

Vilniaus universiteto
Fizikos fakulteto
Lazerinių tyrimų centras

Darius Šilinskis

**SUGERTIES NUOSTOLIŲ TYRIMAS OPTINĖSE DANGOSE, PANAUDOJANT
FOTOTERMINĖS INTERFEROMETRIJOS METODĄ**

Magistro baigiamasis darbas

Lazerinė technologija
studijų programa

Studentas

Darius Šilinskis

Darbo vadovas

dr. Andrius Melninkaitis

Centro direktorius

prof. Aidas Matijošius

Vilnius 2022

Turinys

1. Įvadas.....	3
2. Literatūros apžvalga	5
2.1. Sugerties nuostoliai optiniuose elementuose	5
2.2. Optinis medžiagos atsakas į šilumos poveikį	7
2.2.1. Šilumos laidumo lygtis	7
2.2.2. Terminis lęšis.....	9
2.2.3. Termo-fotoelastiniai reiškiniai	11
2.2.4. Fotorefrakcija.....	14
2.3. Sugerties nuostolių matavimo metodai.....	15
2.3.1. Spektrofotometrija	15
2.3.2. Lazerinė kalorimetrija.....	16
2.3.3. Terminio lęšio spektrometrija.....	17
2.3.4. Fototerminė interferometrija.....	18
3. Eksperimento metodika.....	22
3.1. Bandiniai ir jų paruošimas	22
3.2. Eksperimento schema	23
3.2.1. Pralaidumo režimas	23
3.2.2. Atspindžio režimas	24
4. Pagrindiniai rezultatai ir jų aptarimas	25
4.1. Atvaizdo modulio suderinimas	25
4.2. Sistemos kalibravimas	25
4.3. Homogeniškumo tyrimas	27
4.4. Medžiagų atsako koeficientų R tyrimas.....	28
4.4.1. Netiesinio atsako tyrimas	32
5. Pagrindiniai rezultatai ir išvados.....	34
6. Literatūros sąrašas	35
Santrauka	38
Summary	39

1. Įvadas

Gaminant vis galingesnius lazerius, kurių vidutinė optinės spinduliuotės galia siekia keletą ar net kelias dešimtis kilovatų, lazerinėje sistemoje naudojami optiniai elementai gali keisti savo optines savybes dėl išsiskiriančios perteklinės šilumos poveikio. Taigi, tokiose sistemose naudojami elementai turi pasižymėti itin mažais sugerties nuostoliais. Nuostoliai dėl sugerties paprastai pasireiškia ženkliau elemento kaitimu ir net kelių milijono dalių (nuo bendros kritusios spinduliuotės galios) sugertis gali pasireikšti terminiu lęšiu, pluošto fronto iškraipymais [1], o visa tai paveikti lazerinės sistemos, kurioje yra elementai, veikimą. Taigi, norint pagaminti kilovatinėms sistemoms skirtus optinius elementus, iškyla poreikis optimizuoti elementų gamybos technologijas mažiems nuostoliams, o tai reiškia, kad būtina turėti galimybę tokius nuostolius patikimai apibūdinti.

Sugerties nuostolių matavimai gali būti atliekami įvairiais metodais, vienas iš plačiausiai naudojamų yra spektrofotometrija. Tai sąlyginai paprastas matavimo metodas, kuriuo tam tikru tikslumu galima įvertinti bandinių sugertį, kuri siekia kelias dešimtąsias procento dalis. Norint įvertinti mažesnius sugerties nuostolius reikia tikslesnių metodų - pvz. gali būti naudojama lazerinė kalorimetrija [3]. Tačiau, šiuo atveju, bandinys turi būti priglaustas prie temperatūros sensoriaus, kurio pozicija turi lemiamos įtakos metodo tikslumui. Norint išvengti aplinkos poveikio, matavimai gali būti atliekami vakuuminėje kameroje. Vis dėl to kalorimetrinis metodas turi savo trūkumų - matavimai trunka santykinai ilgai, nes reikia palyginus ilgos ekspozicijos (sulaukti kol bandinys įkais ir atvės), kas komplikuoja kalorimetrinio metodo platesnį pritaikymą. Dar viena alternatyva – terminio lęšio spektrometrija, kuri yra paprastesnis metodas matuoti mažą bandinių sugertį [4]. Matavimai atliekami bandinį periodiškai žadinant lazerine spinduliuote, tokiu būdu sukeliant terminį lęšį, kuris paveikia zonduojančios spinduliuotės sklaidimo kryptį ir tuo pačiu moduliuoja pro apertūrą praėjusios spinduliuotės intensyvumą. Patobulinta šio metodo versija – fototerminė bendrojo kelio interferometrija, taip pat pagrįsta žadinimo-zondavimo principu, tačiau detektuojamas signalas yra proporcingas zonduojančios spinduliuotės dalinei interferencijai. Šis metodas pasižymi itin dideliu jautrumu ir galimybe pamatuoti kelių milijardo dalių sugerties nuostolius [2].

Metodas, leidžiantis tiksliai įvertinti optinių elementų paviršiaus sugerties nuostolius atveria galimybes šių elementų tobulinimui, o tuo pačiu ir galingų lazerinių sistemų vystymui. Optinių elementų, kurių pagrindikai pagaminti iš skirtingų medžiagų, fototerminis atsakas skiriasi [5], todėl norint kuo tiksliau įvertinti tokių elementų paviršiaus sugerties nuostolius fototerminės interferometrijos metodu, reikia turėti ir specialius kalibracinius bandinius, pagamintus iš atitinkamos medžiagos. Būtent šis poreikis ir lėmė šio **darbo tikslą**:

ištirti fototerminio atsako funkcijas populiariausiose skaidriose optinėse terpėse ir nustatyti jų galimą ryšį su tiriamų medžiagų termofizikiniais parametrais.

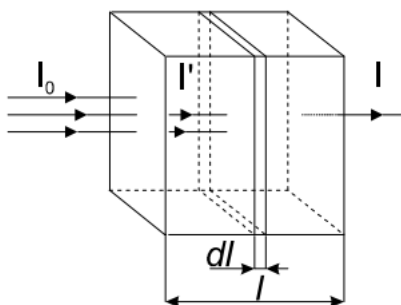
Darbo uždaviniai:

1. organizuoti eksperimentinių kalibracinių bandinių paruošimą;
2. įsisavinti fototerminės interferometrijos metodą, apžvelgiant su šiuo metodu susijusią literatūrą;
3. eksperimentiškai ištirti įvairių eksperimentinių kalibracinių bandinių atsako funkcijas vienam bangos ilgiui tiek atspindžio, tiek ir pralaidumo režimuose;
4. atlikti atvejo studiją: panaudojant ankstesniame darbo etape nustatytą medžiagos atsako funkciją ištirti paviršiaus sugerties nuostolius, jų homogeniškumą bei netiesinį atsaką skaidrinančia danga padengtam LBO kristalui.

2. Literatūros apžvalga

2.1. Sugerties nuostoliai optiniuose elementuose

Sugertis optiniuose elementuose pasireiškia elemento paviršiuje, popaviršiniame sluoksnyje bei tūryje [17]. Sugertį tūryje aprašo Bugerio-Lamberto-Bero dėsnis. Į bandinį kritusi intensyvumo I_0 spinduliuotė bandinyje yra sugerama, todėl išėjime stebima susilpnėjusi spinduliuotė I (2.1 pav.). Intensyvumo susilpnėjimas, vykstantis dėl sugerties, priklauso nuo tūryje esančių dalelių koncentracijos bei šviesos nueito kelio. Bandinyje išskyrus ploną sluoksnį dl , kai sugeriančių dalelių koncentracija yra n , o jų sugerties skerspjūvis σ , sklindančios šviesos intensyvumo pokytis dI lygus išraiškai (2.1). Išreiškus dI/I_0 ir suintegravus per visą bandinio ilgį (2.2), galima išreikšti pro bandinį praėjusios spinduliuotės intensyvumą. Kai bandinys yra vienalytis, sugerties skerspjūvio σ ir koncentracijos n sandauga išreiškiama sugerties koeficientu α , o intensyvumas praėjus l storio bandinį išreiškiamas (2.3). Optinių dangų dizaino bei gamybos atveju medžiagų sugerties įtakai įvertinti naudojamas ekstinkcijos koeficientas κ , kuris su sugerties koeficientu α siejasi sąryšiu (2.4).



2.1 pav. Schema Bugerio-Lamberto-Bero dėsnio išvedimui [12].

$$dI = -I_0 \times \sigma \times n \times dl \quad (2.1)$$

$$\ln\left(\frac{I}{I_0}\right) = -\sigma \times n \times l \quad (2.2)$$

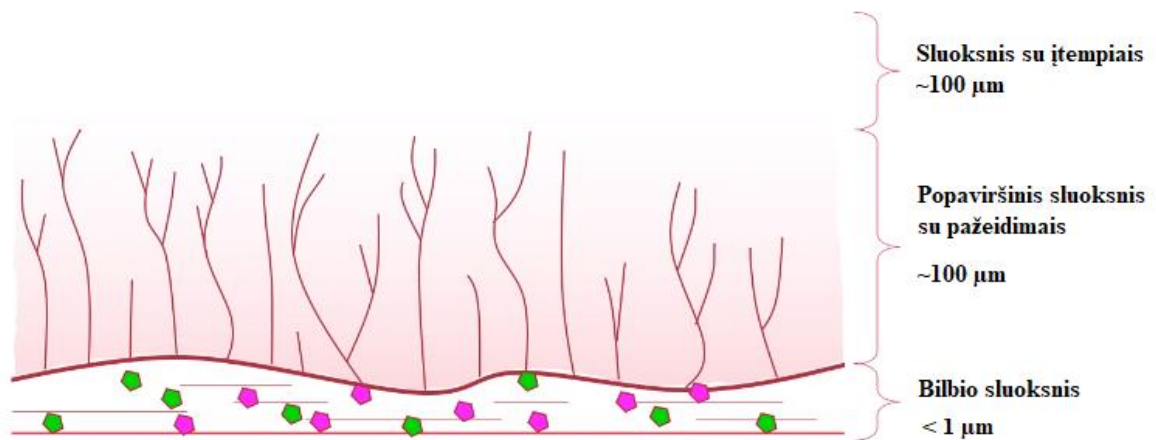
$$I = I_0 \times e^{-\alpha \times l} \quad (2.3)$$

$$\alpha = \frac{4 \times \pi \times \kappa}{\lambda} \quad (2.4)$$

Optinių elementų atveju, pagrindukai, ant kurių formuojamos dangos, yra gaminami iš medžiagų su žinomomis optinėmis, mechaninėmis savybėmis, taigi tokių pagrindukų tūrinė sugertis gali būti gan tiksliai apibrėžiama. Tačiau didžiausias neapibrėžtumas dėl sugerties pasireiškia optinių elementų paviršiuje bei popaviršiniame sluoksnyje.

Optinių elementų paviršius, kai kalbama apie funkcinius optinius elementus, tai - ant pagrindu suformuotos dangos. Jos būna nuo kelių šimtų nanometrų iki keliasdešimties mikrometrų. Dangų formavimui parenkamos tokios medžiagos, kurios būtų skaidrios optinio komponento naudojimo srityje, tačiau dėl dangų formavimo proceso netobulumo, dangose gali pasireikšti sugertis. Dangas formuojant iš oksidinių medžiagų, nepakankamas oksidacijos laipsnis gali lemti sugerties centrų atsiradimą [17]. Taip pat sugerties nuostoliai priklauso ir nuo sluoksnių formavimui naudojamos technologijos ir jos parametrų. Technologijos, kuriose sluoksniai formuojami dalelėmis įgyjant mažą energiją (pavyzdžiui terminio garinimo metu), susidaro porėtos dangos, kurios gali sugerti vandens molekules ir tokiu būdu padidinti paviršiaus sugertį [18].

Optinio elemento popaviršinis sluoksnis – tai iki keliasdešimties mikrometrų sritis, kuri yra paveikiama poliravimo metu [17]. Poveikis pasireiškia paviršiaus mikroįtrūkimais [19], į kuriuos patenka poliravimo medžiaga (2.2 pav.), kuri net ir pagrindu plovimo prieš dangų formavimą metu nėra pilnai pašalinama. To rezultatas – nepageidaujami spinduliuotės sugerties nuostoliai, kurie gali siekti 5-30 ppm [17].



2.2 pav. Stiklo popaviršinio sluoksnio mikrostruktūra po šlifavimo ir poliravimo žingsnių [20].

2.2. Optinis medžiagos atsakas į šilumos poveikį

2.2.1. Šilumos laidumo lygtis

Optiniai elementai, kuriuose pasireiškia spinduliuotės sugertis, patiria šilumos poveikį. Lazerinės spinduliuotės sugertis atitinka šilumos šaltinio atsiradimą kietojo kūno viduje arba paviršiuje. Medžiagos reakciją į tokio šilumos šaltinio poveikį galima nustatyti sprendžiant trimatę šilumos laidumo lygtį (2.5) [14].

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial T}{\partial z} \right) + A(x, y, z, t) \quad (2.5)$$

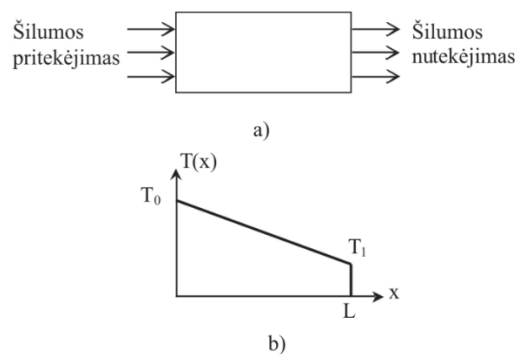
Sprendinio vertė priklauso nuo termofizikinių konstantų:

ρ – tankis;

C - santykinė šiluminė talpa;

K - šiluminio laidumo koeficientas;

Tarkime yra tam tikro ploto A ir ilgio L medžiagos blokas (2.3 (a) pav.), o prie vieno iš galų yra šilumos šaltinis. Šiluma yra pernešama per medžiagos bloką ir išsiskiria kitame gale. Kai yra pusiausvyra, įvadinis šiluminis srautas yra lygus išvadiniam šiluminiam srautui, tačiau temperatūra medžiagos tūryje kyla dėl šilumos pernešimo. Nusistovėjęs temperatūros pasiskirstymas pavaizduotas 2.3 (b) paveiksle. Išraiška (2.6) aprašo įvadinės galios $\frac{dQ}{dt}$ sąryšį su pusiausvirine temperatūra per tam tikro ploto ir ilgio medžiagos bloką, kai žinomas šios medžiagos šiluminio laidumo koeficientas K . Taigi šiluminio laidumo koeficientas K nusako maksimalią pusiausvyros temperatūrą, atitinkančią įvadinę galią $\frac{dQ}{dt}$ [14]. Medžiagose, pasižyminčiose mažu K esant tam tikrai įvadinei galiai, temperatūra yra aukštesnė nei medžiagose, kurių K yra didesnis.



