

VILNIAUS UNIVERSITETAS
FIZIKOS FAKULTETAS
LAZERINIŲ TYRIMŲ CENTRAS

Mindaugas Skirgaila

**Optinių skaidulų fotoelastinių savybių tyrimai ir panaudojimas šviesos
moduliavimui**

Lazerinė fizika ir optinės technologijos studijų programos

Magistro baigiamasis darbas

Studentas

Mindaugas Skirgaila

Darbo vadovas

Dr. Julijanas Želudevičius

Recenzentas

Dr. Julius Vengelis

Lazerių tyrimų centro direktorius

Doc. Dr. Rytis Butkus

Vilnius, 2019

Turinys

Įvadas	3
1. Literatūros apžvalga	4
1.1 Spinduliuotės sklidimas optinėse skaidulose	4
1.2 Skaidulų rūšys	7
1.2.1 Poliarizaciją išlaikančios skaidulos	7
1.3 Kvarcinio stiklo skaidulų elastinių ir fotoelastinių savybių aprašymas	8
1.4 Šviesos fazės ir intensyvumo moduliavimo būdų apžvalga	9
1.4.1 Elektrooptiniai modulatoriai	9
1.4.2 Skaidulos su indukuotu antros eilės netiesiškumu	10
1.4.3 Akustooptiniai modulatoriai	10
1.5 Interferencinis atstumo ir šviesos fazės poslinkio matavimas	11
2. Tyrimo schemos ir metodika	13
2.1 Optinės skaidulos elastinių ir fotoleastinių savybių tyrimo schemos	13
2.2 Fazės poslinkio matavimo metodika ir sistemos suderinimo patikrinimas	14
2.3 Skaidulinio fazės modulatoriaus su pjezoelektriniu aktuatoriumi sandara	15
3. Tyrimų rezultatai	17
3.1 Optinės fazės poslinkio matavimas priklausomai nuo skaidulos be polimerinio apvalkalo geometrinio ištempimo	17
3.2 Optinės fazės poslinkio matavimas priklausomai nuo skaidulos su polimeriniu apvalkalu geometrinio ištempimo	18
3.4 Optinės fazės poslinkio matavimas priklausomai nuo skaidulos tempimo jėgos	19
3.5 Skaidulinio fazės modulatoriaus su pjezoelektriniu aktuatoriumi tyrimo rezultatai.	20
Pagrindiniai rezultatai ir išvados	23
Literatūros šaltinių sąrašas.....	24
SANTRAUKA	26
SUMMARY	27

Įvadas

Kuriant šviesolaidinius lazerius dažnai siekiama, kad optinę grandinę sudarytų tik visiškai skaiduliniai komponentai. Atskiros optinės skaidulos suvirinamos į vientisą skaidulinę grandinę sudarančią lazerį. Tokia architektūra užtikrina rekordinį sistemos atsparumą išoriniam poveikiui, eliminuojant bet kokio išsiderinimo galimybę. Tačiau šios koncepcijos įgyvendinimui reikalingi yra įvairūs pilnai skaiduliniai optiniai komponentai. Viena iš tokių komponentų grupių, kuriai pilnai skaiduliniai sprendiniai dar neišdirbti, yra optinės fazės ir intensyvumo modulatoriai. Šiuo metu komerciškai yra prienami (ir dėl to plačiausiai naudojami) fazės modulatoriai, kurių veikimas remiasi elektrooptiniu efektu netiesiniame kristale. Intensyvumo moduliavimui plačiausiai yra naudojami elektrooptiniai arba akustooptiniai modulatoriai su skaidulinėmis atšakomis. Tačiau visi tokie įrenginiai nėra pilnai skaiduliniai – spinduliuotė iš skaidulinės atšakos turi būti nukreipiama į tam tikrą aktyvų elementą ir vėliau įvedama atgal į kitą skaidulinę atšaką. Dėl to, tokių įrenginių sandara yra pakankamai sudėtinga ir reikalaujanti precizinio suderinimo, o tai kartu reiškia ir aukštą įrenginio kainą. Pakankamai perspektyvūs yra pilnai skaiduliniai fazės (intensyvumo) modulatoriai, kuriuose yra naudojamos skaidulos su indukuotu antros eilės netiesiškumu [1]. Deja, ši technologija dar yra tik vystymo stadijoje.

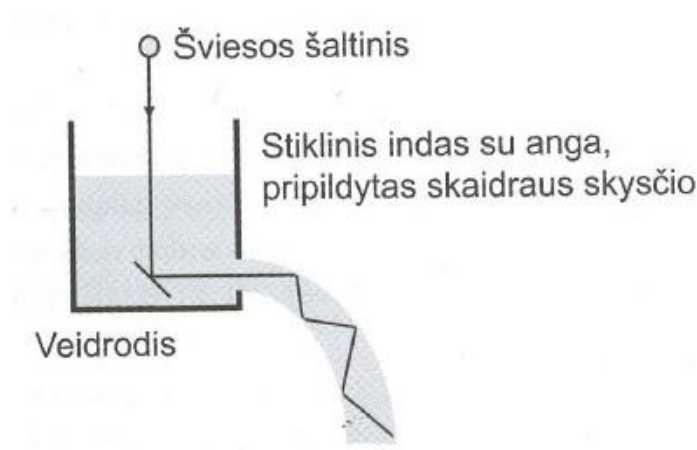
Atsižvelgiant į pilnai skaidulinių moduliatorių poreikį, šiame darbe buvo siekiama sudaryti ir ištirti fazės (ir intensyvumo) moduliatorių, paremtą optinės skaidulos elastinėmis ir fotoelastinėmis savybėmis. Moduliavimui buvo norima panaudoti pjezoelektrinį elementą. Šiuo metu tokių elementų technologijos yra gerai išvystytos ir mažų matmenų aktuatoriai pasiekia pakankamai dideles veikimo spartas. Todėl šiame darbe buvo norima ištirti tokiu pagrindu veikiančio modulatoriaus sudarymo galimybes ir pasiekiamas charakteristikas. Šiam tikslui pasiekti buvo suformuluotos žemiau pateiktos užduotys:

- Ištirti poliarizaciją išlaikančioje skaiduloje indukuojamą optinės fazės poslinkį priklausomai nuo išilginio ištempimo.
- Ištirti poliarizaciją išlaikančioje skaiduloje indukuojamą optinės fazės poslinkį priklausomai nuo tempimo jėgos.
- Remiantis optinės skaidulos elastinių ir fotoelastinių savybių tyrimo rezultatais, parinkti pjezoelektrinį elementą moduliatoriui.
- Sudaryti fazės moduliatorių su pjezoelektriniu elementu.
- Ištirti sudaryto modulatoriaus charakteristikas.

1. Literatūros apžvalga

1.1 Spinduliuotės sklidimas optinėse skaidulose

Pirmą kartą 1841 m. Šveicarijoje Danielis Koladonas (*Daniel Colladon*) pademonstravo eksperimentą, kuriame šviesa sklinda skaidriame dielektrike, kurio lūžio rodiklis didesnis negu išorinės terpės [2]. Šioje demonstracijoje buvo naudojama talpa, su skylė šone, pripildyta skysčio ir ant dugno įtaisytu veidrodėliu. Leidžiant šviesos pluoštą statmenai skysčio paviršiui ir jam atsispindėjus nuo veidrodėlio dugne, pluoštas buvo nukreipiamas skylės link į išorę, kur skystis išteka iš indo. Toliau pluoštas sklido nebe tiesia trajektorija bet atsispindėdamas nuo skysčio ir oro ribos. Taigi, pluoštas sklido skysčio suformuotoje čiurkšlėje.



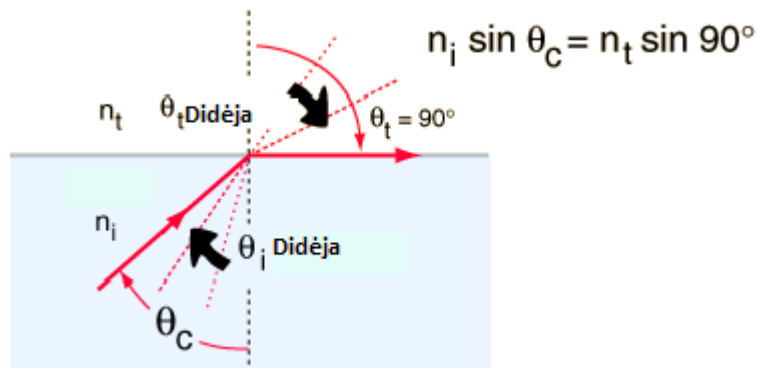
1 pav. Bangolaidinis šviesos sklidimas vandens čiurkšlėje [2].

