

Vilniaus universitetas
Fizikos fakultetas
Lazerinių tyrimų centras

Justinas Abrutis

**KOMPAKTIŠKI OPTINIAI IZOLIATORIAI 785 NM IR 633 NM NUOLATINĖS VEIKOS
LAZERIAMS**

MAGISTRANTŪROS STUDIJŲ BAIGIAMASIS DARBAS

Lazerinės technologijos studijų programa

Studentas	Justinas Abrutis
Leista ginti	2023-05-24
Darbo vadovas	Dr. Doc. Rytis Butkus
Instituto direktorė	Dr. Dalia Kaškelytė

Vilnius 2024

Turinys

Įvadas	3
1 Teorinis įvadas	5
1.1 Optinių izoliatorių raida	5
1.2 Optiniai izoliatoriai	6
1.2.1 Faradėjaus efektas	7
1.2.2 Izoliatoriai skirti poliarizuotai šviesai	10
1.2.3 Izoliatoriai skirti nepoliarizuotai šviesai	11
1.2.4 Faradėjaus rotatorių optiniai elementai	11
1.2.5 Magnetai	12
2 Metodika	14
2.1 Medžiagų pasirinkimas	14
2.2 Eksperimentinės schemos	15
3 Tyrimo rezultatai ir jų aptarimas	18
3.1 Verdet konstantos nustatymas	18
3.2 Pralaidumo ir izoliacijos matavimai	24
Išvados	28
Literatūra	29

Įvadas

Optinis izoliatorius yra svarbus komponentas lazerių sistemose, daugiausia dėl to, kad šis elementas apsaugo sistemas nuo nepageidaujamų atspindžių [1]. Atspindžiai gali sukelti problemas, tokias kaip galios nestabilumas, amplitudės triukšmai ar net žalą jautriems optiniams komponentams ar lazerio šaltiniui. Optinis izoliatorius leidžia šviesai keliauti tik viena kryptimi nuo lazerio šaltinio link optinės sistemos blokuojant ar nukreipiant šviesą, kuri bando keliauti priešinga kryptimi. Šis funkcionalumas yra būtinas siekiant išlaikyti lazerio sistemos vientisumą ir veikimą.

Esant mažai lazerio sistemai yra ir poreikis sumažinti ir jos komponentus, įskaitant optinį izoliatorių. Šis poreikis nėra tik dėl vienodo dydžio, bet ir dėl sistemos integravimo poreikių, kompaktiškumo ir patogumo. Tradiciniai optiniai izoliatoriai, dažnai yra išoriniai ir didesni dėl juose naudojamų magneto-optinių kristalų ir magnetų todėl gaminant integruotą ir kompaktišką izoliatorių susiduriame su daug iššūkių. Kompaktiški optiniai izoliatoriai turi atitikti keletą kriterijų, neapsiribojant tik dydžiu. Tai apima: aukšta izoliacija - galimybė teikti aukštą optinę izoliaciją, siekiant minimalizuoti atgalinių atspindžių riziką, darančią įtaką lazerio šaltiniui. Aukštas pralaidumas - minimalūs sugerties ar sklaidos nuostoliai, kai šviesa eina pro izoliatorių, užtikrinant, kad yra išlaikoma numatyta lazerio sistemos galia. Šiluminis stabilumas - komponentas turi išlikti stabilus per įvairių temperatūrų diapazoną, atsižvelgiant į tai, kad lazerių sistemos dažnai generuoja šilumą. Kainos efektyvumas – esant daug optinių izoliatorių pasirinkimų rinkoje svarbu išlaikyti gerą kainos santykį nesumažinant kokybės.

Nors buvo padaryta daug reikšmingų pažangų lazerių technologijose ir optiniuose komponentuose, optinių izoliatorių skirtų konkrečioms bangos ilgiams, tokiems kaip 785 nm ir 633 nm, vystymas vis dar kelia iššūkius, kurie nėra visiškai išspręsti [2]. Pagrindinės problemos keliančios šiuos iššūkius yra dydis, efektyvumas ir kaina [3]. Dabartinis dažniausiai sutinkamų optinių izoliatorių standartas yra sistema, į kurią įeina magneto-optinė medžiaga, magnetai ir papildomi optiniai elementai, kas lemia įrenginį, kuris yra didelis ir netinkamas integruoti į kompaktišką optinę sistemą.

Efektyvumas optinių izoliatorių kontekste apima tiek jų gebėjimą efektyviai blokuoti atgal atspindėtą šviesą (izoliacija), tiek jų gebėjimą perduoti pirmyn einančią šviesą su minimaliais nuostoliais (pralaidumas) [4]. Nors yra aukštos izoliacijos ir didelio pralaidumo įrenginiai, jie dažnai yra pritaikyti platesniam bangos ilgių diapazonui ir nėra optimizuoti 785 nm ir 633 nm nuolatinės veikos lazeriams. Dėl to, veikimas dažnai tampa neoptimalus, kai šie izoliatoriai yra taikomi sistemose, naudojančiose šiuos specifinius bangos ilgius.

Aukštos kokybės optiniai izoliatoriai dažnai naudoja brangias medžiagas ir reikalauja sudėtingų gamybos procesų. Šie veiksniai prisideda prie aukštos gamybos kainos, kuri savo ruožtu daro technologiją mažiau prieinamą.

Apibendrinant, dabartiniai su 785 nm ir 633 nm bangos ilgiais suderinami optiniai izoliatoriai dažnai reikalauja kompromisų bent vienam iš pagrindinių aspektų: jie arba per dideli, kad būtų integruoti į kompaktiškas sistemas, arba nepakankamai efektyvūs, kad atitiktų veikimo reikalavimus, arba per brangūs plačiam taikymui.

Šio darbo tikslai: suprojektuoti ir eksperimentiškai išbandyti kompaktiškus optinius izoliatorius, optimizuotus 785 nm ir 633 nm nuolatinės veikos lazeriams. Įvertinti įvairias magneto-optines

medžiagas, tinkamas veikti 785 nm ir 633 nm bangos ilgiuose. Šiam vertinimui labai svarbus kriterijus yra Verdet konstanta. Sukurti optimizuotą geometrinį dizainą optiniam keliui ir kitiems komponentams, siekiant užtikrinti aukštą veikimo efektyvumą ir išlaikant kompaktiškumą. Atlikti testus sukurtam izoliatoriui, siekiant išmatuoti jo pralaidumą, izoliaciją ir Verdet konstantą. Analizuoti medžiagų ir gamybos kaštus, siekiant įvertinti pasiūlyto optinio izoliatoriaus komercinį prieinamumą.

1 Teorinis įvadas

1.1 Optinių izoliatorių raida

Kai šviesa sąveikauja su medžiaga, turinčia magnetinį momentą, arba prasiskverbia pro medžiagą, arba atsispindi nuo jos paviršiaus, tam tikri šviesos bangos parametrai, tokie kaip poliarizacijos plokštuma, fazė ir sklaidos savybės patiria pokyčius. Šis reiškinys vadinamas magneto-optiniu efektu [1]. Iš magneto-optinių efektų labiausiai ištyrinėti ir plačiai taikomi yra Faradėjaus ir Kero efektai. 1845 metais Maiklas Faradėjus tarp magnetinių polių įdėjo stiklo gabalėlį ir pastebėjo, kad po to, kai šviesa prasiskverbia pro stiklą, pasikeičia krintančios šviesos poliarizacijos plokštuma. Tai buvo pirmasis šio efekto atradimas, vėliau pavadintas Faradėjaus efektu. Šis pasisukimo laipsnis priklauso nuo kelių faktorių: magnetinio lauko stiprio, esančio šviesos sklaidimo krypties atžvilgiu, optinės medžiagos ilgio, ir magneto-optinės medžiagos gebėjimo keisti šviesos poliarizacijos plokštumą, kas įvardijama Verdet konstanta [5].

Nors magneto-optinio efekto atradimas siekia daugiau nei prieš šimtą penkiasdešimt metų, tik 1970-aisiais buvo sukurtos naujos medžiagos, kurios padarė įmanomą praktinio dydžio magneto-optinių įtaisų gamybą. Šiame technologiniame progrese išsiskiria du pagrindiniai komponentai, pirmasis tai magneto-optinės medžiagos, pasižyminčios didelėmis Verdet konstantomis, kurios leidžia efektyviai keisti šviesos poliarizacijos kryptį, ir antrasis – retųjų žemių magnetų medžiagos, kurios sukuria itin stiprius magnetinius laukus. Šie atradimai atvėrė kelią magneto-optinio efekto panaudojimui įvairiose lazerių technologijose [5].

Nuo tada, kai 1960 metais atsirado pirmasis lazeris [6], magneto-optinių medžiagų ir prietaisų tyrimai sparčiai vystėsi [7]. Pirmieji optiniai izoliatoriai, pagrįsti bangolaidžių konfigūracijomis, sulaukė dėmesio dėl galimybės juos integruoti į optines sistemas. 1973 metais, Verneris pateikė bangolaidžio optinio izoliatoriaus projektą, kuris buvo pagrįstas TE-TM modų konversija [8]. 1975 metais Hepneris empiriškai ištyrė TE-TM modų transformacijas magneto-optinio kristalo bangolaidyje, indukuotas išoriniais, tiek lygiagrečiais, tiek skersiniais magnetiniais laukais - atitinkamai Faradėjaus ir Koton-Mutono efektai. 1977 metais Kastera pristatė bangolaidžio optinį izoliatorių, naudodamiesi tiek Faradėjaus, tiek Koton-Mutono efektais [9].

Nuo Faradėjaus laikų iki šiol buvo identifikuotos įvairios medžiagos, turinčios magneto-optinio šviesos poliarizacijos sukimosi savybę, įskaitant tas, kurių Verdet konstantos yra itin didelės. Magneto-optinių medžiagų, tokių kaip Itrio Geležies Granatas (Yttrium Iron Garnet - YIG), atsiradimas lėmė Faradėjaus izoliatorių tolimesnę vystymąsi, kuris reikšmingai padidino optinių izoliatorių efektyvumą. Tai buvo revoliucinis žingsnis, nes Faradėjaus izoliatoriai buvo atsparesni aplinkos sąlygoms ir turėjo platesnę bangos ilgių diapazoną. Kai lazeriai pradėjo būti naudojami vis įvairesnėse taikymo srityse, atsirado poreikis ir kompaktiškesniems izoliatoriams. Pradėta ieškoti būdų, kaip sumažinti izoliatorių dydį, neprarandant veikimo efektyvumo. Pradėjus tyrinėti naujas medžiagas, tokias kaip Terbio Galio Granatas (Terbium Gallium Garnet - TGG), Terbio Skandžio Aliuminio Granatas (Terbium Scandium Aluminum Garnet - TSAG) ir kitus junginius, buvo siekiama pagerinti Verdet konstantą, kuri yra esminis Faradėjaus izoliatorių efektyvumo parametras. Dėka šių medžiagų, dabar įmanoma sukurti praktinio dydžio įrenginius.

1.2 Optiniai izoliatoriai

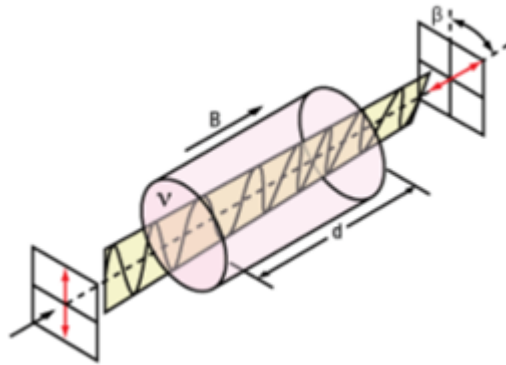
Optiniai izoliatoriai yra prietaisai, skirti praleisti sklindančią šviesą tik viena kryptimi, efektyviai blokuojant bet kokią atsispindėjusią arba išsisklaidžiusią šviesą. Viena iš dažnai taikomų Faradėjaus izoliatoriaus sričių yra puslaidininkiniai lazeriai. Šie optiniai izoliatoriai yra esminiai apsaugant lazerius nuo optinio atgalinio ryšio, kuris pasireiškia kaip šviesos atspindys iš įvairių optinių komponentų. Eksperimentuose, kuriuose yra itin svarbus puslaidininkinio lazerio stabilus veikimas, pavyzdžiui, spektroskopijoje ar dalelių analizėje, eksperimento tikslumas yra tiesiogiai susijęs su lazerių dažnio sinchronizavimu su specifiniais atomų perėjimais. Optinis atgalinis ryšys gali sukelti nepageidaujamą dažnio slinktį ir netgi gali padaryti negrįžtamą žalą lazerio diodui. Atspindžio mažinimui naudojamas izoliatorius, kuris įrengiamas tiesiai prieš lazerį. Šis įrenginys neleidžia atspindėti šviesai pasiekti diodo, taip sumažinant tiek šviesos intensyvumą, tiek dažnio svyravimus. Izoliatoriaus paskirtis izoliuoti lazerį nuo bet kokios atgalinės optinės galios, apsaugant jį nuo nepageidaujamo atgalinio ryšio. Izoliatoriai yra neatsiejama bet kurio mažo triukšmo lazerio sistemos dalis [10].

