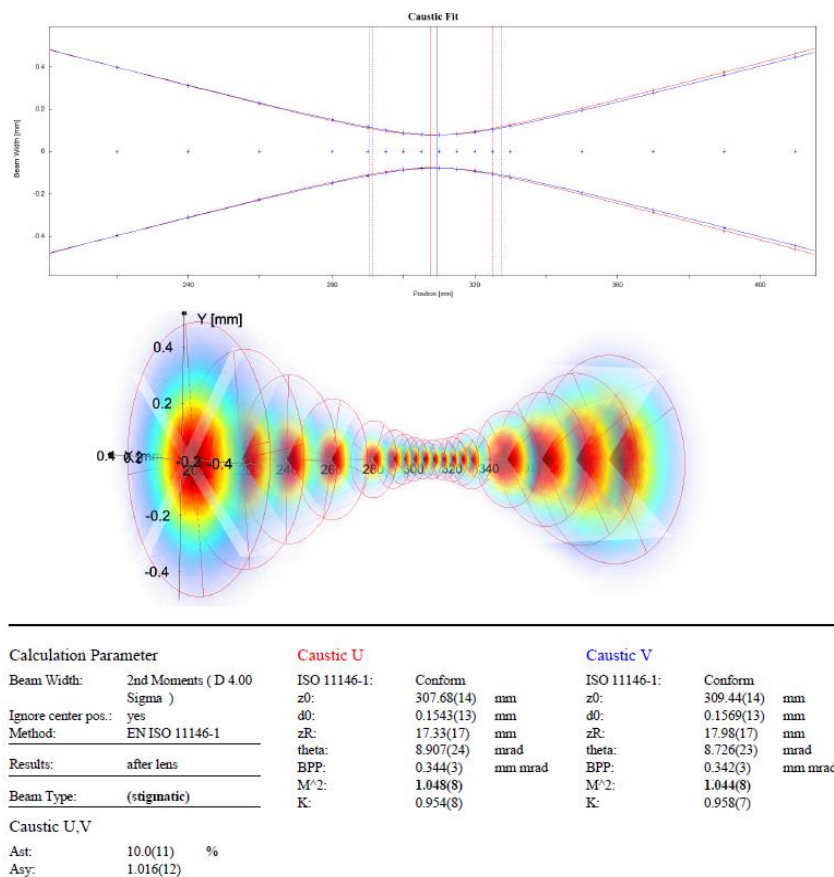


**3.6 pav.** Pluošto parametrų matavimo schema po 2 praėjimo.

Po dviejų praėjimų taip pat buvo matuojama depoliarizacijos laipsnio priklausomybė nuo užkrato galios ir nuo kaupinimo galios panaudojant depoliarizacijos kompensatorius. Taip pat po dviejų praėjimų buvo matuojamos spindulio savybės, bei jų pokytis naudojant depoliarizacijos kompensatorių sistemoje. Pluošto savybių eksperimentinė matavimo schema pateikta **3.6 pav.** Šioje schemoje atsiranda papildomos dvi dalys:

1. Galios atenuatorius, pažymėtas 9 numeriu ir kurio paskirtis sumažinti spinduliuotės galia iki tokios, kurią būtų galima registruoti kamera. Atenuatorių sudaro du pleištai: **PL1** ir **PL2**, pusės bangos ilgio fazinė plokštelė  $\lambda/2$  **FP3**, poliarizatorius **P3** ir gaudyklės likutinei spinduliuotei.
2. Pluošto kokybės matavimo sistema, pažymėta numeriu 10, paremta sufokusuoto spindulio z-skenavimu ir kaustikos matavimu. Spinduliuotė yra fokusuojama su teigiamu lęšiu: **LZ** ( $f_z=200$  mm), o su CMOS kamera (CinCam CMOS Nano 1.001) **K** yra registruojamas spindulio profilis išilgai spindulio sklidimo krypties z (z-skenavimas). Pagal ISO 11146 standartą, kad gauti pilną informaciją apie pluoštą ir jo parametrus, reikia išmatuoti bent 5 taškus sąsmaukoje (dvigubas Relėjaus ilgis  $2 \cdot z_R$ ) ir 5 taškus tolimajame lauke, kai pluošto spindulys kinta tiesiškai. Tuomet programinė įranga (RayCi professional) apskaičiuoja

pagrindinius pluošto parametrus statmenom pluošto ašims : sąsmaukos padėtį  $z_0$ , diametrą sąsmaukoje  $d_0$ , Relėjaus ilgį  $z_R$ , skėsties kampą  $\theta_s$ , pluošto kokybės parametą  $BPP$  bei  $M^2$  skirtomis kryptimis. Gauti parametrai atvaizduojami ekrane, o tipinis vaizdas pateiktas 3.7 pav.



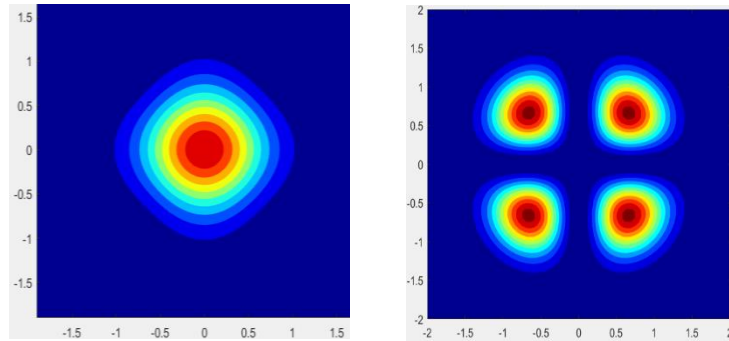
3.7 pav. Tipinė z-skenavimo rezultatų suvestinė ir apskaičiuoti pagrindiniai pluošto parametrai programine įranga (RayCi professional).

### 3.4. Teorinis depoliarizacijos kompensatorių modeliavimas

Eksperimentiniams rezultatams validuoti, buvo parašyta programa, aprašanti depoliarizacijos kompensatorius ir jų poveikį pradinei šviesos poliarizacijai. Teorinis modelis paremtas šviesos ir elemento sąveika per Jones'o vektorius ir matricas, aprašyta 2.4 skyriuje

Pradinis šviesos profilis aprašomas Gauss'o formule polinėje koordinačių sistemoje ir yra idealiai tiesinės  $s$  poliarizacijos. Depoliarizacijos kompensatorius, tai elementas, turintis parabolinę fazės vėlinimo, tarp radialinės ir tangentinės komponentės, priklausomybę ir yra aprašomas (10) formule. Tuomet pluoštas ir depoliarizacijos kompensatorius yra sudalinami į daug atskirų dalių ir kiekvienas jų patiria skirtingą fazės vėlinimą, priklausomai nuo tos dalies atstumo iki centro ir kampo

nuo horizontalios ašies. Galiausiai kiekvienas elementas praleidžiamas pro poliarizuojančia matricą ir gaunamas kiekvieno elemento poliarizacijos vektorius, kuris turi dvi poliarizacijos komponentes: s poliarizacijos, atitinkančią nedepoliarizuotą dalį, ir p poliarizacijos, atitinkančią depoliarizuotą dalį. Tuomet sudalinti elementai apjungiami atgal ir gaunami nedepoliarizuoto ir depoliarizuoto spindulio profiliai. Gauti vaizdai pateikti **3.8 pav.**



**3.8 pav.** Sumodeliuoti ir sunormuoti nedepoliarizuoto ir depoliarizuoto spindulio profiliai.

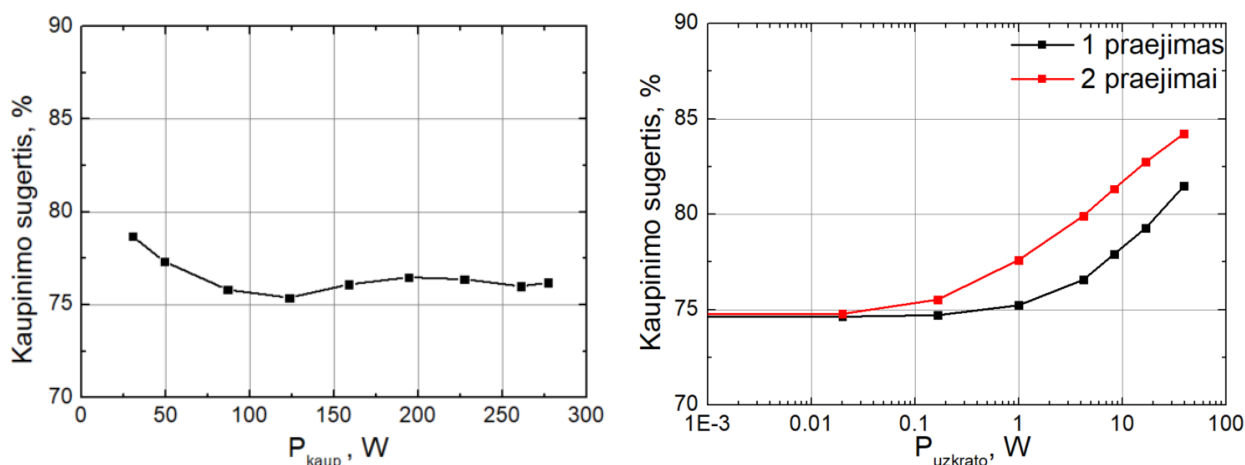
Gauti profiliai gali būti integruojami, apskaičiuojama santykinė galia ir depoliarizacijos laipsnis. Vėliau gali būti keičiamas fazinis vėlinimas ir vėl apskaičiuojamas depoliarizacijos laipsnis. Tokiu būdu, žinant pluošto formą ir diametrą gali būti surandamas reikiamas fazės vėlinimas, tam tikrai depoliarizacijai kompensuoti.

## 4. Eksperimento rezultatai

Šio darbo tikslas buvo pademonstruoti depoliarizacijos kompensatorių veikimą realioje Yb:YAG stiprintuvo schemoje, todėl eksperimentiniai rezultatai bus aptariami tokia tvarka: pirmiausia bus apžvelgiama Yb:YAG stiprintuvo parametrai ir depoliarizacijos bei bifokuso susidarymas jame, vėliau nagrinėjamas depoliarizacijos kompensatorių veikimas ir galiausiai bus palyginamas depoliarizacijos laipsnis ir pluošto parametrai kuomet Yb:YAG stiprintuve nėra ir yra naudojamas depoliarizacijos kompensatorius.