Šviesos lūžio ir atspindžio dėsniai buvo nagrinėjami jau daugiau nei prieš tūkstantį metų. Tai bandė aprašyti Ibn Sahl, tačiau tikslus lūžio ir atspindžio aprašymas išvydo dienos šviesą tik po 600 metų. Jį pateikė V. Snelijus (Willebrord Snellius), kuris suformulavo dėsnį: kai šviesa krinta į dviejų skirtingų skaidrių terpių skiriamąją ribą, jos dalis atsispindi, o kita dalis pereina į kitą terpę [2]. Krintančio (α_1) ir lūžusio (α_2) spindulių sklidimo kampai abiejose terpėse yra susieti su terpių lūžio rodikliais n_1 , n_2 tokiu dėsniu:

$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad (1.1)$$

Krintant šviesai iš optiškai tankesnės terpės į optiškai retesnę (t.y. iš didesnio į mažesnio lūžio rodiklio terpės), tam tikru kampu į skiriamąją ribą kritęs spindulys sklinda optinių terpių skiriamąją ribą, tai vadinama visiškuoju vidaus atspindžiu. Kritimo kampas α_1 , kai lūžęs spindulys eina optinių terpių skiriamąją ribą, yra vadinamas visiškojo vidaus atspindžio kritimo

kampu – $\sin \alpha_2 = 1$. Įrašius šią sąlygą į (1.1) išraišką, kritinis kampas gali būti išreikštas taip:
 $\sin \alpha_{krit} = \frac{n_2}{n_1}$.

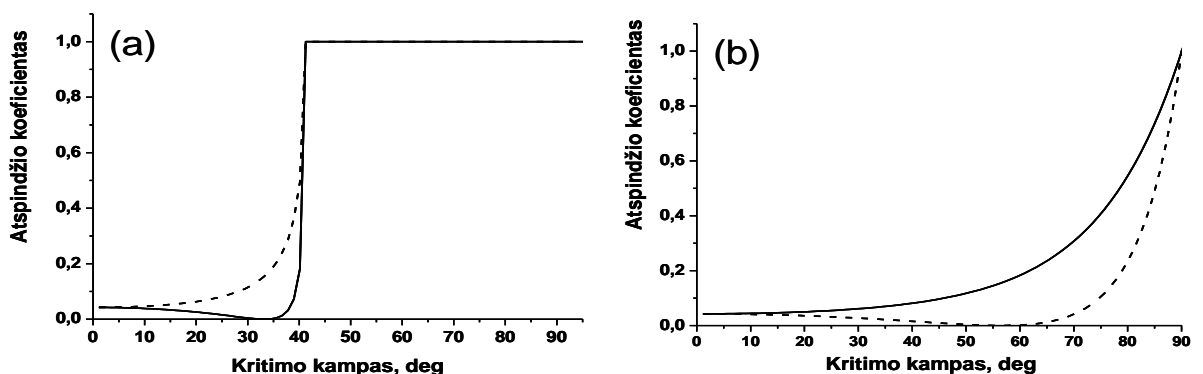


2 pav. Visiškas vidaus atspindys prie dviejų skaidrių terpių ribos ($n_i > n_t$) [3].

Naudojant poliarizuotą šviesą, skirtinga poliarizacija turi nevienodą atspindžio koeficientą priklausomai nuo kritimo kampo į paviršių [3]. Statmenosios (\perp) ir lygegrečiosios (\parallel) (kritimo plokštumai) elektromagnetinės spinduliuotės atspindžio priklausomybę aprašo A. Frenelio (Augustin Jean Fresnel) formulės [2]:

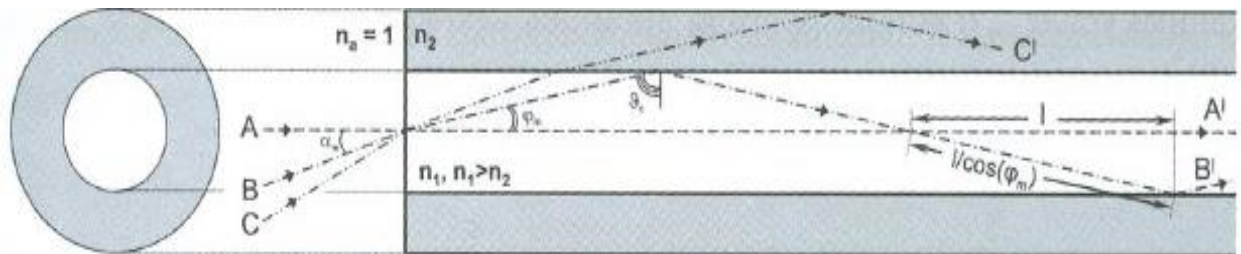
$$R_{\parallel} = \frac{E_{10}^{\parallel}}{E_{00}^{\parallel}} = \frac{\tan(\alpha_1 - \alpha_2)}{\tan(\alpha_1 + \alpha_2)} = \frac{\sin 2\alpha_1 - \sin 2\alpha_2}{\sin 2\alpha_1 + \sin 2\alpha_2} = \frac{\sin 2\alpha_1 \cos \alpha_1 - \sin 2\alpha_2 \cos \alpha_2}{\sin 2\alpha_1 \cos \alpha_1 + \sin 2\alpha_2 \cos \alpha_2}, \quad (1.2)$$

$$R_{\perp} = \frac{E_{10}^{\perp}}{E_{00}^{\perp}} = \frac{\sin(\alpha_1 - \alpha_2)}{\sin(\alpha_1 + \alpha_2)} = \frac{\sin \alpha_1 \cos \alpha_2 - \sin \alpha_2 \cos \alpha_1}{\sin \alpha_1 \cos \alpha_2 + \sin \alpha_2 \cos \alpha_1},$$



3 pav. Atspindžio koeficiento priklausomybė nuo dviejų skaidrių terpių ribos dviem skirtingų poliarizacijų bangoms (a) kai $n_1 > n_2$ stiklas – oras; b) $n_1 < n_2$ oras – stiklas). Ištisa linija atitinka \perp poliarizacijos bangą, punktyrinė – \parallel bangą [2].

3 paveiksle grafiškai atvaizduotos apskaičiuotos atspindžio nuo dviejų skaidrių aplinkų ribos koeficiento priklausomybės skirtingų poliarizacijų bangoms, kurios aprašytos Frenelio formulėmis (1.2). Iš grafikų matyti, jog skirtingų poliarizacijų atspindžio koeficientas skiriasi priklausomai nuo kampo. Sklandant lygiagrečiai (p) poliarizuotai bangai iš optiškai tankesnės terpės į optiškai retesnę yra toks kritimo kampas, kai ji nėra atspindima ir gali be nuostolių praeiti skiriamąją terpę. Šio kampo vertė lygi $\sim 34^\circ$. O atveju, kai spinduliuotė sklinda iš optiškai retesnės į optiškai tankesnę terpę, šis kampas lygus $\sim 56^\circ$. Toks kampas yra vadinamas Brewsterio kampu.



4 pav. Šviesos sklidimas skaiduloje (A – „trumpiausias“ kelias; B – „ilgiausias“ kelias; C – neatitinkantis visiškojo vidaus atspindžio spindulys) [2].

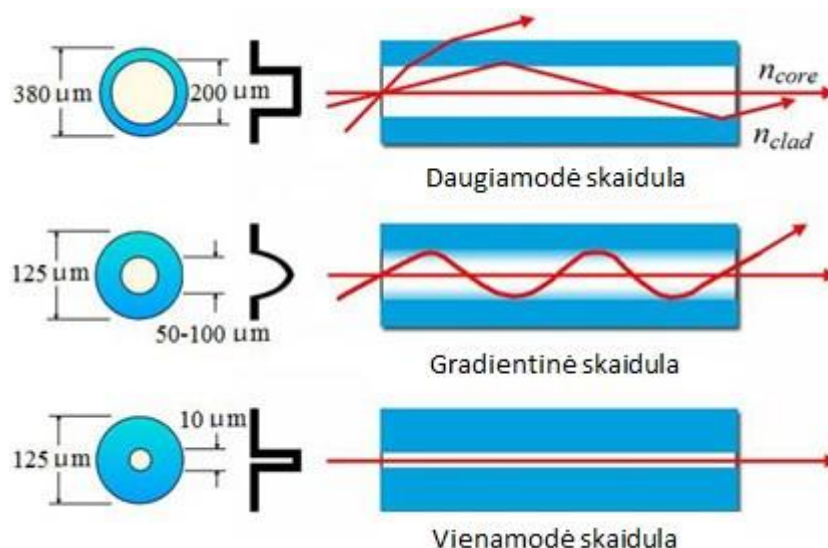
4 paveiksle pavaizduota paprasčiausios cilindro formos skaidula, kuri sudaryta iš šerdies su lūžio rodikliu n_1 ir apvalkalo su lūžio rodikliu n_2 ($n_1 > n_2$). Spinduliai patekę į skaidulą (4 pav.) sklinda daug kartų atsispindėdami nuo skiriamosios ribos šerdis–apvalkalas. Tuo atveju, yra svarbu koku kampu yra įvedinėjama šviesa į skaidulą. Ji turi tenkinti visiškojo vidaus atspindžio dėsnį. Jei kritimo α_m kampas bus didesnis negu vertė tenkinanti visiško vidaus atspindžio sąlygas, spinduliuotė neskliks skaidula. Spinduliuotės įvedimo į skaidulą apibrėžia parametras skaitinė apertūra, kuris aprašomas formule:

$$NA = n_0 \sin \theta = \sqrt{n_{core}^2 - n_{clad}^2} \quad (1.3)$$

kur n_0 aplinkos lūžio rodiklis, θ spindulio kritimo į skaidulos galą kampas, n_{core} – šerdies lūžio rodiklis, o n_{clad} – apvalkalo lūžio rodiklis. Skaitinė apertūra nusako, koku maksimaliu kampu šviesa gali būti įvedama į skaidulą. Paprastai vienamodės skaidulos skaitinės apertūros vertės būna 0,1 eilės, bet iš esmės gali kisti plačiame diapazone. Daugiamodės skaidulos tipinė skaitinės apertūros vertė 0,3, bet praktikoje dažnai naudojami ir didesnių – 0,45 ir 0,6 skaitinių apertūrų skaidulos. Skaitinė apertūra priklauso nuo šerdies ir apvalkalo lūžio rodiklio skirtumo, dėl to keičiant medžiagas, iš kurių pagaminti apvalkalas ir šerdis, galima derinti skaidulos NA.