2.3 pav. Šilumos laidumas A skerspjūvio ploto ir L ilgio medžiagos bloke [14].

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{K \times A \times (T_0 - T_1)}{L} \quad (2.6)$$

Šiluminė talpa C pasireiškia medžiagos gebėjimu kaupti šilumą, pritekančia iš išorinio šaltinio, kol nėra pasiekta pusiausvyros būseną. Esant masės m medžiagai, joje sukaupta energija temperatūrai padidėjus per ΔT yra išreiškiama (2.7). Suintegravus šią išraišką per visą bandinį, galima apskaičiuoti perteklinės šilumos, sukauptos medžiagoje, kiekį.

$$\Delta E = C \times m \times \Delta T \quad (2.7)$$

Taigi, konstantos C ir K nusako šiluminės pusiausvyros nusistovėjimo greitį staiga įjungus šilumos šaltinį. Šias konstantas, konkrečiai tankio ρ medžiagai, galima išreikšti per temperatūrinio laidumo koeficientą κ (2.8). Žinant κ , galima įvertinti gylį, į kurį prasiskverbia šiluminė banga per tam tikrą laiką t (2.9).

$$\kappa = \frac{K}{\rho \times C} \quad (2.8)$$

$$x = \sqrt{\kappa \times t} \quad (2.9)$$

2.1 lentelė. Įvairių optinių medžiagų termofizikiniai parametrai [6, 7, 8, 9, 10, 11, 13, 14].

Medžiaga	Tankis ρ , g/cm ³	Šiluminio laidumo koeficientas K , W/(cm×K)	Santykinė šiluminė talpa C , J/(g×K)	Temperatūrinio laidumo koeficientas κ , cm ² /s
Lydytas kvarcas (Corning 7980)	2,2	0,0138	0,77	0,0075
Borosilikatinis stiklas (N-BK7)	2,51	0,01114	0,858	0,0052
CaF ₂	3,18	0,0971	0,854	0,0358
YAG	4,56	0,14	0,59	0,052
Kristalinis kvarcas	2,65	0,113 (∥c) 0,066 (⊥c)	0,71	0,06 (∥c) 0,0351 (⊥c)
β-BBO	3,85	0,016 (∥c) 0,012 (⊥c)	0,496	0,0084 (∥c) 0,0063 (⊥c)
LBO	2,47	0,035 (vidurkis)	1,06	0,0134

Įvairių optinių medžiagų šiluminiai parametrai pateikti 2.1 lentelėje. Dvejetainiams kristalams šiluminiai medžiagos parametrai priklauso nuo kristalo orientacijos tarp optinės ašies c ir šilumos šaltinio [7]. Analizuojant šiluminius efektus, svarbus parametras yra šiluminės relaksacijos trukmė (2.10) [5]. Ši trukmė atitinka santykį tarp šilumos šaltinio ploto bandinio paviršiuje ir bandinio medžiagos temperatūrinio laidumo koeficiento. Fototerminės interferometrijos metodu matuojant sugertį dėl šilumos poveikio, šiluminės relaksacijos trukmė gali būti išreiškiama ir atvirkštiniu jai dydžiu - relaksacijos dažniu (2.11). Tad atliekant matavimus, turi būti pasirenkamas toks kaupinančios spinduliuotės moduliacijos dažnis, kuris neviršija medžiagos relaksacijos dažnio [5]. 2.2 lentelėje pateiktos tam tikrų medžiagų šiluminės relaksacijos trukmės ir dažniai, kai medžiagą kaitinančio šaltinio diametras yra 70 μm (radiusas $\omega_0 = 35 \mu\text{m}$).

$$t_T = \frac{\pi \times \omega_0^2}{4 \times \kappa} \quad (2.10)$$

$$f_T = \frac{1}{t_T} \quad (2.11)$$

2.2 lentelė. Nagrinėjimų optinių medžiagų šiluminės relaksacijos trukmės ir dažniai, esant 70 μm kaitinančio šaltinio diametru.

Medžiaga	Temperatūrinio laidumo koeficientas κ , cm^2/s	Šiluminės relaksacijos trukmė, s	Šiluminės relaksacijos dažnis, Hz
Lydytas kvarcas (Corning 7980)	0,0075	0,001282	780
Borosilikatinis stiklas (N-BK7)	0,0052	0,001849	541
CaF ₂	0,0358	0,000269	3723
YAG	0,052	0,000185	5408
Kristalinis kvarcas	0,06 ($\parallel c$)	0,000160	6239
Kristalinis kvarcas	0,0351 ($\perp c$)	0,000274	3650
β -BBO	0,0084 ($\parallel c$)	0,001145	874
β -BBO	0,0063 ($\perp c$)	0,001526	655
LBO	0,0134	0,000718	1393

2.2.2. Terminis lėšis

Šviesą sugeriantį bandinį veikiant spinduliuote, jis kaista ir susidaro temperatūros gradientas. Priklausomai nuo bandinio medžiagos termofizikinių savybių, temperatūros gradientas gali paveikti lūžio rodiklio pasiskirstymą ir tokiu būdu formuoti terminis lėšis [1]. Sumodeliuotas temperatūros gradiento pasiskirstymas cilindro formos lazeriniame kristale, kuris kaupinamas iš priekio pavaizduotas 2.4 paveiksle. Galima išskirti radialinį gradiento pasiskirstymą ir pasiskirstymą išilgai z ašies. Vertinant lūžio rodiklio pokytį dėl temperatūros gradiento tik radialine kryptimi, kai medžiaga apšviečiama Gausinio skirstinio pluoštu, galima įvertinti terminio lėšio efektyvųjį židinio nuotolį:

$$f = \frac{\pi K \omega_p^2}{P_h (dn/dT)} \left(\frac{1}{1 - \exp(-\alpha_0 l)} \right) \quad (2.12)$$

ω_p – Gausinio pluošto radiusas ties $1/e^2$;

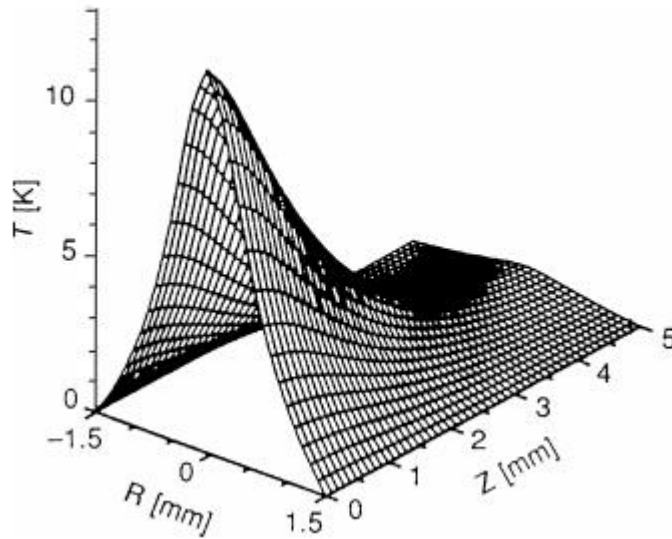
P_h – sugerta spinduliuotės dalis, kuri sukelia šiluminį poveikį;

α_0 – medžiagos sugerties koeficientas;

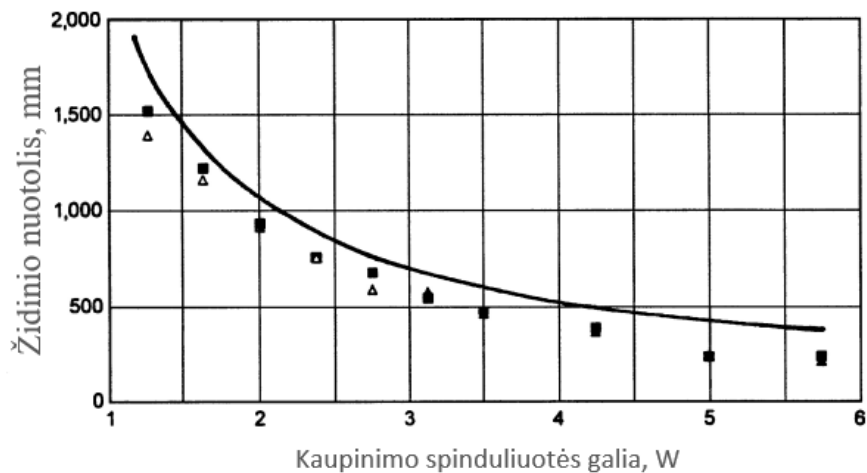
K – medžiagos šiluminio laidumo koeficientas;

dn/dT – medžiagos lūžio rodiklio priklausomybės nuo temperatūros koeficientas.

Terminio lėšio efektyviojo židinio nuotolio priklausomybė nuo kaupinimo spinduliuotės galios Nd:YAG kristale, kuris kaupinamas iš kristalo priekio pavaizduota 2.5 pav.



2.4 pav. Sumodeliuotas temperatūros gradiento pasiskirstymas cilindro formos lazeriniame kristale, kuris kaupinamas iš priekio [1].



2.5 pav. Terminio lęšio efektyviojo židinio nuotolio priklausomybė nuo kaupinimo spinduliuotės galios Nd:YAG kristale [1].

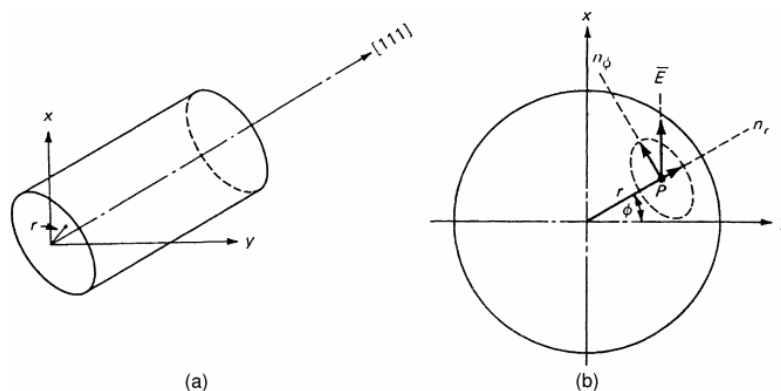
2.3 lentelė. Darbe nagrinėjamų optinių medžiagų dn/dT ir šiluminio plėtimosi koeficientai [6, 7, 8, 9, 10, 11, 13, 14].

Medžiaga	$dn/dT, ^\circ C^{-1}$	Šiluminio plėtimosi koeficientas, $^\circ C^{-1}$
Lydytas kvarcas (Corning 7980)	$11,3 \times 10^{-6}$ (20-25 $^\circ C$, 355 nm)	$0,57 \times 10^{-6}$ (0-200 $^\circ C$)
Borosilikatinis stiklas (N-BK7)	$3,5 \times 10^{-6}$ (20-40 $^\circ C$, 435,8 nm)	$8,3 \times 10^{-6}$ (20-300 $^\circ C$)
CaF ₂	$-9,35 \times 10^{-6}$ (18-28 $^\circ C$, N ₂ , 355 nm)	$21,28 \times 10^{-6}$ (20-300 $^\circ C$)
YAG	$9,1 \times 10^{-6}$ (1064 nm)	$7,8 \times 10^{-6}$ ($\perp c$)
Kristalinis kvarcas	$-5,5 \times 10^{-6}$ ($\parallel c$, 633 nm)	$7,1 \times 10^{-6}$ ($\parallel c$)
	$-6,5 \times 10^{-6}$ ($\perp c$, 633 nm)	$13,2 \times 10^{-6}$ ($\perp c$)
β -BBO	$-9,3 \times 10^{-6}$ ($\parallel c$, 400-1000 nm)	$0,36 \times 10^{-6}$ ($\parallel c$, 20 $^\circ C$)
	$-16,6 \times 10^{-6}$ ($\perp c$, 400-1000 nm)	$-2,54 \times 10^{-6}$ ($\perp c$, 20 $^\circ C$)
LBO	$-1,8 \times 10^{-6}$ (dn_x/dT , 400-1000 nm)	$66,4 \times 10^{-6}$ (x ašies kryptimi, 25-150 $^\circ C$)
	$-13,6 \times 10^{-6}$ (dn_y/dT , 400-1000 nm)	$-52,8 \times 10^{-6}$ (y ašies kryptimi, 25-150 $^\circ C$)
	$-7,14 \times 10^{-6}$ (dn_z/dT , 400 nm)	$27,3 \times 10^{-6}$ (z ašies kryptimi, 25-150 $^\circ C$)

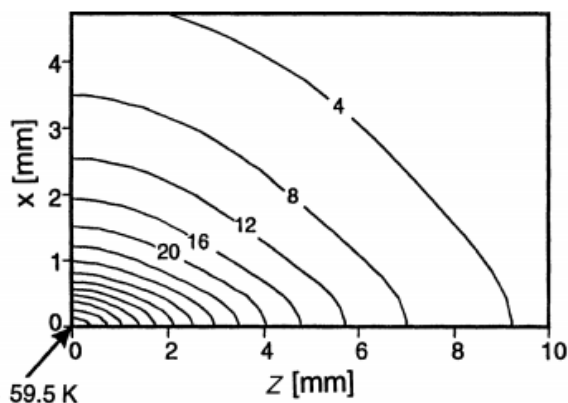
2.2.3. Termo-fotoelastiniai reiškiniai

Išraiškoje (2.12) buvo vertintas tik radialinis šilumos tekėjimas, tačiau esant aukštai spinduliuotės galiai dėl šiluminio poveikio ir priklausomai nuo medžiagos šiluminio plėtimosi koeficiento (2.3 lent.), gali pasireikšti medžiagos paviršiaus deformacija – iškilimas [1]. Kai kurioms medžiagoms šio reiškinio įtaka terminiam lęšiui gali būti palyginamo dydžio kaip ir dn/dT įtaka ir gali siekti kelias dioptrijas [1].