### 4.1. Yb:YAG stiprintuvo parametrai be depoliarizacijos kompensatorių

Eksperimentinės stiprinimo schemas vieno ir dviejų lėkių stiprintuvuose pateiktos **3.1 pav.** ir **3.5 pav.** Pirmiausia buvo išmatuota kaupinio sugertis Yb:YAG kristale ir jos priklausomybė nuo kaupinio galios be užkrato signalo galios. Taip pat buvo išmatuota kaip keičiasi kaupinio sugertis nuo užkrato signalo galios, abu grafikai pateikti **4.1 pav.** Iš matomų grafikų reikėtų akcentuoti du dalykus: pirma tai jog, kaupinio sugertis nuo kaupinio galios praktiškai nepriklausė, ir kito tik kelių procentų ribose tarp 80 W iki 270 W. Antra, didinant užkrato signalo galią, kaupinio sugertis didėja ir esant maksimaliai signalo galiai padidėja nuo 75% iki 82% ir beveik 85% lyginant vieną ir du praėjimus. Didėjanti kaupinio sugertis rodo, kad kristale išsiskiria vis daugiau šilumos, kuri sukelia vis didesnius šiluminius reiškinius.

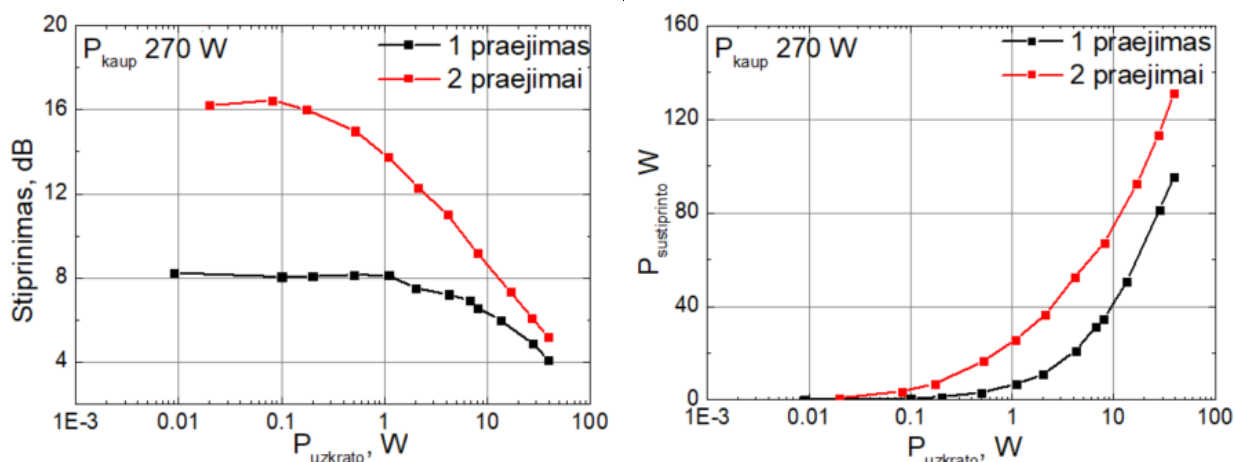


**4.1 pav.** Kaupinio sugerties priklausomybė nuo kaupinio galios ir nuo užkrato signalo galios vieno ir dviejų praėjimų atvejais.

Išmatuotas mažo signalo stiprinimas Yb:YAG stiprintuve po vieno praėjimo buvo 8 dB, o po dviejų praėjimų – 16 dB. Stiprinant 39 W užkrato galia, po vieno praėjimo buvo pasiekta 95 W



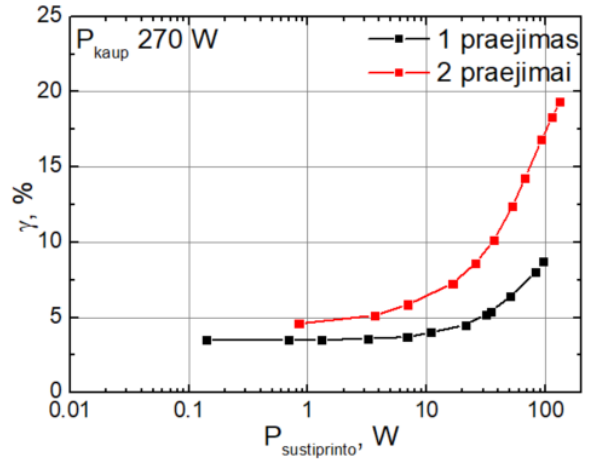
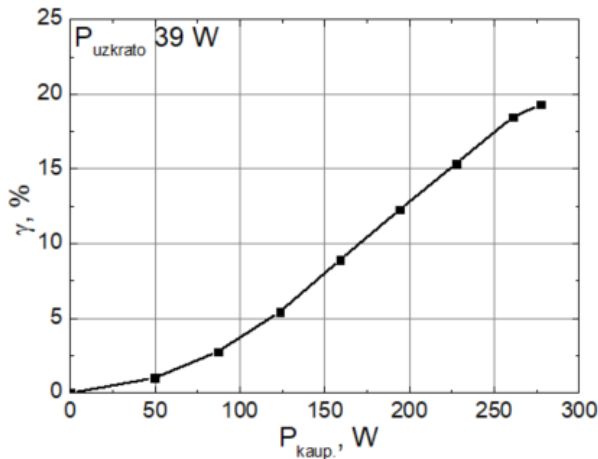
vidutinė galia, o po dviejų praėjimų – 131 W, o stiprinimo ir sustiprinto signalo priklausomybės pateiktos **4.2 pav.** Stiprintuvo efektyvumas (kaupinimo spinduliuotės vertimas signalu) siekė 21% ir 34% atitinkamai po vieno ir dviejų praėjimų.



**4.2 pav.** Stiprinimo ir sustiprinto signalo kreivės nuo užkrato galios po vieno ir dviejų praėjimų.

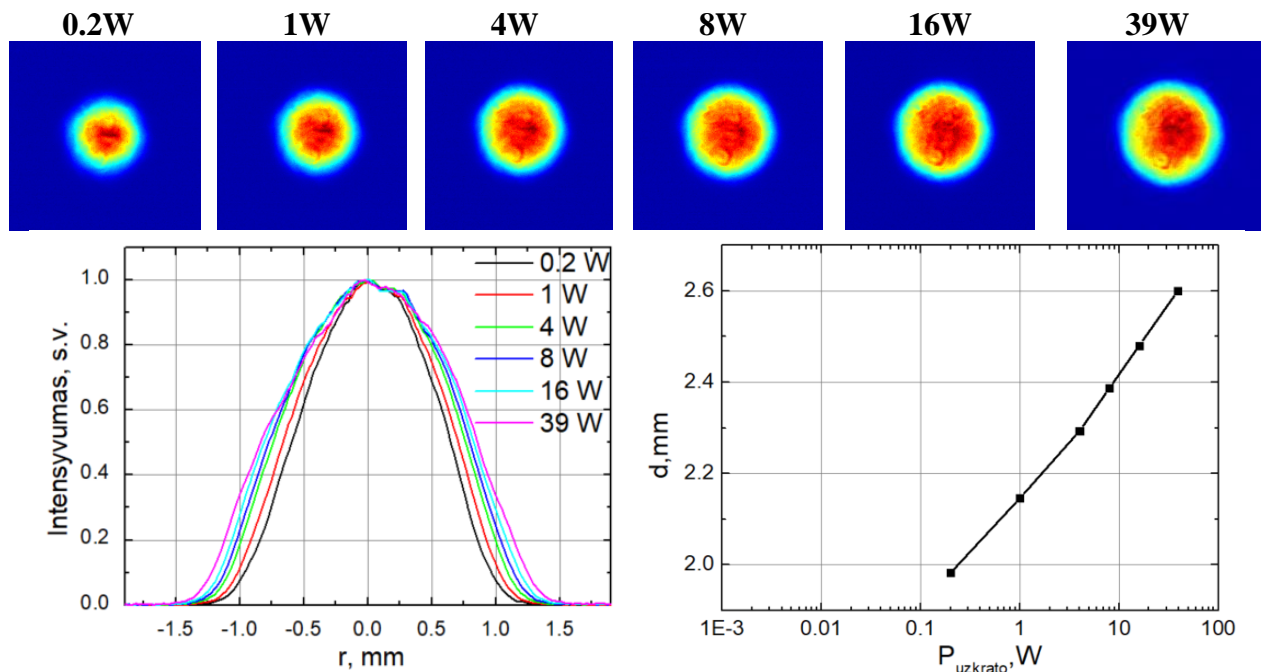
Depolarizacijos laipsnio priklausomybė nuo kaupinimo galios, esant maksimaliai užkrato galiai ir nuo užkrato signalo, esant maksimaliai kaupinimo galiai pavaizduotos **4.3 pav.** Keliant kaupinimo galia nuo 0 iki 270 W buvo stebimas daugmaž tolygus depolarizacijos laipsnio augimas nuo 0 iki 19,3% po dviejų praėjimų per Yb:YAG stiprintuvą. Stebint priklausomybę nuo užkrato galios matome, kad po vieno praėjimo depolarizuotos šviesos dalis sudarė 2,9% ir nekito esant mažo signalo stiprinimui, o didėjo tik išėjus iš mažo signalo stiprinimo režimo ir pasiekė 8%, kai užkrato signalas buvo maksimalus. Tuo tarpu po dviejų praėjimų depolarizacijos laipsnis prie mažo signalo buvo 5% ir išaugo daugiau negu dvigubai prie maksimalios užkrato galios iki 19,3%, o tai buvo net 25,3 W. Depolarizacijos augimas nuo užkrato galios gerai koreliavo tiek su kaupinimo sugerties augimu, tiek su stiprinimo mažėjimu. Vis dėl to vien tik kaupinimo sugerties išaugimas apie 10% nepaaiškina to, kodėl stebime apie 4 kartus išaugusią depolarizaciją, didinant užkrato signalo galią. Tam, kad geriau suprasti tokį augimą, toliau buvo tiriamos pluošto savybės.