1.2 Skaidulų rūšys

Priklausomai nuo skaidulos šerdies diametro, joje gali sklirti skirtingas modų skaičius. Pagal tai skaidulos skirstomos į vienamodes ir daugiamodes (5 pav.). Daugiamodėse skaidulose šerdies diametras yra pakankamai didelis, todėl jose gali susižadinti kelios skersinės modos pasižyminčioms skirtingomis sklidimo konstantomis. Dėl skirtingų sklidimo konstantų, tokios modos skaidulos galą pasiekia skirtingais laiko tarpais. Vienamodėse skaidulose šerdies diametras yra toks mažas, kad jame gali sklirti tik viena moda. Be šių dviejų tipų reikėtų paminėti ir gradientines skaidulas, kuriose gali sklirti daug modų, bet dėl gradientinio lūžio rodiklio pasiskirstymo šerdyje, tarpmodinė dispersija yra kompensuojama.



5 pav. Optinių skaidulų rūšys priklausomai nuo skaidulų šerdies konfigūracijos [4].

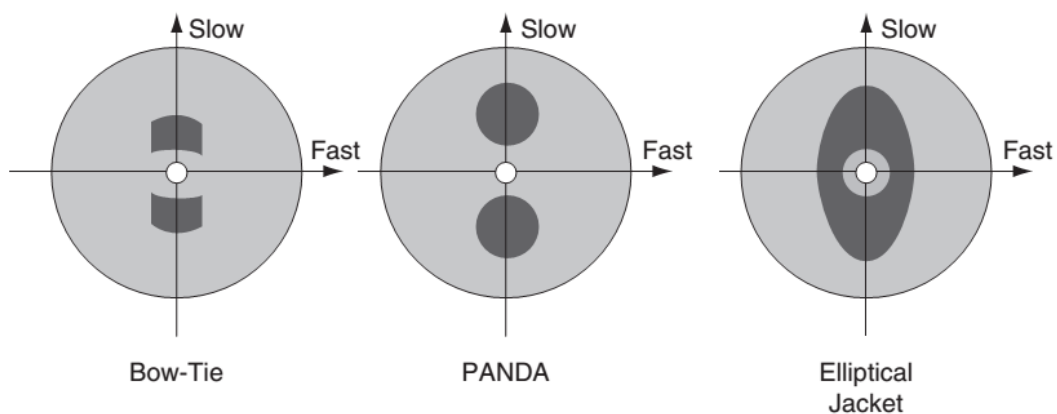
1.2.1 Poliarizaciją išlaikančios skaidulos

Idealiausiu atveju vienmodėje skaiduloje, pasižyminčioje apskritimine simetrija, sklindant tiesiškai poliarizuotai šviesai, jos poliarizacija turi išsilaikyti ir likti nepakitusi. Tačiau gamybos proceso metu ar naudojimo metu neišvengiamai atsiranda geometriniai netobulumai arba įtempimai, lemiantys lūžio rodiklio pokyčius ir pažeidžiantys simetriją ir sukuriantys dvejopalauiškumą. Dėl to sklindančios šviesos poliarizacija kinta [5]. Šis poliarizacijos kitimas, pasižymi periodiškumu – iš tiesinės į elipsinę, toliau į apskritimą, į statmenai orientuotą tiesinę ir t.t. Atstumas, atitinkantis vieną poliarizacijos kitimo periodą, yra vadinamas mušimų ilgiu (angl. beat length) [6]:

$$L_B = \frac{\lambda}{B} \quad (1.4)$$

čia $B = |n_x - n_y|$ yra dvejetainis parametras, n_x ir n_y žymi efektyvų lūžio rodiklį dviem statmenomis kryptimis x ir y poliarizuotoms modoms.

Siekiant pagerinti poliarizacijos išlaikymą skaidulose buvo sukurtos didelio dvejetainis skaidulos, kuriose yra suformuotos dvi ašys: greitoji ir lėtoji (6 pav.). Jose yra specialiai suformuojamos eliptinės formos šerdys arba įterpiama kitų medžiagų, kurios suformuotu įtempimus skaiduloje. Jei pradinės šviesos poliarizacija sutampa su viena iš šių ašių, tai tokiu atveju šviesos sklidimo metu poliarizacija nesikeičia. Plačiausiai naudojamos poliarizaciją išlaikančios skaidulos: „Panda“, „Bow-Tie“, Elliptical Jacket“ (6 pav.).



6 pav. Poliarizaciją išlaikančių „Bow-Tie“, „Panda“, Elliptical Jacket“ skaidulų skerspjūvių iliustracijos

1.3 Kvarcinio stiklo skaidulų elastinių ir fotoelastinių savybių aprašymas

Veikiant kvarcinio stiklo skaidulą tam tikra jėga nukreipta išilgai simetrijos ašies, skaidula yra deformuojama. Tiesinės deformacijos artinyje, gaunamas skaidulos išilginis pailgėjimas (ΔL) tempiant yra proporcingas veikiančiai jėgai (F):

$$\Delta L = \frac{F}{A \cdot E} L \quad (1.5)$$

Čia A – skaidulos skerspjūvio plotas, E – medžiagos Jungo modulis, L – skaidulos atkarpos ilgis (veikiamos jėgos).

Tokio pailgėjimo poveikis skaidula sklindančios šviesos fazei pasireiškia dvejopai: per geometrinį sklidimo kelio pailgėjimą ir įtempimų sukeltą lūžio rodiklio pokytį [7], [8]:

$$\Delta\varphi = k(n\Delta L + \Delta nL) = kn\Delta L \left(1 - \left(\frac{n^2}{2}\right) (p_{12} - v(p_{11} + p_{12})) \right) \quad (1.6)$$

čia $k = 2\pi/\lambda$ – bangos skaičius, λ – bangos ilgis vakuume, n – lūžio rodiklis, p_{11}, p_{12} – elastooptiniai koeficientai, v – Puasono santykis.

Formulę (1.6) galime perrašyti pakeisdami lūžio rodiklio pokyčio narį koeficientu C :

$$\Delta\varphi(\Delta L) = (1 - C)kn\Delta L \quad (1.7)$$

Taigi tiesiniame artinyje, fazės poslinkis yra tiesinė skaidulos išilginio pailgėjimo funkcija.

Įstačius (1.5) į (1.7) galime išreikšti ir fazės poslinkio priklausomybę nuo veikiančios jėgos:

$$\Delta\varphi(F) = (1 - C)kn \frac{F}{A \cdot E} L \quad (1.8)$$

1.4 Šviesos fazės ir intensyvumo moduliavimo būdų apžvalga

1.4.1 Elektrooptiniai modulatoriai

Elektrooptinis reiškinytas tai yra antros eilės netiesiškumo $X^{(2)}$ lemiamas reiškinytas, kai paveikus kristalą elektriniu lauku yra modifikuojamas jo lūžio rodiklis. Elektrooptinis efektas gali būti panaudotas kontroliuoti sklindančios spinduliuotės fazę, intensyvumą ar poliarizaciją [9]. Šis reiškinytas dar kartais vadinamas Pokelso efektu.

Dėl elektrooptinio efekto, išorinis elektrinis laukas keičia kristalo $(1/n^2)_i$ koeficientų vertes. Koeficientų verčių pokytis tiesiogiai proporcingas elektrinio lauko E_0 stipriui kristalografinėmis kryptimis. Lūžio rodiklio pokyčio Δn ir išorinio elektrinio lauko sąryšis išreiškiamas trečio rango elektrooptiniu tenzoriumi r [10]:

$$\Delta \left(\frac{1}{n^2} \right) = \sum_{j=1}^3 r_{ij} E_j, \quad (1.9)$$

čia r_{ij} – elektrooptiniai koeficientai, $i = 1, \dots, 6$ ir $j = 1, 2, 3$; $E_1 = E_x, E_2 = E_y, E_3 = E_z$.

Elektrooptinis (Pokelso) efektas yra skirstomas į du tipus – išilginį ir skersinį – pagal tai, kokia kryptimi prijungiamas elektrinis laukas. Išilginiu atveju, elektrinis laukas veikia ta pačia kryptimi kaip ir sklindanti spinduliuotė. Šiuo atveju ant kristalo elektrodai turi būti parenkami taip, kad netrukdytų spinduliuotei skliti pro kristalą. Išilginiu efekto atveju, geriausia kontaktų forma yra žiedo. Tokie kontaktai yra tvirtinami prie kristalo galinių plokštumų arba kristalų galuose ant šoninių sienų. Skersinis Pokelso efektas skiriasi nuo išilginio Pokelso efekto tuo, kad elektrinis laukas prijungiamas statmenai spinduliuotės sklidimo kryptčiai. Šiuo atveju

elektrodai yra tvirtinami prie kristalo šonų. Labai svarbus Pokelso efekto parametras yra pusbanginė įtampa $U_{\lambda/2}$, kuri parodo kokio dydžio įtampą reikia paveikti kristalą, norint indukuoti fazių pokytį per $\Delta\varphi = \pi$. Pusbanginių įtampų vertės skiriasi išilginio ir skersinio Pokelso efekto konfigūracijoms.