Faradėjaus izoliatoriaus būtinybė optinio atgalinio ryšio eliminavimui gali būti neakivaizdi iš pirmo žvilgsnio. Nebrangus ir paprastas izoliatorius gali būti padarytas iš poliarizuojančio šviesos daliklio, kuris praleidžia horizontaliai poliarizuotą šviesą, ir $\lambda/4$ plokštelės. Lazerio šviesa, pereinama per minėtą daliklį, tampa horizontaliai poliarizuota, o vėliau apskritimiškai poliarizuojama per plokštelę. Optiniai atspindžiai, praėję per komponentus, per plokštelę yra verčiami į vertikalią poliarizaciją ir nepraleidžiami atgal per šviesos daliklį. Tokio izoliatoriaus efektyvumas priklauso nuo šviesos daliklio ekstinkcijos koeficiento. Vis dėlto, šis metodas tampa neveiksmingas, jeigu optiniai komponentai indukuoja elipsiškumą atspindėtoje šviesoje. Faradėjaus izoliatorius susideda iš optiškai aktyvaus kristalo, kuris yra įdėtas į magnetą, ir yra skirtas minimalizuoti šviesos nuostolius dėl antireflekcinės dangos pasirinktame bangos ilgyje. Izoliatoriaus galuose yra poliarizatoriai, užtikrinantys jiems atitinkančios poliarizacijos šviesos pralaidumą. Lazerio šviesai, sklindant kristalu, jos poliarizacijos plokštuma pasukama 45 laipsnių kampu. Kai atspindėta šviesa praeina per kristalą, jos poliarizacijos plokštuma pasisuka ta pačia kryptimi kaip ir pradinė šviesa. Dėl šios priežasties, kai šviesa pasukama statmenai savo pradinei kryptimi, ji neutralizuojama priešais izoliatorių esančiu poliarizatoriumi. Ši sistema efektyviai veikia net ir tada, kai optiniai elementai įveda elipsiškumą atspindėtoje šviesoje, pabrėžiant Faradėjaus izoliatoriaus pranašumą [11].

Pagrindiniai optinio izoliatoriaus parametrai yra izoliacija ir pralaidumas. Pasiiektas izoliacijos laipsnis priklauso nuo to, kaip gerai poliarizatoriai gali filtruoti nepageidaujamas poliarizacijos būsenas. Aukštos kokybės poliarizatoriai pagerina izoliatoriaus veikimą, didindami izoliacijos santykį. Taip pat efektyvūs poliarizatoriai turi gerą pralaidumo koeficientą, kas leidžia sistemai veikti su mažesniais galios nuostoliais. Tai yra labai svarbu sistemose, kuriose svarbu išlaikyti signalo stiprumą.

Judėjimas link kompaktiškų optinių izoliatorių lėmė įvairių naujoviškų dizainų ir medžiagų pasirinkimą. Atsižvelgiant į tai, kad šis tyrimas yra sutelktas į Faradėjaus izoliatorius, aktualu tyrinėti, kaip kompaktiškumas pasiektas šioje kategorijoje.

Pirmieji Faradėjaus izoliatoriai dažnai naudojo didelius magneto-optinius kristalus, kad pasiek-



1 pav. Faradėjaus efektas tiesiškai poliarizuotai šviesai. [15]

tų reikalingą Faradėjaus rotaciją [12]. Šiandien naudojami mažesni kristalai su didesnėmis Verdet konstantomis, pavyzdžiui, Terbio Galio Granatas (TGG) ir Terbio Skandžio Aliuminio Granatas (TSAG), siekiant sumažinti dydį nesumažinant efektyvumo.

Taip pat buvo naudojami dideli magnetai norint turėti pakankamai stiprų magnetinį lauką, kas lėmė masyvių optinių izoliatorių dizainą ir nepraktiškumą [3]. Stiprių retųjų žemės magnetų, pavyzdžiui, neodimio magnetų, naudojimas leidžia pasiekti mažesnius dizainus, nes reikalingas magnetinio lauko stiprumas pasiekiamas per trumpesnę medžiagos kelią. Dėka šių medžiagų, dabar įmanoma sukurti praktinio dydžio įrenginius, skirtus vienai iš svarbiausių lazerių naudojimo problemų optiniam atgaliniam ryšiui, kuris sukelia įvairias neigiamas pasekmes, tokias kaip amplitudės svyravimai, dažnio paslinkimai, moduliacijos juostos apribojimai, triukšmas ir net pažeidimai [5].

Kompaktiško integruoto izoliatoriaus įdiegimas suteiktų kelias esmines naudas, leistų sumažinti lazerio įrangos dydį bei kainą. Taip pat sumažintų atskirų optinių komponentų derinimo poreikį. Galiausiai, jo integracija, užtikrintų didesnę mechaninį stabilumą.

1.2.1 Faradėjaus efektas

Faradėjaus efektas, yra kertinis daugelio optinių izoliatorių veikimo principas, aprašantis kaip tiesiškai poliarizuotos šviesos srauto poliarizacijos plokštuma sukasi, praėjus pro medžiagą, kurią veikia magnetinio lauko jėgos linijos, lygiagrečios šviesos sklidimo kryptimi 1pav. [13]. Vienas iš unikalių Faradėjaus efekto bruožų yra tai, kad jis nepriklauso nuo šviesos sklidimo krypties [14]. Tai reiškia, jei šviesa grįžta atgal per tą pačią medžiagą priešinga kryptimi, poliarizacijos plokštuma pasisuka ta pačia kryptimi - pagal laikrodžio rodyklę ar prieš ją, efektyviai padvigubindama pasukimo kampą palyginti su pradiniu šviesos srautu. Šis sukimas yra apibrėžtas Verdet konstantos vertėmis, kurios priklauso nuo medžiagos. Tai yra visiškai priešinga nei kai kalbama apie optiškai aktyvias medžiagas, tokias kaip kristalinis kvarcas ar cukraus tirpalai, kuriose poliarizacijos sukimosi reiškinys priklauso nuo šviesos judėjimo krypties [5].

Faradėjaus efekto fizikinę prigimtį galima suprasti analizuojant elektrono orbitalinį judėjimą dielektrinėje medžiagoje, kai jis yra veikiamas magnetinio lauko B , kuris yra orientuotas statmenai elektrono orbitos plokštumai. Elektrono judėjimo charakteristinis kampinis dažnis yra ciklotrono dažnis, $\omega_c = eB/m$, čia m - elektrono masė, o e - elektrono krūvis. Šis dažnis, kartu su orbitalės spinduliu, keičiasi atsižvelgiant į tai, ar šviesa, turinti kampinį dažnį ω , yra apskritimiškai poliarizuota į

dešinę ar į kairę. Skirtingi orbitaliniai spinduliai, atitinkantys abi priešingas apskritimines poliarizacijas, lemia skirtingus dipolinius momentus, kurie veda prie skirtingų lūžio rodiklių šioms dviem poliarizacijoms. Kai dielektrikas apšviečiamas tiesiškai poliarizuota šviesa, ji gali būti traktuojama kaip dešinės ir kairės apskritimiškai poliarizuotų šviesos komponentų sumavimas. Šie komponentai sklinda per terpę su skirtingais fazės greičiais ir patiria fazės poslinkį. Tai lemia poliarizacijos plokštumos sukimosi reiškinį per kampą β apibrėžtą kaip [11]:

$$\beta = \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right) \left(\frac{(n_r - n_l)}{2} \right) d \quad (1)$$

Šioje formulėje d žymi dielektriko storį, λ - šviesos bangos ilgį, o n_r ir n_l - atitinkamai dešinės ir kairės apskritimines poliarizacijos šviesos lūžio rodiklius. Sukimosi kryptis yra nulemta vien magnetinio lauko krypties, nepriklausomai nuo šviesos sklidimo krypties per dielektriką. Todėl atspindėta šviesa bus pasukta per dvigubą β kampą.

Faradėjaus sukimosi dielektrike išraišką galime apibūdinti modeliuojant optiškai aktyvią terpę kaip harmoninių osciliatorių aibę, kuri yra sužadinama iš rezonanso veikiant magnetiniam laukui. Judėjimo lygtis šiai sistemai yra:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + m\omega_0^2 x(t) = eE(t) \quad (2)$$

Kur ω_0 yra sistemos dažnis, ω yra veikiantis jį dažnis, $E(t)$ yra elektrinis laukas, $x(t)$ yra nuo laiko priklausanti pozicija. Elektrinis laukas ir pozicija gali būti užrašyta kaip

$$E(t) = E_0 e^{-i\omega t} \quad (3)$$

ir

$$x(t) = x_0 e^{-i\omega t} \quad (4)$$

atitinkamai. Naudojant 3 ir 4 randame

$$x(t) = \frac{eE_0}{m(\omega_0^2 - \omega^2)} \quad (5)$$

Dielektriko poliarizacija P gali būti aprašyta

$$P = eNx(t) = (\varepsilon - \varepsilon_0) E(t) \quad (6)$$

kur N yra elektronų skaičius tūrio vienetė, ε_0 yra vakuomo dielektrinis pralaidumas, ε yra dielektriko santykinis dielektrinis pralaidumas. Naudojant 5 galima gauti

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = 1 + \frac{Ne^2}{\varepsilon_0 m_e \omega_0^2 - \omega^2} \quad (7)$$

Nuo dažnio priklausantis lūžio rodiklis yra

$$n = \sqrt{1 + \frac{Ne^2}{\varepsilon_0 m_e} \frac{1}{\omega_0^2 - \omega^2}} \quad (8)$$

Išprendžiant 2 papildžius atsiradusia jėga dėl magnetinio lauko, galima parodyti kad, lūžio rodikliai kairiajai ir dešiniajai apskritiminei poliarizacijai esant magnetiniam laukui yra

$$n_{r,l} = \sqrt{1 + \frac{Ne^2}{\varepsilon_0 m} \frac{1}{(\omega_0^2 - \omega^2) \mp \frac{eB\omega}{m}}} \quad (9)$$

Skirtumas tarp dviejų lūžio rodiklių gali būti apytiksliai apskaičiuotas, gaunant

$$n_r - n_l = \frac{Ne^3 B \omega}{\varepsilon_0 m^2} \frac{1}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 - \left(\frac{eB\omega}{m}\right)^2} \quad (10)$$

Kadangi svarstome toli nuo rezonanco atvejį ir ciklotrono dažnis yra daug mažesnis, nei optinis dažnis susijęs su veikiančiu lauku, darome prielaidą, kad

$$\left(\frac{qB}{m}\right)^2 \ll \frac{(\omega_0^2 - \omega^2)^2}{\omega^2} \quad (11)$$

Ir 10 gali būti suprastinta gaunant:

$$n_r - n_l = \frac{Ne^3 B \omega}{\varepsilon_0 m^2} \frac{1}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2} \quad (12)$$

Kadangi

$$\frac{dn}{d\lambda} = \frac{dn}{d\omega} \frac{d\omega}{d\lambda} \quad (13)$$

galime panaudoti 8 parodyti, kad

$$\frac{dn}{d\lambda} = \frac{Ne^2 \omega}{\varepsilon_0 m} \frac{1}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2} \frac{2\pi c}{\lambda^2} \quad (14)$$

Sulyginus 11 ir 12 gauname

$$n_r - n_l = \left(\frac{\lambda^2}{c}\right) \left(\frac{dn}{d\lambda}\right) \left(\frac{eB}{2\pi m}\right) \quad (15)$$

13 lygtis gali būti panaudota 1 išsireikšti poliarizacijos plokštumos pasukimo kampą krintančiai šviesai:

$$\beta = \left(\frac{e}{2m} \frac{\lambda}{c} \frac{dn}{d\lambda}\right) B d \quad (16)$$

Iš čia, medžiagos Verdet konstanta gali būti aprašyta kaip:

$$V = \left(\frac{e}{2m} \frac{\lambda}{c} \frac{dn}{d\lambda} \right) \quad (17)$$

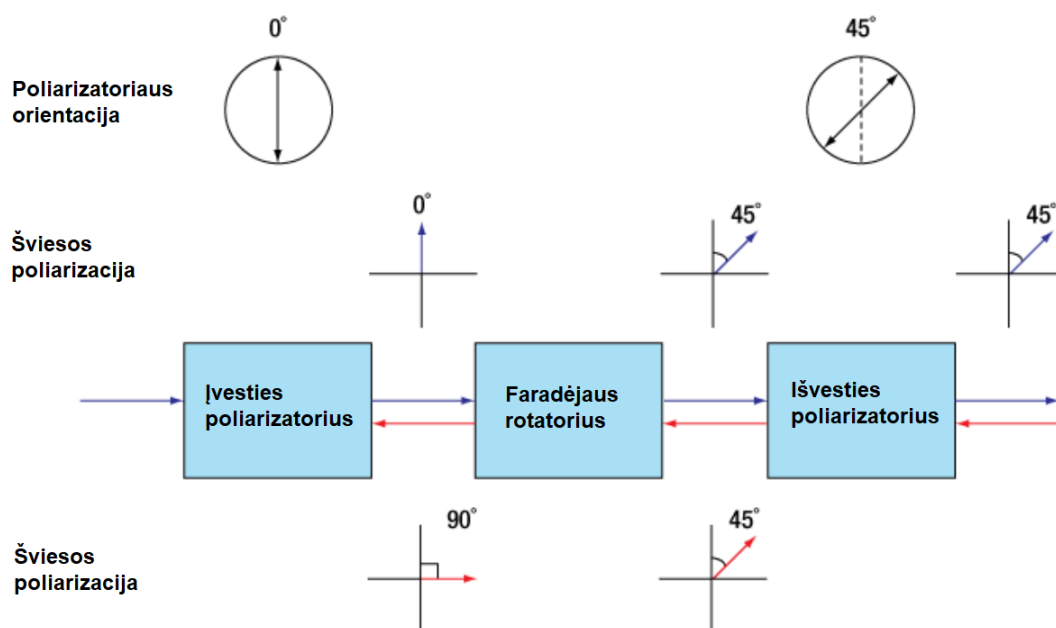
ir poliarizacijos posūkio kampas tada bus:

$$\beta = BVd \quad (18)$$

Taigi poliarizacijos pasukimo kampas priklauso tik nuo magnetinio lauko stiprio, dielektriko ilgio ir sklindančios šviesos bangos ilgio. Medžiagos Verdet konstanta paprastai yra svarbiausias dydis įtakojančias optinio izoliatoriaus dydį. Kuo didesnė Verdet konstanta, tuo mažesnė gali būti optinio izoliatoriaus konstrukcija, nes galima naudoti trumpesnę optinį elementą arba mažesnę magnetą. Taip pat svarbu Verdet konstantos priklausomybė nuo bangos ilgio. Kuo didesnis bangos ilgis tuo mažesnė konstanta, todėl regimo spektro ir IR srities izoliatorius yra sunkiau padaryti kompaktiškus nei UV srities [13].