**4.3 pav.** Depoliarizacijos laipsnio priklausomybė nuo kaupinimo galios ir užkrato signalo galios.

Remiantis **3.6 pav.** pavaizduota schema, buvo matuojamos pluošto savybės po dviejų praėjimų. Pirmiausia, stumdant kamera išilgai  $z$ , buvo surasta tokia vieta, kuomet kamera registruojame vaizdą nuo kristalo centro. Tuomet prie maksimalios kaupinimo galios, buvo keičiama užkrato galia ir matuojamas pluošto profilis. Vaizdai išsaugomi, o diametrai buvo perskaičiuoti, įskaitant 2,5 karto didinimą. 2D, 1D pluošto profiliai ir pluošto diametro ( $1/e^2$  lygyje) kitimas nuo užkrato signalo galios pavaizduoti **4.4 pav.**



**4.4 pav.** 2D, 1D pluošto profilių ir jų diametro kitimas kristale, keičiant užkrato galią, esant fiksuotai 270 W kaupinimo galiai.

Iš gautų rezultatų matome, kad didinant signalo galią, pluoštas kristale didėjo, ir nuo mažo signalo stiprinimo iki maksimalaus signalo stiprinimo, pluošto diametras padidėjo apie 33%. Taip pat

svarbu atkreipti dėmesį, kad keitėsi ne tik diametras, bet ir forma. Iš sunormuotų 2D ir 1D pluošto profilių matoma, kad didinant signalo galią, pluošto kraštuose intensyvumas augo gerokai labiau, nei centrinėje dalyje. Taip yra todėl, kad stiprinant didelės galios signalą, stiprinimo metu centrinė pluošto dalis įsisotina labiau ir stiprinimas buna mažesnis lyginant su pluošto kraštais. Įnešamos fazės pokytis nuo atstumo iki centro didėjo kvadratu ( (3) formulė), todėl toks pluošto formos kitimas, kai kraštuose atsiduria vis didesnė dalis signalo galėtų paaiškinti, kodėl **4.3 pav.** stebima ženklus depoliarizacijos augimas didinant signalo galią.

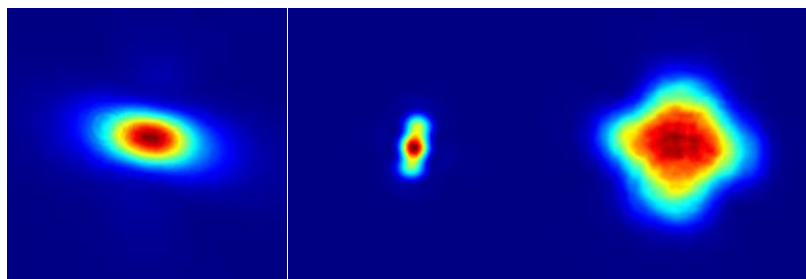
Pluošto profiliui pilnai charakterizuoti buvo atliktas z-skenavimas, remiantis 3.3 skyriuje aprašyta metodika. Pradžioje buvo išmatuotas ir charakterizuotas pluošto profilis prieš stiprintuvą, o vėliau pluošto profiliai po dviejų lėkių Yb:YAG stiprintuvo, esant skirtingoms užkrato signalo galioms ir maksimaliai kaupinimo galioms. Matavimų rezultatai pateikti **4.-4.9 pav.**, ir yra palyginami su rezultatais, gautais stiprintuve naudojant depoliarizacijos kompensatorių, o pagrindinių pluošto parametrų suvestinė pateikta **4.1 lentelėje**.

**4.1 lentelė.** Pagrindiniai pluošto parametrai ir jų pokytis, keičiant signalo galią nuo 1W iki 39W Yb:YAG dviejų lėkių stiprintuve, kaupinamame 270W galia.

	Pradinis		1 W		8 W		16 W		39 W	
	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
$z_0$ , mm	309	308	225	221	221	212	217	208	212	201
$d_0$ , mm	0,157	0,154	0,095	0,098	0,104	0,150	0,124	0,195	0,173	0,314
$z_R$ , mm	18	17,3	4,2	5,1	5,5	10,6	7,5	12,2	12,8	34
$M^2$	1,04	1,05	1,64	1,44	1,48	1,63	1,56	1,82	1,77	2,21
$\theta_s$ , mrad	8,7	8,9	22,6	19,2	18,7	14,2	16,6	12,2	13,5	9,23
$\frac{\theta_s(X)}{\theta_s(Y)}$	<b>0,98</b>		<b>1,18</b>		<b>1,31</b>		<b>1,36</b>		<b>1,46</b>	

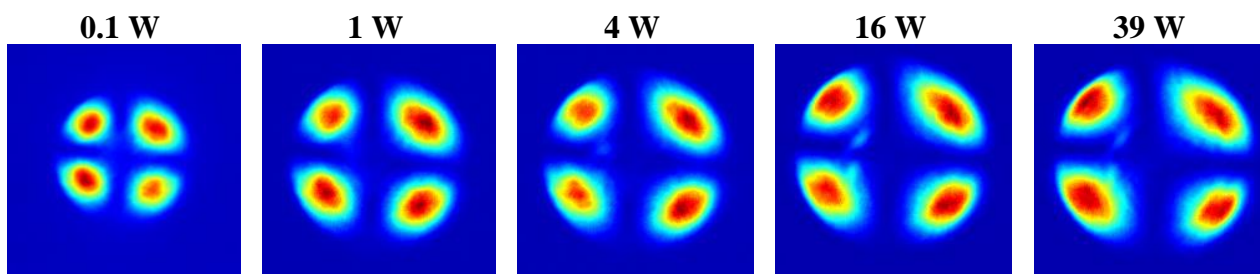
$z_0$  žymi sąsmaukos padėtį,  $d_0$  - diametrą sąsmaukoje,  $z_R$  - Relėjaus ilgį,  $M^2$  - pluošto kokybės parametras,  $\theta_s$  - skėsties kampas,  $\frac{\theta_s(X)}{\theta_s(Y)}$  - skėstčių santykį X ir Y kryptimis.

Iš gautų rezultatų matoma, kad didinant įvadinę signalo galią, pluošto kokybės parametras  $M^2$  prastėjo, nuo pradinio 1,05 iki 1,99, esant maksimaliai signalo galioms. Taip pat atsirado bifokusas, kuomet skirtingos pluošto dalys X ir Y kryptimis fokusavosi skirtingai ir tai pasireiškia skirtingomis sąsmaukos padėtimis ir skėstimis X ir Y kryptimis. Jeigu pradinis skėstčių santykis buvo 0,98, tai esant maksimaliai signalo galioms jis išaugo iki 1,46. Galiausiai, išmatuoti 2D pluošto profiliai pateikti **4.5 pav.** Iš išmatuotų profilių matome, kad pluoštas praranda simetriją ir iš beveik apvalios formos tampa panašus į elipsę ar apskritimą su iškirptais kampais.



**4.5 pav.** 2D pluošto profilis po dviejų lėkių stiprintuvo, kai užkrato signalo galia 8 W, o kaupinimo galia 270 W.

**3.6 pav.** schemeje vaizduojamas išėjimas B, kuriame išmetama depoliarizuota spindulio dalis. Šiai spindulio daliai buvo surinktas analogiškas galios atenuatorius ir išmatuoti depoliarizuoto spindulio profiliai, keičiant įvadinę signalo galią. Iš gautų depoliarizuotos spindulio dalies profilių, pateiktų **4.6 pav.**, matome analogišką pluošto dydžio augimą, kaip ir nedepoliaruotos spindulio dalies. Taip pat matome, kad didinant užkrato signalo galią, depoliarizuoto spindulio intensyviausia dalis tolsta nuo centro. Tai dar kartą patvirtinta, kodėl **4.3 pav.** stebėjome tokį greitą depoliarizacijos laipsnio augimą, didinant užkrato galią.



**4.6 pav.** 2D depoliarizuoto pluošto profilis po dviejų lėkių stiprintuvo, keičiant įvadinę užkrato signalo galią.

Apibendrinant gautus stiprinimo, spindulio profilio ir depoliarizacijos laipsnio rezultatus, galime teigti, jog depoliarizacijos laipsnio padidėjimas iki 19,3%, atsiradęs ženklus spindulio bifokusavimasis bei pluošto formos išdarymas smarkiai apriboja tokio spindulio ir kartu lazerinės sistemos panaudojimą ir pritaikymą.

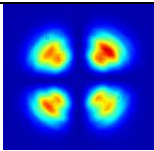
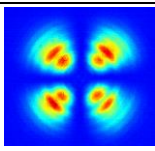
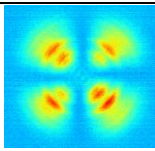
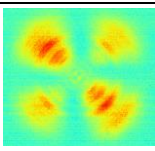
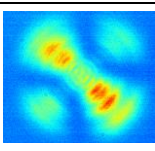
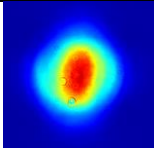
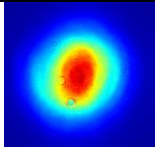
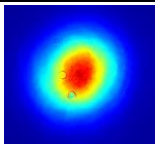
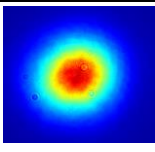
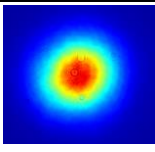
## 4.2. Depoliarizacijos kompensatorių rezultatai

Šiame skyriuje bus nagrinėjama kaip depoliarizacijos kompensatoriai, aprašyti 3.2 skyriuje, keičia idealaus pluošto poliarizacijos ekstinkciją, kokie gaunami depoliarizuoto ir nedepoliarizuoto spindulio profiliai. Nagrinėjami du atvejus: kai spindulys praeina vieną kartą per kompensatorių ir du kartus, apgręžiant spindulį priešinga kryptimi.