Elektrooptiniai modulatoriai yra plačiai naudojami laisvos erdvės šviesos pluoštų moduliavimui, tačiau yra gaminamos ir įrenginių modifikacijos su skaidulų atšakomis. Tokiuose modulatoriuose netiesinis kristalas būna įmontuotas tarp dviejų mikrooptinių skaidulinių kolimatorių (fazės modulatoriuose). Skaiduliniuose intensyvumo modulatoriuose, papildomai naudojamas integralus Mach-Zehnder interferometras, kurio vienoje iš šakų (arba abiejuose) yra įmontuotas netiesinis kristalas. Dėl sudėtingos konstrukcijos ir reikalingo labai tikslaus suderinimo, tokių skaidulinių moduliatorių kaina būna pakankamai didelė.

1.4.2 Skaidulos su indukuotu antros eilės netiesiškumu

Įprastas kvarcinis stiklas praktiškai nepasižymi antros eilės netiesiškumu, todėl elektrooptinis efektas skaidulose nevyksta. Tačiau yra žinoma technologija, kai efektyvus antros eilės netiesiškumas gali būti „įrašytas“ skaidulos medžiagoje, paveikiant ją stipriu elektriniu lauku tam tikroje temperatūroje [11]. Buvo pademonstruota, kad skaiduloje indukuotas antros eilės netiesiškumas išlieka ataušinus skaidulą iki kambario temperatūros ir bėgant laikui. Taigi, integravus į taip modifikuota skaidulą elektrodus gali būti sukurtas elektrooptiniu efektu paremtas fazės modulatorius. Panaudojus tokios skaidulos atkarpą Sanjako interferometre, greitas fazės moduliavimas gali būti konvertuotas ir į intensyvumo moduliavimą [1], [11], [12]. Nors tokie pilnai skaiduliniai modulatoriai demonstruoja geras charakteristikas moksliniuose publikacijose, praktinių taikymų lygio ši technologija dar nepasiekė.

1.4.3 Akustooptiniai modulatoriai

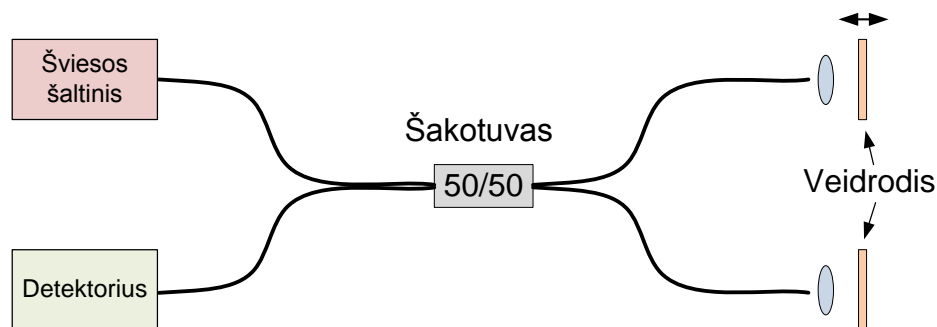
Akustooptiniai modulatoriai gali būti naudojami šviesos intensyvumo moduliavimui ir optinio dažnio poslinkiui indukuoti. Tokių moduliatorių veikimas remiasi akustooptiniu reiškiniu, kai tam tikrame kristale yra sužadinama akustinė banga sukelianti ir periodinę lūžio rodiklio moduliaciją. Šviesos pluoštui sklindat per kristalą su sužadinta lūžio rodiklio moduliacija, pluoštas patiria Brego difrakcija. Difrugavęs pluoštas sklinda kita kryptimi negu pradinis pluoštas, taigi ši savybė naudojama sukurti šviesos intensyvumo moduliaciją.

Pagrindiniai akustooptinio intensyvumo modulatoriaus parametrai tai maksimalus difrakcijos našumas ir pasiekiamas kontrastas (maksimalaus ir minimalaus pralaidumo santykis).

Skaiduliniai akustooptiniai modulatoriai sudaromi prie laisvos erdvė modulatoriaus pridendant skaidulinius mikrooptinius kolimatorius. Tokie komerciškai prieinami skaiduliniai modulatoriai pasižymi geru kontrastu siekiančiu $\sim 40\text{dB}$ [13], tačiau dėl spinduliuotės įvedimo nuostolių, tokių moduliatorių maksimalus pralaidumas paprastai būna nedidesnis $\sim 50\%$ [13]. Kaip trūkumą galima paminėti ir tai, kad akustooptiniai modulatoriai reikalauja valdiklio generuojančio pakankamos galios radijo dažnio signalą akustinei bangai sužadinti.

1.5 Interferencinis atstumo ir šviesos fazės poslinkio matavimas

Vienas plačiausiai naudojamų būdų atstumo ir šviesos fazės poslinkiui matuoti yra pasitelkiant Michelsono interferometro konfigūraciją (7. pav.). Klasikiniu atveju, kaip šviesos šaltinis tokiam interferometrui yra naudojamas siauro spektro pločio koherentinis lazeris. Tokiu atveju, gali būti tiksliai išmatuojami interferometro šakų poslinkio skirtumai neviršijantys pusės bangos ilgio (naudoto šaltinio). Esant didesniai poslinkiui turi būti skaičiuojami interferenciniai maksimumai (minimumai), kas apsunkina absoliutaus poslinkio matavimus.

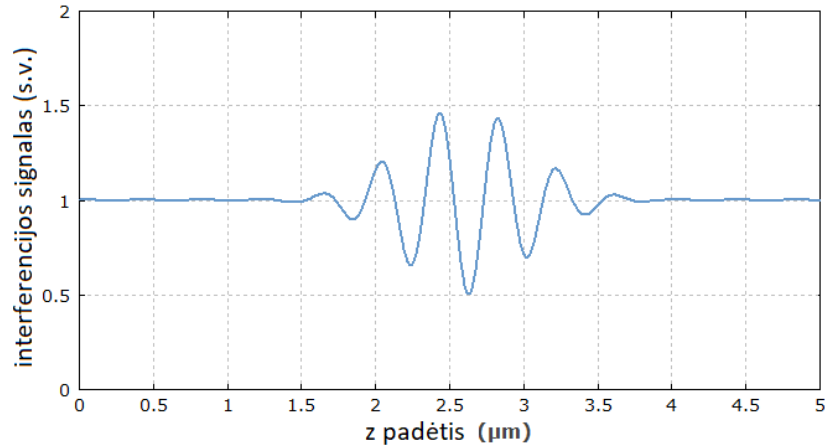


7. pav. Skaidulinio Michelsono interferometro schema

Dideliam poslinkiui matuoti ($\gg \lambda$) labiau tinkanti yra Michelsono interferometro konfigūracija su plataus spektro šaltiniu, kuri kitaip dar vadinama baltos šviesos interferometru (angl. White Light Interferometer – WLI). Tokio interferometro išėjime gausime didžiausius intensyvumo svyravimus priklausomai nuo vienos šakos užvėlinimo, kai abiejų šakų ilgiai bus vienodi (8. pav.). Didėjant šakų ilgio skirtumui, moduliacijų amplitudė mažėja. Maksimalų šakų ilgio skirtumą, kai dar stebimos intensyvumo moduliacijos, apibrėžia šaltinio koherentiškumo ilgis:

$$l_c = \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda} \quad (1.10)$$

Čia λ ir $\Delta\lambda$ yra atitinkamai naudojamo šaltinio bangos ilgis ir spektro plotis.