1.2.2 Izoliatoriai skirti poliarizuotai šviesai

Vienas iš galimų optinių izoliatorių dizainų yra izoliatorius skirtas poliarizuotai šviesai. Toks izoliatorius ir bus bandomas suprojektuoti šiame darbe.



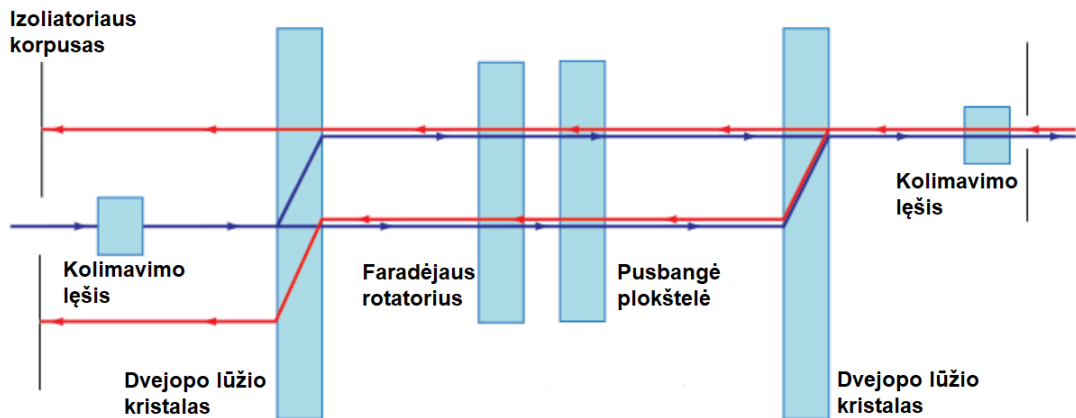
2 pav. Izoliatorius skirtas poliarizuotai šviesai. Atbulinis šviesos srautas yra blokuojamas įvadinio poliarizatoriaus.

Į priekį sklindant šviesai tarkime, kad įvesties poliarizatoriaus ašis yra vertikali 2pav. Lazerio šviesa, arba poliarizuota, arba nepoliarizuota, patenka į įvesties poliarizatorių ir tampa vertikaliai poliarizuota. Kai ji eina per magneto-optinę medžiagą magnetiniame lauke, jos poliarizacijos plokštuma pasisuka. Faradėjaus rotatorius pasuks poliarizacijos plokštumą 45° teigiama kryptimi. Galiausiai, šviesa išeina pro išvesties poliarizatorių, kurio ašis yra 45° . Taigi, šviesa palieka izoliatorių su 45° poliarizacijos kampo posūkiu. Atgal sklindant šviesai per izoliatorių, šviesos srautas

pirmiausia patenka į išvesties poliarizatorių, kuris poliarizuoja šviesą 45° atžvilgiu į įvesties poliarizatorių. Tada ji praeina per Faradėjaus rotatorių, ir pasisuka dar 45° teigiama kryptimi. Tai lemia 90° bendrą posūkį įvesties poliarizatoriaus atžvilgiu, ir taip poliarizacijos optinė plokštuma dabar yra statmena įvesties poliarizatoriaus perdavimo ašiai. Taigi, šviesa bus arba atspindėta, arba sugeriama ir taip pasiekama optinė izoliacija [15].

1.2.3 Izoliatoriai skirti nepoliarizuotai šviesai

Kitas optinio izoliatoriaus dizainas yra izoliatorius skirtas nepoliarizuotai šviesai. Šiame izo-



3 pav. Izoliatorius skirtas nepoliarizuotai šviesai. Šviesos srautas yra nukreipiamas nuo įvadinio kelio.

Izoliatoriuje ateinanti nepoliarizuota šviesa yra padalinama į dvi šakas dvejo lūžio kristalo pagalba 3pav. Faradėjaus rotatorius ir pusbangė plokštelė pasuka kiekvienos šakos poliarizaciją prieš susiduriant su antruoju dvejo lūžio kristalu, suderintu sujungti abu šviesos srautus. Atgal atspindėta šviesa susidurs su antruoju dvejo lūžio kristalu ir bus padalinta į du šviesos srautus, kurių poliarizacija yra suderinta su pirmyn einančios šviesos poliarizacija. Faradėjaus rotatorius yra ne abipusis rotatorius, todėl jis anuliuos pusbangės plokštelės įvestą posūkį atgalinio režimo šviesai. Kai šviesa susidurs su įvesties kristalu, ji bus nukreipta nuo kolimavimo lęšio į izoliatoriaus korpuso sienas, neleidžiant atgal sklindančiai šviesai patekti atgal [15, 16].

1.2.4 Faradėjaus rotatorių optiniai elementai

Medžiagos, galinčios sukelti poliarizacijos sukimosi efektą, skirstomos į tris pagrindines kategorijas: paramagnetines, diamagnetines ir feromagnetines. Paramagnetinės medžiagos pasižymi neigiama Verdet konstanta, kuri mažėja didėjant absoliučiai temperatūrai ir maždaug yra atvirkščiai proporcinga bangos ilgio kvadratui. Diamagnetinės medžiagos turi teigiamą Verdet konstantą, kuri esmingai nekinta keičiantis temperatūrai ir, panašiai kaip paramagnetinės medžiagos, maždaug yra atvirkščiai proporcinga bangos ilgio kvadratui. Feromagnetinės medžiagos pasižymi teigiama Verdet konstanta, kuri priklauso nuo temperatūros ir konkrečios medžiagos savybių. Taip pat, kaip ir

kitų tipų atveju, ši konstanta maždaug yra atvirkščiai proporcinga bangos ilgio kvadratui [5]. Tačiau reikia nepamiršti, kad gali pasitaikyti ir reikšmingi nuokrypiai nuo šių bendrųjų tendencijų.

Faradėjaus rotatoriai yra esminiai komponentai pažangiose optinėse sistemose, atliekantys optinės izoliacijos ir signalo stabilizavimo funkcijas. Šie prietaisai priklauso nuo juose naudojamų magnetų ir kristalų sukuriama Faradėjaus efekto, kad pasiektų reikiamą šviesos poliarizacijos plokštumos pasukimo kampą, kai šviesos pluoštas eina per magneto-optinę terpę, veikiamą magnetinio lauko [7]. Didėjant poreikiui naudoti magneto-optinius elementus matomajame ir artimajame infraraudonajame spektro diapazonuose, ypač svarbu yra medžiagų, kurios būtų skaidrios dominuojančio bangos ilgio srityje, turėtų galimybę būti auginamos reikiama matmenimis ir būtų technologiškai efektyvios, kūrimas [17]. Šiandien perspektyvios medžiagos Faradėjaus izoliatoriams yra įvairūs granatai, nes jie apima aukštą Verdet konstantą, mažą sugertį ir geras termo-optines savybes [18]. Dažniausiai pasirenkamos medžiagos yra Terbio Galio Granatas (TGG) ir Terbio Skandžio Aliuminio Granatas (TSAG) dėl jų pranašų savybių.

TGG, sintetinėje gamyboje gaminamas kristalas, yra žinomas dėl didelės Verdet konstantos plačiame bangos ilgių diapazone, šiluminio stabilumo ir cheminio atsparumo [2]. Jo šiluminis stabilumas padaro jį labai atsparų šiluminiams lėšiams, reiškiniui, kai temperatūros poveikio sukeltas lūžio rodiklio pokytis gali iškraipyti optinius signalus.

TSAG, kita vertus, yra gan naujai atsiradusi medžiaga palyginus su plačiai naudojamu TGG. Sudėtingas TSAG kristalų auginimas lemia didesnę jų kainą, dėl ko TGG kristalų pasirinkimas gali būti gera alternatyva. Tačiau ji turi keletą pastebimų privalumų. Didžiausias TSAG kristalų privalumas yra tai, kad jie turi aukštą Verdet konstantą, kuri yra 25% didesnė nei tradiciškai naudojamo TGG kristalo [19]. Taip pat ji turi mažesnę sugerties koeficientą, suteikiantį geresnę šviesos pralaidumo koeficientą. Be to, TSAG turi dar geresnę šiluminę laidumą nei TGG, sumažinant šiluminius efektus didelės galios taikymuose. Kadangi projektuojamas optinis izoliatorius bus taikomas mažesnės galios lazeriams su pastoviu temperatūros palaikymu, naudojant TSAG kristalus šiluminių efektų bus galima nepaisyti.

TGG ir TSAG kristalai siūlo unikalius privalumus Faradėjaus rotatorių projektavimo ir veikimo atžvilgiu. Nors TGG išlieka pramonės standartu dėl jo užtikrinto veikimo ir plačios taikymo srities, TSAG pasirodo kaip perspektyvi alternatyva specializuotoms sistemoms.

1.2.5 Magnetai

Šiuolaikinėje mokslinėje literatūroje jau yra matematiškai aprašyti paprastų formų nuolatinių magnetų magnetinių laukų pasiskirstymai. Tai suteikia galimybę prognozuoti magnetinio lauko charakteristikas, išvengiant ilgalaikių skaičiavimų. Be to, remiantis superpozicijos principu, sudėtingesnių konstrukcijų nuolatinių magnetų, sudarytų iš paprastų formų, pavyzdžiui, kubų, sferų, kūgių ir kt., magnetinis laukas gali būti nustatomas sudedant pagrindinių formų magnetų laukus. Taip pat, žinant magnetinio lauko stiprumą, galima apskaičiuoti nuolatinių magnetų sukeltą jėgą ir sukimo momentą, remiantis Kulonio modeliu [20].

Mokslinėje literatūroje yra daugybė tyrimų, skirtų nuolatinių magnetų su paprastomis konfigūracijomis magnetinių laukų analizei. Pavyzdžiui, buvo išvestos greitai skaičiuojamos magnetinio

lauko pasiskirstymo formulės elipsiniams ir apvaliems cilindrų formos magnetų konfigūracijoms, taip pat buvo tirtas magnetinis laukas, generuojamas kubo ir stačiakampio formos magneto. Buvo analizuoti sferų ir elipsoidų magnetiniai laukai.

Magnetinių laukų skaičiavimai gali būti atlikti remiantis magneto formos geometrija [21]. Išvedama formulė magneto ašinio magnetinio lauko pasiskirstymui nustatyti palei magneto centrinę ašį yra:

$$B_z(z) = \frac{B_r}{\pi} \left(\tan^{-1} \left\{ \frac{ab}{2(z+l/2)[4(z+l/2)^2+a^2+b^2]^{1/2}} \right\} - \tan^{-1} \left\{ \frac{ab}{2(z-l/2)[4(z-l/2)^2+a^2+b^2]^{1/2}} \right\} \right) \quad (19)$$

čia a ir b atitinka magneto pločio ir aukščio matmenis, l – magneto ilgį, o B_r reiškia magnetinio srauto tankį, z yra atstumas nuo magneto centro išilgai jo pagrindinės ašies. Šiame darbe naudotas stačiakampio formos N42 (neodymium) neodimio magnetas su NiCuNi (nickel-copper-nickel) danga, apskaičiuotą $B_z(z)$ reikšmė kuria remtasi randant optinio izoliatoriaus Verdet konstantą.

2 Metodika

2.1 Medžiagų pasirinkimas

Kompaktinių optinių izoliatorių, ypač tų, kurie yra optimizuoti 785 nm ir 633 nm nuolatinės bangos lazeriams, projektavime reikia atsižvelgti į įvairias fizikines savybes ir sistemos reikalavimus, siekiant atitikti konkrečius veikimo kriterijus. Toliau šiame skyriuje aprašomi pagrindiniai aspektai, į kuriuos reikia atkreipti dėmesį projektuojant tokius izoliatorius.

Vienas iš svarbiausių kriterijų renkantis magneto-optinę medžiagą izoliatoriuje yra Verdet konstanta, kuri parodo, kaip efektyviai medžiaga pasuka poliarizacijos plokštumą esant magnetiniam laukui. Medžiagos su didelėmis Verdet konstantomis, kaip Terbio Galio Granatas (TGG) ir Terbio Skandžio Aliuminio Granatas (TSAG), yra pasirinktos dėl jų efektyvumo Faradėjaus rotacijoje [22].

Medžiagos optinis skaidrumas. Ji turėtų būti labai skaidri konkrečiuose bangos ilgiuose (785 nm ir 633 nm), norint užtikrinti mažesnius galios nuostolius ir kuo didesnę pralaidumą, kas yra būtina norint išlaikyti lazerio efektyvumą.