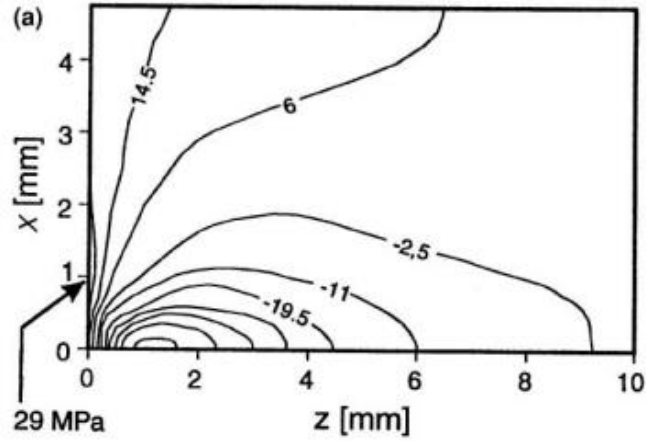
2.7 paveiksle pavaizduotas sumodeliuotas Nd:YAG cilindro formos kristalo (2.6 pav.) temperatūros gradiento pasiskirstymas, kristalą kaupinant 500 μm radiuso Gausiniu pluoštu. Didžiausia temperatūra yra ties kaupinimo centru. Susidaręs temperatūros gradientas medžiagoje sukelia terminius įtempimus (2.8 pav.) [1]. 2.8 paveiksle pavaizduotos linijos su teigiama reikšme atitinka tempimą, o neigiamos vertės atitinka zonas, kuriose pasireiškia gniuždymas. Taigi kristalo centras patiria gniuždymą, o kraštai tempimą. Didžiausi įtempiai pasireiškia ant kristalo įėjimo paviršiaus, tačiau kitaip nei temperatūros pasiskirstymo modelyje (2.7 pav.), didžiausi įtempiai yra ne ties centru, kur didžiausia temperatūra, tačiau ties kaupinimo pluošto kraštu ir siekia 29 MPa (2.8 pav.) [1].



2.6 pav. Nd:YAG kristalo orientacija (a) ir indikatrišė paveikta šiluminių įtempių (b) [1].



2.7 pav. Sumodeliuotas Nd:YAG cilindro formos kristalo temperatūros gradiento pasiskirstymas, kristalą kaupinant 500 μm radiuso Gausiniu pluoštu [1].



2.8 pav. Sumodeliuotas Nd:YAG cilindro formos kristalo temperatūros gradiento sukeltas įtempių pasiskirstymas, kristalą kaupinant 500 μm radiuso Gausiniu pluoštu [1].

Cilindro formos bandinio centrinę dalį iš priekio apšvietus pakankamai intensyvia spinduliuote, dėl susidariusio temperatūrinio gradiento, pasireiškia mechaniniai įtempiai [1]. Centrinė įkaitusi bandinio dalis negali plėstis dėl išorinės vėsesnės bandinio zonos – pasireiškia radialiniai (σ_r), tangentiniai (σ_ϕ) ir ašiniai (σ_z) įtempiai, kurie sukelia lūžio rodiklio pokytį. Bendru atveju medžiagos lūžio rodiklis aprašomas elipsoido formos indikatrėmis. Dėl temperatūros gradiento susidarę įtempiai paveikia indikatrės formą, dydį bei orientaciją [1]. Šis poveikis aprašomas sutrikdytos indikatrės B_{ij} koeficiento pokyčiu (2.13), kur p_{ijkl} – ketvirtos eilės tenzorius aprašantis fotoelastinį reiškinį. Šio tenzorius elementai yra elastooptiniai koeficientai. Išraiškoje (2.13) esantis ϵ_{kl} – antros eilės įtempių tenzorius. Pasinaudojus matricų žymėjimais [1], (2.13) išraišką galima supaprastinti iki (2.14). Daugelio kristalų elastooptiniai koeficientai p_{mn} , kurie apibūdina indikatrės pokytį dėl įtempių, yra žinomi. Nd:YAG, pasižymintis kubine gardelės simetrija, turi tris nepriklausomus elastooptinius koeficientus [1].

$$\Delta B_{ij} = p_{ijkl} \epsilon_{kl} \quad (i, j, k, l = 1, 2, 3), \quad (2.13)$$

$$\Delta B_m = p_{mn} \epsilon_n \quad (m, n = 1, 2, \dots, 6) \quad (2.14)$$

Kubine gardelės simetrija pasižyminčių medžiagų lūžio rodiklio indikatrės yra sferos. Tačiau esant įtempiams, indikatrė tampa elipsoidu. 2.6b paveiksle pavaizduota cilindro formos Nd:YAG kristalo lūžio rodiklio indikatrė paveikta šiluminių įtempių. Lūžio rodiklio pokytis radialine bei tangentine kryptimis apskaičiuojamas (2.15) ir (2.16) išraiškėmis.

$$\Delta n_r = -\frac{1}{2} n_0^3 \Delta B_r \quad (2.15)$$

$$\Delta n_\phi = -\frac{1}{2} n_0^3 \Delta B_\phi \quad (2.16)$$

Ir pasinaudojus ΔB_r ir ΔB_ϕ išraiškėmis, lūžio rodiklio pokytis radialine bei tangentine kryptimis gali būti išreiškiamas:

$$\Delta n_r = -\frac{1}{2}n_0^3 \frac{\alpha Q}{K} C_r r^2 \quad (2.17)$$

$$\Delta n_\phi = -\frac{1}{2}n_0^3 \frac{\alpha Q}{K} C_\phi r^2 \quad (2.18)$$

Kur n_0 – medžiagos lūžio rodiklis, α – šiluminio plėtimosi koeficientas, K – šiluminio laidumo koeficientas, C_r ir C_ϕ – medžiagos elastooptinio koeficiento funkcijos, Q – galia į tūrį, r – atstumas nuo medžiagos centro (2.6 b pav.). Nd:YAG medžiagos atveju lūžio rodiklio pokytis radialine ir tangentine kryptimis išreiškiamas:

$$\Delta n_r = (-2.8 \times 10^{-6}) Q r^2 \quad (2.19)$$

$$\Delta n_\phi = (+0.4 \times 10^{-6}) Q r^2 \quad (2.20)$$

2.2.4. Fotorefrakcija

Lūžio rodiklio pokytis bandinyje gali pasireikšti ne tik dėl šiluminio poveikio, tačiau ir dėl intensyvios lazerinės spinduliuotės sukulto elektroninio netiesiškumo. Bendru atveju lūžio rodiklis išreiškiamas (2.21) išraiška, kurioje n_0 yra tiesinis medžiagos lūžio rodiklis, n_2 yra netiesinis medžiagos lūžio rodiklis, o I yra intensyvumas. Taigi, esant intensyviai spinduliuotei, lūžio rodiklis priklauso nuo konkrečios nagrinėjamos medžiagos netiesinio lūžio rodiklio n_2 . Lentelėje 2.4 pateikti tam tikrų medžiagų elektroninio netiesiškumo nulemti netiesiniai lūžio rodikliai n_2 . Kadangi šviesos pluoštas turi tam tikrą erdvinį intensyvumo skirstinį skersai sklidimo krypties (paprastai skirstinys aprašomas Gauso funkcija), tai atsiranda ir atitinkama terpės lūžio rodiklio moduliacija – terpė tampa lęšiška [22]. Kai $n_2 > 0$, tai medžiaga veikia kaip glaudžiamasis lęšis.

$$n = n_0 + n_2 I \quad (2.21)$$

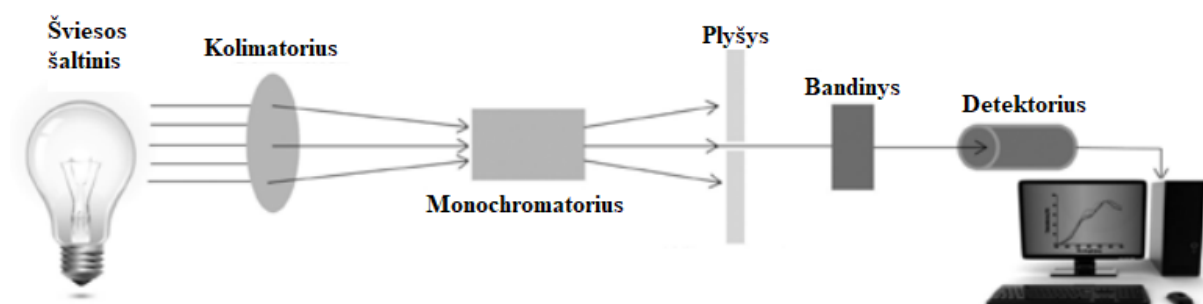
2.4 lentelė. Įvairių skaidrių medžiagų tiesinio lūžio rodiklio n_0 ir elektroninio netiesiškumo nulemto netiesinio lūžio rodiklio n_2 vertės ties $\lambda = 800$ nm [22].

Medžiaga	n_0	n_2 $\times 10^{-16} \text{cm}^2/\text{W}$
Vanduo	1.33	1.9
Lydytas kvarcas	1.47	2.4
BBO	1.61	3.6
Safyras	1.80	3.7
YAG	1.83	8.4
Deimantas	2.42	10
Oras	~ 1	3.2×10^{-3}

2.3. Sugerties nuostolių matavimo metodai

2.3.1. Spektrofotometrija

Spektrofotometrija - tai kiekybinis matavimo metodas, kuriuo galima pamatuoti bandinių pralaidumą arba atspindį plačiame bangos ilgių diapazone. Principinė matavimo prietaiso schema pavaizduota 2.9 pav. Šviesos šaltinio išspinduliuota šviesa patekusi į monochromatoriaus dispersinį elementą yra spektriškai išskleidžiama erdvėje. Veidrodžiais sukant šviesos pluoštą monochromatoriaus išėjimo plyšio atžvilgiu, atrenkami bangos ilgiai, kuriais apšviečiamas bandinys ir detektoriumi fiksuojamos intensyvumo vertės ties konkrečiais bangos ilgiais. Prieš atliekant bandinio matavimus yra atliekamas kalibracinis matavimas be bandinio, kad būtų galima eliminuoti aplinkos poveikį. Optinių elementų atspindžio bei pralaidumo matavimams ultravioletinės, regimosios bei artimosios infraraudonosios spinduliuotės spektrinėse srityse naudojami spektrofotometrai gali pamatuoti iki 99,99 % atspindį bei 0,01 % pralaidumą, tačiau matavimų tikslumas siekia $\pm 0,5$ % matavimo vertės [3]. Taigi pamatavus bandinio atspindį bei pralaidumą, tam tikru tikslumu galima įvertinti, kokia spinduliuotės dalis buvo sugerta (darant prielaidą, kad sklaida yra nykstamai maža). Tokiu metodu galima įvertinti sugertį kelių dešimtųjų procento dalių tikslumu. Tokio tikslumo pakanka bandiniams, kurių charakteringa sugerties nuostolių dalis yra daugiau nei 1 %, tačiau ne visada tokio tikslumo pakanka mažos sugerties bandiniams. Vis dėlto, optinius elementus naudojant su aukštomis galiomis, net ir kelių šimtų tūkstantųjų procento dalių (1-10 ppm) sugerties nuostoliai gali būti pakankamai dideli, kad pasireikštų nepageidaujami šiluminiai efektai. Dar vienas spektrofotometrinio metodo trūkumas yra tas, kad jis nepasižymi erdvine skyra - negalima atskirti ar šviesos sugertis vyksta paviršiuje ar tūryje.



2.9 pav. Principinė spektrofotometrinio matavimo metodo schema [16].

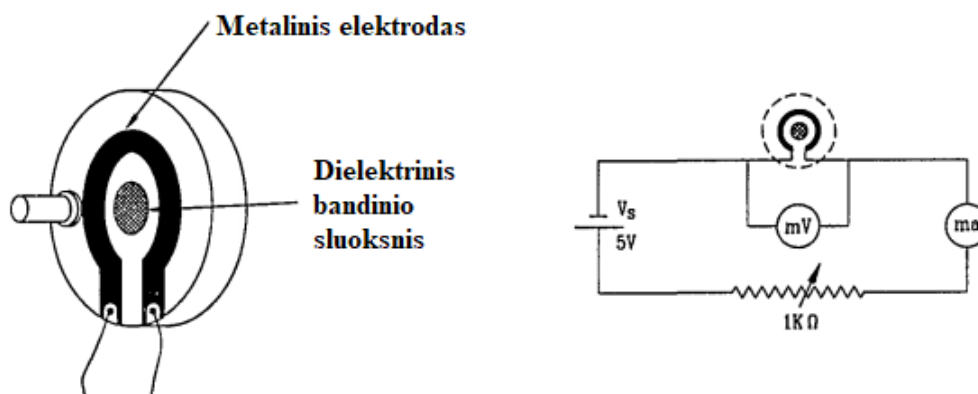
2.3.2. Lazerinė kalorimetrija

Norint išmatuoti mažesnius nei 1% sugerties nuostolius gali būti naudojami keli metodai. Vienas iš jų lazerinės kalorimetrijos būdas. Kalorimetrinio metodo veikimo principas pagrįstas tiesioginiu bandinio kaitinimu didelės galios lazerine spinduliuote ir tuo pat metu temperatūros padidėjimo matavimu, kai bandinys yra termiškai izoliuotas [3]. Temperatūros padidėjimą sukelia bandinyje sugerta optinė energija (ties lazerio spinduliuojamu bangos ilgiu). Jei bandinyje pasiekama šiluminė pusiausvyra, bandinio sugertis išreiškiama (2.22) formule, kur G_e – efektyvus šiluminio laidumo koeficientas, ΔT_m – maksimalus temperatūros pokytis, W – lazerio galia. Kai lazerio spinduliuotė išjungžiama, bandinio temperatūra mažėja, kol pasiekiami pradine šiluminės pusiausvyros temperatūra. Tokiu atveju bandinio sugertis apskaičiuojama pagal (2.23) išraišką, kur C – bandinio santykinė šiluminė talpa. Jeigu norima įvertinti ant pagrinduko suformuotų dangų ar paviršiaus sugerties nuostolius, reikalingi papildomi matavimai (pagrinduko su danga ir atskirai - be dangos). Tuomet dangos sugerties nuostoliai gali būti išreikšiami (2.24), kur t_f – suformuoto sluoksnio pralaidumas. Matavimo tikslumas labiausiai priklauso nuo naudojamo termometro tikslumo, taip pat sensoriaus pozicijos centro atžvilgiu, tiesioginės šviesos apšviečiančio sensorių, šiluminio kontakto tarp sensoriaus ir bandinio bei šiluminių koeficientų parinkimo [3]. Literatūroje [3] aprašytas atvejis, kai šis matavimo metodas įgalino išmatuoti temperatūrą 0.001 °C (2.10 pav.) tikslumu ir tokiu būdu (2.11 pav.) suformuoto sluoksnio sugerties matavimo tikslumas gali siekti nuo kelių iki kelių dešimtųjų ppm.