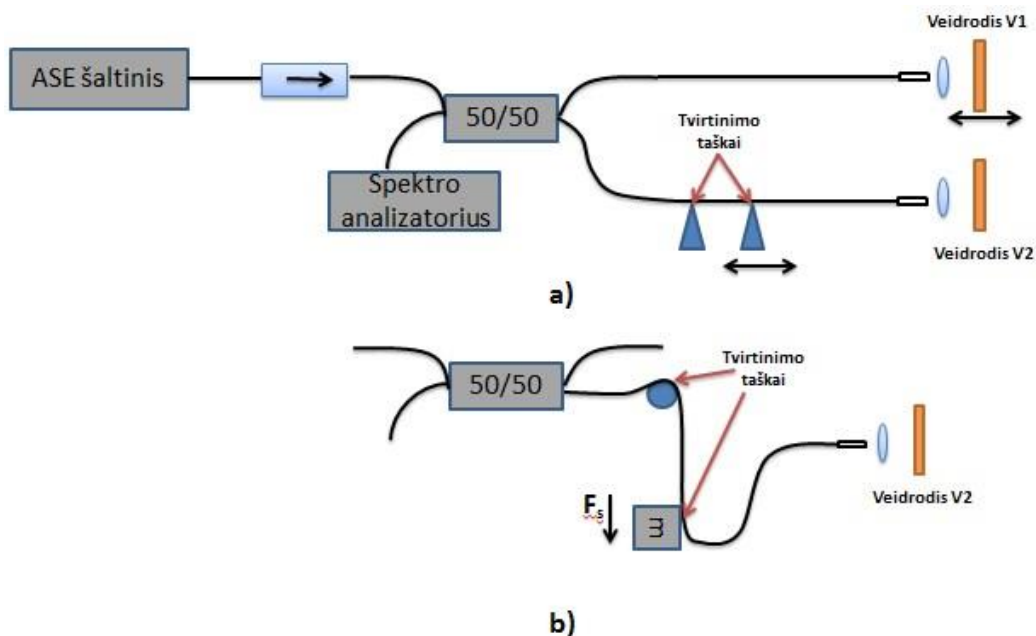
8. pav. Pavyzdinė interferencijos signalo (šviesos intensyvumo) priklausomybė nuo vienos iš interferometro šakų poslinkio. [14]

Taikant baltos šviesos interferometro konfigūraciją, poslinkis gali būti matuojamas registruojant laikinį intensyvumo kitimą su fotodiodu arba matuojant interferencijos spektrą ir registruojant spektrinių moduliacijų periodą [15]. Spektrinis metodas pasižymi tuo, kad iš vieno matavimo leidžia išmatuoti absoliutų poslinkių skirtumą tarp šakų. Būtent šis metodas buvo naudotas šiame darbe tiriant optinėje skaiduloje indukuojamą fazės poslinkį priklausomai nuo jos mechaninio ištempimo.

2. Tyrimo schemos ir metodika

2. 1 Optinės skaidulos elastinių ir fotoelastinių savybių tyrimo schemos

Šiame darbe tirtos elastingės ir fotoelastingės savybės vienamodėje poliarizaciją išlaikančioje skaiduloje Fujikura PM980 (1 lentelė). Šioms savybėms ištirti buvo sukonstruotas Michelsono interferometras su 50/50 skaiduliniu dalikliu. Viena iš šio skaidulinio daliklio atšakų buvo įvairiai tvirtinama, kad būtų galima mechaniškai ištempti per tam tikrą ilgio vienetą skaidulą su ir be apvalkalo (9 pav. a) arba tam tikra jėga tempti skaidulą (9 pav. b). Naudojant 9 paveikslėlio eksperimentines schemas buvo nustatytos fazės poslinkio charakteristikos nuo keičiamų parametrų (tempimo jėgos, skaidulos pailgėjimo).



9 pav. Elastinių ir fotoelastinių savybių tyrimo eksperimentinė schema, kai a) skaidula tempiama per tam tikrą ilgio vienetą ir b) tam tikra jėga.

Prieš pradėdant matavimus yra būtina suderinti tiriama eksperimentinę schemą (9 pav.). Schemoje naudojamos sustiprintos spontaninės spinduliuotės šaltinio pluoštas yra padalinamas į dvi lygias atšakas su skaiduliniu 50/50 dalikliu, kurių galuose pluoštas yra išvedamas į atvirą erdvę, kur nuo aliumininių veidrodžių (V1 ir V2) jis yra vėl grąžinamas į tą pačią skaidulą. Tokiu atveju sukuriame Michelsono interferometrą. Optimaliam interferometro suderinimui, optiniai keliai turi sutapti. Kitu atveju interferencijos amplitudė bus maža, o spektro analizatoriuje matomos spektrinės moduliacijos labai tankios. Dėl šios

priežasties pirmasis V1 veidrodis yra įtaisytas ant poslinkio stalelio, kurio pagalba galime kompensuoti abiejų atšakų optinių kelių skirtumus.

1 lentelė. Fujikura PM980 optinės skaidulos charakteristikos.[16]

Modelis	Modos diametras	Stiklo apvalklo diam.	Polimerinio apvalkalo diametras	Aukštesnės eilės modų nukirtimo bangos ilgis	Atlaikoma apkrova
PM980	6.6 ± 0.5 μm	125 ± 1 μm	245 ± 15 μm	870-950 nm	0,69 GPa

2.2 Fazės poslinkio matavimo metodika ir sistemos suderinimo patikrinimas

Šiame darbe fazės poslinkiui matuoti buvo naudojama modifikuota baltos šviesos interferometrijos metodika, kai gaunamas fazės (ir sklidimo kelio) poslinkis yra nustatomas registruojant spektrines moduliacijas [15]. Žemiau išvesime sąryšį tarp spektrinių moduliacijų periodo ir vienos šakos išderinimo poslinkio (laisvoje erdvėje).

Esant dviejų pluoštų interferencijai, kai vienas pluoštų užvėlintas dėl sklidimo laisva erdve $2x$ atstumu, spektro moduliacijų intensyvumo pasiskirstymas gali būti užrašytas taip [15]:

$$I(\lambda) = I(\lambda) \left(1 - v \cos\left(\frac{4\pi x}{\lambda}\right) \right) \quad (2.1)$$

Čia v – moduliacijų amplitudės koeficientas, x – vienos šakos veidrodžio poslinkis laisvoje erdvėje.

Vienas spektrinių moduliacijų periodas atitinka tokius du bangos ilgius, kuriems kosinuso nario argumentas pasikeičia 2π :

$$\frac{4\pi x}{\lambda_1} - \frac{4\pi x}{\lambda_2} = 2\pi \quad (2.2)$$

Iš (2.2) formulės galime išreikšti, kad vienos šakos veidrodžio poslinkis laisvoje erdvėje yra lygus:

$$x = \frac{1}{2\left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2}\right)} = \frac{c}{2\Delta f} \quad (2.3)$$

Čia Δf - moduliacijų periodas dažnių skalėje, c – šviesos greitis vakuume.

Poslinkis erdvėje gali būti konvertuotas į optinės fazės poslinkį pasinaudojant formule:

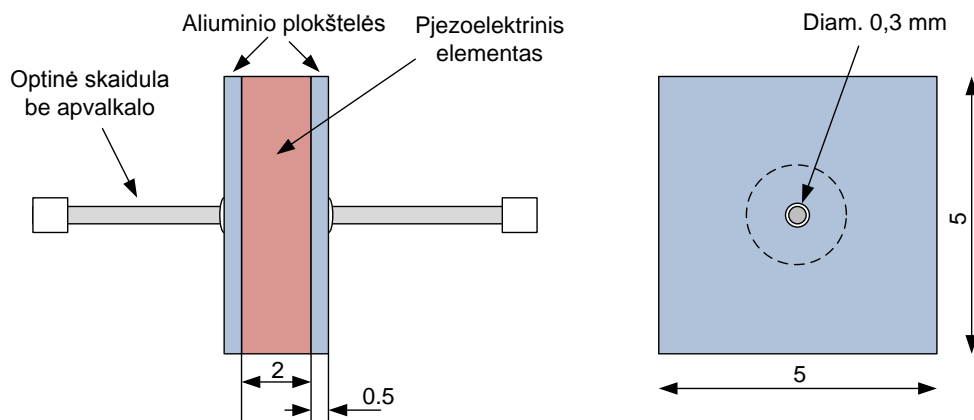
$$\Delta\varphi = \frac{2\pi x}{\lambda} \quad (2.4)$$

Čia λ – spinduliuotės bangos ilgis vakuume. Šio tyrimo atveju laikoma, kad $\lambda = 1,06 \mu\text{m}$.

Siekiant patikrinti ar eksperimentinė schema buvo suderinta teisingai ir aprašyta metodika leidžia tinkamai nustatyti vienos šakos optinio kelio pokytį, buvo atliktas matavimas esant žinomam vienos šakos ilgio išderinimui. Tam tikslui, veidrodys V1 (9 pav.) buvo paslenkamas žinomu atstumu $30 \mu\text{m}$ pagal poslinkio staliuko mikrometro rodmenis. Toliau buvo registruojamas spektras interferometro išėjime ir matuojamas moduliacijų periodas (dažnių skalėje). Iš moduliacijų periodo buvo suskaičiuojamas veidrodžio poslinkis x remiantis (2.3) formule. Šie matavimai buvo kartojami 10 kartų, kadangi buvo pastebėta, kad skaidulinis interferometras yra jautrus aplinkos poveikiui ir interferencijos rezultatas laikui bėgant kinta. Iš pakartotinių matavimų buvo įvertinta atsitiktinė matavimo paklaida. Gauta poslinkio vertė: $28,62 \pm 1,44 \mu\text{m}$ (99 % patikimumas). Taigi paklaidų ribose gauta vertė atitinka mechaninį išderinimą. Sistemines paklaidos šių matavimų metu nebuvo įvertinamos, kadangi jų indėlis yra žymiai mažesnis negu atsitiktinės paklaidos.

2.3 Skaidulinio fazės modulatoriaus su pjezoelektriniu aktuatoriumi sandara

Ištirus optinės skaidulos elastinges ir fotoelastinges savybes, buvo sudarytas pilnai skaidulinis fazės modulatorius su pjezoelektriniu aktuatoriumi. Šio įrenginio schema yra pavaizduota 10 pav. Modulatoriui naudotas pjezoelektrinis elementas su skylė centre, kurio parametrai pateikti 2 lentelėje. Prie pjezoelektrinio elemento darbinių paviršių buvo priklijuotos specialiai pagamintos aliuminio plokštelės su $300 \mu\text{m}$ diametro kiaurymėmis centre. Per šias kiaurymes buvo įstatytas ir priklijuotas šviesolaidis (atkarpa be apvalkalo).