Kaina ir prieinamumas. Nors optinio izoliatoriaus veikimas yra esminis kriterijus, jo komponentų kaina ir prieinamumas taip pat atlieka svarbų vaidmenį. Lengvai prieinamos medžiagos ir mažesnė jų kaina padeda sumažinti įrenginio gamybos išlaidas, ypač didelio masto taikymuose. Neodimio N42 magnetai yra plačiai naudojami ir lengvai gaunami įvairių matmenų bei formų. Plačiausiai naudojama magneto-optinė medžiaga optinių izoliatorių gamyboje yra TGG kristalai. Rečiau naudojama yra TSAG kristalai, kurie yra dar ganėtinai nauji ir pasirinkimas daug mažesnis. Jų gamyba yra sudėtingesnė ir kaina didesnė nei minėtų TGG kristalų. Tačiau dėl puikių magneto-optinių savybių šie kristalai yra gera alternatyva. Dėl didesnės Verdet konstantos reikalingi kristalai yra mažesni, kas sumažina kainos skirtumą, o taip pat prisideda ir prie izoliatoriaus siekiamo kompaktiškumo.

Magnetinio lauko stiprumas. Vienodas magnetinis laukas užtikrina nuoseklią Faradėjaus rotatoriaus veiklą per visą apertūrą. Magnetinio lauko stiprumas tiesiogiai veikia Faradėjaus rotacijos kampą, stipresnis laukas gali kompensuoti trumpesnius optinių elementų ilgius, leidžiant sukurti kompaktiškesnius įrenginius. Magnetai turi būti parinkti pagal kristalų dydžius, kad būtų užtikrintas reikiamas lauko stiprumas ir vienodumas.

Geometrinis dizainas. Atsižvelgiama į naudojamų elementų matmenis, kad jie būtų pakankamai maži norint sutalpinti komponentus į lazerinę sistemą. Lazeriai į kuriuos norima integruoti optinį izoliatorių yra 18 mm aukščio, 30mm pločio ir 50 mm ilgio išorinių matmenų. Reikalinga pakankamai maža optinio izoliatoriaus konstrukcija įtalpinti jį į vidų, bei palikti užtektinai vietos papildomiems optikos komponentams ir elektronikai, naudojamiems lazerio viduje. Optinio izoliatoriaus aukščio ir pločio matmenys pagrinde yra ribojami naudojamo magneto, kurio dydis įtakoja jo kuriamo magnetinio lauko stiprį. Kristalo esančio magneto viduje įeities apertūros dydis įtakoja šviesos kiekį, kuris gali praeiti per izoliatorių. Būtina pasirinkti pakankamo dydžio optinį elementą, kad pro jį galėtų praeiti visas lazerio pluoštas. Kadangi naudojamų lazerių pluoštų diametrai yra iki 2mm, magnete esanti anga optiniam elementui yra maža ir neįtakoja magnetinio lauko stiprumo jo viduje. Todėl izoliatoriaus ilgis keičiasi priklausomai nuo reikiamo kristalo ilgio, kad gauti 45°

poliarizacijos rotaciją.

Visi matavimai buvo atlikti laboratorijos aplinkoje naudojant turimą eksperimentinę įrangą ir medžiagas.

Nuolatinės veikos lazeriai: buvo naudojami konkrečios 633 nm ir 785 nm bangos ilgio lazerinės sistemos naudojamos izoliatoriaus veiklos tyrimui.

633 nm lazerio tipinė galia – 70 mW, stabilumas (RMS, 8val.) - 0,03%, lazerio spindulio plotis (1/e²) iki 1,3 mm, aukštis (1/e²) iki 1,8 mm. Spindulio plotis ir aukštis matuojami 0,4 m atstumu nuo išėjimo apertūros.

785 nm lazerio tipinė galia – 130 mW, stabilumas (RMS, 8val.) - 0,02%, spindulio plotis (1/e²) iki 1,7 mm, aukštis (1/e²) iki 1,9 mm.

Optiniai komponentai: kaip įvesties ir išvesties poliarizatoriai buvo naudojami turimi poliariaciniai kubai atitinkamiems bangos ilgiams:

1. 3,2 mm matmenų poliarizacinis kubas iš H-ZF2 medžiagos su antirefleksine danga iš vių pusių. Pralaidumo sritis 450-680nm: Tp_avg>95%. Ekstinkcijos koeficientas >100:1.

2. 3,2 mm matmenų poliarizacinis kubas iš H-ZF1 medžiagos su antirefleksine danga iš vių pusių. Pralaidumo sritis 650-850nm: Tp_avg>95%. Ekstinkcijos koeficientas >100:1.

Kristalai:

Bandymuose naudoti TGG kristalai cilindro formos:

1. TGG 1,8 mm diametro x 4,5 mm ilgio
2. TGG 4,5 mm diametro x 4,5 mm ilgio
3. TGG 4,5 mm diametro x 8 mm ilgio

Bandymuose naudoti TSAG kristalai:

1. TSAG cilindro formos 3 mm diametro x 10 mm ilgio
2. TSAG stačiakampio formos 3 mm aukščio x 5 mm pločio x 5 mm ilgio
3. TSAG stačiakampio formos 3 mm aukščio x 10 mm pločio x 5 mm ilgio

TSAG kristalai naudoti galutinei optinio izoliatoriaus konstrukcijai cilindro formos:

4. TSAG 2 mm diametro x 10 mm ilgio
5. TSAG 2 mm diametro x 5 mm ilgio

Magnetai: turimi neodimio magnetai su anga cente pagal atitinkamo kristalo matmenis. Galutinei optinio izoliatoriaus konstrukcijai neodimio N42 magnetai 8 mm aukščio x 22 mm pločio x 10 mm ilgio matmenų su 2 mm diametro anga naudojamiems kristalams.

Matavimo priemonės:

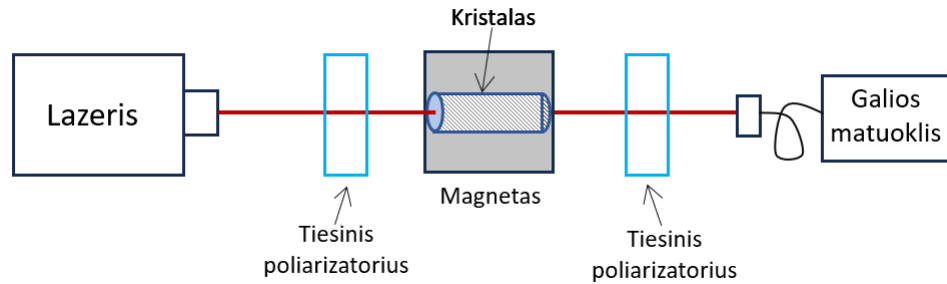
Galios matuoklis: išvesties galios matavimui, pralaidumo bei izoliacijos apskaičiavimui.

Schafter-Kirchoff poliarizacijos analizatorius: rotacijos kampų matavimui ir izoliatoriaus veikimo patvirtinimui.

2.2 Eksperimentinės schemos

Eksperimente buvo matuojami TGG ir TSAG kristalų Faradėjaus efekto stiprumai. Tiesiškai poliarizuotas šviesos šaltinis gaunamas iš 633 nm arba 785 nm bangos ilgio lazerio, kurio kolimuotas pluoštas buvo perduotas per fiksuotą poliarizacinį kubą. Neodimio magnetas buvo naudojamas

tam, kad būtų sudarytas pakankamai stiprus magnetinis laukas, leidžiantis matuoti Faradėjaus rotaciją. Kristalas buvo įmontuotas į magneto skylės centrą, nes ten magnetinio lauko stiprumas yra didžiausias.



4 pav. Verdet konstantos matavimo schema.

Magnetinio lauko stipris, veikiantis jame esantį kristalą apskaičiuotas pagal 19 formulę sumodeliuojant magnetinio lauko pasiskirstymą magneto ašimi, kuri veikia kristalą per jo ilgį. Lazero pluoštas, sklindanti iš kristalo, buvo perduotas per antrąjį poliarizacinį kubą, kuris buvo įmontuotas į indeksuojamą sukamąjį laikiklį ir nukreiptas į galios matuoklį. Galios matuoklis buvo padėtas kuo arčiau antrojo poliarizatoriaus išėjimo pusės.

Buvo gauti du matavimų rinkiniai, vienas su magneto buvimu sistemoje, ir kitas be jo. Kiekvienoje duomenų aibėje buvo registruojami vidutiniai galios matavimai, gaunami kas 2° pasukant antrojo poliarizatoriaus kampą. Kreivės svyruoja tokiu pačiu periodiškumu, tačiau jos yra pasislinkę viena kitos atžvilgiu fazės poslinkiu $\Delta\theta$. Fazės poslinkis tarp dviejų kreivių yra lygus Faradėjaus rotacijai. Pagal jį gali būti apskaičiuota Verdet konstanta.

Fazės poslinkis gali būti nustatomas po to, kai kiekviena duomenų kreivė yra aproksimuojama pagal Maluso dėsnį.

$$I = I_0 \cos^2(\varphi - \theta) \quad (20)$$

kuriame I_0 yra šviesos intensyvumas, o φ yra antrojo poliarizatoriaus perdavimo ašies kampas. Parametras θ yra atitinkamai θ_b duomenims gautiems be magneto ir θ_m su magnetu gautų duomenų aibei. Šių dviejų parametru skirtumas yra Faradėjaus rotacijos kampas $\Delta\theta$. Naudodamiesi šia Faradėjaus rotacijos reikšme, galima apskaičiuoti Verdet konstantą.

Aproksimacija gautiems duomenims be magneto:

$$I_b = I_0 \cos^2(\varphi - \theta_b) \quad (21)$$

Aproksimacija gautiems duomenims su magnetu:

$$I_m = I_0 \cos^2(\varphi - \theta_m) \quad (22)$$

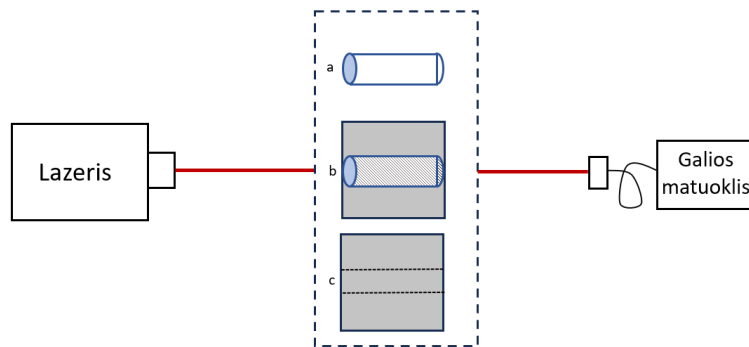
Faradėjaus rotacijos kampas:

$$\Delta\theta = (\theta_m - \theta_b) \quad (23)$$

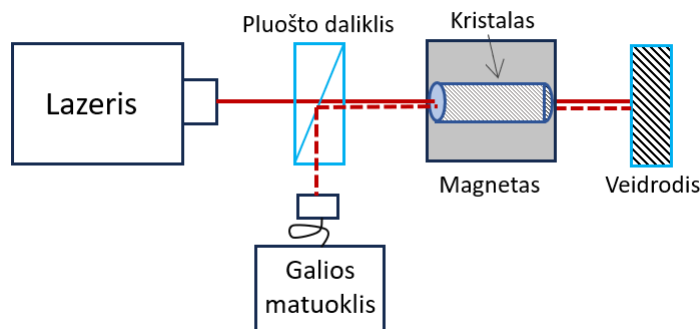
Verdet konstanta:

$$V = \frac{\Delta\theta}{BL} \quad (24)$$

Pralaidumas yra išvesties optinės galios ir įvesties optinės galios santykis, išreikštas procentais. Jis parodo, kiek šviesos praeina pro optinį izoliatorių be sugerties ar sklaidos. Izoliacija yra dydis parodantis, kaip efektyviai izoliatorius blokuoja atgal sklindančią šviesą lyginant su į priekį sklindančia šviesa. Jis matuojamas decibelais (dB).



5 pav. Optinio izoliatoriaus nuostolių matavimo schema. a - kristalas, b- kristalas magnetu, c - magnetas.