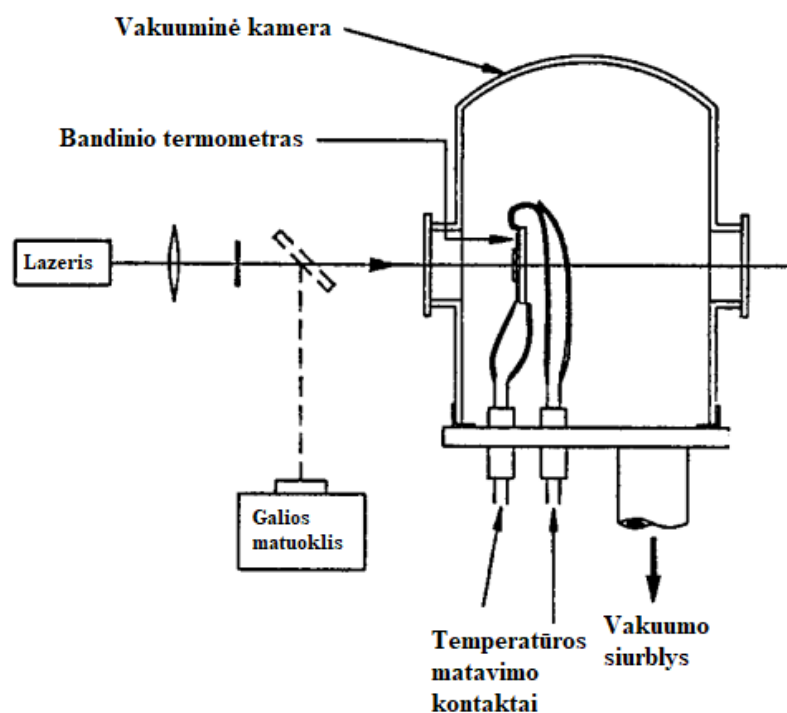
$$A = \frac{\text{sugerta galia}}{\text{kritusi galia}} = \frac{G_e \times \Delta T_m}{W} \quad (2.22)$$

$$A = \frac{C}{W} \left(\left| \frac{dT}{dt} \right|_{T_0}^{\uparrow} + \left| \frac{dT}{dt} \right|_{T_0}^{\downarrow} \right) \quad (2.23)$$

$$A_{\text{dangos}} = A_{\text{danga+pagrindukas}} - A_{\text{pagrindukas}} \times t_f \quad (2.24)$$



2.10 pav. Principinė varžinio termometro schema [3].



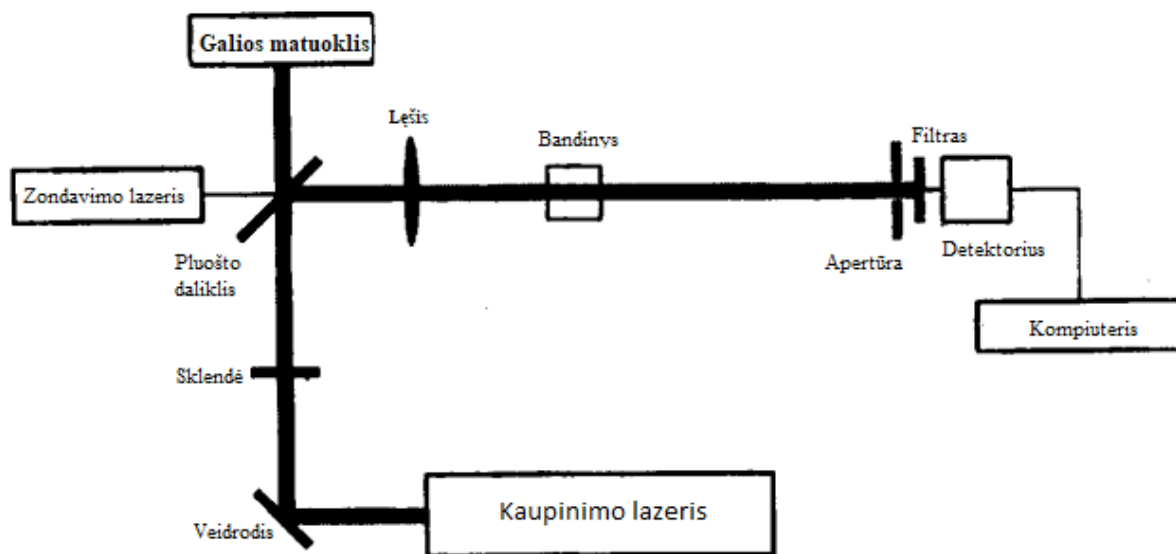
2.11 pav. Principinė lazerinio kalorimetrinio matavimo schema adaptuota iš [3].

2.3.3. Terminio lęšio spektrometrija

Terminio lęšio spektrometrija – tai dar vienas iš fototerminės analizės metodų, kuris pagrįstas spinduliuotės bandinyje sugertimi ir dėl šios sugerties susidariusio temperatūros gradiento poveikio šviesos sklidimui detektavimu. Terminio lęšio spektrometrijoje, bandinys yra apšviečiamas pluoštu, kurio intensyvumo skirstinys atitinka Gauso funkcijos formą [4]. Taigi, temperatūros gradientas iš spinduliuotės apšviestos zonos link kraštų taip pat yra proporcingas Gausiniam spinduliuotės pluošto pasiskirstymui. Todėl lūžio rodiklio pokytis dėl temperatūros pokyčio dn/dT yra didžiausias bandinio centre ir mažėja link kraštų. dn/dT koeficientas priklauso ir nuo bandinio medžiagos, ir gali būti tiek teigiamas – pasireiškia pluošto konvergencija (fokusavimas), tiek ir neigiamas – pasireiškia divergencija (plėtimasis). 2.3 lentelėje pateikti įvairių medžiagų dn/dT koeficientai. Konvergencijos ar divergencijos dydis taip pat priklauso nuo spinduliuotės galios ir nuo bandinio sugerties koeficiento [4]. Taigi, terminio lęšio spektrometrijos metodu galima netiesiogiai įvertinti bandinio sugerties nuostolius. 2.12 pav. pavaizduota principinė tokio matavimo schema. Lazerio kaupinimo pluoštas apšviečia bandinį, taip sukurdamas temperatūros gradientą, tuomet koliniarus zonuojantis pluoštas praėjęs pro bandinį dėl susidariusio lūžio rodiklio pasiskirstymo profilio patiria skirtingus optinius kelius priklausomai nuo padėties centro atžvilgiu, ir tokiu būdu priklausomai nuo bandinio dn/dT pluoštas konverguoja arba diverguoja. Prieš detektorių esanti apertūra erdviškai apriboja į detektorių patenkančios spinduliuotės intensyvumą. Moduluojant

kaupinančią spinduliuotę laike taip, kad vienu atveju būtų fiksuojamas zonduojančios spinduliuotės intensyvumas esant kaupinimui ir po tam tikros, charakteringos medžiagai, šiluminės relaksacijos trukmės, detektuojamas intensyvumo pokytis ΔI . Pasinaudojus (2.25) išraiška galima įvertinti bandinio sugerties nuostolių dalį A . (2.25) išraiškoje P_e – kaupinančios spinduliuotės galia, λ_p – zonduojančios spinduliuotės bangos ilgis, dn/dT – bandinio lūžio rodiklio priklausomybės nuo temperatūros koeficientas, k – šiluminio laidumo koeficientas.

$$S_{TL} = \frac{\Delta I}{I} = \frac{P_e (dn/dT) A}{\lambda_p k} \quad (2.25)$$

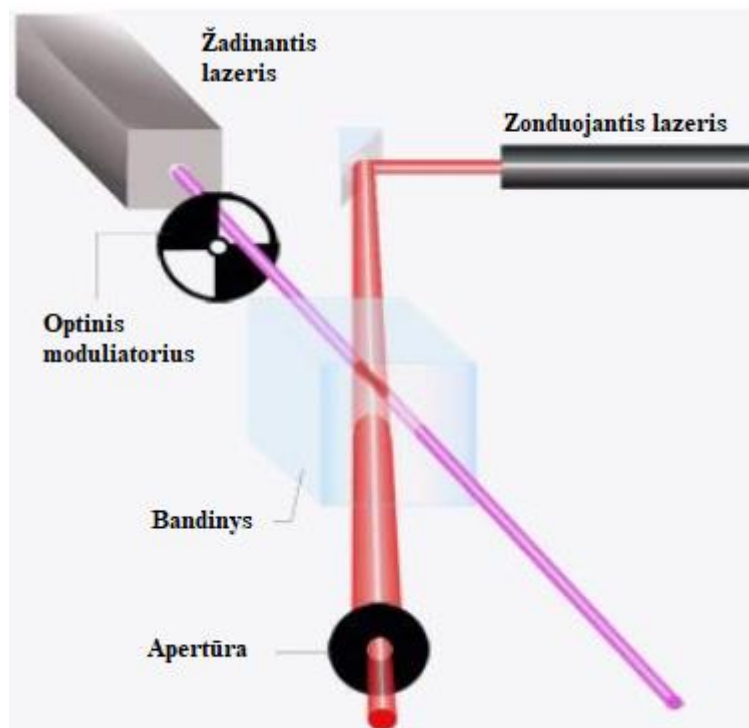


2.12 pav. Principinė terminio lęšio spektrometrijos schema adaptuota iš [4].

2.3.4. Fototerminė interferometrija

Fototerminė interferometrija – dar vienas metodas, kuris vis dažniau naudojamas apibūdinti optinių elementų mažiems sugerties nuostoliams. Optiniai elementai – tai stiklai arba kristalai, kurie padengti plonomis dangomis bei pasižymi netobulu paviršiniu sluoksniu. Matavimo metodas taip pat pagrįstas žadinimo ir zondavimo principu, kurio metu pasireiškia terminis lęšis (2.13 pav.). Matuojami sugerties nuostoliai, kuriuos sukėlė žadinanti spinduliuotė. Tam, kad įvertinti terminio lęšio efektą ir padidinti matavimo jautrumą, žadinanti spinduliuotė yra periodiškai moduluojama, o tai sukelia periodinį matuojamo elemento kaitimą. Periodinis bandinio kaitinimas atitinkamai sukelia periodines perturbacijas zonduojančiame pluošte. Zonduojantis pluoštas yra šiek tiek didesnis, nei kaupinimu moduluota zona, taigi centrinė zonduojančio pluošto dalis yra moduluota, o išorinė ne. Sklindant zonduojančiam pluoštui abi šios dalys tarpusavyje persikloja ir interferuoja. Interferencijos rezultatą galima tiesiogiai stebėti detektoriumi, kurio signalas pasireiškia kaip maža fotodetektoriaus srovės moduliacija.

Moduliacijos signalas gali būti išreiškiamas kaip dviejų signalų dedamųjų – kintamos dedamosios AC ir pastovios DC dedamosios santykis: šis santykis yra proporcingas bandinio sugerties nuostoliams. AC ir DC signalai yra fiksuojami silicio fotodetektoriumi ir apdorojami „lock-in“ stiprintuvu, kuris yra suderintas su žadinančios spinduliuotės moduliacijos dažniu.



2.13 pav. Fototerminės interferometrijos metodo principinė schema [2].

Žadinimo ir zondavimo pluoštų persiklojimas, bei zondavimo pluošto atvaizdavimas yra suderinti taip, kad intensyvumo pokytis $\Delta I/I$ laike ties zondavimo pluošto centru būtų maksimalus - tenkintų dviejų pluoštų interferencijos sąlygą, moduliacijos gylis būtų proporcingas vėlinimui tarp dviejų pluoštų: $\Delta I/I = \Delta\phi$, kur $\Delta\phi$ atitinka fazės pokytį, kurį sukėlė žadinimo spinduliuotė neperturbuoto pluošto atžvilgiu. Maksimali signalo vertė gaunama kai interferencijos rezultatas atvaizduojamas iš viena Relėjaus ilgį atitinkančio atstumo [5].

Tam, kad bandinyje būtų matuojama tik sugertis ir nebūtų fiksuojami kiti reiškiniai, kampas tarp žadinimo ir zondavimo pluoštų parenkamas tarp 5-10 laipsnių [2]. Įprastai šis kampas bei žadinimo ir zondavimo pluoštų persiklojimas yra suderinamas matavimų pradžioje ir matavimų eigoje nėra keičiamas. Bandinio padėtis pluoštų atžvilgiu yra keičiama XYZ translaciniu staliuku (3.1 pav.), kuris matavimo metu yra valdomas automatizuotai. Kitas svarbus aspektas derinant sistemą yra zonuojančios HeNe spinduliuotės atvaizdo formavimas detektoriaus plokštumoje. Atvaizdavimo modulis yra pastatomas į tinkamą poziciją translaciniu staliuku taip, kad detektuojamas terminio lęšio poveikis zonuojančiai HeNe

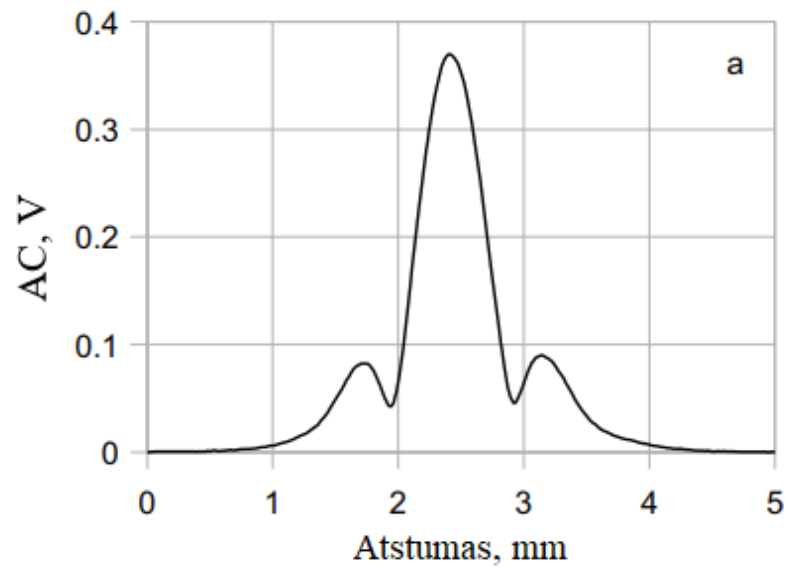
spinduliuotei būtų maksimalus. Šis poveikis yra išreiškiamas AC signalu. Nesant žadinimo spinduliuotei atvaizdavimo sistema gaunama tik DC signalo dedamoji. Derinant sistemą yra svarbu surasti tokią atvaizdavimo sistemos poziciją, kurioje AC/DC signalų santykis yra didžiausias.