10. pav. Sudaryto skaidulinio optinės fazės modulatoriaus su pjezoelektriniu elementu schema.

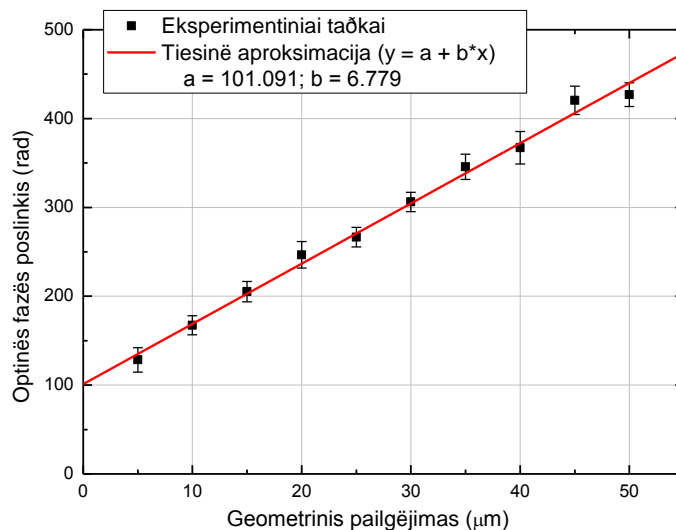
2 lentelė. Thorlabs PA4FEH3W pjezoelektrinio elemento charakteristikos [17].

Parametras	Vertė
Valdymo įtampos intervalas	0 - 150 V
Maksimalus poslinkis (be apkrovos) @ 150 V	1.8 $\mu\text{m} \pm 15\%$
Histerežė	<15%
Maksimalaus poslinkio apkrova	300 N
Blokuojanti jėga prie maksimalios įtampos	800 N
Rezonansinis dažnis (be apkrovos)	610 kHz
Impedansas esant rezonansiniam dažniui	200 mOhm
Anti-rezonansinis dažnis	820 kHz
Išsklaidymo koeficientas	<2.0%
Talpa	160 nF $\pm 15\%$
Svoris	0.573 g
Darbinių temperatūrų intervalas	-25 to 130 °C
Curie temperatūra	230 °C

3. Tyrimų rezultatai

3.1 Optinės fazės poslinkio matavimas priklausomai nuo skaidulos be polimerinio apvalkalo geometrinio ištempimo

Atliekant šiuos matavimus buvo siekiama nustatyti įnešamą optinės fazės poslinkį priklausomai nuo skaidulos geometrinio ištempimo. Tam tikslui buvo nuvalytas polimerinis apvalkalas nuo skaidulos atkarpos ir ši skaidulos atkarpa įtvirtinta priklijuojant vieną galą prie užfiksuoto laikiklio, o kitą galą prie poslinkio staliuko. Atkarpos ilgis tarp priklijavimų buvo 5 cm. Toliau buvo matuojamas spektrinių moduliacijų periodas keičiant poslinkio staliuko padėtį. Kiekvienai staliuko padėčiai buvo atliekama 10 spektro matavimų, siekiant įvertinti atsitiktinę paklaidą. Fazės poslinkis buvo apskaičiuojamas remiantis (2.3) ir (2.4) formulėmis. Gauta fazės poslinkio priklausomybė nuo geometrinio ištempimo yra pavaizduota 11 pav.



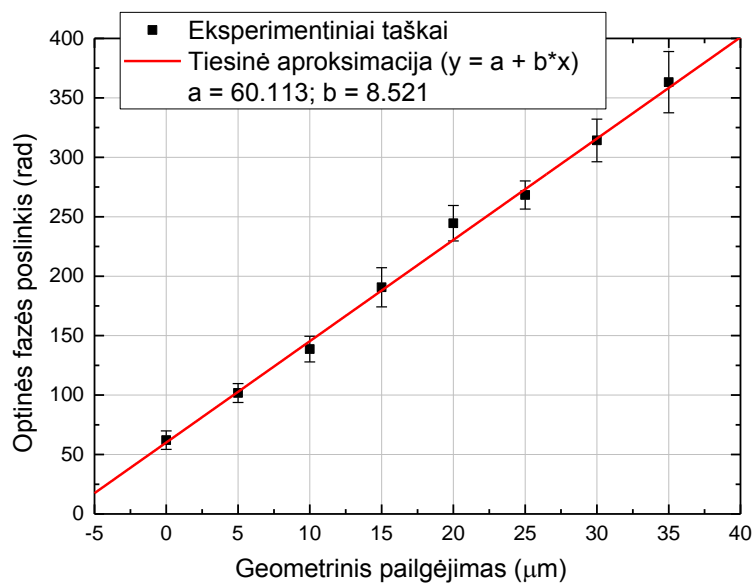
11. Pav. Išmatuota optinės fazės poslinkio priklausomybė nuo geometrinio skaidulos pailgėjimo. Skaidula be polimerinio apvalkalo.

Aproksimuojant eksperimentinius taškus tiese galime nustatyti gaunamą optinės fazės poslinkį skaidulos pailgėjimo matmens vienetui. Gauta vertė: $6,779 \text{ rad}/\mu\text{m} \approx 2,16\pi \text{ rad}/\mu\text{m}$. Remdamiesi elastingos deformacijos teorija (tiesiniame artinyje) ir formule (1.7) galime taip pat įvertinti lūžio rodiklio pokyčio indėlį gaunamam fazės poslinkiui. Įstačius gautą fazės poslinkio vertę pailgėjimo vienetui, ir laikant, kad kvarcinio stiklo lūžio rodiklis $n = 1,45$, iš (1.7) gauname, kad lūžio rodiklio pokyčio nario vertė yra $C = 0,211$. Tai reiškia, kad lūžio

rodiklio pokyčio indėlis yra neigiamas ir fazės poslinkis dėl to yra mažesnis ~21 %. Tai atitinka literatūroje minimas gryno kvarcinio stiklo savybes [7], [8].

3.2 Optinės fazės poslinkio matavimas priklausomai nuo skaidulos su polimeriniu apvaskalu geometrinio ištempimo

Atliekant šiuos tyrimus buvo siekiama nustatyti kokią įtaką ištempimo sukeltam fazės poslinkiui turi optinės skaidulos apsauginis polimerinis apvaskalas. Tam tikslui 18,4 cm ilgio skaidulos atkarpa (sudaranti interferometro atšaką) buvo pritvirtinta dviejuose taškuose, iš kurių vienas tvirtino taškas buvo ant precizinio poslinkio staliuko. Keičiant staliuko padėtį buvo matuojamas spektrinių moduliacijų periodas ir iš jo apskaičiuojamas fazės poslinkis. Gauta fazės poslinkio priklausomybė nuo skaidulos pailgėjimo pavaizduota 12 pav.



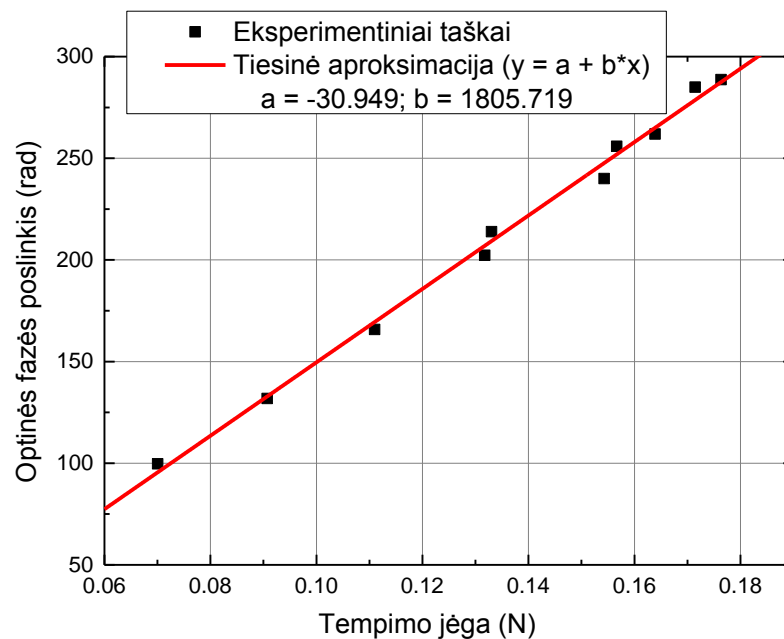
12. pav. Išmatuota optinės fazės poslinkio priklausomybė nuo geometrinio skaidulos pailgėjimo. Skaidula su polimeriniu apvaskalu.

Iš tiesinės aproksimacijos gauname, kad šiuo atveju fazės poslinkis pailgėjimo vienetui yra: $8,521 \text{ rad}/\mu\text{m} \approx 2,71\pi \text{ rad}/\mu\text{m}$. Taigi skaidulai su polimeriniu apvaskalu ištempimo lemiamas fazės poslinkis yra didesnis negu skaidulai be polimerinio apvaskalo. Iš (1.7) formulės galime įvertinti, kad lūžio rodiklio pokyčio indėlis šiuo atveju yra labai menkas: $C = 8,6 \times 10^{-3}$.