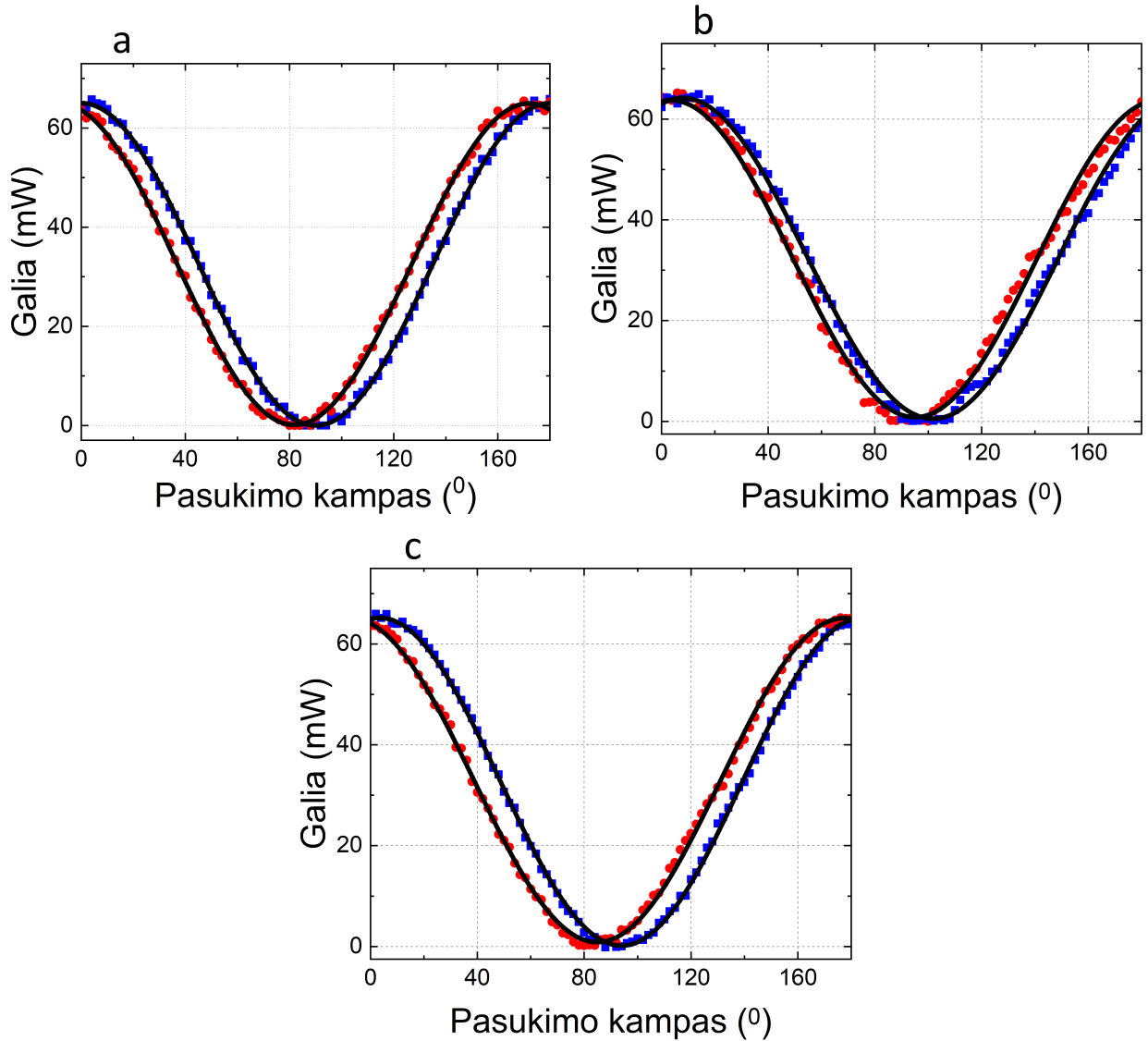
6 pav. Optinio izoliatoriaus izoliacijos matavimo schema.

Tiksliai apskaičiuoti pralaidumą ir izoliaciją yra įvertinami nuostoliai, galimi dėl optinio izoliatoriaus elementų apertūros, taip pat dėl kristalų sugerties bei optinių paviršių sugerties ir atspindžių. Matuojant nuostolius buvo palyginama galia praėjusi tik pro magneto angą (5 pav. c), galia praėjusi tik naudojant kristalą be magneto (5 pav. a) ir taip pat kai kristalas yra magneto viduje (5 pav. b). Iš šių matavimų buvo galima įvertinti optinio izoliatoriaus nuostolius bei jų kilmę. Izoliacijai apskaičiuoti buvo naudojama 6 pav. schema. Praėjęs pro optinį izoliatorių, lazerio spindulys buvo grąžinamas atgal su veidrodžiu. Antrą kartą pro izoliatorių praėjęs spindulys buvo nukreipiamas į galios matuoklį taip įvertinant grįžtantį signalą.

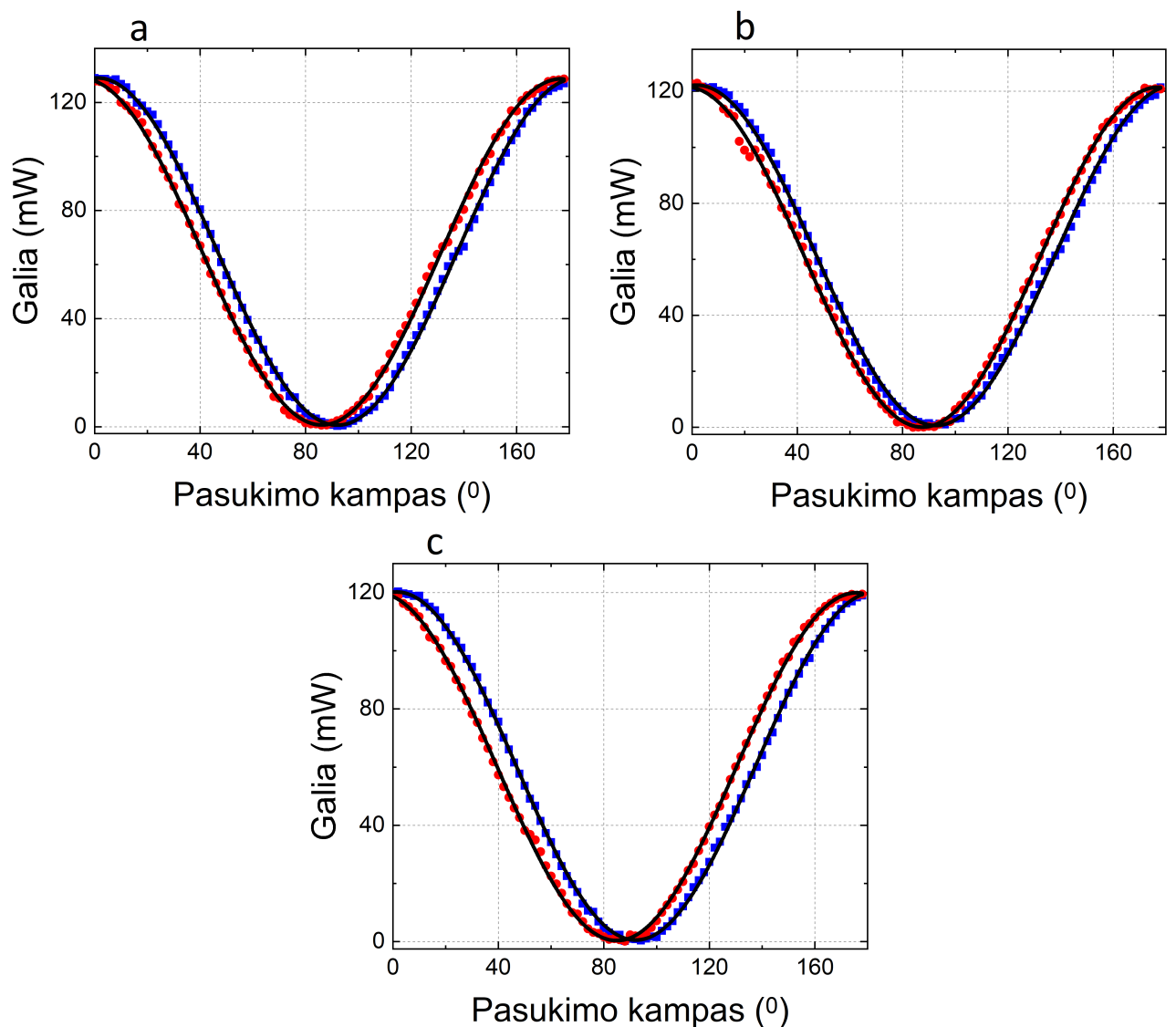
3 Tyrimo rezultatai ir jų aptarimas

3.1 Verdet konstantos nustatymas

Pirmiausia buvo atlikti matavimai pagal 4pav. apskaičiuoti Verdet konstantą. Gauti matavimų grafikai visiems kristalų bandiniams bei 633 nm ir 785 nm bangos ilgiams.



7 pav. Galios priklausomybė nuo poliarizatoriaus pasukimo kampo naudojant TGG kristalus 633 nm bangos ilgiui, a – 1.TGG, b – 2.TGG, c – 3.TGG. Raudoni apskritimai žymi matavimą be magneto, mėlyni kvadratai – su magnetu. Juoda linija – aproksimacija pagal Maluso dėsnį.

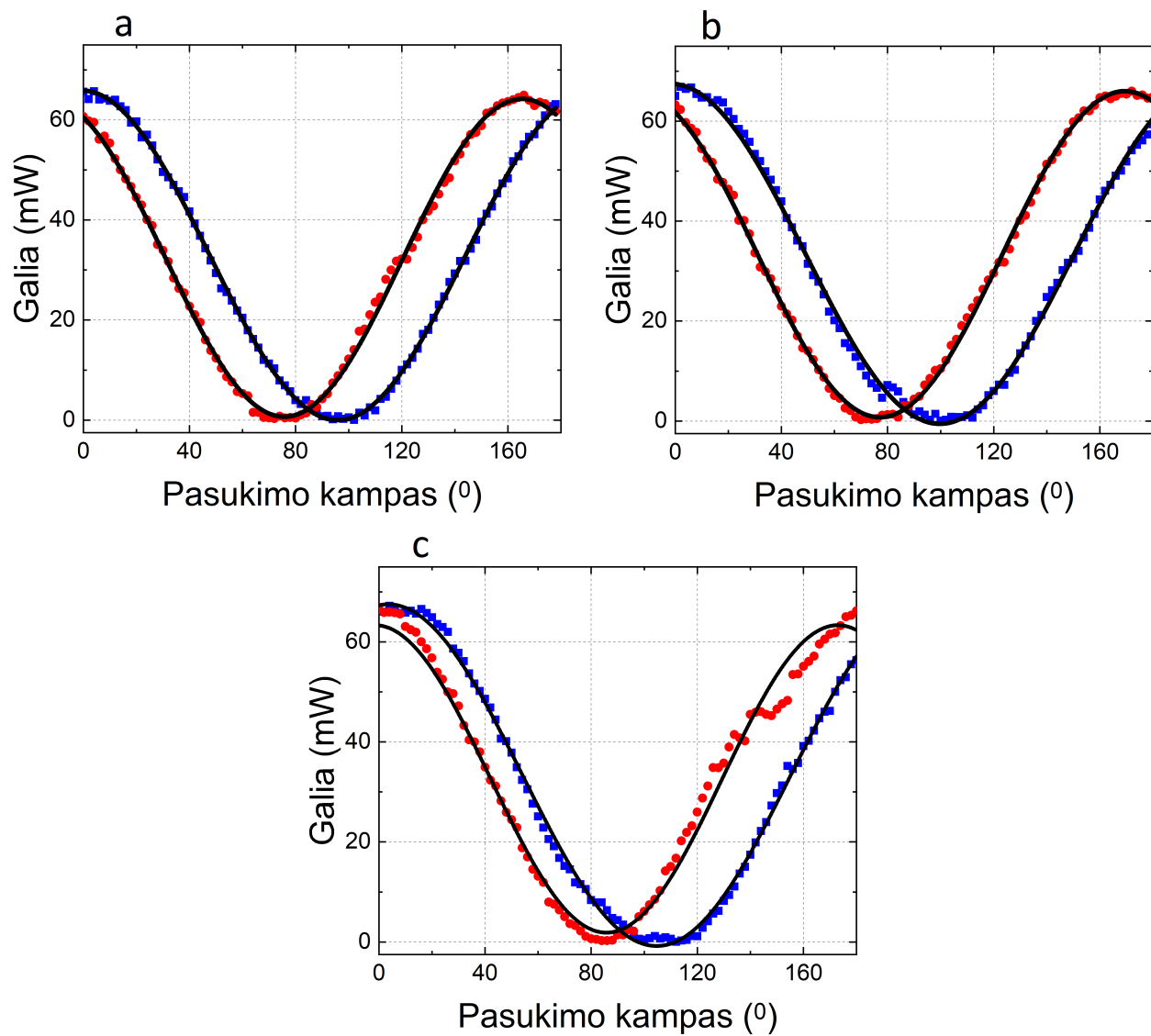


8 pav. Galios priklausomybė nuo poliarizatoriaus pasukimo kampo naudojant TGG kristalus 785 nm bangos ilgiui, a – 1.TGG, b – 2.TGG, c – 3.TGG. Raudoni apskritimai žymi matavimą be magneto, mėlyni kvadratai – su magnetu. Juoda linija – aproksimacija pagal Maluso dėsnį.