Matuojant sugertį fototerminės interferometrijos metodu, kaupinimui galima naudoti tiek nuolatinės tiek ir kvazinuolatinės veikos spinduliuotę, tačiau matavimo sistema visais atvejais turi būti kalibruota konkrečiam atvejui. Kalibracijos procedūra atliekama naudojant kalibracinį bandinį su žinomais sugerties nuostoliais žadinimo bangos ilgiui. Kalibracijos tikslas yra nustatyti medžiagos atsako konstantos vertę R (2.26) esant maksimalioms AC_{ref} ir DC_{ref} signalų vertėms, kai P_{ref} atitinka žadinimo spinduliuotės galią ties žadinimo ir zondavimo pluoštų susikirtimu. Apskaičiuota medžiagos atsako konstantos vertė R vėliau yra naudojama matuojant tiriamojo bandinio signalą ir vertinant jo sugertį (2.27). Atsako vertė R yra skirtinga skirtingoms bandinių pagrindukų medžiagoms dėl skirtingų jų termofizikinių konstantų. Todėl norint tiksliai įvertinti tiriamųjų bandinių sugerties nuotolius, konkrečiai pagrinduko medžiagai yra gaminami specialūs kalibraciniai bandiniai ir pirmiausia įvertinama jų atsako vertė R .

$$R = \frac{AC_{ref}}{DC_{ref}} * \frac{1}{P_{ref} * \alpha_{ref}} \quad (2.26)$$

$$\alpha = \frac{AC}{DC} * \frac{1}{P} * \frac{1}{R} \quad (2.27)$$

Esant stabiliai sistemai, atsako vertė R išlieka pastovi (su 5-10 % paklaida) keletą metų. 5-10 % išsibarstymą labiausiai lemia žadinimo spinduliuotės galios matavimo netikslumai [2]. Didesnis R vertės pokytis gali reikšti žadinimo spinduliuotės degradaciją arba žadinimo-zondavimo pluoštų išsiderinimą tarpusavyje. 2.14 pav. pavaizduota kalibracinio bandinio (lydytas kvarcas padengtas plonu metalo sluoksniu) AC_{ref} signalo atsakas keičiant bandinio poziciją lygiagrečiai kaupinančiai spinduliuotei pluoštų sankirtos atžvilgiu. Bandinys yra slenkamas z kryptimi tam tikru žingsniu (įprastai kas 20 μm), o detektuojamas signalas atkeliauja iš zonos, kurioje persikloja žadinimo ir zondavimo pluoštai. Taigi, fiksuojamas žadinančiąją spinduliuote sukeltas zonduojamo pluošto trikdys. 2.14 pav. signalo pikas atitinka bandinio paviršių, ši signalo vertė yra naudojama atsako vertės R skaičiavimui (2.26). Centrinio piko plotis taip pat parodo išilginę matavimo sistemos raišką. 2.14 pav. pavaizduotu atveju tai atitiktų ~ 0.7 mm FWHM. Tokios raiškos dažniausiai pakanka siekiant atskirti paviršiaus ir tūrio sugerties nuostolius.



2.14 pav. Kalibracinio bandinio AC_{ref} signalas bandinį slenkant z kryptimi. Vidutinė žadinimo galia 20 mW, bangos ilgis 532 nm, moduliacijos dažnis 380 Hz [5].

3. Eksperimento metodika

Buvo paruošti eksperimentiniai kalibraciniai bandiniai: ant pagrindukų iš įvairių medžiagų (3.1, 3.2 lent.) buvo padengtas plonas metalo sluoksnis su pageidaujama paviršiaus sugerties nuostoliais. Kalibraciniai bandiniai buvo matuoti fototerminės interferometrijos metodu, kurio principinė schema pavaizduota 3.1 pav. Kalibracinių bandinių atsako vertės R vertintos pralaidumo (3.3 lent.) ir atspindžio (3.4 lent.) režimuose. Norint nustatyti, kurie iš kalibracinių bandinių pagrindukų medžiagos termofizikiniai parametrai labiausiai lemia atsako R vertę, buvo ieškoma koreliacijos: sudarytas tiesinio atsako modelis pralaidumo (3.1) ir atspindžio (3.2) režimams.

Fototerminės interferometrijos metodu buvo atliktas kalibracinio bandinio paviršiaus homogeniškumo tyrimas, rezultatai pateikti 3.5 pav.

Panaudojus ankstesniame darbo etape nustatytą LBO medžiagos atsako vertę R , iširtas skaidrinančia danga padengto LBO kristalo paviršiaus netiesinis atsakas esant skirtingoms žadinančios spinduliuotės intensyvumo vertėms (3.9, 3.10 pav.).

3.1. Bandiniai ir jų paruošimas

Norint kuo tiksliau įvertinti tiriamųjų bandinių sugertį fototerminės interferometrijos metodu, svarbu, kad kalibracinių bandinių pagrindukų medžiaga būtų pagaminta iš tokios pačios medžiagos kaip tiriamieji bandiniai. To reikia dėl nevienodo bandinių medžiagos atsako į šiluminį poveikį. 3.1 lentelėje yra pateikti šiame darbe nagrinėjamų medžiagų termofizikiniai parametrai. Tyrimui, bandiniai iš šių medžiagų buvo pagaminti padengiant juos plonu chromo sluoksniu: sluoksnio storis, nuo kurio priklauso sugerties nuostoliai dangoje, parinktas toks, kad sugertį būtų galima santykinai tiksliai (dešimtųjų procento dalių tikslumu) įvertinti spektrofotometriškai, t.y.: tiesiogiai tiriant bandinių pralaidumą bei atspindį (darant prielaidą, kad sklaida minimali ir jos galime nepaisyti).

Kalibraciniai bandiniai buvo padengti dviem procesais, pirmuoju procesu buvo dengiamas lydytas kvarcas (Corning 7980), borosilikatinis stiklas (N-BK7) ir CaF_2 , o antruoju, įsitikinus, kad pavyko pirmasis, padengti likę YAG, β -BBO, LBO ir kristalinis kvarcas.

3.1 lentelė. Tyrimo metu naudotų medžiagų termofizikiniai parametrai [6, 7, 8, 9, 10, 11, 13, 14].

Medžiaga	Tankis ρ , g/cm ³	Lūžio rodiklis	Šiluminio laidumo koeficientas K, W/(cm×K)	Santykinė šiluminė talpa C, J/(g×K)	Temperatūrinio laidumo koeficientas κ , cm ² /s
Lydytas kvarcas (Corning 7980)	2,2	1,4570 (633 nm)	0,0138	0,77	0,0075
Borosilikatinis stiklas (N-BK7)	2,51	1,5151 (633 nm)	0,01114	0,858	0,0052
CaF ₂	3,18	1,4329 (633 nm)	0,0971	0,854	0,0358
YAG	4,56	1,8295 (633 nm)	0,14	0,59	0,052
Kristalinis kvarcas	2,65	$n_o=1,5442$ $n_e=1,5533$ (600 nm)	0,113 (∥c) 0,066 (⊥c)	0,71	0,06 (∥c) 0,0351 (⊥c)
β-BBO	3,85	$n_o=1,6674$ $n_e=1,5501$ (644 nm)	0,016 (∥c) 0,012 (⊥c)	0,496	0,0084 (∥c) 0,0063 (⊥c)
LBO	2,47	$n_x=1,5742$ $n_y=1,6014$ $n_z=1,6163$ (633 nm)	0,035 (vidurkis)	1,06	0,0134

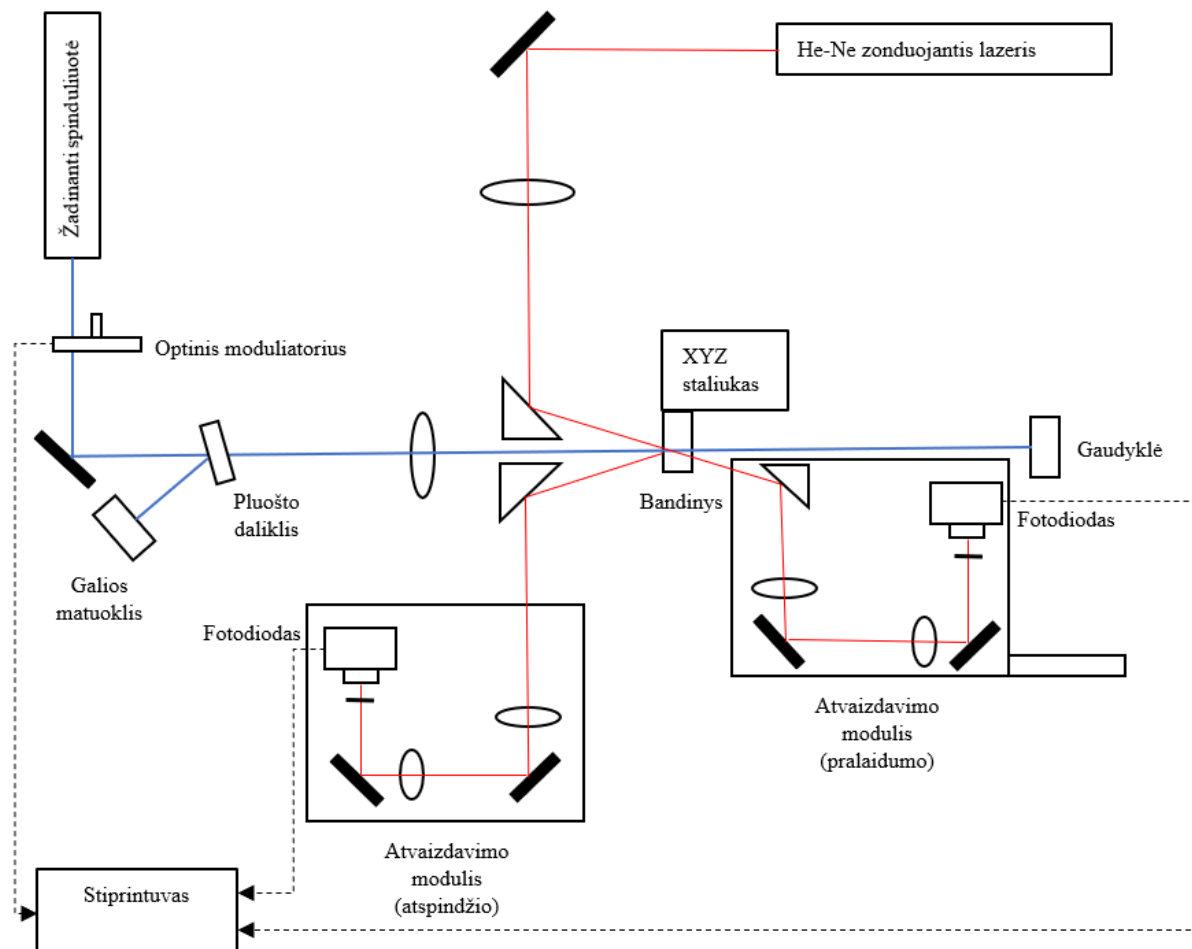
3.2 lentelė. Tyrimo metu naudotų medžiagų dn/dT ir šiluminio plėtimosi koeficientai [6, 7, 8, 9, 10, 11, 13, 14].

Medžiaga	dn/dT , °C ⁻¹	Šiluminio plėtimosi koeficientas, °C ⁻¹
Lydytas kvarcas (Corning 7980)	$11,3 \times 10^{-6}$ (20-25 °C, 355 nm)	$0,57 \times 10^{-6}$ (0-200 °C)
Borosilikatinis stiklas (N-BK7)	$3,5 \times 10^{-6}$ (20-40 °C, 435,8 nm)	$8,3 \times 10^{-6}$ (20-300 °C)
CaF ₂	$-9,35 \times 10^{-6}$ (18-28 °C, N ₂ , 355 nm)	$21,28 \times 10^{-6}$ (20-300 °C)
YAG	$9,1 \times 10^{-6}$ (1064 nm)	$7,8 \times 10^{-6}$ (111)
Kristalinis kvarcas	$-5,5 \times 10^{-6}$ (∥c, 633 nm) $-6,5 \times 10^{-6}$ (⊥c, 633 nm)	$7,1 \times 10^{-6}$ (∥c) $13,2 \times 10^{-6}$ (⊥c)
β-BBO	$-9,3 \times 10^{-6}$ (∥c, 400-1000 nm) $-16,6 \times 10^{-6}$ (⊥c, 400-1000 nm)	$0,36 \times 10^{-6}$ (∥c, 20 °C) $-2,54 \times 10^{-6}$ (⊥c, 20 °C)
LBO	$-1,8 \times 10^{-6}$ (dn_x/dT , 400-1000 nm) $-13,6 \times 10^{-6}$ (dn_y/dT , 400-1000 nm) $-7,14 \times 10^{-6}$ (dn_z/dT , 400 nm)	$66,4 \times 10^{-6}$ (x ašies kryptimi, 25-150 °C) $-52,8 \times 10^{-6}$ (y ašies kryptimi, 25-150 °C) $27,3 \times 10^{-6}$ (z ašies kryptimi, 25-150 °C)

3.2. Eksperimento schema

3.2.1. Pralaidumo režimas

Šiam darbui panaudota kompanijos Stanford Photothermal Instruments fototerminės interferometrijos matavimų sistema, kurios principinė optinė schema pavaizduota 3.1 pav. Pralaidumo režimui naudotas atvaizdavimo modulis esantis už bandinio. Bandinių žadinimui buvo naudojama Atlantic 80 (EKSPLA) lazerio spinduliuotė sudaryta iš 1 MHz pasikartojimo dažniu generuojamų 10 ps impulsų su 355 nm bangos ilgiu. Žadinimo spinduliuotė papildomai moduluojama 390 Hz dažniu, panaudojant mechaninį diskinį moduliatorių su periodiškai erdvėje išdėstytomis erdmėmis. Zondavimui naudojamas 2 mW vidutinės galios HeNe lazeris emituojantis 633 nm bangos ilgi.



3.1 pav. Principinė fototerminės interferometrijos metodo matavimo schema signalą registruojant pralaidume bei atspindyje.

3.2.2. Atspindžio režimas

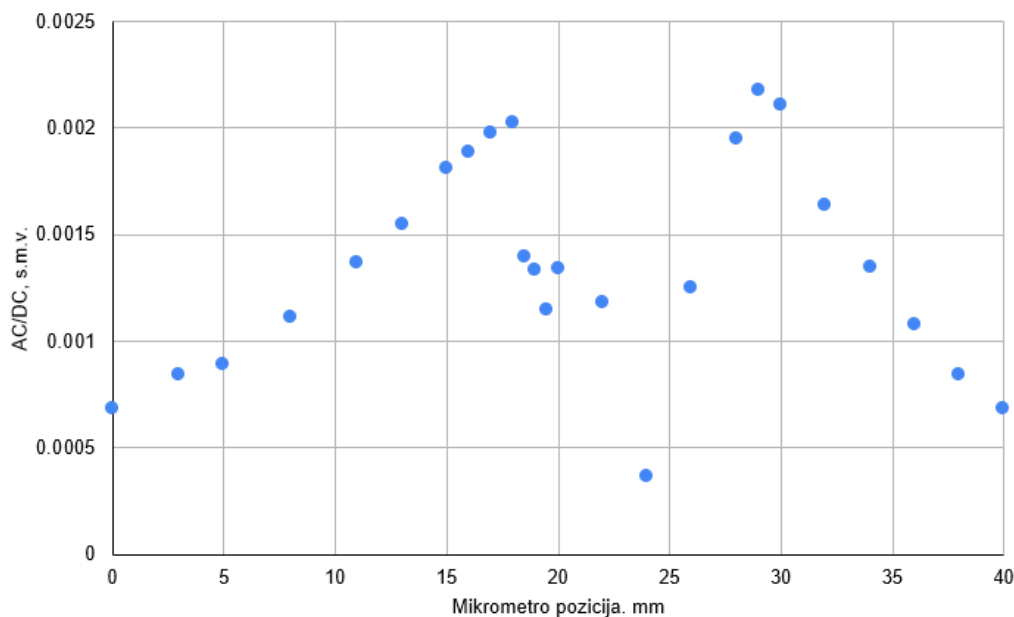
Neskaidrių zondojuojančiai spinduliutei bandinių paviršiaus sugerties nuostolių matavimo principinė schema pavaizduota 3.1 pav. Žadinančios spinduliutės bandinio paviršiuje sukulto terminio poveikio signalui detektuoti naudojamas atvaizdavimo modulis, esantis prieš bandinį. Šiuo moduli, kurį sudaro atvaizdavimo lęšiai, nukreipiantys veidrodžiai, apertūra bei fotodiodas, detektuojama mažu kampu nuo bandinio paviršiaus atsispindėjusi zondojuojanti spinduliutė. Zondojuojanti spinduliutė yra didesnio diametro nei žadinanti spinduliutė, todėl tik dalis zondojuojančios spinduliutės patiria terminį poveikį. Tam tikrame atstume nuo bandinio zondojuojanti, terminį poveikį patyrusi, spinduliutė su iškraipytu faziniu frontu, interferuoja su nepaveikta zondojuojančio pluošto dalimi [27]. Atvaizdavimo modulio pagalba interferencijos rezultatas yra padidinamas ir centrinė jo dalis detektuojama fotodiodu. Kadangi žadinanti spinduliutė yra moduluojama laike, fiksuojamas signalo pokytis esant terminiam poveikiui ir kai poveikio nėra.