Pirmiausia buvo matuojama depoliarizuotos ir nedepoliarizuotos spindulio dalies profiliai praėjus depoliarizacijos kompensatorių vieną kartą pagal **3.3 pav.** pateiktą schemą. Gauti profiliai ir

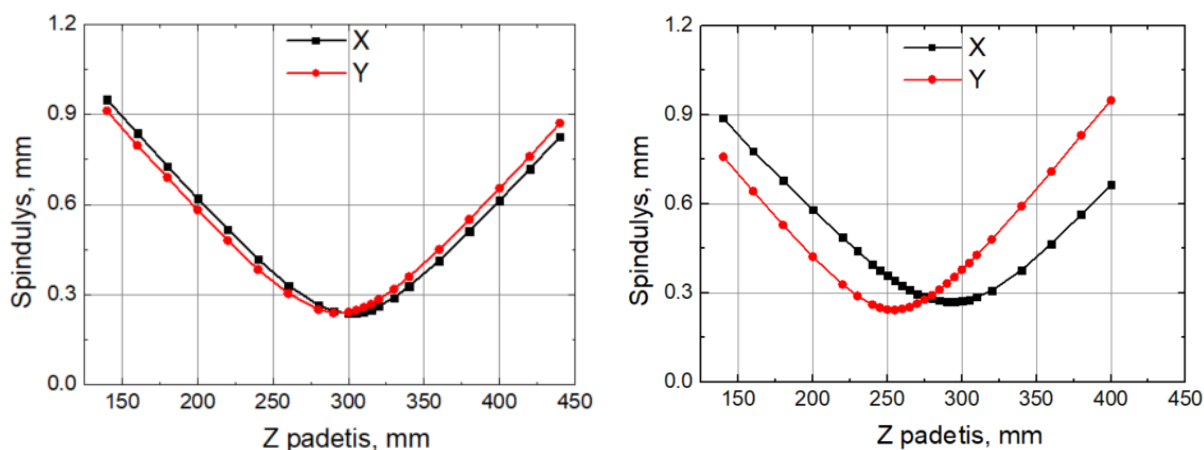
depolarizacijos laipsniai pateikti **4.2 lentelėje**. Matuojant profilius kamera, programinė įranga automatiškai parinkdavo ekspozicijos trukmę ir sunormuodavo intensyvumą į maksimalią vertę profilyje, todėl esant mažesniems depolarizacijos signalams buvo stebimas didesnis fonas.

**4.2 Lentelė.** Depolarizuotos ir nedepolarizuotos spindulio dalies profiliai praėjus vieną kartą skirtingą depolarizacijos kompensatorių ir depolarizacijos laipsnis.

Depolarizacijos kompensatorius	1) $M=\lambda/2$	2) $M=\lambda/4$	3) $M=\lambda/8$	4) $M=\lambda/16$	5) $M=\lambda/32$
Depolarizuoto spindulio profilis					
Nedepolarizuoto spindulio profilis					
$\gamma$	9,7%	4,7%	1,3%	0,4%	0,1%

Iš gautų rezultatų matome, kad gaunamas depolarizacijos profilis panašus į „dobilo lapus“. Didžiausia dalis depolarizacijos yra gaunama ant ašių, kurios sudaro  $45^\circ$  su vertikalia ir horizontalia ašimis. Vertikaloje ir horizontolioje skirstinio ašyse depolarizacijos neatsiranda, kadangi nanostruktūros elemente yra įrašytos taip, kad šiomis kryptimis šviesos poliarizacija yra lygiagreti arba statmena nanogardelėms, todėl fazės skirtumo nesukuria ir poliarizacijos būsenos nepakeičia. Didžiausias depolarizacijos laipsnis gautas 9,7% ir laipsniškai mažėjo keičiant depolarizatorius su mažesniu fazės vėlinimu. Iš nedepolarizuotų spindulio profilių matome, kad tose vietose kur stebėjome depolarizacijos augimą, stebimas intensyvumo sumažėjimas. Taip pat galime pastebėti, kad profilis tampa šiek tiek eliptinis, ko neparodo teorinis modeliavimas, kadangi jame nebuvo modeliuojama erdvinių spindulio savybių pokyčių, dėl indukuoto dvejojpalaužiškumo. Mažėjant elemento įnešamam fazės vėlinimui eliptiškumas taip pat mažėjo.

Depolarizacijos kompensatorių įtakai erdvinėms pluošto savybėms nustatyti buvo atliktas pilnas z-skenavimas, remiantis 3.3 skyriuje aprašyta metodika. Pradžioje buvo išmatuotas pluošto profilis be depolarizacijos kompensatoriaus, vėliau prieš lęšį LZ įstatytas depolarizacijos kompensatorius ( $M=\lambda/2$ ) ir matavimas pakartotas. Matavimo rezultatai su depolarizacijos kompensatoriumi pateikti **4.7 pav.**, o pagrindinių pluošto parametrų rezultatų suvestinė **4.3 lentelėje**.



**4.7 pav.** Spindulio z-skenavimo rezultatai, kai nėra (kairėje) ir yra (dešinėje) depoliarizacijos kompensatorius ( $M=0.5\lambda$ ) prieš lęšį LZ.

**4.3 lentelė.** Pradiniai ir naudojant depoliarizacijos kompensatorių, pagrindiniai pluošto parametrai.

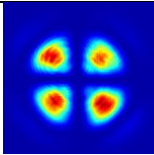
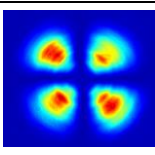
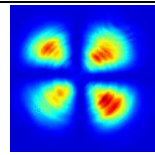
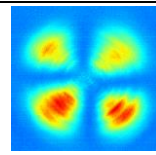
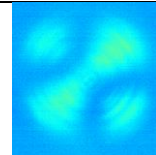
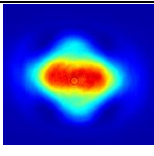
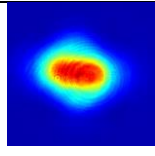
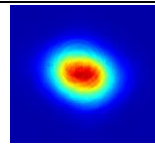
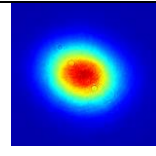
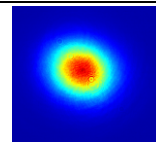
	Pradinis		$M=\lambda/2$	
	X	Y	X	Y
$z_0$ , mm	301	293	292	254
$d_0$ , mm	0,237	0,238	0,27	0,244
$z_R$ , mm	41,7	41,8	48,5	38,8
$M^2$	1,03	1,04	1,14	1,17
$\theta_s$ , mrad	5,69	5,71	5,57	6,30
$\frac{\theta_s(X)}{\theta_s(Y)}$	<b>0,99</b>		<b>0,88</b>	

$z_0$  - sąsmaukos padėtį,  $d_0$  - diametrą sąsmaukoje,  $z_R$  - Relėjaus ilgį,  $M^2$  - pluošto kokybės parametras,  $\theta_s$  - skėsties kampas,  $\frac{\theta_s(X)}{\theta_s(Y)}$  skėstčių santykis X ir Y kryptimis.

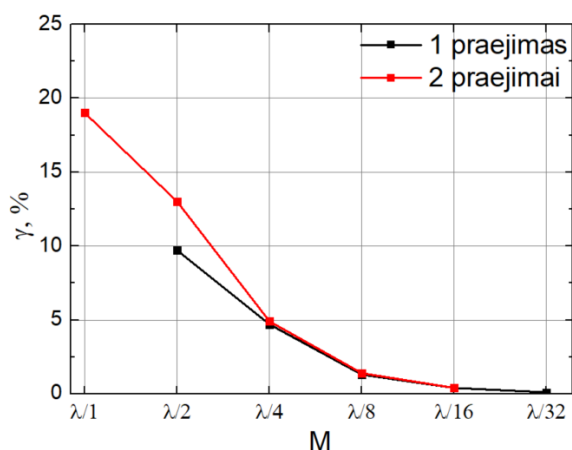
Kaip ir po dviejų lėkių Yb:YAG stiprintuvo, matome, kad skėstčių santykis tarp X ir Y krypties pasikeičia, elemente susiformuoja bifokusas. Šiuo atveju skėstčių santykis sumažėja nuo 0,99 iki 0,88. Skėsties padidėjimas ir sąsmaukos priartėjimas arčiau fokusuojančio lęšio LZ Y kryptimi indikuoja, kad šia kryptimi atsiranda stipresnis teigiamas lęšis, nei X kryptimi, kuria šių parametų pokyčiai buvo minimalūs. Stipresnio lęšio atsiradimas Y kryptimi, kuri sutampa su radialine kryptimi, parodė kad šie depoliarizacijos kompensatoriai sukuria tokio pat ženklo fazės vėlinimą, kaip ir lazeriniame stiprintuve, todėl nėra tinkami naudoti depoliarizacijai, atsirandančiai Yb:YAG kristale, kompensuoti. Dėl šios priežasties buvo pagaminti nauji depoliarizacijos kompensatoriai, tik šiuo atveju jau su priešingo ženklo fazės vėlinimo profiliu. Nepaisant to, depoliarizacijos kompensatoriai toliau buvo tyrinėjami ir nagrinėjama jų įtaka depoliarizacijos laipsniui ir spindulio profilio savybėms kitokiomis veikimo sąlygomis.

Lazeryje naudojamas dviejų praėjimų Yb:YAG stiprintuvas, todėl kitu atveju buvo matuojamas depoliarizacijos kompensatorių įnešamas depoliarizacijos laipsnis ir kaip pasikeičia depoliarizuotas ir nedepoliarizuotas pluošto profiliai, kai spindulys praeina per elementą du kartus pirmyn ir atgal, pagal **3.4 pav.** pateiktą schemą. Išmatuoti profiliai ir apskaičiuoti depoliarizacijos laipsniai pateikti **4.4 lentelėje**.

**4.4 Lentelė.** Depoliarizuotos ir nedepoliarizuotos spindulio dalies profiliai praėjus du kartus skirtingą depoliarizacijos kompensatorių ir depoliarizacijos laipsnis.

Depoliarizacijos kompensatorius	1)M=λ/2	2)M=λ/4	3)M=λ/8	4)M=λ/16	5)M=λ/32
Depoliarizuoto spindulio profilis					
Nedepoliarizuoto spindulio profilis					
$\gamma$	19%	13%	4,9%	1,4%	0,4%

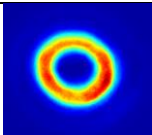
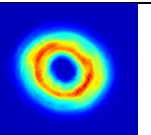
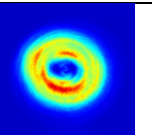
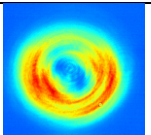
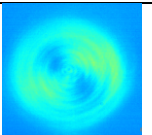
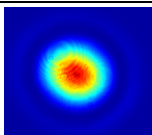
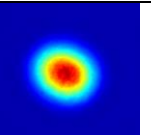
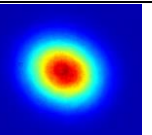
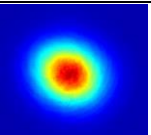
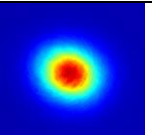
Iš dviejų praėjimų per depoliarizacijos kompensatorių matavimų su tiesine poliarizacija matome, kad depoliarizacijos laipsnis padidėjo 2-4 kartus lyginant su vieno praėjimo per depoliarizacijos kompensatorių atveju. Depoliarizacijos profilis po dviejų praėjimų, kaip ir po vieno išlaikė tokią pačią formą - turėjo keturis „dobilo lapus“. Nedepoliarizuoto spindulio profiliuose dar labiau išryškėjo pluošto eliptiškumas, dėl atsirandančio bifokusavimo kompensatoriuose. Vieno ir dviejų praėjimų sukuriamas depoliarizacijos laipsnis palygintas **4.8 pav.**



**4.8 pav.** Depoliarizacijos laipsnio priklausomybės nuo elemento įnešamo fazės vėlinimo vieno ir dviejų praėjimų per depoliarizacijos kompensatorių atvejais. ( juoda kreivė – vieno, raudona – dviejų praėjimų).