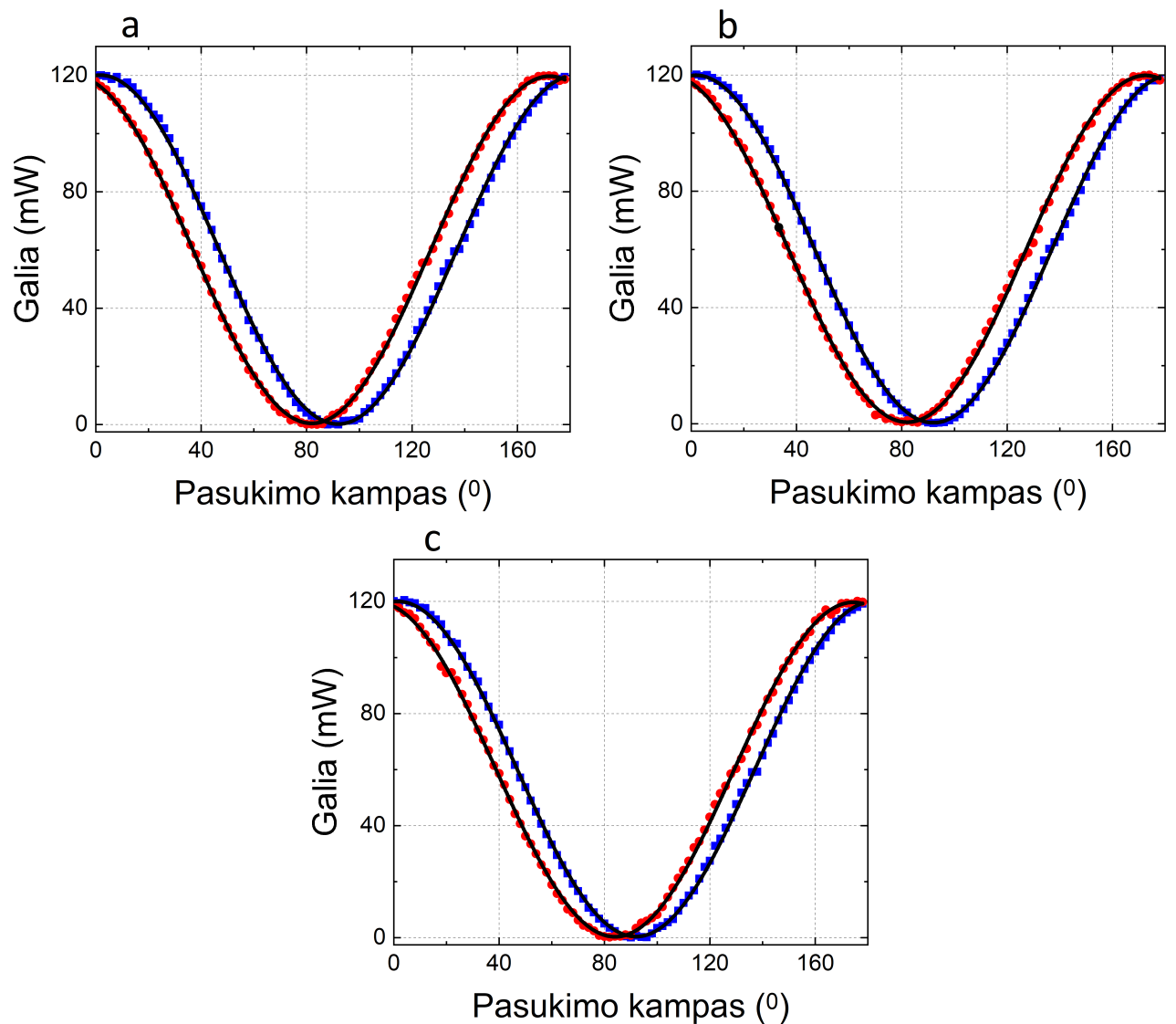
Apskaičiuotos TGG kristalų Verdet konstantos vertės 633 nm bangos ilgiui: a) $V = 42 \text{ rad}/(\text{T}\cdot\text{m})$; b) $V = 33 \text{ rad}/(\text{T}\cdot\text{m})$; c) $V = 59 \text{ rad}/(\text{T}\cdot\text{m})$.

Apskaičiuotos TGG kristalų Verdet konstantos vertės 785 nm bangos ilgiui: a) $V = 27 \text{ rad}/(\text{T}\cdot\text{m})$; b) $V = 22 \text{ rad}/(\text{T}\cdot\text{m})$; c) $V = 34 \text{ rad}/(\text{T}\cdot\text{m})$.

Gautos Verdet konstantų vertės yra gerokai per mažos pasiekti norimą Faradėjaus rotaciją su naudojamais komponentais ir yra mažesnės už kituose šaltiniuose pateikiamas eksperimentiškai gautas vertes [23–25](~140 rad/(T•m) esant 633 nm bangos ilgiui, ~92 rad/(T•m) esant 785 nm bangos ilgiui) net apie 3 - 5 kartus.



9 pav. Galios priklausomybė nuo polarizatoriaus pasukimo kampo naudojant TSAG kristalus 633 nm bangos ilgiui, a – 1.TSAG, b – 2.TSAG, c – 3.TSAG. Raudoni apskritimai žymi matavimą be magneto, mėlyni kvadratai – su magnetu. Juoda linija – aproksimacija pagal Maluso dėsnį.

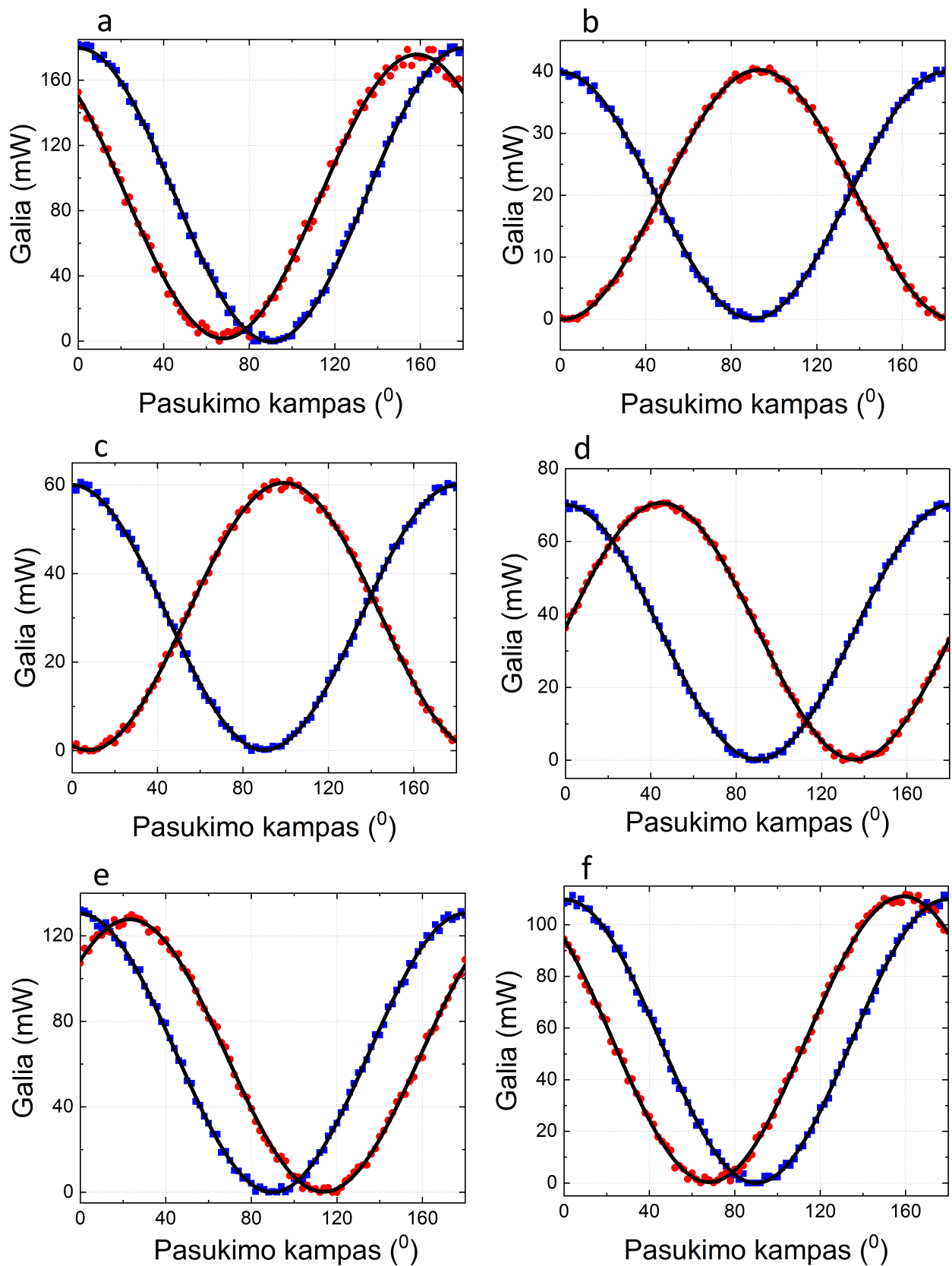


10 pav. Galios priklausomybė nuo poliarizatoriaus pasukimo kampo naudojant TSAG kristalus 785 nm bangos ilgiui, a – 1.TSAG, b – 2.TSAG, c – 3.TSAG. Raudoni apskritimai žymi matavimą be magneto, mėlyni kvadratai – su magnetu. Juoda linija – aproksimacija pagal Maluso dėsnį.

Apskaičiuotos TSAG kristalų Verdet konstantos vertės 633 nm bangos ilgiui: a) $V = 85 \text{ rad}/(\text{T}\cdot\text{m})$; b) $V = 93 \text{ rad}/(\text{T}\cdot\text{m})$; c) $V = 73 \text{ rad}/(\text{T}\cdot\text{m})$.

Apskaičiuotos TSAG kristalų Verdet konstantos vertės 785 nm bangos ilgiui: a) $V = 48 \text{ rad}/(\text{T}\cdot\text{m})$; b) $V = 51 \text{ rad}/(\text{T}\cdot\text{m})$; c) $V = 36 \text{ rad}/(\text{T}\cdot\text{m})$.

Gautos TSAG kristalų Verdet konstantų vertės yra taip pat gerokai per mažos pasiekti norimą Faradėjaus rotaciją su naudojamais elementais ir yra mažesnės už kituose šaltiniuose pateikiamas eksperimentiškai gautas vertes [25,26]($\sim 172 \text{ rad}/(\text{T}\cdot\text{m})$) esant 633 nm bangos ilgiui, $\sim 108 \text{ rad}/(\text{T}\cdot\text{m})$ esant 785 nm bangos ilgiui) apie 2 - 3 kartus.

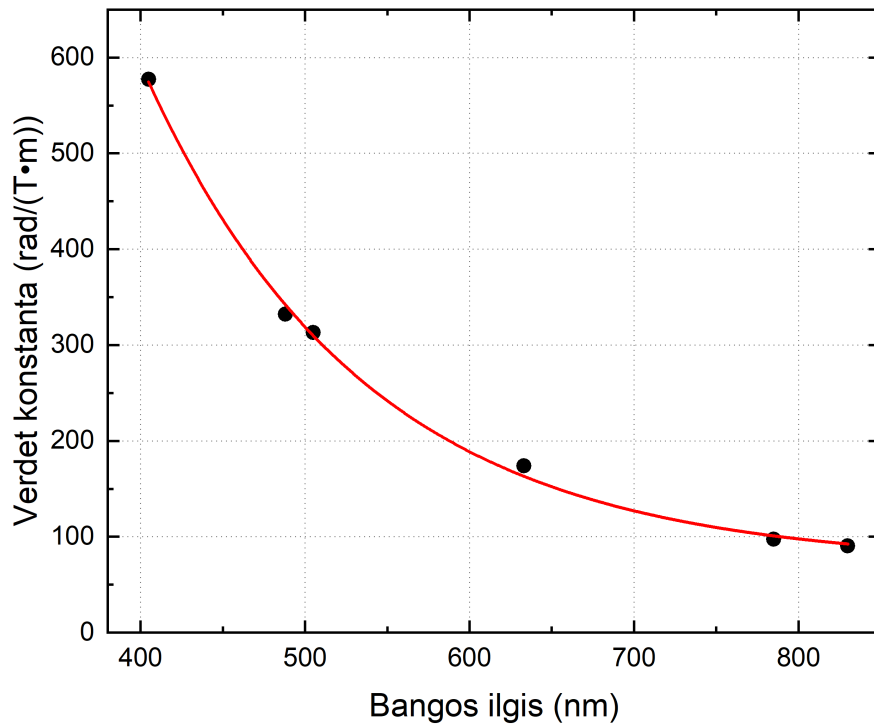


11 pav. Galios priklausomybė nuo poliarizatoriaus pasukimo kampo naudojant 4.TSAG kristalą, a – 405 nm, b – 488 nm, c – 505 nm, d – 633 nm, e – 785 nm, f – 830 nm bangos ilgiui. Raudoni apskritimai žymi matavimą be magneto, mėlyni kvadratai – su magnetu. Juoda linija – aproksimacija pagal Maluso dėsnį.

Apskaičiuotos Verdet konstantos vertės 4.TSAG kristalui naudotam optinio izoliatoriaus konst-

rukciijoje: d) 633 nm bangos ilgiui $V = 173 \text{ rad}/(\text{T}\cdot\text{m})$; e) 785 nm bangos ilgiui $V = 97 \text{ rad}/(\text{T}\cdot\text{m})$.