4. Pagrindiniai rezultatai ir jų aptarimas

Tyrimas pradėtas nuo lydyto kvarco (Corning 7980) bandinio. Išmatavus šio bandinio pralaidumą bei atspindį ties 355 nm esant $< 10^\circ$ kampui, apskaičiuota vidutinė paviršiaus sugerties nuostolių vertė lygi 36,9 % (daroma prielaida, jog bandinio sklaida yra minimali ir jos galime nepaisyti). Ši vertė vėliau bus naudojama kalibracinio bandinio atsako konstantos R skaičiavimui pagal (2.26) išraišką.

4.1. Atvaizdo modulio suderinimas

3.2 pav. pavaizduota sistemos atvaizdo modulio (pralaidumo režime) derinimo kreivė ieškant maksimalaus AC/DC signalų santykio. Yra žinoma, jog labiausiai kontrastingas signalas yra suformuojamas dviejose pozicijose: gauti rezultatai tai patvirtina. Visiems vėlesniems tyrimo etapams – kalibravimui ir sugerties nuostolių matavimams buvo naudojama modulio pozicija, ties kuria buvo gautas pats didžiausias AC/DC signalų santykis.



3.2 pav. maksimalus AC ir DC signalų santykis derinant atvaizdo modulio poziciją.

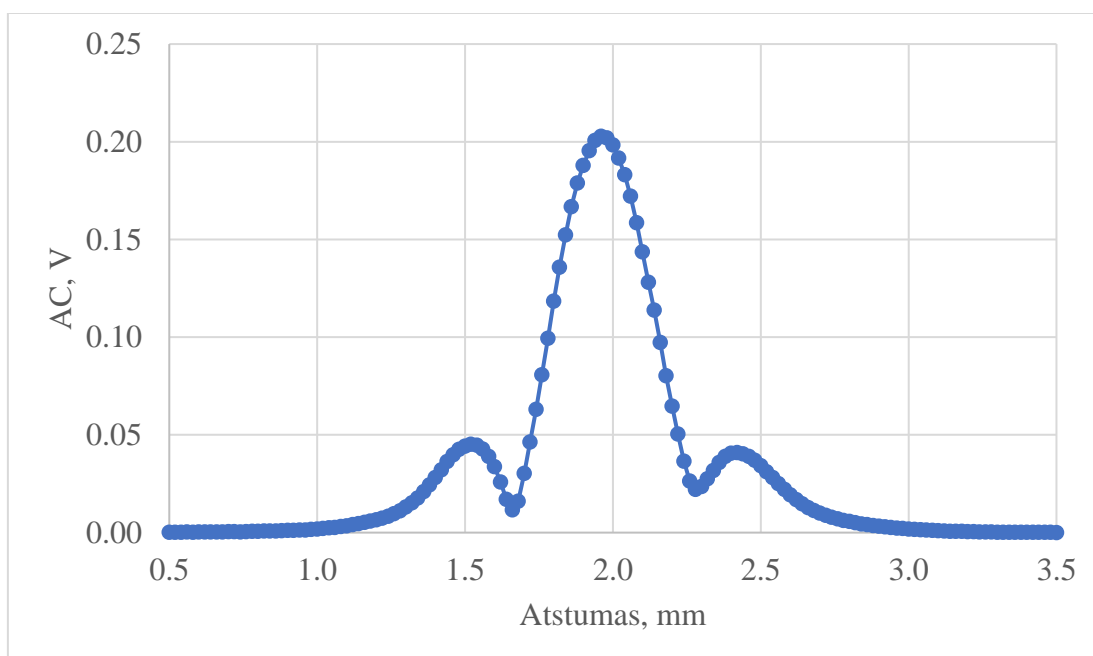
Suderinus sistemos atvaizdo modulį lydyto kvarco (Corning 7980) kalibraciniam bandiniui gauta fototerminio atsako kintamosios dedamosios (AC) priklausomybė nuo bandinio pozicijos pateikta 3.3 pav. Atsako funkcijos forma labai panaši į tą, kuri sutinkama literatūroje [5], todėl galima teigti, jog sistema suderinta tinkamai.

4.2. Sistemos kalibravimas

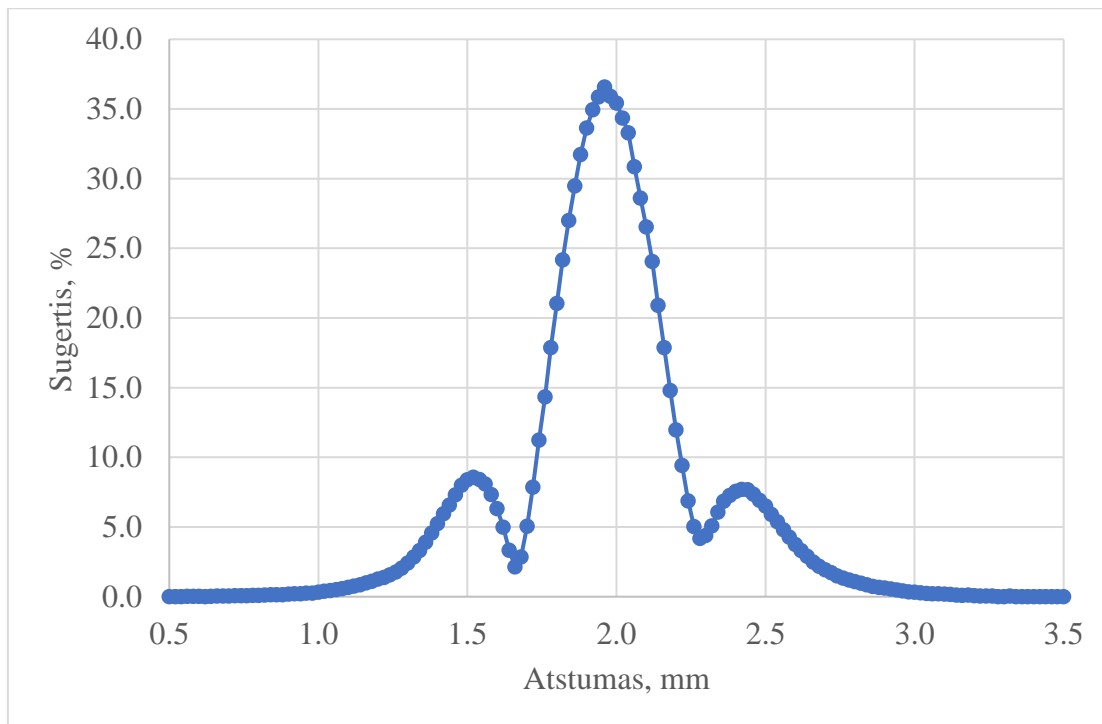
3.3 pav. pavaizduota maksimali kintamosios dedamosios (AC) signalo vertė atitinka poziciją, kai žadinimo ir zondavimo pluoštai persikloja bandinio paviršiuje. Į išraišką (2.26) įstačius šią maksimalią kintamosios dedamosios (AC), pastoviosios dedamosios (DC) vertes, į

bandinio paviršių krentančią galią bei pamatuotą kalibracinio bandinio - lydyto kvarco (Corning 7980) paviršiaus sugertį, apskaičiuojame atsako funkcijos vertę $R = 9,65$. Tam, kad patikrinti sistemos matavimo tikslumą (toje pačioje bandinio paviršiaus koordinatėje) atliekamas to pačio bandinio sugerties nuostolių matavimas, naudojant apskaičiuotą R vertę (3.4 pav.). Fototerminės interferometrijos metodu pamatuota sugertis lygi 36,6 %, taigi palyginus ją su žinoma bandinio sugertimi (36,9 %), gauname, jog matavimo sistemos tikslumas ~0,8 %.

Papildomai, buvo atliktas kito iš lydyto kvarco pagaminto kalibracinio bandinio - su mažesne metalinio paviršiaus sugerties nuostolių verte (25,9 %), matavimas. Šio matavimo metu gauta atsako R vertė buvo lygi 10,26. Taigi, palyginus ją su tyrimui pagaminto bandinio rezultatais, galime teigti, jog kalibracinių bandinių paviršiaus sugerties nuostolių vertės esant tai pačiai pagrindukų medžiagai (lydytas kvarcas) turi santykinai nedidelę įtaką atsako vertei.



3.3 pav. Kalibracinio bandinio fototerminio atsako kintamosios dedamosios (AC) priklausomybė nuo atstumo kai pagrinduko medžiaga lydytas kvarcas (Corning 7980). Žadinimo spinduliuotė - 355 nm; vidutinė žadinimo spinduliuotės galia - 20 mW.

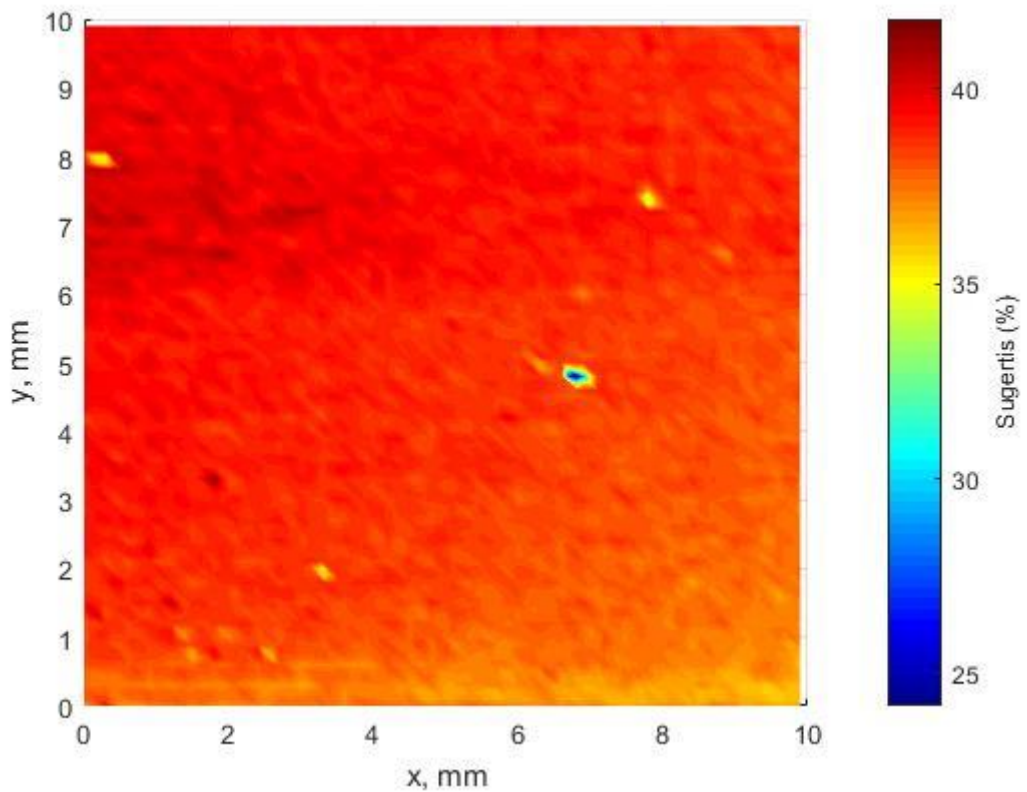


3.4 pav. Kalibracinio bandinio paviršiaus sugerties nuostoliai kai pagrinduko medžiaga - lydytas kvarcas (Corning 7980). Žadinimo spinduliuotė - 355 nm; vidutinė žadinimo spinduliuotės galia - 20 mW.

4.3. Homogeniškumo tyrimas

Tam, kad įvertinti lydyto kvarco (Corning 7980) kalibracinio bandinio paviršiaus sugerties nuostolių homogeniškumą skirtingose bandinio vietose, fototerminės interferometrijos metodu su 150 μm žingsniu buvo ištirtas 10 mm x 10 mm plotas. Gauti matavimo rezultatai pavaizduoti (3.5 pav.). Galima pastebėti, jog sugerties nuostolių pasiskirstymas per matuojamą plotą yra nevysiskai tolygus. Tai būtų galima sieti su tuo, jog chromo sugertis yra labai jautri jo sluoksnio storiui [28], kelių dešimtųjų nanometro dalių storio skirtumas lemia kelių procentų sugerties nuostolių skirtumus. Tad tikėtina, jog sluoksnio dengimo proceso metu, storis pasiskirstė netolygiai. Tačiau taip pat yra pastebimos ir ženkliai išsiskiriančios sugerties nuostolių vertės. Jas būtų galima sieti su lokaliu užteršimu ten kur vertės ženkliai padidėjusios. Sugerties nuostolių sumažėjimas, galėtų būti siejamas su plonesniu sluoksniu - galimai dėl kaupinančios spinduliuotės poveikio – abliacijos [29]. Tokie lokalūs kalibracinio bandinio paviršiaus pažeidimai galėjo atsirasti anksčiau dėl to, jog bandinys buvo ne kartą naudotas taikant įvairius lazerio pluošto parametrus. Dvimatis paviršiaus sugerties nuostolių matavimo panaudojimas norint įvertinti bandinio paviršiuje esančius defektus aprašytas ir [21] literatūroje.

Taigi, atliekant sistemos kalibravimą svarbu matavimus atlikti bandinio paviršiaus koordinatėje, kurioje sugerties nuostolių vertė yra gerai žinoma arba keliose vietose.