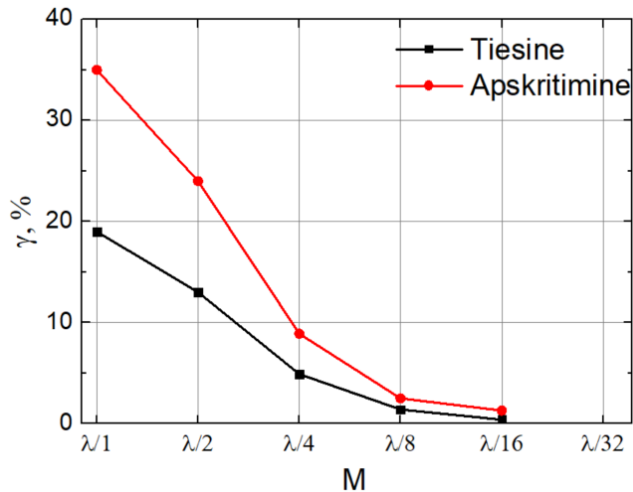
Kartais lazeriniuose stiprintuvuose stiprinama apskritiminė poliarizacija. Tuo tikslu paskutiniai matavimai buvo atlikti prieš depoliarizacijos kompensatorių pastačius ketvirčio bangos ilgio fazinę plokštelę **FP3**, kuri tiesinę poliarizaciją paverčia apskritimine poliarizacija. Toliau buvo matuojamas depoliarizacijos laipsnis, depoliarizuoto ir nedepoliarizuoto spindulio profiliai apskritiminės poliarizacijos atveju. Gauti rezultatai pateikti **4.5 lentelėje**.

**4.5 Lentelė.** Depoliarizuotos ir nedepoliarizuotos spindulio dalies profiliai praėjus du kartus skirtingą depoliarizacijos kompensatorių ir depoliarizacijos laipsnis. Apskritiminės poliarizacijos atvejis.

Depoliarizacijos kompensatorius	1) $M=\lambda/2$	2) $M=\lambda/4$	3) $M=\lambda/8$	4) $M=\lambda/16$	5) $M=\lambda/32$
Depoliarizuoto spindulio profilis					
Nedepoliarizuoto spindulio profilis					
$\gamma$	35%	24%	9,9%	3%	2,3%

Apskritiminės poliarizacijos atveju gaunamas dvigubai didesnis depoliarizacijos laipsnis, lyginant su tiesinės poliarizacijos atveju, nepriklausomai nuo naudojamo depoliarizacijos kompensatoriaus, o palyginimas pavaizduotas **4.9 pav.** Toks depoliarizacijos padidėjimas yra natūralus dėl suvidurkintos poliarizacijos būsenos per visą profilį. Tuomet įnešamas depoliarizacijos kiekis nepriklauso nuo įrašytų struktūrų orientacijos, o priklauso tik nuo atstumo iki centro. Būtent tai yra matoma depoliarizacijos profiliuose, kurie gaunami žiedo formos. Iš nedepoliarizuoto spindulio profilių matome, kad šiuo atveju eliptiškumas nėra padidėjęs.





**4.9 pav.** Depolarizacijos laipsnio priklausomybės nuo elemento įnešamo fazės vėlinimo dviejų praėjimų per depolarizacijos kompensatorių tiesinės ir apskritiminės poliarizacijos atvejais. ( juoda – tiesinė , raudona - apskritiminė).

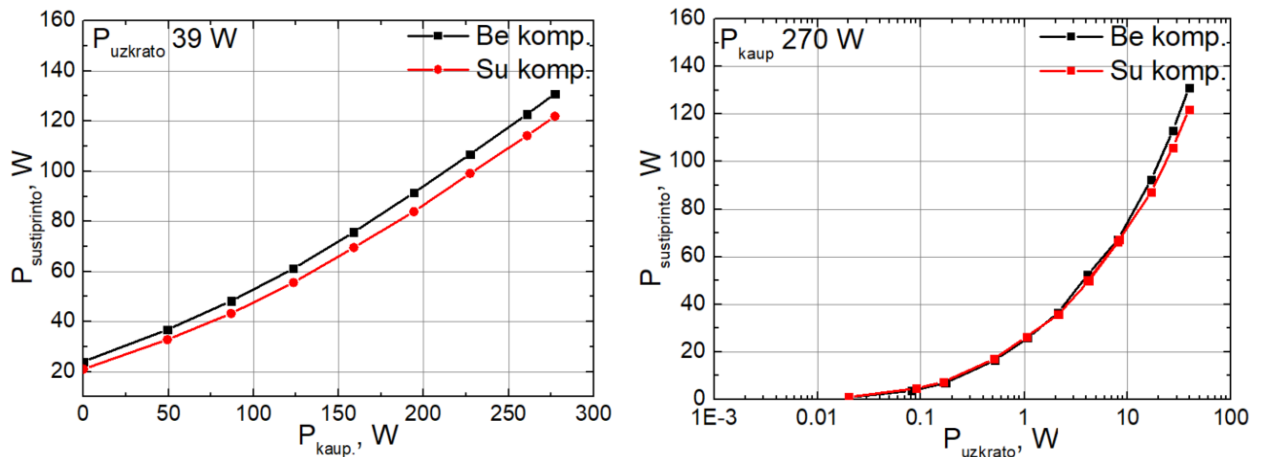
Apibendrinant depolarizacijos kompensatorių veikimą, matome, kad jų poveikis pluošto poliarizacinėms ir erdvinėms savybėms yra analogiškas kaip ir kietakūnių stiprintuvų kristalų, turinčių šiluminius gradientus viduje. Geras poveikio atkartojimas leidžia juos pritaikyti poliarizacinėms ir erdvinėms savybėms kompensuoti termiškai apkrautuose kietakūniuose kristaluose.

### 4.3. Depolarizacijos kompensatorių veikimas Yb:YAG stiprintuve

Šiame skyriuje nagrinėjamas depolarizacijos kompensatorių veikimas ir įnešamas depolarizacijos laipsnio bei pluošto pokytis realioje Yb:YAG stiprintuvo schemeje, pavaizduotoje **3.1 pav.** Dėl anksčiau aprašytų priežasčių, buvo sumodeliuotas ir pagamintas naujas depolarizacijos kompensatorius, kurio parametras  $M$  buvo lygus  $0.44\lambda$ , o visi kiti parametrai tokie patys.

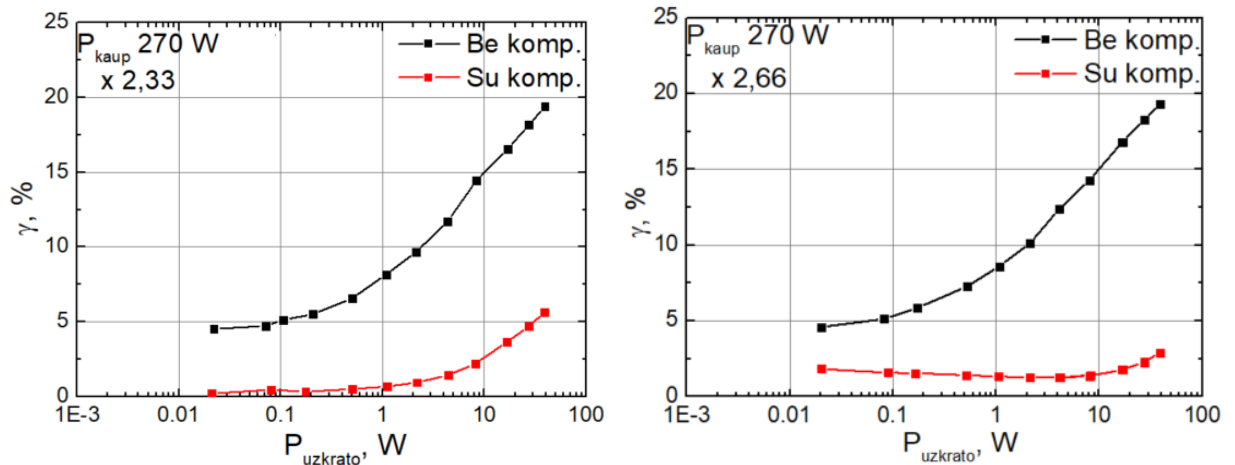
Pirmiausia buvo išmatuota sustiprinto signalo galia nuo kaupinimo galios ir nuo užkrato galios po dviejų praėjimų bei palyginta **4.10 pav.** su rezultatais gautais be depolarizacijos kompensatoriaus. Sustiprinto signalo galia, naudojant depolarizacijos kompensatorių, visame kaupinimo galių intervale buvo ~8% mažesnė, lyginant su sustiprinto signalo galia, kuomet nebuvo naudojamas depolarizacijos kompensatorius. Toks sumažėjimas yra dėl atsiradusių papildomų Frenelio atspindžių nuo depolarizacijos kompensatoriaus. Kai kaupinimo galia buvo maksimali ir keičiama tik užkrato galia, sustiprinto signalo galia prie mažų užkrato galių buvo tokia pati, o tas pats skirtumas kaip ir matavime nuo kaupinimo galios išryškėjo tik prie didelių užkrato galių arba mažo stiprinimo. Neskaitant atsiradusių papildomų Frenelio atspindžių, galima teigti, kad depolarizacijos kompensatorius Yb:YAG dviejų lėkių stiprintuvo stiprinimo charakteristikoms įtakos neturėjo.





**4.10 pav.** Sustiprinto signalo priklausomybė nuo kaupinimo galios (kairėje) ir užkrato galios (dešinėje). Be depolarizacijos kompensatoriaus ir su kompensatoriumi, kurio  $M=0,44\lambda$ .