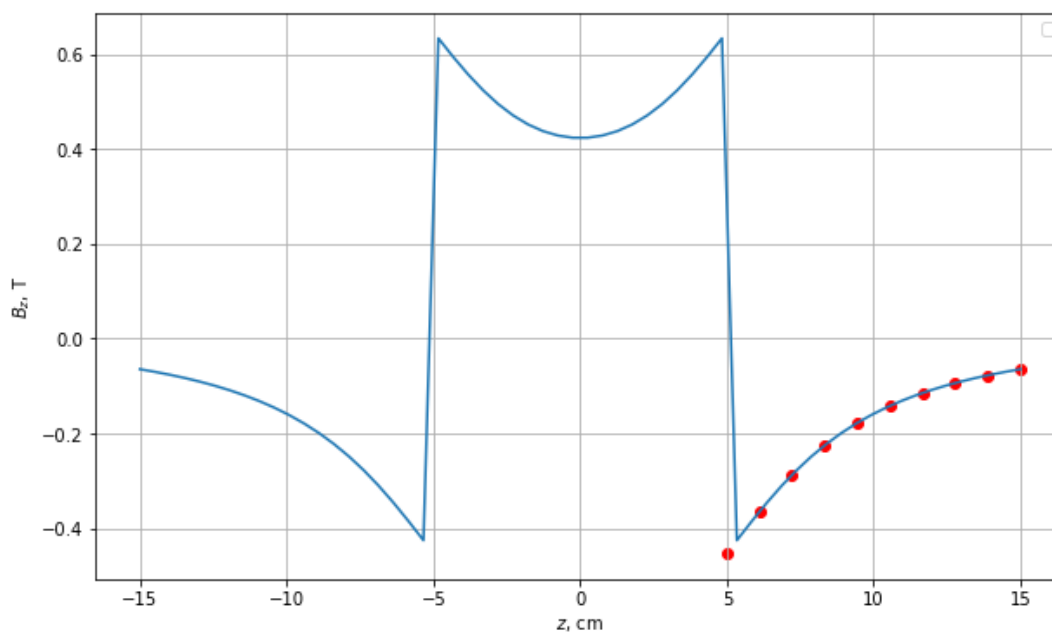
Gautos Verdet konstantų vertės artimai sutampa su kituose šaltiniuose pateikiamomis eksperimentiškai gautomis vertėmis (172 $\text{rad}/(\text{T}\cdot\text{m})$ esant 633 nm bangos ilgiui, 108 $\text{rad}/(\text{T}\cdot\text{m})$ esant 785 nm bangos ilgiui). Dėl tinkamų parametų šis kristalas buvo pasirinktas galutinei optinio izoliatoriaus konstrukcijai. Papildomai buvo pamatuota poliarizacijos kampo pasukimo priklausomybė nuo daugiau bangos ilgių (papildomai 405 nm 11 pav. a, 488 nm 11 pav. b, 505 nm 11 pav. c, 830 nm 11 pav. f), kad įvertinti Verdet konstantą platesniame bangos ilgių diapazone.



12 pav. Verdet konstantos priklausomybė nuo bangos ilgio 4.TSAG kristalui.

12 pav. gauta Verdet konstantos priklausomybė TSAG kristalui atitinka kitas eksperimentiškai gautas priklausomybes šiam kristalui [25, 26].

Grafike 13pav. pavaizduotas magnetinio lauko pasiskirstymas magneto z ašyje veikiantis magnetu patalpintą kristalą per jo ilgį. Gautas vidutinis magnetinio lauko stipris $B_z = 0.502\text{T}$. Grafike taip pat atidėti raudoni taškai kurie žymi išmatuotą magnetinio lauko stiprumą su magnetometru. Jie gauti naudojant magnetometrą ir fiksuojant jo rodomus duomenis 1cm intervalais nuo magneto. Magneto viduje esanti ertmė tėra 2 mm diametro, todėl išmatuoti magnetinį lauką viduje su magnetometru nebuvo galimybės. Tačiau esant tokiai mažai ertmei magneto viduje ji reikšmingai nekeičia bendro magnetinio lauko stiprio ir dėl to jos galime nepaisyti [21]. Todėl dėl puikiai atitinkančių matavimų ir modelio reikšmių magneto išorėje galime teigti, kad modelis tiksliai apskaičiuoja magnetinio lauko stiprį esantį išilgai z ašies magneto viduje.



13 pav. Magnetinio lauko stiprio pasiskirstymas neodimio N42 magnetui, $x = 0$ ašyje žymi magneto centrą, z yra atstumas nuo magneto centro išilgai jo pagrindinės ašies. Raudoni taškai žymi magnetometro matavimus.

Su šio magneto gautu magnetinio lauko stipriu ir naudojant 4.TSAG kristalą su žinoma Verdet konstantos verte galima įvertinti, kad reikalingas kristalo ilgis 633 nm bangos ilgiui bus 10 mm, o 785 nm bangos ilgiui 20 mm. Taigi gaunami Faradėjaus rotatoriaus matmenys yra 8 mm aukščio x 22 mm pločio x 10 mm ilgio 633 nm bangos ilgiui ir 20 mm ilgio atitinkamai 785 nm bangos ilgiui. Tokie gauti matmenys yra patenkinami, kad izoliatorių būtų galima integruoti į 18 mm aukščio, 30mm pločio ir 50 mm ilgio išorinių matmenų lazerio vidinę konstrukciją.

Pirmuose bandymuose naudotų kristalų ir magnetų konfigūracijos rezultatai buvo nepakankamai geri Faradėjaus izoliatoriaus gamybai. Gautos Verdet konstantų vertės buvo gerokai per mažos ir nesutiko su kituose straipsniuose gautomis eksperimentinėmis vertėmis. Galutinei konstrukcijai buvo pasirinktas naujas 4.TSAG kristalas, kurio gautos Verdet konstantos dydžiai gerai atitiko eksperimentines vertes ir buvo pakankami, norimų matmenų kompaktiško izoliatoriaus gamybai.

3.2 Pralaidumo ir izoliacijos matavimai

Atliekant matavimus kiekvienam kristalui buvo pasirinkti trys bandiniai siekiant gauti tikslius rezultatus. Kristalų pavadinimai atitinka (2.1) skyrelyje naudotą kristalų numeraciją.

Išmatuoti duomenys:

1 lentelė. Išmatuoti TGG kristalų pralaidumai ir izoliacija.

Kristalai	Bandinys	633 nm		785 nm	
		Pralaidumas, %	Izoliacija, dB	Pralaidumas, %	Izoliacija, dB
1.TGG	1	68.1	8.5	70	7.1
	2	68.7	8.6	68.6	7.6
	3	65.3	8.5	68.1	7.6
2.TGG	1	42.3	9.5	40.5	8.5
	2	52	9.4	53.2	7.5
	3	69.8	8.1	70	7.2
3.TGG	1	71.1	8.6	72.3	7.1
	2	50.6	9.1	52.2	8.2
	3	69.2	8.7	68	7.8

2 lentelė. Išmatuoti TSAG kristalų pralaidumai ir izoliacija.

Kristalai	Bandinys	633 nm		785 nm	
		Pralaidumas, %	Izoliacija, dB	Pralaidumas, %	Izoliacija, dB
1.TSAG	1	72.2	10	70	8.4
	2	76	11	77.2	8.8
	3	75.4	10.8	75.8	8.8
2.TSAG	1	75.2	10.2	77.3	9.8
	2	72.5	10.5	73.1	9
	3	74.1	10.7	77	9.7
3.TSAG	1	90	8.2	91	7.6
	2	85.1	8.1	88.1	7.1
	3	85.5	8.1	90.2	7
4.TSAG	1	98.4	39	97.6	36
	2	98.1	38	97.1	35
	3	97.7	36	97.2	36

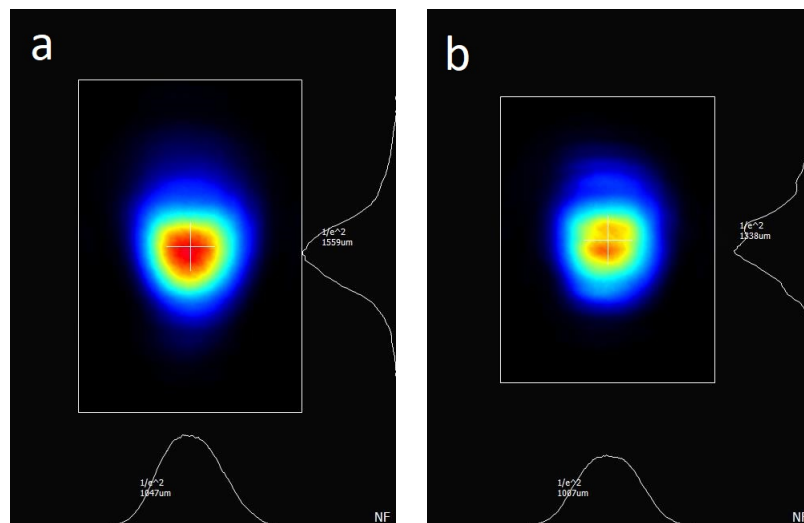
Bandymuose atliktuose su įvairiais kristalų bandiniais matuojant kristalų izoliaciją (6)pav. beveik visais atvejais gauta optinė izoliacija yra gerokai per maža (1), (2). Kaip aptarta prieš tai buvusiam (3.1) skyriuje dėl prastų kristalų 1-3.TGG ir 1-3TSAG Verdet konstantų gauta Faradėjaus rotacija yra nepakankama užtikrinti reikiamą poliarizacijos kampo sukimą. Todėl atgal grįžtanti šviesa yra nepilnai izoliuojama poliarizatorių ir dalis šviesos vis tiek yra praleidžiama atbuline kryptimi. Gavus pakankamą poliarizacijos plokštumos kampo posūkį - 45°, tipinė optinio izoliatoriaus izoliacija turėtų būti apie 34-40 dB.

Taip pat buvo išmatuoti kristalų optiniai pralaidumai 633 nm ir 785 nm bangos ilgiams pagal (5) schemą. TGG kristalai geriausiai atvejais siekė apie 69% pralaidumą, iš to seka dideli nuostoliai ir tokį optinį izoliatorių yra neefektyvu naudoti lazerio sistemoje. TSAG kristalų rezultatai buvo geresni ir jų pralaidumas vidutiniškai siekė apie 80%, jis yra patenkinamas norint gauti efektyvų optinį komponentą palyginus su komerciniais izoliatoriais, kurių pralaidumas yra apie 90%.

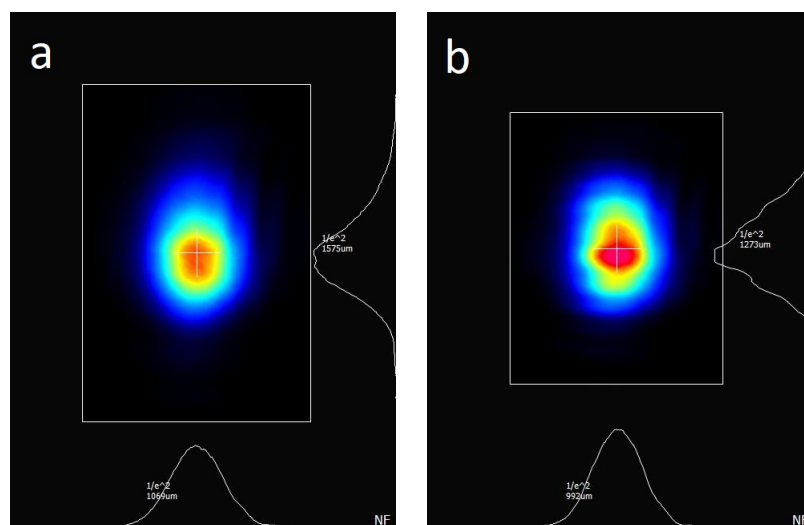
Tuo tarpu 4.TSAG kristalų rezultatai buvo labai geri. Matoma, kad galima pasiekti netgi labai didelį šių kristalų skaidrumą, kai jų pralaidumas abiem bangos ilgiams gali siekti net apie 97%. Šiuo atveju galios nuostoliai yra itin maži ir TSAG kristalai yra tikrai tinkami lazerio sistemai inte-

gruoto optinio izoliatoriaus gamybai. Taip pat gauta gera izoliacijos vertė, apie 36dB, kuri pasiekta dėl pakankamai didelės Verdet konstantos šiam kristalui dėl ko buvo užtikrinta optinė izoliacija ir antirefleksinės dangos kuria padengti kristalų paviršiai, dar labiau sumažinančios atsispindėjusios šviesos kiekį.

Tiksliai apskaičiuoti pralaidumą ir izoliaciją yra įvertinami nuostoliai, galimi dėl optinio izoliatoriaus elementų apertūros, taip pat dėl kristalų sugerties bei optinių paviršių surgeries ir atspindžių. Apytiksliai juos įvertinti 4.TSAG kristalams buvo naudoti 5.TSAG kristalai, kurie buvo identiški tik trumpesni. Lyginant pro magneto su kristalu (pro apertūra) praėjusios šviesos kiekį bei vien tik skirtingų ilgių kristalų nuostolius (5)pav. apytiksliai gauta kad, dėl apertūros patiriami nuostoliai siekia apie 1,3%, dėl antirefleksinės dangos patiriami nuostoliai yra apie 0,3%, o nuostoliai dėl kristalo sugeries siekia apie 0,8% 633 nm bangos ilgiui ir apie 1,6% 785 nm bangos ilgiui.



14 pav. 633 nm bangos ilgio lazerio pluoštas be izoliatoriaus (a) ir su izoliatoriumi (b) 40cm nuo išėjimo apertūros.



15 pav. 785 nm bangos ilgio lazerio pluoštas be izoliatoriaus (a) ir su izoliatoriumi (b) 40cm nuo išėjimo apertūros.

Papildomai buvo padaryta lazerių pluoštų nuotraukos (14), (15) be optinio izoliatoriaus ir esant

optiniam izoliatoriui. Matome, kad esant optiniam izoliatoriui gaunamas lazerio pluoštas yra šiek tiek siauresnis. Tačiau įvertinant nuostolių kiekį pagal (2) lentelę, kurie yra apie 2-3% galime teigti, kad pagrinde yra apribojamas lazerio pluošto fonas. Todėl bendra lazerio pluošto kokybė nesuprastėja ir izoliatorius naudojimui yra tinkamas.