3.5 pav. Kalibracinio bandinio paviršiaus sugerties nuostoliai kai pagrinduko medžiaga lydytas kvarcas (Corning 7980). Matavimo plotas 10 mm x 10 mm. Žadinimo spinduliuotė - 355 nm; vidutinė žadinimo spinduliuotės galia - 20 mW.

4.4. Medžiagų atsako koeficientų R tyrimas

Kalibruojant sistemą tokiu pačiu būdu kaip ir lydyto kvarco (Corning 7980) atveju buvo eksperimentiškai įvertintos ir visų kalibracinių bandinių atsako koeficiento vertės R . Iš pradžių tyrimas atliktas pralaidumo režime (3.3 lent.), o vėliau – atspindžio (3.4 lent.).

3.3 lentelė. Kalibracinių bandinių atsako koeficiento R vertės matuojant pralaidume.

Medžiaga	Atsako koeficientas R
Lydytas kvarcas (Corning 7980)	9,65
Borosilikatinis stiklas (N-BK7)	7,15
CaF ₂	0,61
YAG	1,9
β -BBO	5,09
LBO	12,02
Kristalinis kvarcas	1,74

Norint nustatyti, kurie iš kalibracinių bandinių pagrindukų medžiagos termofizikiniai parametrai labiausiai lemia atsako koeficiento R vertę, buvo ieškoma koreliacijos: sudarytas tiesinio atsako modelis (3.1):

$$R_{(\text{modelis})} = A_1(-448051,1) \times C_{TE} + A_2(-60,63) \times \kappa + A_3(24,77) \times C + A_4(8,51) \times n + A_5(-21,46) \quad (3.1)$$

kur:

C_{TE} - šiluminio plėtimosi koeficientas, $^{\circ}\text{C}^{-1}$,

κ - Temperatūrinio laidumo koeficientas, cm^2/s ,

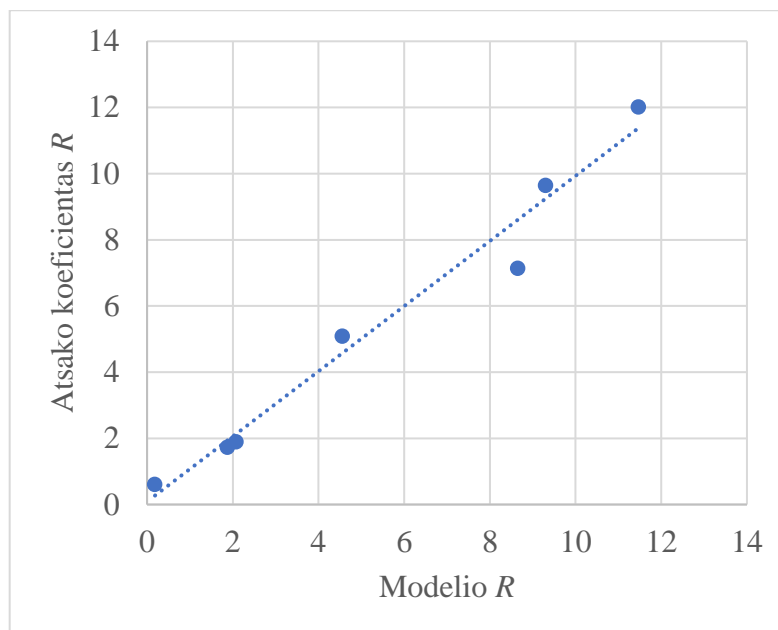
C - Santykinė šiluminė talpa, $\text{J}/(\text{g} \times \text{K})$,

n - lūžio rodiklis (ties 633 nm),

A_1, A_2, A_3, A_4, A_5 – modelio konstantos.

Modelio rezultatai pateikti palyginami su eksperimentinėmis vertėmis 3.6 pav. Tokiu būdu buvo identifikuoti keturi parametrai, darantys didžiausią įtaką atsako koeficientui R , tai - medžiagos šiluminio plėtimosi koeficientas, temperatūrinio laidumo koeficientas, santykinė šiluminė talpa bei lūžio rodiklis ties zondojuojančiu bangos ilgiu. Modelyje prie šiluminio plėtimosi koeficiento yra neigiama konstanta, tad jeigu medžiaga dėl temperatūrinio gradiento pasižymi plėtimusi, tai kuo didesnė šio koeficiento vertė, tuo labiau atsako koeficientas mažės. Temperatūrinio laidumo koeficientas modelyje taip pat turi neigiamą konstantą. Kadangi nagrinėjamų medžiagų atveju temperatūrinio laidumo koeficientas visada teigiamas, todėl šio koeficiento įtaka atsako koeficientui visuomet neigiama. Santykinės šiluminės talpos narys modelyje turi teigiamą konstantos vertę, kadangi ir pati santykinė šiluminė talpa nagrinėjamų medžiagų atveju visuomet teigiama, tad šis narys visuomet didins atsako koeficientą. Ketvirtasis narys priklauso nuo lūžio rodiklio ir koeficiento, kuris yra teigiamas, taigi šis narys taip pat didina atsako koeficientą R .

Atsižvelgiant į modeliavimo rezultatus, galima teigti, jog žinant nagrinėjamos medžiagos šiluminio plėtimosi koeficientą, temperatūrinio laidumo koeficientą, santykinę šiluminę talpą bei lūžio rodiklį ties zondojuojančiu bangos ilgiu, galima tam tikru tikslumu (modeliavimo metu gauta standartinio nuokrypio vertė lygi 0,68) prognozuoti atsako koeficientą R . O tai atveria galimybes vertinti bandinių sugerties nuostolius, neturint kalibracinių bandinių, pagamintų iš konkrečios tiriamo bandinio medžiagos.



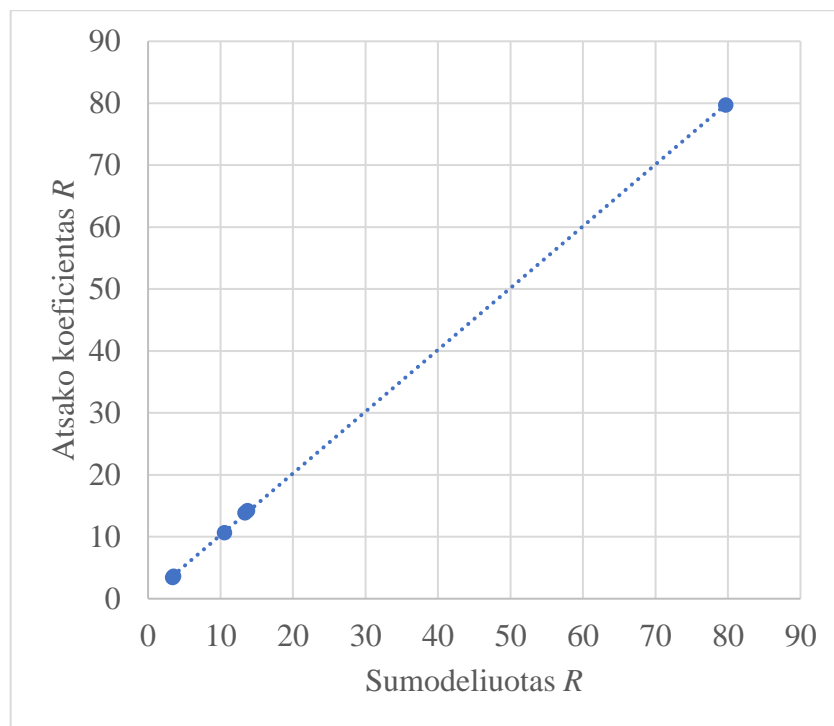
3.6 pav. Atsako koeficiento R modelio (pralaidumo režime), įvertinto iš medžiagos termofizikinių parametru, ir eksperimentiškai nustatytų R verčių palyginimas.

Kalibracinių bandinių atsako koeficiento vertės matuojant atspindžio režime pateiktos 3.4 lentelėje.

3.4 lentelė. Kalibracinių bandinių atsako koeficiento R vertės matuojant atspindžio režime.

Medžiaga	Atsako koeficientas R
Lydytas kvarcas (Corning 7980)	3,66
Borosilikatinis stiklas (N-BK7)	13,88
CaF ₂	10,67
YAG	3,43
β-BBO	79,72
Kristalinis kvarcas	14,24

Norint nustatyti, kurie kalibracinių bandinių medžiagų termofizikiniai parametrai labiausiai lemia atsako koeficiento R vertę ir atspindžio režime, buvo atliktas modeliavimas: surastas modelis (3.2), pasižymintis tiesine priklausomybe 3.8 pav.



3.8 pav. Atsako koeficiento modelio R atspindžio režime (įvertinant medžiagos termofizikinius parametrus) ir eksperimentiškai gautų R verčių palyginimas.

$$R_{(\text{modelis})} = B_1(-1449951) \times C_{TE} + B_2(-233,34) \times K + B_3(-2025033) \times dn/dT + B_4(14,97) \times \rho + B_5(-2,48) \quad (3.2)$$

C_{TE} - šiluminio plėtimosi koeficientas, $^{\circ}\text{C}^{-1}$,

K - šiluminio laidumo koeficientas, $\text{W}/(\text{cm} \times \text{K})$,

dn/dT - $^{\circ}\text{C}^{-1}$,

ρ - tankis, g/cm^3 ,

B_1, B_2, B_3, B_4, B_5 - modelio konstantos.

Buvo identifikuoti keturi parametrai, darantys didžiausią įtaką atsako koeficientui atspindyje, tai medžiagos šiluminio plėtimosi koeficientas, šiluminio laidumo koeficientas, dn/dT bei medžiagos tankis. β -BBO atsako koeficiento vertė ženkliai skiriasi nuo likusių tirtų bandinių, tai būtų galima paaiškinti tuo, jog vienintelio β -BBO šiluminio plėtimosi koeficientas turi ir neigiamas vertes. Prie šiluminio plėtimosi koeficiento esanti neigiama konstanta B_1 , β -BBO bandinio atveju didina atsako koeficiento vertę, tuo tarpu likusioms medžiagoms jautrumo koeficiento vertę mažina. Šiluminio laidumo koeficientas modelyje taip pat turi neigiamą konstantą, tačiau nagrinėjamų medžiagų atveju, šiluminio laidumo koeficientas visada

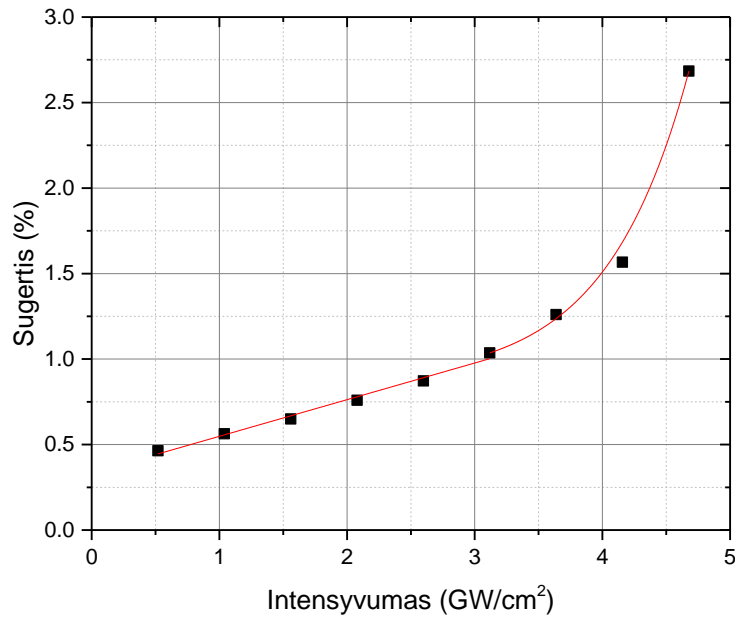
teigiamas, todėl šio koeficiento įtaka atsako koeficientui visuomet neigiama. Neigiamu dn/dT pasižymi trys medžiagos CaF_2 , $\beta\text{-BBO}$ ir kristalinis kvarcas, todėl modelyje esanti neigiama konstanta B_3 didina šių bandinių atsako koeficientą.

Taigi, atsižvelgiant į modeliavimo rezultatus, galima teigti, jog žinant nagrinėjamos medžiagos šiluminio plėtimosi koeficientą, šiluminio laidumo koeficientą, dn/dT bei medžiagos tankį, galima tam tikru tikslumu (modeliavimo metu gauta standartinio nuokrypio vertė lygi 0,31) įvertinti atsako koeficientą R atspindyje. O tai atveria galimybes vertinti neskaidrių bandinių paviršiaus sugerties nuostolius, neturint kalibracinių bandinių, pagamintų iš konkrečios tiriamo bandinio medžiagos.

Svarbu paminėti, jog atsakas pralaidumo ir atspindžio režimuose net ir esant tai pačiai pagrinduko medžiagai skiriasi. Iš sudarytų tiesinių atsako modelių galima teigti, jog atsako koeficiento vertei (o tuo pačiu ir fototerminiam atsakui) pralaidume ir atspindyje didžiausią įtaką daro skirtingas termofizikinių koeficientų rinkinys, o tai indikuoja nevienodai pasireiškiančius termofizikinius procesus.

4.4.1. Netiesinio atsako tyrimas

Siekiant pademonstruoti fototerminės interferometrijos metodo galimybes buvo atlikti ir papildomi netiesinių sugerties nuostolių tyrimai LBO kristalui su skaidrinančia danga (sudaryta iš Al_2O_3 ir SiO_2 sluoksnių panaudojant jonapluoštį dulkinimą), rezultatai pateikti 3.9 pav. Matavimai atlikti su 355 nm bangos ilgio, 10 ps trukmės, 1 MHz pasikartojimo dažnio žadinančia spinduliuote, kurios pluošto diametras bandinio paviršiuje buvo $70 \mu\text{m}$ $1/e^2$ lygyje. Smailinio intensyvumo intervale nuo 0,5 iki 3,1 GW/cm^2 pastebima tiesinė sugerties nuostolių priklausomybė (3.9 pav.). Atlikus duomenų ekstrapoliaciją, gauta, jog mažo intensyvumo žadinančiai spinduliuotei ($\sim 0 \text{ W}/\text{cm}^2$), paviršiaus sugerties nuostoliai siekia apie 0,33 %. Atspindžius mažinanti danga sudaryta iš SiO_2 bei Al_2O_3 , kai dengimo procesas atliktas tinkamai (pilna oksidacija) SiO_2 bei Al_2O_3 sluoksniai ties 355 nm bangos ilgio spinduliuote turėtų praktiškai nesugerti šviesos [23, 24]. Visgi, įvertintus paviršiaus sugerties nuostolius, galėjo lemti netobulas dengimo procesas (pavyzdžiui nepilna oksidacija [17]), taip pat LBO kristalo nepakankama paviršiaus švara prieš dengimą.