Toliau buvo išmatuotas depolarizacijos laipsnio kitimas nuo užkrato signalo galios, kai kaupinimo galia 270 W ir palygintas su depolarizacijos laipsniu, kai nebuvo naudojamas depolarizacijos kompensatorius stiprintuve **4.11 pav.** Matavimai atlikti dviem vaizdo pernešimo nuo kristalo ant galinio veidrodžio atvejais a) su vaizdo didinimu 2,33 ir b) vaizdo didinimu 2,66. Iš rezultatų, kai vaizdo didinimas ant galinio veidrodžio buvo 2,33, matome kad kol užkrato galia yra mažesne nei 1 W, depolarizacijos laipsnis yra mažiau nei 1% ir depolarizacija beveik kompensuota, tačiau toliau didinant užkrato galią stebime depolarizacijos laipsnio augimą ir prie maksimalios galios depolarizacijos laipsnis padidėja iki 5,6%. Kai vaizdo didinimas ant galinio veidrodžio buvo 2,66 matome, kad depolarizacijos laipsnis sumažėjo iki 2%, esant minimaliai – 20 mW užkrato galiai ir vis mažėjo didinant užkrato signalo galią iki 4-8 W, kol pasiekė mažiausią depolarizacijos laipsnį - 1,3%, o tai yra net 11 kartų mažiau lyginant su depolarizacijos laipsniu, kuomet stiprintuve nėra depolarizacijos kompensatoriaus (14,3%). Toliau didinant užkrato galią depolarizacijos laipsnis pradėjo didėti ir prie maksimalios galios buvo 2,9%. Nepaisant to, tai yra net 6,6 karto mažesnis depolarizacijos laipsnis lyginant su tuo, kai stiprintuve nėra naudojamas depolarizacijos kompensatorius.

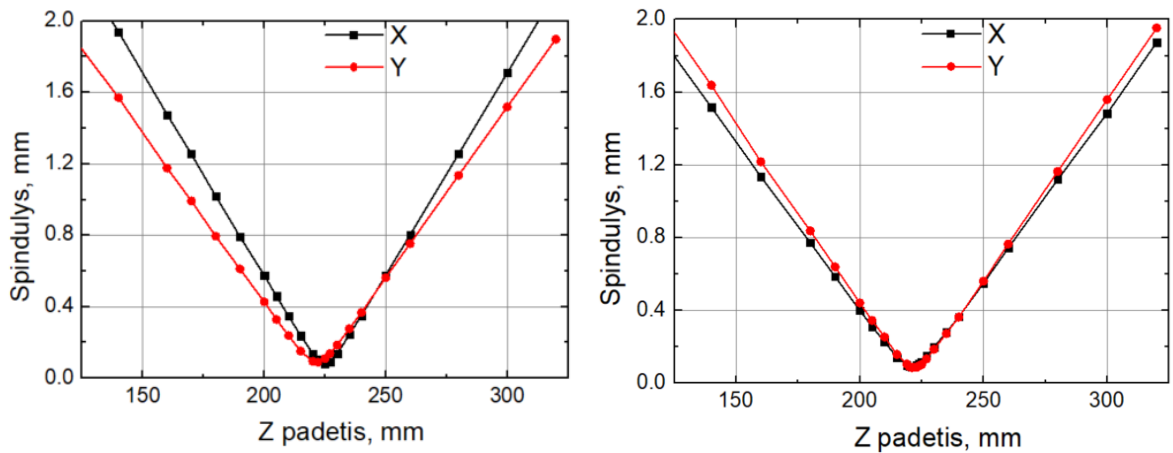


**4.11 pav.** Depoliarizacijos laipsnio priklausomybė nuo užkrato signalo be depoliarizacijos kompensatoriaus ir su kompensatoriumi, kurio  $M=0,44\lambda$ . Kairėje vaizdo didinimas 2,33, dešinėje vaizdo didinimas 2,66.

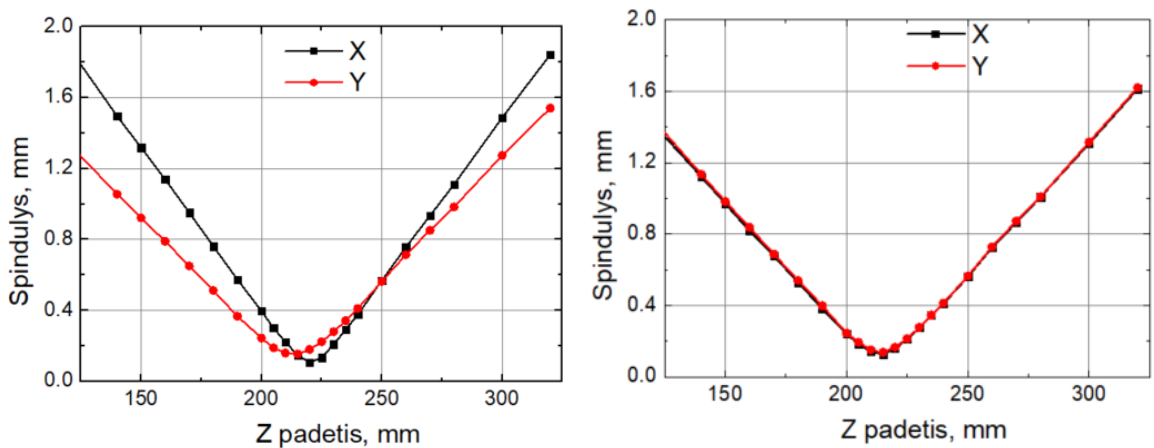
Tam, kad paaiškinti kaip depoliarizacijos kompensatorius, turintis pastovų fazės vėlinimo profilį, kompensuoja tokiam plačiam intervale kintantį depoliarizacijos laipsnį, reiktų prisiminti kelis aspektus aprašytus anksčiau. Pirmia, tai 3.1 skyriuje aprašytoje schemoje, buvo minima, kad vaizdas nuo kristalo buvo pernešamas ant apgręžiančio veidrodžio V0, o depoliarizacijos kompensatorius buvo statomas būtent prie pat šio veidrodžio. Antra, 4.1 skyriuje buvo parodyta, kad didinant užkrato signalo galią, pluošto dydis kristale didėja ir ypatingai kraštuose ir tai pagrįsde lemia depoliarizacijos augimą. Trečia, kaupinimo sugertis padidėjo apie 10% didinant užkrato signalą nuo minimalaus iki maksimalaus. Būtent dėl pirmų dviejų aspektų gauname visišką depoliarizacijos augimo kompensavimą. Depoliarizacija atsirandanti stiprintuve auga dėl to, kad didėja pluošto diametras kristale, tačiau lygiai taip pat didėja pluošto diametras ant kompensatoriaus, kuris kompensuoja šį augimą. Vis gi, kol užkrato signalo galia yra minimali, tuomet turime depoliarizacijos perkompensavimą, o dėl didėjančios kaupinimo sugerties ir išsiskiriančios papildomos šilumos kristale, depoliarizacijos kiekis kristale auga. Taip depoliarizacijos perkompensavimas ir depoliarizacijos laipsnis vis mažėja, kol pasiekia minimalią vertę. Visiškai kompensuoti depoliarizacijos nepavyksta galimai dėl depoliarizacijos profilio įrašymo netolygumų ir baigtinių depoliarizacijos kompensatoriaus matmenų. Taip pat nėra tiksliai aišku ar eksperimentiškai gaunamas fazės vėlinimo profilis kristale turi parabolinę priklausomybę nuo centro per visą pluošto profilį. Galiausiai, pluoštas nėra idealiai simetrinis, be to kristale indukuotas dvejetainis dvejopalažiškumas ir stiprinimo įsotinimas smarkiai keičia erdvines pluošto savybes, kurios gali turėti įtakos depoliarizacijos kompensavimui.

Lygiai taip pat, kaip ir 4.1 skyriuje pluošto profiliai buvo išmatuoti ir pilnai charakterizuoti atliekant z-skenavimus po dviejų lėkių Yb:YAG stiprintuvo, tik šiuo atveju stiprintuve naudojamas depoliarizacijos kompensatorius. Didinimas ant galinio veidrodžio buvo parinktas 2,66, o išmatuoti

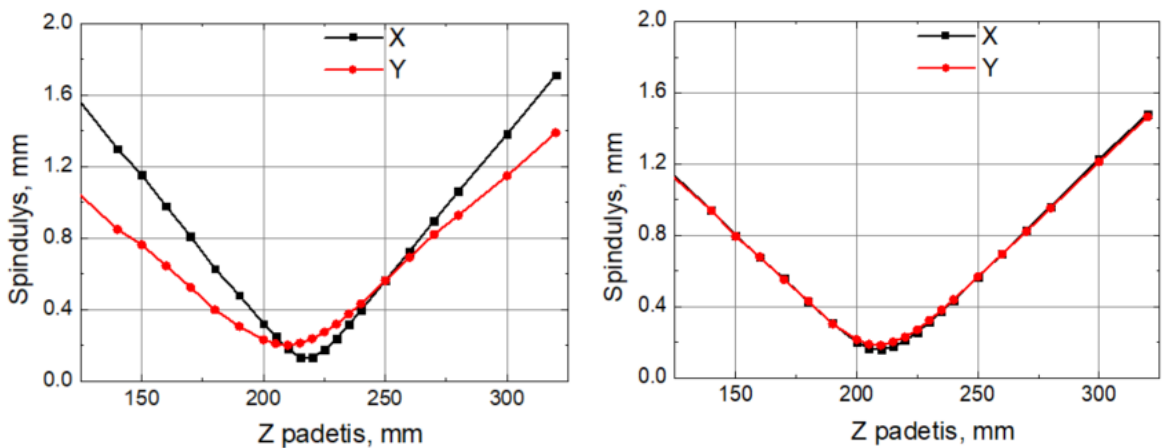
z-skenavimo rezultatai, kuomet stiprintuve nėra naudojamas ir yra naudojamas depoliarizacijos kompensatorius, pateikti 4.12-4.19 pav. , rezultatų suvestinė - 4.6 lentelėje.