3.4 Optinės fazės poslinkio matavimas priklausomai nuo skaidulos tempimo jėgos

Kuriant optinius elementus paremtus optinių skaidulų fotoelastinėmis savybėmis, svarbus parametras yra ištempimui reikalinga jėga. Nors jėgą galima apskaičiuoti žinant medžiagos Jungo modulį, poliarizaciją išlaikančią optinę skaidulą sudaro ne tik grynas kvarcinis stiklas, todėl skaidulos elastingos savybės gali skirtis nuo grynos medžiagos savybių. Kaip pavyzdį galima paminėti žymiai kitokios sudėties „PANDA“ strypus, kurie integruojami į skaidulos struktūrą siekiant sukurti papildomus įtempimus ir užtikrinti poliarizacijos išlaikymą.

Fazės poslinkio priklausomybės nuo tempimo jėgos matavimai buvo atliekami sudarius 9b. pav. pavaizduotą schemą, kai skaidula buvo užfiksuota viename gale ir tempiama žemyn naudojant žinomo svorio svarelius. Skaidula buvo su polimeriniu apvaskalu, o atkarpos ilgis, kuris buvo veikiamos jėgos, siekė 18,4 cm. Išmatuota fazės poslinkio priklausomybė nuo jėgos pavaizduota pav.



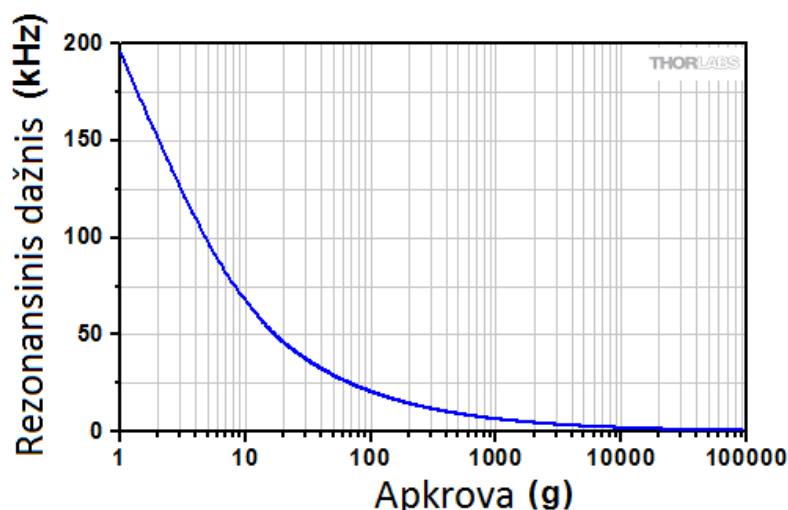
13 pav. Išmatuota optinės fazės poslinkio priklausomybė nuo tempiančios jėgos, kai tempiama yra 18,4 cm ilgio skaidulos atkarpa.

Iš gautų rezultatų tiesinės aproksimacijos galime paskaičiuoti, kad fazės poslinkis jėgos ir atkarpos ilgio vienetui yra $\sim 9,81 \text{ rad}/(\text{N}\times\text{mm})$. Pasinaudojant šiais rezultatais ir (1.8) formule galime įvertinti visos tokios skaidulos Jungo modulį: $E \approx 72 \text{ GPa}$. Ši vertė yra $\sim 12 \%$

didesnė negu pateikiama literatūroje vienmodėms (neišlaikančioms poliarizacijos) optinėms skaiduloms [8].

3.5 Skaidulinio fazės modulatoriaus su pjezoelektriniu aktuatoriumi tyrimo rezultatai.

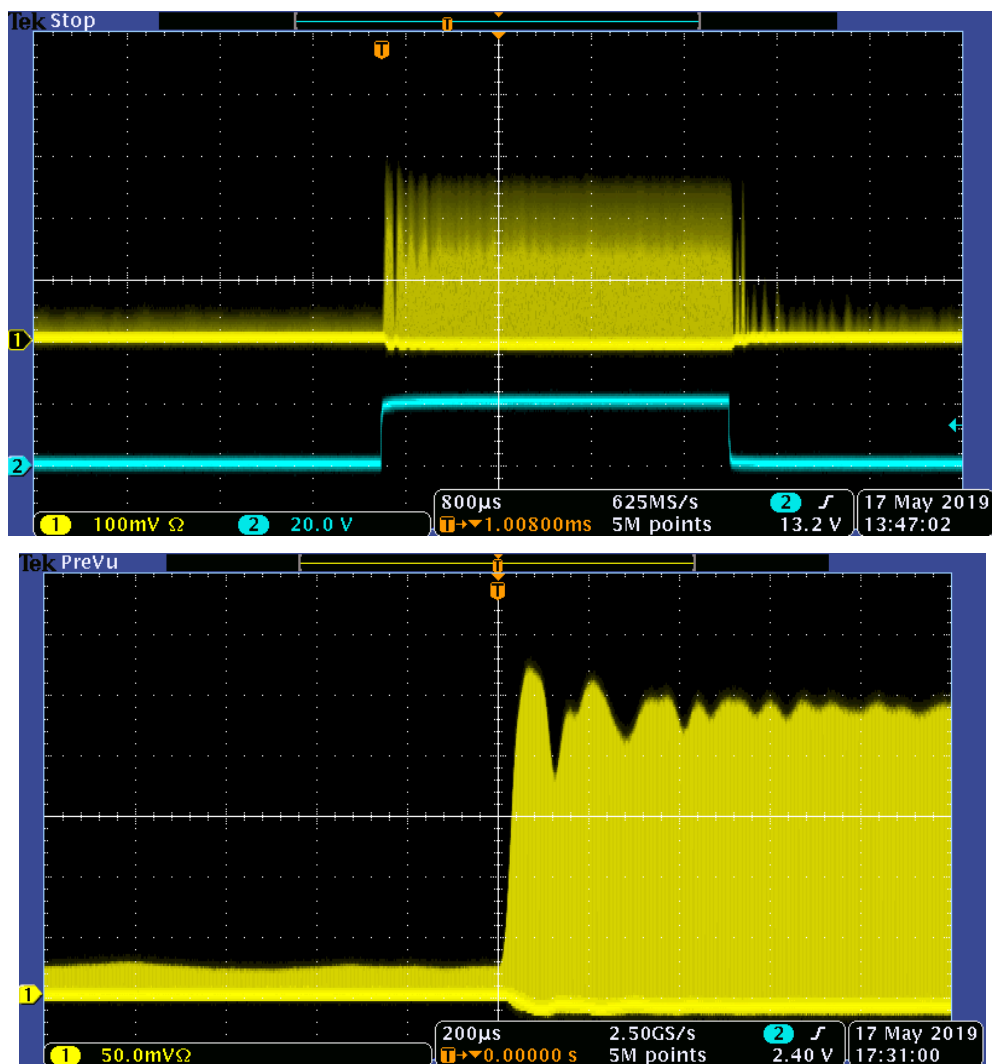
Remiantis optinės skaidulos elastinių ir fotoelastinių tyrimų rezultatais, buvo pasirinktas reikiamų parametrų pjezoelektrinis elementas ir sukurtas pilnai skaidulinis fazės modulatorius. Pagrindiniai parametrai, kuriais remiantis buvo pasirinktas pjezoelektrinis elementas, tai maksimalus poslinkis, elemento dydis ir pasiekama veikimo sparta. Šio modulatoriaus schema buvo pavaizduota 10 pav. Optinė skaidula buvo užfiksuota tarp 2 plokštelių priglundančių prie pjezoelektrinio elemento darbinų paviršių. Prijungus įtampą, pjezoelektrinis elementas išsiplėsdavo ir tokiu būdu ištempdavo skaidulos atkarpą. Darbinės atkarpos ilgis buvo 2 mm. Remiantis praeito skyriaus rezultatais galime įvertinti, kad norint pasiekti π fazės poslinkį tokio ilgio skaidulos atkarpoje, ji turi būti veikiamą 0,16 N jėga. Iš pjezoelektrinio elementų specifikacijų (14 pav.) matome, kad esant tokiai apkrovai, elemento rezonansinis dažnis turėtų būti ~50 kHz.