3.9 pav. LBO kristalo paviršiaus, padengto skaidrinančia danga, sugerties nuostolių priklausomybė nuo smailinio intensyvumo.

Matuota su 355 nm, 10 ps, 1 MHz, 70 μm 1/e² lygyje.

Analizuojant 3.9 pav. pateiktus matavimų rezultatus matoma, jog viršijus 3,1 GW/cm² žadinančios spinduliuotės smailinį intensyvumą, sugerties nuostolių kitimas tampa netiesinis. Netiesinės sugerties pasireikimą galėtume sieti su daugiafotone sugertimi [30]. Krintanti intensyvi 355 nm bangos ilgio spinduliuotė, kurios fotono energija yra apie 3,5 eV, dėl dvifotonės sugerties gali būti sugerta LBO kristalo paviršių dengiančios Al₂O₃ medžiagos sluoksnyje (draustinės juostos plotis apie 6,5 eV [25]). Dvifotonės sugerties atveju, sugerties nuostolių koeficientas su pastoviąja ir kintama dedamosiomis aprašomas išraiška (3.3), kur α – pastoviosios sugerties koeficientas, β – dvifotonės sugerties koeficientas, o I – spinduliuotės intensyvumas [30].

$$\alpha(I) = \alpha + \beta \times I \quad (3.3)$$

Taigi esant intensyviai spinduliuotei, bandinio paviršiaus sugertis dėl netiesinės sugerties nuostolių dedamosios gali padidėti nuo kelių dešimtųjų procento dalių iki kelių procentų. O tai savo ruožtu gali turėti nepageidaujamos įtakos optinio elemento taikyme, pavyzdžiui tai gali pasireikšti, kaip lazerinės spinduliuotės intensyvumo sumažėjimas. O netiesinių kristalų, tokių kaip LBO, atveju, dėl ženklios sugerties ir dėl to padidėjusios elemento temperatūros, gali pasikeisti fazinio sinchronizmo sąlygos, ir dėl to pakisti konversijos efektyvumas [7].

5. Pagrindiniai rezultatai ir išvados

1. Pagaminus specialius kalibracinius bandinius (iš lydyto kvarco (Corning 7980) ir borosilikatinio (N-BK7) stiklų bei CaF_2 , IAG, β -BBO, LBO, kvarco kristalinių pagrindu su dalinai pralaidžiomis chromo dangomis) pavyko eksperimentiškai įvertinti šių medžiagų fototerminio atsako koeficiento vertes R , o atlikus preliminarią analizę identifikuoti ir jų sąsają su medžiagos parametrais. Nustatyta, kad fototerminio atsako skirtumai atspindžio režime pasireiškia daugiausiai dėl medžiagos šiluminio plėtimosi koeficiento, šiluminio laidumo koeficiento, dn/dT bei medžiagos tankio indėlio į fototerminį atsaką, o pralaidumo režime didžiausius skirtumus lemia – medžiagos šiluminio plėtimosi koeficientas, temperatūrinio laidumo koeficientas, santykinė šiluminė talpa bei lūžio rodiklis ties zondojuojančiu bangos ilgiu.
2. Tarpusavyje lyginant lydyto ir kristalinio kvarco (R atitinkamai 3,66 ir 14,24 - atspindžio režime bei 9,65 ir 1,74 – pralaidumo režime) medžiagas, akivaizdu, kad ne tik cheminė medžiagos sandara, bet ir kristalinis būvis lemia fototerminio atsako skirtumus.
3. Pademonstruota, kad apjungus itin dideliu jautrumu pasižyminčią bendrojo kelio interferometrijos sugerties nuostolių vertinimo metodiką su didelio pasikartojimo dažnio (MHz) ir itin aukštos smailinės galios lazeriniu šaltiniu galima kiekybiškai apibūdinti ne tik pastoviąją sugerties nuostolių dalį bet ir netiesinius sugerties nuostolius skaidriose optinėse dangose. Eksperimentiškai nustatyta, kad didinant smailinį intensyvumą nuo 3,1 iki 4,7 GW/cm^2 LBO kristalo skaidrinančios dangos (Al_2O_3 ir SiO_2) sluoksniuose sugerties nuostoliai gali išaugti nuo 1,04 iki 2,68 % dėl daugiafotonės sugerties indėlio.

Padėka

Už šiam tyrimui suteiktus bandinių substratus autorius dėkoja įmonėms UAB Altechna, UAB Lidaris ir UAB Optolita, o už jų padengimą chromo dangomis - M. Jupe iš Laser Zentrum Hannover LZH, Vokietija. Taip pat autorius dėkoja VU FF LTC dokt. E. Atkočaičiui už visokeriopą pagalbą įsisavinant tyrimų metodiką.

6. Literatūros sąrašas

- [1] W. Koechner, „Solid-State Laser Engineering“, 6th edition, Springer (2006). ISBN-10: 0-387-29094-X
- [2] Stanford Photo-Thermal Solutions, Photothermal System Manual, (2019), <https://stan-pts.com/blog1/2019/06/21/updated-generic-manual/> (stebėta 2022-02-28)
- [3] N.K. Sahoo et al., „Laser calorimeter for UV absorption measurement of dielectric thin films“, APPLIED OPTICS, **31**, 28 (1992).
- [4] R. D. Snook et al., „Thermal lens spectrometry. A review“, Analyst, **120** (1995).
- [5] A. Alexandrovski et al., „Photothermal common-path interferometry (PCI): new developments“, Proc. SPIE 7193, Solid State Lasers XVIII: Technology and Devices, 71930D (2009). <https://doi.org/10.1117/12.814813>
- [6] J. D. Beasley, „Thermal conductivities of some novel nonlinear optical materials“, APPLIED OPTICS, **33**, No. 6 (1994).
- [7] D. N. Nikogosyan, „Nonlinear Optical Crystals: A Complete Survey“, Springer (2005). ISBN: 0-387-22022-4.
- [8] Corning HPFS 7979, 7980, 8655 Fused Silica, Optical Materials Product Information, https://www.corning.com/media/worldwide/csm/documents/HPFS_Product_Brochure_All_Grades_2015_07_21.pdf (stebėta 2022-02-25)
- [9] SCHOTT N-BK7 data sheet, <https://www.schott.com/shop/advanced-optics/en/Optical-Glass/SCHOTT-N-BK7/c/optical-glass/glass-SCHOTT%20N-BK7%c2%ae> (stebėta 2022-02-25)
- [10] Hellma Materials Calcium Fluoride data sheet, <https://www.hellma.com/en/crystalline-materials/optical-materials/caf2/> (stebėta 2022-02-25)
- [11] Crystran Ltd, Yttrium Aluminium Garnet (YAG) data sheet, <https://www.crystran.co.uk/optical-materials/yttrium-aluminium-garnet-yag> (stebėta 2022-02-25)
- [12] http://www.biofotonika.ff.vu.lt/wp-content/uploads/2013/02/Sugerties_teorija.pdf (stebėta 2022-02-28)

- [13] Crystran Ltd, Quartz Crystal (SiO₂) data sheet, <https://www.crystran.co.uk/optical-materials/quartz-crystal-sio2> (stebėta 2022-02-25)
- [14] O. Balachninaite et al., Lazerinė technologija, Vilniaus universiteto leidykla (2008)
- [15] M. Fejer et al., „Study of Photorefractive Effects in Periodically-Poled Lithium Niobate“, (1998) <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADA372478.pdf> (stebėta 2022-03-01)
- [16] S. Jena et al., „Characterization of Optical Thin Films by Spectrophotometry and Atomic Force Microscopy“, SMC Bulletin, **6**(1) (2015).
- [17] K. Juškevičius et al., „Argon plasma etching of fused silica substrates for manufacturing high laser damage resistance optical interference coatings“, OPTICAL MATERIALS EXPRESS, **7**, 10 (2017).
- [18] O. Stenzel et al., „The correlation between mechanical stress, thermal shift and refractive index in HfO₂, Nb₂O₅, Ta₂O₅ and SiO₂ layers and its relation to the layer porosity“, Thin Solid Films **517** p 6058–6068 (2009).
- [19] T. I. Suratwala, „Materials Science and Technology of Optical Fabrication“, Wiley (2018).
- [20] J. Wang et al., „Evaluating subsurface damage in optical glasses“, Journal of the European Optical Society - Rapid Publications **6**, p. 11001 (2011).
- [21] M. Commandre et al., „Characterization of optical coatings by photothermal deflection“, Applied Optics, **35**(25) (1996).
- [22] A. Dubietis, Netiesinė optika, vadovėlis, Vilniaus universitetas, Vilniaus universiteto leidykla (2011).
- [23] <https://materion.com/resource-center/newsletters/newsletter-archives/coating-materials-news-2000-to-2010/silicon-dioxide-sio2-for-optical-coating> (stebėta 2022-03-21)
- [24] <https://materion.com/resource-center/product-data-and-related-literature/inorganic-chemicals/oxides/aluminum-oxide-al2o3-for-optical-coating> (stebėta 2022-03-21)
- [25] L. Gallais et al., „Laser-induced damage thresholds of bulk and coating optical materials at 1030 nm, 500 fs“, Applied Optics, **53**(4) (2014).

- [26] M. Leidinger et al., „Comparative study on three highly sensitive absorption measurement techniques characterizing lithium niobate over its entire transparent spectral range“, OPTICS EXPRESS, **23**(17) (2015).
- [27] P.K. Kuo et al., „Single-beam interferometry of thermal bump“, Applied Optics, **29**(36) (1990).
- [28] Chromium <https://refractiveindex.info/?shelf=main&book=Cr&page=Johnson> (steβeta 2022-03-14)
- [29] S. K. Lee et al., „Excimer laser ablation removal of thin chromium films from glass substrates“, Surface and Coatings Technology 113, 63–74 (1999).
- [30] I. Vershinin et al., „Anisotropy of nonlinear optical absorption of LBO crystals at 355 nm“, Optics Letters, **43**(1) (2018).

Santrauka

Darius Šilinskis

SUGERTIES NUOSTOLIŲ TYRIMAS OPTINĖSE DANGOSE, PANAUDOJANT FOTOTERMINĖS INTERFEROMETRIJOS METODĄ

Fototerminės interferometrijos metodas, leidžia tiksliai įvertinti optinių elementų paviršiaus sugerties nuostolius ir atveria galimybes šių elementų tobulinimui, o tuo pačiu ir galingų lazerinių sistemų vystymui. Optinių elementų, kurių pagrindukai pagaminti iš skirtingų medžiagų, fototerminis atsakas skiriasi, todėl norint kuo tiksliau įvertinti tokių elementų paviršiaus sugerties nuostolius fototerminės interferometrijos metodu, reikia turėti ir specialius kalibracinius bandinius, pagamintus iš atitinkamos medžiagos. Būtent šis poreikis ir lėmė šio darbo tikslą: ištirti fototerminio atsako funkcijas populiariausiose skaidriose optinėse terpėse ir nustatyti jų galimą ryšį su tiriamų medžiagų termofizikiniais parametrais.

Pagaminus specialius kalibracinius bandinius (iš lydyto kvarco (Corning 7980) ir borosilikatinio (N-BK7) stiklų bei CaF_2 , IAG, β -BBO, LBO, kvarco kristalinių pagrindukų su dalinai pralaidžiomis chromo dangomis) pavyko eksperimentiškai įvertinti šių medžiagų fototerminio atsako koeficiento vertes R , o atlikus preliminarią analizę identifikuoti ir jų sąsają su medžiagos parametrais. Nustatyta, kad fototerminio atsako skirtumai atspindžio režime pasireiškia daugiausiai dėl medžiagos šiluminio plėtimosi koeficiento, šiluminio laidumo koeficiento, dn/dT bei medžiagos tankio indėlio į fototerminį atsaką, o pralaidumo režime didžiausius skirtumus lemia – medžiagos šiluminio plėtimosi koeficientas, temperatūrinio laidumo koeficientas, santykinė šiluminė talpa bei lūžio rodiklis ties zonduojančiu bangos ilgiu.

Tarpusavyje lyginant lydyto ir kristalinio kvarco (R atitinkamai 3,66 ir 14,24 - atspindžio režime bei 9,65 ir 1,74 – pralaidumo režime) medžiagas, akivaizdu, kad ne tik cheminė medžiagos sandara, bet ir kristalinis būvis lemia fototerminio atsako skirtumus.

Pademonstruota, kad apjungus itin dideliu jautrumu pasižyminčią bendrojo kelio interferometrijos sugerties nuostolių vertinimo metodiką su didelio pasikartojimo dažnio (MHz) ir itin aukštos smailinės galios lazeriniu šaltiniu galima kiekybiškai apibūdinti ne tik pastoviąją sugerties nuostolių dalį bet ir netiesinius sugerties nuostolius skaidriose optinėse dangose. Eksperimentiškai nustatyta, kad didinant smailinį intensyvumą nuo 3,1 iki 4,7 GW/cm^2 LBO kristalo skaidrinančios dangos (Al_2O_3 ir SiO_2) sluoksniuose sugerties nuostoliai gali išaugti nuo 1,04 iki 2,68 % dėl daugiafotonės sugerties indėlio.

Summary

Darius Šilinskis

INVESTIGATION OF ABSORPTION LOSS IN OPTICAL COATINGS USING PHOTOTHERMAL INTERFEROMETRY

Photothermal response of various materials differs and precise measurement of surface absorption using the photothermal common-path interferometry (PCI) technique requires calibration samples made of investigative material. For this purpose, calibration samples of various substrate materials (glass and crystals) with a coated thin semi-transparent chromium layer were made and the photothermal response using 355 nm pump wavelength was investigated.

Responsivity values of calibration samples made of glass (fused silica, borosilicate) and crystals (CaF_2 , YAG, β -BBO, LBO, crystalline quartz) were investigated in reflection and transmission modes. Further analysis and modelling showed the dependency of thermophysical parameters of material with measured responsivity value. It was found that responsivity in reflection mode mostly depends on thermal expansion, thermal conductivity, dn/dT and density of the material while in transmission mode responsivity mostly depends on thermal expansion, thermal diffusivity, specific heat and refractive index at probe wavelength.

If compared responsivity values of fused silica and crystalline quartz in reflection (R for fused silica 3.66, crystalline quartz 14.24) and transmission (R for fused silica 9.65, crystalline quartz 1.74) modes, it's evident that not only the chemical composition of the material but also the crystalline state impacts photothermal responsivity.

It is shown, that using the photothermal common-path interferometry technique with a high repetition rate (MHz) and high peak power laser source, it's possible to estimate not only linear absorption term but also a nonlinear response. For that reason, intensity-dependent nonlinear absorption of LBO crystal surface coated with anti-reflection coatings (Al_2O_3 and SiO_2) was measured. From the results, it's observed that with increasing peak intensity from 3.1 to 4.7 GW/cm^2 , surface absorption losses increase from 1.04 to 2.68 % which could be attributed to two-photon absorption.