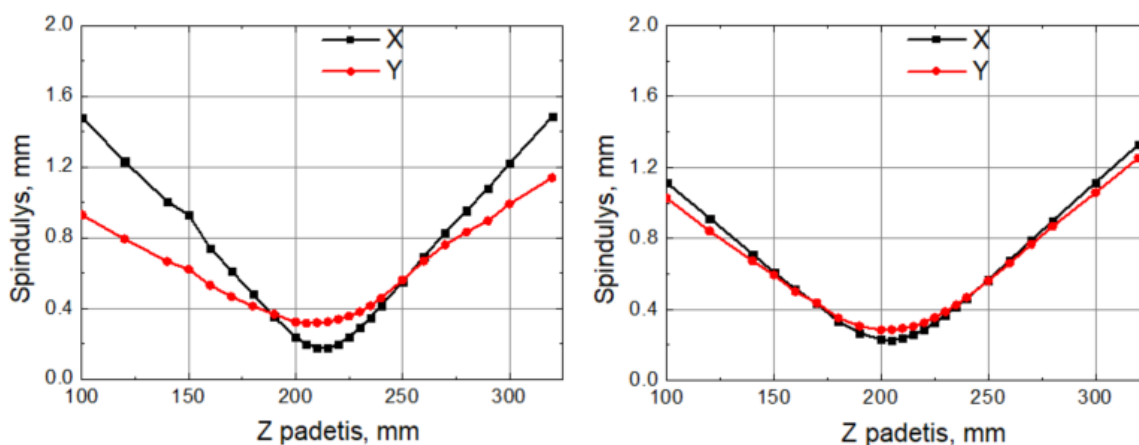
4.12 pav. Spindulio z-skenavimo rezultatai, kai nėra (kairėje) ir yra (dešinėje) depoliarizacijos kompensatorius ( $M=0.44\lambda$ ) stiprintuve, kai užkrato galia **1 W**.



4.13 pav. Spindulio z-skenavimo rezultatai, kai nėra (kairėje) ir yra (dešinėje) depoliarizacijos kompensatorius ( $M=0.44\lambda$ ) stiprintuve, kai užkrato galia **8 W**.



4.14 pav. Spindulio z-skenavimo rezultatai, kai nėra (kairėje) ir yra (dešinėje) depoliarizacijos kompensatorius ( $M=0.44\lambda$ ) stiprintuve, kai užkrato galia **16 W**.



**4.15 pav.** Spindulio z-skenavimo rezultatai, kai nėra (kairėje) ir yra (dešinėje) depoliarizacijos kompensatorius ( $M=0.44\lambda$ ) stiprintuve, kai užkrato galia **39 W**.

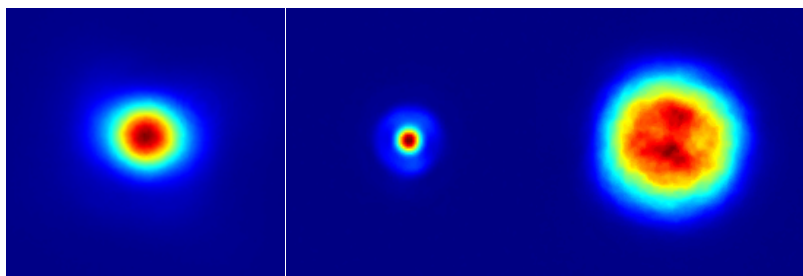
**4.6 lentelė.** Pagrindiniai pluošto parametrai ir jų pokytis, keičiant signalo galią nuo 1 W iki 39 W Yb:YAG dviejų lėkių stiprintuve, kaupinamame 270 W galia, schemoje panaudojus depoliarizacijos kompensatorių.

	Pradinis		1 W		8 W		16 W		39 W	
	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
$z_0$ , mm	309	308	221	222	214	214	209	209	202	201
$d_0$ , mm	0,1547	0,154	0,091	0,085	0,127	0,137	0,156	0,180	0,221	0,275
$z_R$ , mm	18	17,3	4,9	4,3	8,36	8,87	11,8	13,7	20,1	27,1
$M^2$	1,04	1,05	1,3	1,29	1,46	1,58	1,59	1,81	1,85	2,12
$\theta_s$ , mrad	8,7	8,9	18,8	19,9	15,1	15,3	13,3	13,1	11,0	10,1
$\frac{\theta_s(X)}{\theta_s(Y)}$	<b>0,98</b>		<b>0,94</b>		<b>0,98</b>		<b>1,01</b>		<b>1,08</b>	

$z_0$  - sąsmaukos padėtį,  $d_0$  - diametrą sąsmaukoje,  $z_R$  - Relėjaus ilgį,  $M^2$  - pluošto kokybės parametras,  $\theta_s$  - skėsties kampas,  $\frac{\theta_s(X)}{\theta_s(Y)}$  - skėstčių santykis X ir Y kryptimis.

Lyginant gautus rezultatus kuomet stiprintuve nėra naudojamas depoliarizacijos kompensatorius, pagrindinis skirtumas matomas iš z-skenavimo, tai jog šiuo atveju X ir Y kreivės nėra taip smarkiai išsiskyrusios ir bifokusavimasis gerokai sumažėjęs, o kai kuriais atvejais ir išnykęs. Tą patį galime pastebėti lyginant pagrindinius pluošto parametrus su **4.1 lentelėje** pateiktais rezultatais. Naudojant stiprintuve depoliarizacijos kompensatorių matome, kad sąsmaukos padėčių skirtumas buvo minimalus, o skėstčių santykis keitėsi nuo 0,94 iki 1,08 didinant užkrato signalo galią nuo 1 W iki 39 W. Svarbu pastebėti, kad bifokusavimosi praktiškai nesimatė, esant 8 W užkrato signalo galiai, prie kurios gaunamas skėstčių santykis toks pat kaip ir pradinis – 0,98, be to gaunamas ir mažiausias depoliarizacijos laipsnis. Lyginant pluošto kokybės parametras kuomet stiprintuve nėra ir yra naudojamas depoliarizacijos kompensatorius liko beveik nepasikeitęs, todėl galime teigti jog

depolarizacijos kompensatoriai pluošto kokybės parametrai įtakos nedaro. Lygiai taip, kaip ir nenaudojant depolarizacijos kompensatoriaus, šiuo atveju buvo išmatuoti 2D pluošto profiliai pateikti **4.16 pav.** Iš išmatuotų profilių matome, kad pluošto eliptiškumas yra gerokai pagerėjęs, o esminių pluošto išdarymų nesimato.



**4.16 pav.** 2D pluošto profilis skirtingose z-skenavimo padėtyse po dviejų lėkių stiprintuvo, schemeje panaudojus depolarizacijos kompensatorių. Užkrato signalo galia 8 W, o kaupinimo galia 270 W.

Apibendrinant depolarizacijos kompensatorių veikimą Yb:YAG dviejų lėkių stiprintuve, galime teigti, kad naudotas metodas tinka depolarizacijai ir bifokusavimuisi, atsirandantiems termiškai apkrautame aktyviajame elemente, kompensuoti. Geriausias šio konkretaus kompensatoriaus veikimas šioje sistemoje nustatytas prie 8 W įvadinės užkrato signalo galios, 270 W kaupinimo galios ir 67 W išvadinės signalo galios, kuomet depolarizacijos laipsnis buvo sumažintas nuo 14,3% iki 1,3% , o dėl bifokusavimosi atsiradęs skėscių santykis atstatytas į pradinį – 0,98. Prie maksimalios sustiprinto signalo galios (131 W), depolarizacijos laipsnis buvo sumažintas nuo 19,3% iki 2,9%, o dėl bifokusavimosi atsiradęs skėscių santykis X ir Y kryptimis sumažintas nuo 1,46 iki 1,08. Taip pat pademonstruotas derinamas kompensuojamas depolarizacijos kiekis, keičiant pluošto dydį ant depolarizacijos kompensatoriaus, rodo lankstų depolarizacijos kompensatoriaus pritaikymą.

## 5. Pagrindiniai rezultatai ir išvados

Šiame darbe buvo tirtas depoliarizacijos susidarymas ir kompensavimas 270 W vidutine galia kaupinamame, dviejų lėkių Yb:YAG stiprintuve. Kompensavimui buvo naudojamos lydytame kvarce lazeriu įrašytos nanostruktūros, kurios sukuria fazės vėlinimo profilį kaip ir kristale atsirandanti dėl šiluminių reiškinių, tik su priešingu ženklu. Pagrindiniai šio darbo **rezultatai**:

1. Dėl stiprinimo įsotinio atsiradęs pluošto didėjimas, keliant užkrato galią lėmė spartesnę depoliarizacijos laipsnio augimą. Pritaikius vaizdo pernešimą nuo kristalo ant depoliarizacijos kompensatoriaus, gautas depoliarizacijos laipsnio kompensavimas plačiame intervale.
2. Didžiausias absoliutinis depoliarizacijos kompensavimas pasiektas Yb:YAG dviejų lėkių stiprintuve sumažinant depoliarizacijos laipsnį nuo 19,3% iki 2,9%. Bifokusavimasis sumažintas, o skėscių santykis skirtingomis kryptimis sumažintas nuo 1,46 iki 1,08.
3. Geriausias santykinis depoliarizacijos kompensavimas pasiektas, kuomet depoliarizacijos laipsnis sumažintas 11 kartų iki 1,3%. Bifokusavimasis eliminuotas, o skėscių santykis skirtingomis kryptimis atstatytas į pradinį – 0,98.

Iš to padarytos **išvados**:

1. Geresnį (<1,3%) depoliarizacijos laipsnio kompensavimą riboja fiziniai elemento matmenys, nanogardelių įrašymo netolygumai ir neidealios erdvinės pluošto savybės.
2. Derinamas kompensuojamas depoliarizacijos kiekis, keičiant pluošto dydį ant depoliarizacijos kompensatoriaus, rodo lankstų tokių depoliarizacijos kompensatorių pritaikymą.
3. Depoliarizacijos kompensatoriai, paremti nanogardelių įrašymu lydytame kvarce, yra tinkami šiluminių reiškinių (depoliarizacijos, bifokusavimosi ir pluošto profilio išdarkymo) kompensavimui termiškai apkrautuose aktyviuosiuose elementuose.