Išvados

1. Bandymų metu buvo eksperimentiškai nustatytas turimų optinių elementų, TSAG ir TGG kristalų, poliarizacijos sukimo kampas ir pagal jį apskaičiuotos Verdet konstantos vertės.
2. Pagal eksperimentuose gautas vertes su naudojamais komponentų matmenimis yra įmanoma pasiekti pakankamai mažus optinio izoliatoriaus matmenis, kad jį būtų galima integruoti lazeryje (3.1).
3. Gautas optinio izoliatoriaus specifikacijos pralaidumas ir izoliacija su 4.TSAG kristalu yra geri ((2) lentelė) ir atitinka komerciškai prieinamų optinių izoliatorių specifikacijas.
4. Panaudojus TSAG kristalą pasižymintį didesne Verdet konstantos verte už dažniausiai naudojamus TGG kristalus, gautas mažesnių matmenų optinis izoliatorius, pralaidumo ir izoliacijos rodikliais nenusileidžiantis įprastai rinkoje siūlomiems izoliatoriams.

Literatūra

- [1] A. D. White, G. H. Ahn, K. V. Gasse, K. Y. Yang, L. Chang, J. E. Bowers, and J. Vučković, Integrated passive nonlinear optical isolators, *Nature Photonics*, 2023, **17**, 143–149.
- [2] D. Vojna, O. Slezák, A. Lucianetti, and T. Mocek, Verdet constant of magneto-active materials developed for high-power faraday devices, *Applied Sciences*, 2019, **9**, 3160.
- [3] K. Birch, A compact optical isolator, *Optics Communications*, 1982, **43**, 79–84.
- [4] T. Mizumoto, Y. Shoji, and R. Takei, Direct wafer bonding and its application to waveguide optical isolators, *Materials*, 2012, **5**, 985–1004.
- [5] D. K. Wilson, Faraday effect devices, optical isolators, *MRS Online Proceedings Library (OPL)*, 1998, **517**, 541.
- [6] T. H. Maiman *et al.*, Stimulated optical radiation in ruby, 1960.
- [7] L. Zhang, D. Hu, I. L. Snetkov, S. Balabanov, O. Palashov, and J. Li, A review on magneto-optical ceramics for faraday isolators., *Journal of Advanced Ceramics*, 2023, **12**.
- [8] J. Warner, Faraday optical isolator/gyrator design in planar dielectric waveguide form, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1973, **21**, 769–775.
- [9] J. Castera and G. Hepner, Isolator in integrated optics using faraday and cotton-mouton effects, *Applied Optics*, 1977, **16**, 2031–2033.
- [10] W. Demtröder, Laser spectroscopy: Basic concepts and instrumentation, *NASA STI/Recon Technical Report A*, 1981, **82**, 12273.
- [11] S. Winter, C. Mok, and A. Kumarakrishnan, Tools for laser spectroscopy: The design and construction of a faraday isolator, *Canadian journal of physics*, 2006, **84**, 845–855.
- [12] C. Zhang, *Integrated waveguide optical isolator*. PhD thesis, University of Glasgow, 2017.
- [13] A. Kruk and M. Mrózek, The measurement of faraday effect of translucent material in the entire visible spectrum, *Measurement*, 2020, **162**, 107912.
- [14] I. Snetkov and O. Palashov, Faraday isolator based on a tsag single crystal with compensation of thermally induced depolarization inside magnetic field, *Optical Materials*, 2015, **42**, 293–297.
- [15] “Thorlabs optical isolator tutorial.” https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=9017. Accessed: 2024-05-19.
- [16] T. R. Zaman, *Integrated optical isolators*. PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology, 2005.

- [17] A. Starobor, R. Yasuhara, I. Snetkov, E. Mironov, and O. Palashov, Tsag-based cryogenic faraday isolator, *Optical Materials*, 2015, **47**, 112–117.
- [18] R. Yasuhara, I. Snetkov, A. Starobor, E. Mironov, and O. Palashov, Faraday rotator based on tsag crystal with $\langle 001 \rangle$ orientation, *Optics Express*, 2016, **24**, 15486–15493.
- [19] I. Snetkov and J. Li, Selection of magneto-optical material for a faraday isolator operating in high-power laser radiation, *Magnetochemistry*, 2022, **8**, 168.
- [20] V. T. Nguyen, Magnetic field distribution of a conical permanent magnet with an application in magnetic resonance imaging, 2020.
- [21] L. Sun, S. Jiang, J. Zuegel, and J. Marciante, All-fiber optical isolator based on faraday rotation in highly terbium-doped fiber, *Optics letters*, 2010, **35**, 706–708.
- [22] E. Mironov and O. Palashov, Faraday isolator based on tsag crystal for high power lasers, *Optics Express*, 2014, **22**, 23226–23230.
- [23] Z. Chen, L. Zhu, J. Yi, and C. Yang, Fabrication and characterization of a gadolinium-doped terbium gallium garnet crystal with an enhanced verdet constant, *Optics Letters*, 2022, **47**, 2270–2273.
- [24] O. Slezak, R. Yasuhara, A. Lucianetti, and T. Mocek, Wavelength dependence of magneto-optic properties of terbium gallium garnet ceramics, *Optics Express*, 2015, **23**, 13641–13647.
- [25] R. Dou, H. Zhang, Q. Zhang, *et al.*, Growth and properties of tsag and tslag magneto-optical crystals with large size, *Optical Materials*, 2019, **96**, 109272.
- [26] D. Vojna, R. Yasuhara, O. Slezák, J. Mužík, A. Lucianetti, and T. Mocek, Verdet constant dispersion of cef3 in the visible and near-infrared spectral range, *Optical Engineering*, 2017, **56**, 067105–067105.

Compact optical isolators for 785 nm and 633 nm continuous wave lasers

Justinas Abrutis

Summary

Optical isolator is a crucial component in laser systems, primarily because it protects these systems from unwanted reflections. Reflections can lead to issues such as power instability, amplitude noise or even damage to sensitive optical components or the laser source itself. Optical isolator allows light to travel only in one direction from the laser source towards the optical system by blocking or redirecting light that attempts to travel in the opposite direction. This functionality is essential to maintain the integrity and performance of the laser system.

In small laser systems, there is a need to reduce the size of their components, including the optical isolator. This need arises not only from the requirement for a uniform size but also due to the demands for system integration, compactness, and convenience. Traditional optical isolators are often larger due to easier construction using bigger magneto-optical crystals and magnets, posing challenges when creating integrated and compact isolators. Compact optical isolators must meet several criteria, including high isolation, which minimizes the risk of back reflections affecting the laser source, high transmission, which ensures minimal absorption or scattering losses and cost-effectiveness, which is crucial in a market with many optical isolator options.

The goals of this study include designing and experimentally testing compact optical isolators optimized for continuous wave lasers at 633 nm and 785 nm wavelengths. The evaluation will involve various magneto-optical materials suitable for these wavelengths, with a particular focus on the Verdet constant. This study also aims to create an optimized geometric design for the optical path and other components to ensure high performance while maintaining compactness, and to test the designed isolator to measure its transmission, isolation, and Verdet constant.

The Faraday effect, a fundamental principle in many optical isolators, describes how the polarization plane of a linearly polarized light beam rotates as it passes through a material influenced by a magnetic field parallel to the light propagation direction. A unique aspect of the Faraday effect is its independence from the direction of light travel. This means that if light travels back through the same material in the opposite direction, the polarization plane rotates in the same direction, effectively doubling the rotation angle compared to the initial light beam. This rotation is defined by the Verdet constant values, which are material-dependent. This behavior contrasts with optically active materials, such as crystalline quartz or sugar solutions, where the polarization rotation depends on the light's direction of travel.

The experiment measured the strength of the Faraday effect in TGG (Terbium Gallium Garnet) and TSAG (Terbium Scandium Aluminum Garnet) crystals. Linearly polarized light was obtained from a laser with a wavelength of either 633 nm or 785 nm, and its collimated beam was transmitted through a fixed polarization cube. A neodymium magnet created a sufficiently strong magnetic field, allowing the measurement of Faraday rotation. Comparing measured Verdet constants of all used crystals, those with best results were selected for optical isolator construction.

Transmission of the selected crystals for optical isolator was also measured, which is the ratio of output optical power to input optical power, expressed as a percentage. It indicates how much light passes through the optical isolator without absorption or scattering. The experimental setup involved measuring losses by comparing power passed only through the magnet aperture, through the crystal without the magnet, and through the crystal inside the magnet. These measurements allowed the assessment of optical isolator losses and their origins. Other important optical isolator parameter is isolation which was also experimentally tested. Isolation shows how effectively the isolator blocks backward-traveling light compared to forward-traveling light and is measured in decibels (dB). To calculate isolation, the setup included returning the laser beam through the isolator with a mirror and directing the beam that passed through the isolator a second time into a power meter to evaluate the returning signal.

After all experiments it was concluded that selected magneto-optical material was suitable and optical isolator setup met the parameters and was compact enough for integrating it into 633 nm and 785 nm wavelength lasers.

Kompaktiški optiniai izoliatoriai 785 nm ir 633 nm nuolatinės veikos lazeriams

Justinas Abrutis

Santrauka

Optinis izoliatorius yra esminis lazerinių sistemų komponentas, visų pirma todėl, kad jis apsaugo šias sistemas nuo nepageidaujamų atspindžių. Atspindžiai gali sukelti problemų, tokių kaip galios nestabilumas, amplitudės triukšmai ar net pažeisti jautrius optinius komponentus arba patį lazerio šaltinį. Optinis izoliatorius leidžia šviesai judėti tik viena kryptimi nuo lazerio šaltinio link optinės sistemos blokuodamas arba nukreipdamas šviesą, kuri bando sklusti priešinga kryptimi. Ši funkcija yra būtina norint išlaikyti lazerinės sistemos vientisumą ir veikimą.

Šio tyrimo tikslai apima kompaktiškų optinių izoliatorių, pritaikytų nuolatinės veikos 633 nm ir 785 nm bangos ilgio lazeriams, sukūrimą ir eksperimentinį išbandymą. Rinkoje siūlomi optiniai izoliatoriai yra per dideli integruoti į šiuos lazerius taigi, pagrindinis iššūkis yra gauti kuo mažesnių matmenų optinį izoliatorių, išlaikant konkurencingus izoliacijos ir pralaidumo parametrus. Šiuo tikslu buvo išbandyti įvairūs kristalai tinkantys optinio izoliatoriaus gamyboje, ypatingą dėmesį skiriant Verdet konstantai.

Faradėjaus efektas, pagrindinis daugelio optinių izoliatorių principas, apibūdina, kaip tiesiškai poliarizuoto šviesos pluošto poliarizacijos plokštuma sukasi, kai ji praeina pro medžiagą, kurią veikia magnetinis laukas, lygiagretus šviesos sklidimo kryptčiai. Unikalus Faradėjaus efekto aspektas yra tai, kad jis nepriklauso nuo šviesos sklidimo kryptties. Tai reiškia, kad jei šviesa grįžta per tą pačią medžiagą priešinga krypttimi, poliarizacijos plokštuma sukasi ta pačia krypttimi, efektyviai padvigubindama sukimosi kampą, palyginti su pradiniu šviesos pluoštu. Šis sukimasis apibrėžiamas Verdet konstantos vertėmis, kurios priklauso nuo medžiagos. Šis elgesys skiriasi nuo optiškai aktyvių medžiagų, tokių kaip kristalinis kvarcas ar cukraus tirpalai, kur poliarizacijos sukimasis priklauso nuo šviesos judėjimo kryptties.

Eksperimentų metu buvo matuojamas Faradėjaus efekto stiprumas TGG (Terbio Galio Granato) ir TSAG (Terbio Skandžio Aliuminio Granato) kristaluose. Iš 633 nm ir 785 nm lazerių, kolimuotas spindulys buvo perduodamas per fiksuotą poliarizacijos kubą gaunant tiesiškai poliarizuotą šviesą. Tuomet per kristalą, esantį magneto viduje, praėjusi šviesa pasukdavo kampą, pagal kurį buvo galima apskaičiuoti Verdet konstantą. Lyginant išmatuotas visų panaudotų kristalų Verdet konstantas, optinio izoliatoriaus konstrukcijai buvo pasirinkti tie, kurių rezultatai buvo geriausi.

Taip pat buvo išmatuota pasirinktų kristalų pralaidumas, kuris rodo, kiek šviesos praeina per optinį izoliatorių be sugerties ar sklaidos, išreikštas procentais. Matavimai lyginant praėjusią galią tik per magneto apertūrą, per kristalą be magneto ir per magneto viduje esantį kristalą leido įvertinti optinio izoliatoriaus nuostolius ir jų kilmę. Kitas svarbus optinio izoliatoriaus parametras yra izoliacija, kuri taip pat buvo eksperimentiškai patikrinta. Izoliacija rodo, kaip efektyviai izoliatorius blokuoja atgal grįžtančią šviesą, palyginti su į priekį sklindančia šviesa, ir yra matuojama decibelais (dB). Per optinį izoliatorių praėjęs lazerio spindulys buvo gražinimas su veidrodžiu atgal ir nukreipiamas į galios matuoklį, įvertinant grįžtančio signalo slopinimą.

Atlikus visus eksperimentus buvo padaryta išvada, kad pasirinkta TSAG magneto-optinė medžiaga buvo tinkama, o optinis izoliatorius atitiko parametrus ir buvo pakankamai kompaktiškas, kad jį būtų galima integruoti į 633 nm ir 785 nm bangos ilgio lazerius.