# Literatūros sąrašas

- [1] Jeff Squier, Michiel Muller, „High resolution nonlinear microscopy: A review of sources and methods for achieving optimal imaging“, *Rev. Sci. Instrum.*, 2001, p. 2855-2867, <https://doi.org/10.1063/1.1379598>
- [2] Lawrence Shah, Martin E. Fermann, „Micromachining with a 50 W, 50  $\mu$ J, subpicosecond fiber laser system“, *Optics Express*, 2018, p. 12546-12551, <https://doi.org/10.1364/OE.14.012546>
- [3] Dubietis Audrius, „*Netiesine Optika*“. Vilnius: Vilniaus Universitetas, 2011, p. 87-111.
- [4] Donna Strickland, Mourou Gerard. „Compression of amplified chirped optical pulses“, *Optics Communications*, 1985, p. 219-222, [https://doi.org/10.1016/0030-4018\(85\)90151-8](https://doi.org/10.1016/0030-4018(85)90151-8)
- [5] Ilya L. Snetkov, Vitaly V. Dorofeev, Oleg V. Palashov, „Effect of full compensation of thermally induced depolarization in two nonidentical laser elements“, *Optics Letters*, 2016, p. 2374-2377, <https://doi.org/10.1364/OL.41.002374>
- [6] W.C. Scott, M. de Wit „Birefringence compensation and TEM00 mode enhancement in Nd:YAG laser“, *Applied Physics*, 1971, p. 3-4, <https://doi.org/10.1063/1.1653466>
- [7] Jae Sung Shin, Sangwoo Park, Hong Jin Kong “Compensation of the thermally induced depolarization in a double-pass Nd:YAG rod amplifier with a stimulated Brillouin scattering phase conjugate mirror”, *Optics Communications*, 2010, p. 2402-2405, <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2010.02.013>
- [8] I.A.Shaikin, „Compensation for laser beam depolarization by spatial light modulator“, *Radiophysics and Quantum Electronics*, 2019, p. 924-929, <https://doi.org/10.1007/s11141-019-09948-z>
- [9] You Wang ir kt. „Birefringence compensation of two tandem-set Nd:YAG rods with different thermally induced features“, *Pure and Applied Optics*, 2009, p. 125501-125510, <https://doi.org/10.1088/1464-4258/11/12/125501>
- [10] Hans J. Eichler, ir kt. „Thermal lensing and depolarization in a highly pumped Nd:YAG laser amplifier“, *Applied Physics*, 1993, p. 1884-1891, <https://doi.org/10.1088/0022-3727/26/11/008>
- [11] Zhaocong Lin ir kt. „Amplified spontaneous emission model of thin disk laser with nonuniform temperature distribution“, *Optical Physics*, 2017, p. 625-632, <https://doi.org/10.1364/JOSAB.34.000625>

- [12] Sebastien, Chenais, ir kt. „On thermal effects in solid-state lasers: The case of ytterbium-doped materials“, *Quantum Electronics*, 2006, p. 89-153,  
<https://doi.org/10.1016/j.pquantelec.2006.12.001>
- [13] Walter Koechner, Michael Bass, „*Solid-State Lasers*“, 2002, p. 255-277.
- [14] H. Tünnermann ir kt., „Linearly polarized single-mode Nd:YAG oscillators using [100]- and [110]-cut crystals“, *Optics Express*, 2011, p.12992–12999,  
<https://doi.org/10.1364/OE.19.012992>
- [15] Oliver Puncken ir kt., „Intrinsic reduction of the depolarization in Nd:YAG crystals“, *Optics Express*, 2010, p. 20461-20474, <https://doi.org/10.1364/OE.18.020461>
- [16] You Wang ir kt „Study on thermally induced depolarization of a probe beam by considering the thermal lens effect“, *Applied Physics*, 2009, p. 235108-235118,  
<https://doi.org/10.1088/0022-3727/42/23/235108>
- [17] B.C. Stuart, M. D. Feit, A. M. Rubenchik, B.W. Shore, M. D. Perry, „Laser-Induced Damage in Dielectrics with Nanosecond to Subpicosecond Pulses“, *Physical Review Letters*, 1995, p. 2248-2252, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.74.2248>
- [18] David Milam, „Review and assessment of measured values of the nonlinear refractive-index coefficient of fused silica“, *Applied Optics*, 1998, p. 546-550,  
<https://doi.org/10.1364/AO.37.000546>
- [19] Martynas Beresna, Mindaugas Gecevičius, Peter G. Kazansky, „Ultrafast laser direct writing and nanostructuring in transparent materials“, *Advances in Optics and Photonics* 2014, p. 293–339, <https://doi.org/10.1364/AOP.6.000293>
- [20] Rokas Drevinskas, Peter G. Kazansky, „High-performance geometric phase elements in silica glass“ *APL Photonics* 2017, 2, 066104, <https://doi.org/10.1063/1.4984066>
- [21] Y. Liao ir kt., “Femtosecond laser nanostructuring in porous glass with sub-50 nm feature sizes” *Optics Letters*. 2013, p.187–189, <https://doi.org/10.1364/OL.38.000187>
- [22] Yasuhiko Shimotsuma, Peter G. Kazansky, Jiarong Qiu, Kazuoki Hirao, „Self-Organized Nanogratings in Glass Irradiated by Ultrashort Light Pulses“ *Physical Review Letters*, 2003, p. 247405-4, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.91.247405>
- [23] D. Paipulas, „*Lūžio rodiklio modifikavimas stikluose ir kristaluose veikiant ultratrumpaisiais lazerio impulsais*“, 2011, [http://vddb.library.lt/obj/LT-eLABa-0001:E.02~2011~D\\_20111122\\_102519-04256](http://vddb.library.lt/obj/LT-eLABa-0001:E.02~2011~D_20111122_102519-04256)
- [24] Bahaa E. A. Saleh, Malvin C. Teich, „*Fundamentals of Photonic*“, 1991, p.197-203,



- [25] Laurynas Veselis ir kt., „Compact 20 W femtosecond laser system based on fiber laser seeder, Yb:YAG rod amplifier and chirped volume Bragg grating compressor”, *Optics Express*, 2018, p.31873–31879, <https://doi.org/10.1364/OE.26.031873>

# Santrauka

## **DEPOLIARIZACIJOS, INDUKUOTOS DIDELĖS GALIOS Yb:YAG STIPRINTUVO, KOMPENSAVIMAS PANAUDOJANT NANOSTRUKTŪRINIUS OPTINIUS ELEMENTUS**

Raimundas Burokas

Didelio smailinio intensyvumo ir didelės vidutinės galios femtosekundinėse lazerinėse sistemose yra naudojama didelė kaupinimo galia, kuri iššaukia šiluminius reiškinius aktyviajame elemente: depoliarizaciją, bifokusavimąsi. Depoliarizuota šviesa sklisdama pro poliarizuojančius elementus sistemoje virsta nuostoliais, be to pasižymi erdvinio netolygumu ir taip smarkiai apriboja didelės galios lazerių gamybą bei jų panaudojimą.

Šio darbo pagrindinis tikslas buvo kompensuoti depoliarizaciją, atsirandančią 270 W galia kaupinamame Yb:YAG kristale, dviejų lėkių stiprintuve. Depoliarizacijai kompensuoti buvo panaudotos lydytame kvarce įrašytos nanostruktūros, kurios sukūria fazės vėlinimo profilį, atkartojantį Yb:YAG kristale indukuota šilumos, tik priešingo ženklo.

Darbo metu buvo išmatuotas depoliarizacijos laipsnio ir bifokusavimosi indukavimas Yb:YAG kristale, dviejų lėkių stiprintuve. Taip pat išmatuotos šių parametrų priklausomybės nuo užkrato signalo galios, depoliarizuoto ir nedepoliarizuoto spindulio profilių kitimas, keičiant įvadinę užkrato galią. Esant maksimaliai 270 W kaupinimo galiai ir sustiprinto signalo galiai 131 W, gautas didžiausias depoliarizacijos laipsnis siekė 19,3%, o tai yra net 25,3 W galios nuostoliai. Be to atsirandantis bifokusavimasis, įneša 1,46 skėščių santykį pluošto skerspjuvio X ir Y kryptimis, o pluošto profilis pasidaro eliptinis.

Panaudojant depoliarizacijos kompensatorius buvo pademonstruotas didžiausias depoliarizacijos laipsnio sumažinimas nuo 19,3% iki 2,9% , esant maksimaliom kaupinimo ir užkrato signalo galioms. Didžiausias santykinis depoliarizacijos laipsnio sumažinimas nuo 14,3% iki 1,3% buvo pasiektas esant 8 W užkrato signalo galiai. Šiuo atveju depoliarizacijos laipsnis buvo mažiausias, o bifokusavimasis eliminuotas, tai yra skėščių santykis skirtingomis kryptimis sumažintas nuo 1,31 iki pradinio - 0,98. Pradinė pluošto profilio simetrija taip pat atstatyta.

Remiantis gautais rezultatais buvo padaryta išvada, kad depoliarizacijos kompensatoriai, paremti nanogardelių įrašymu lydytame kvarce, gerai kompensuoja depoliarizaciją, bifokusavimąsi ir pluošto profilio išdarymus, atsirandančius termiškai apkrautuose aktyviuosiuose elementuose ir yra tinkami naudoti šiluminiais reiškiniais kompensuoti juose.

# Summary

## **DEPOLARIZATION INDUCED IN HIGH POWER Yb:YAG AMPLIFIER COMPENSATION BY NANOSTRUCTURED OPTICAL ELEMENTS**

Raimundas Burokas

High intensity and high power femtosecond laser systems suffer from undesirable thermal phenomena in the active element: depolarization and bi-focusing. After the propagation through polarizing elements the depolarized light acts as optical losses. Subsequently, beam profile is deteriorated, severely limiting the output power and thus applicability of such high-power lasers.

The main goal of this work was to compensate depolarization in Yb:YAG crystal double-pass amplifier pumped by 270 W laser diodes radiations. For this purpose the nanostructured optical element – nanogratings formed in a fused silica glass by direct laser writing using femtosecond laser was used as a depolarization compensator. Phase delay profile created in specially designed sample repeats that of the Yb:YAG amplifier but with opposite sign. In this work, the degree of depolarization and bi-focusing in Yb:YAG crystal, used in double-pass amplifier was measured. The dependences of these parameters on the seed signal power, as well as beam profiles of depolarized and non-depolarized beams on seed power were also measured. At the maximum pump power (270 W) and amplified signal power (131 W), the highest degree of depolarization observed was 19,3%, which was estimated as a power loss of 25,3 W. Moreover, due to the induced bi-focusing, divergence ratio in two perpendicular beam cross sections X and Y increased to 1,46 while beam profile became elliptical. Depolarization losses and bi-focusing were reduced with depolarization compensator. The best compensation results were achieved for 67 W amplified signal power and resulted in depolarization reduction from 14,3% to 1,3%. In this case, bi-focusing was eliminated such as the ratio of divergences in perpendicular directions was reduced from 1,31 to initial 0,98. The symmetry of the beam profile was also restored to the original.

To summarize, depolarization compensators based on direct laser writing of nanogratings in fused silica is suitable for efficient compensation of depolarization, bi-focusing and beam profile distortions occurring in thermally loaded active elements and can be implemented in high power ultrafast laser systems.