14. pav. Naudoto pjezoelektrinio elemento rezonansinio dažnio priklausomybė nuo apkrovos.[17]

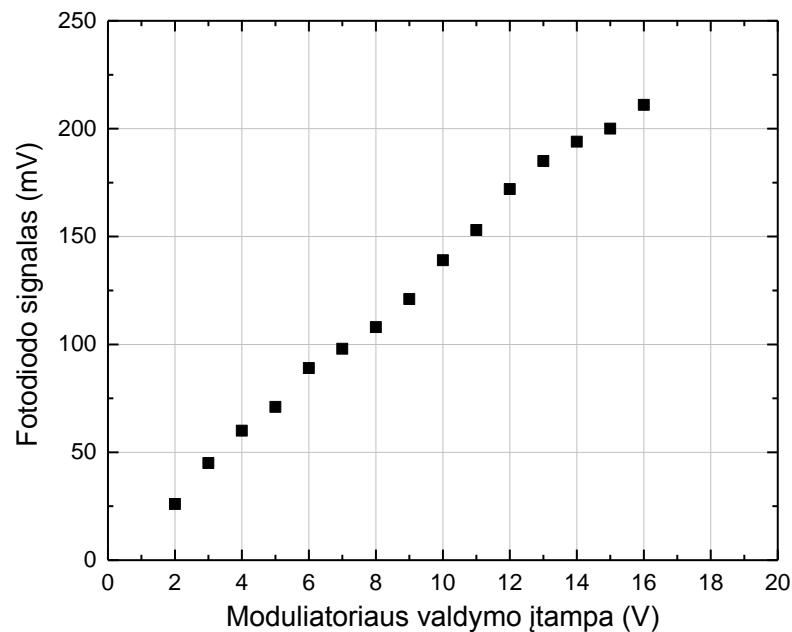
Siekiant ištirti sukurtą fazės moduliatorių, jis buvo integruotas skaidulinio Michelsono interferometro vienoje iš šakų. Į interferometrą buvo įvedama siauro spektro impulsinė lazerinė spinduliuotė. Tokiu būdu, modulatoriaus įnešamas fazės poslinkis buvo konvertuojamas į intensyvumo moduliaciją, kuri buvo registruojama fotodiodo. Kadangi

skaidulinis interferometras pasižymėjo tam tikru jautrumu aplinkos poveikiui (intensyvumas svyrudavo išėjime), geresniam moduliatoriaus įnešamos fazės pokyčio išskyrimui, jis buvo valdomas stačiakampiais periodiniais impulsais. Eksperimentui buvo nustatyta valdymo impulsų trukmė 3 ms ir periodas 100 Hz. 15 pav. yra pavaizduotas išmatuotas optinis signalas (geltonas žymėjimas) oscilografo ekrane, kai į moduliatorių buvo paduodamas stačiakampis įtampos impulsas (mėlyna kreivė). Kadangi spinduliuotė iš lazerio buvo impulsinė, optinis signalas šiuo atveju atrodo kaip užpildytas stačiakampis. 15 b. pav. yra pavaizduota optinio signalo priekinio fronto oscilograma smulkesnėje laikinėje skalėje. Iš šios oscilogramos matyti, priekinis frontas yra pakankamai greitas $\sim 50 \mu\text{s}$, tačiau toliau vyksta dar tam tikri intensyvumo svyravimai greičiausiai nulemti pjezoelektrinio elemento savųjų svyravimų. Šių svyravimo periodas $\sim 120 \mu\text{s}$.



15 pav. a) Optinio signalo interferometro išėjime oscilograma (geltona) ir pjezoelektrinio elemento įtampos oscilograma (mėlyna). b) Optinio signalo interferometro išėjime priekinio fronto oscilograma.

Tiriant modulatoriaus veikimą, buvo išmatuota fotodiode signalo (proporcingo optiniam intensyvumui) pokyčio priklausomybė nuo valdančios įtampos (16 pav.).



16 pav. Išmatuota fotodiode signalo pokyčio priklausomybė nuo modulatoriaus valdančio impulso įtampos.

Matavimų metu taip pat buvo nustatyta įtampos vertė, kai registruojamas signalas pakinta nuo minimo iki maksimumo. Išmatuota įtampos vertė: 18 mV. Toks pokytis atitinka fazės poslinkį per π esant dvigubam praėjimui per modulatorių. Taigi galime įvertinti, kad tiesinėje aproksimacijoje, per vieną praėjimą modulatoriaus įnešamas fazės poslinkis yra apytiksliai lygus 0,09 rad/V.

Pagrindiniai rezultatai ir išvados

1. Ištyrus Fujikura PM980 optinėje skaiduloje **be** polimerinio apvalkalo indikuojamą optinės fazės poslinkį priklausomai nuo išilginio ištempimo, buvo nustatyta, kad fazės poslinkį daugiausiai lemia geometrinis skaidulos ištempimas. Lūžio rodiklio indėlis yra 5 kartus mažesnis ir kompensuojantis geometrinio ištempimo indėlį. Išmatuota fazės poslinkio ištempimo ilgio vienetui vertė: $2,16\pi$ rad/ μm .
2. Ištyrus Fujikura PM980 optinėje skaiduloje **su** polimeriniu apvalkalu indikuojamą optinės fazės poslinkį priklausomai nuo išilginio ištempimo, buvo nustatyta, kad fazės poslinkis ištempimo ilgio vienetui yra didesnis negu skaidulai be polimerinio apvalkalo. Išmatuota vertė: $2,71\pi$ rad/ μm .
3. Ištyrus Fujikura PM980 optinės skaidulos **su** polimeriniu apvalkalu fazės poslinkį veikiančios jėgos ir atkarpos ilgio vienetui buvo gauta vertė: $9,81$ rad/(N \times mm).
4. Ištyrus sudarytą fazės moduliatorių su pjezoelektriniu elementu buvo nustatyta tokio įrenginio įnešamo optinės fazės poslinkio vertė priklausomai nuo valdymo įtampos: $0,09$ rad/V.

Literatūros šaltinių sąrašas

- [1] M. Malmström, S. Boivinet, O. Tarasenko, J. - Lecourt, Y. Hernandez, W. Margulis, and F. Laurell, "All-Fiber Polarization-Maintaining Electrooptic Pulse-Picker," in *CLEO: 2015*, OSA Technical Digest (online) (Optical Society of America, 2015), STu1F.7.
- [2] D. Čiplys, A. Krotkus, ir V. Smilgevičius, *Šviesolaidžių optika* (Vilniaus universiteto leidykla, Vilnius, 2008).
- [3] „Total Internal Reflection“ . Adresas: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/phyopt/totint.html>. Žiūrėta: 2019-5-21.
- [4] Manal Abdel-Baki, Fouad El-Diasty, Glasses for Photonic Technologies, *International Journal of Optics and Applications* **3**(6), 125-137, (2013).
- [5] J. Želudevičius, „*Impulsinių skaidulinių lazerių parametų optimizavimas, netiesinis impulsų apjungimas ir optinio dažnio keitimas*“, Daktaro disertacija (Vilniaus universitetas ir Valstybinis mokslinių tyrimų institutas fizinių ir technologijos mokslų centras, Vilnius, 2017).
- [6] J. Želudevičius, „*Šviesolaidiniai trumpų impulsų stiprintuvai: technologijos ir savybės*“ (Vilnius, 2014).
- [7] A. Bertholds and R. Dandliker, "Determination of the individual strain-optic coefficients in single-mode optical fibres," *Journal of Lightwave Technology* **6**(1), 17–20 (1988).
- [8] A. Bertholds and R. Dandliker, "Deformation of single-mode optical fibers under static longitudinal stress," *Journal of Lightwave Technology* **5**(7), 895–900 (1987).
- [9] „RP Photonics Encyclopedia - electro-optic modulators“. Adresas: https://www.rp-photonics.com/electro_optic_modulators.html. Žiūrėta: 2019-5-22.
- [10] C. Davis, *Lasers and Electro-optics: Fundamentals and Engineering*, (Cambridge University Press, Cambridge, 2014).
- [11] M. Malmström, O. Tarasenko, and W. Margulis, "Pulse selection at 1 MHz with electrooptic fiber switch," *Opt. Express* **20**(9), 9465-9470 (2012).
- [12] M. Malmstrom, O. Tarasenko, W. Margulis, and F. Laurell, "All-Fiber Nanosecond Gating for Time-Resolved Spectral Analysis," *IEEE Photon. Technol. Lett.* **28**(8), 829–832 (2016).

- [13] „Laser Modulation“, Gooch & Housego. . Adresas: <https://goochandhousego.com/product-categories/fiber-coupled-modulators/>. Žiūrėta: 2019-5-22.
- [14] „RP Photonics Encyclopedia - white light interferometers, dispersion measurement, low-coherence interferometry“. Adresas: https://www.rp-photonics.com/white_light_interferometers.html. Žiūrėta: 2019-5-22.
- [15] L. M. Smith and C. C. Dobson, "Absolute displacement measurements using modulation of the spectrum of white light in a Michelson interferometer," *Applied Optics* **28**(16), 3339-3342 (1989).
- [16] „Fujikura Ltd. - Products“. Adresas: http://www.fujikura.co.jp/eng/products/optical/opticaldevices/04/2050105_12895.html. Žiūrėta: 2019-5-22.
- [17] „Low-Voltage Piezoelectric Chips with Through Holes, 1.8 μm to 3.0 μm Travel“. Adresas: https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=10311. Žiūrėta: 2019-5-22.

Mindaugas Skirgaila

OPTINIŲ SKAIDULŲ FOTOELASTINIŲ SAVYBIŲ TYRIMAI IR
PANAUDOJIMAS ŠVIESOS MODULIAVIMUI

SANTRAUKA

Šio darbo tikslas buvo sudaryti ir ištirti fazės (ir intensyvumo) moduliatorių, paremtą optinės skaidulos elastingomis ir fotoelastingomis savybėmis. Tam tikslui pasiekti, buvo sukonstruotas skaidulinis Michelsono interferometras ir tiriama poliarizaciją išlaikančioje skaiduloje Fujikura PM980 indukuoto optinės fazės poslinkio priklausomybė nuo išilginio skaidulos ištempimo ir veikiančios jėgos. Buvo nustatyta, kad skaiduloje su polimeriniu apvalkalu pasiekiamas optinės fazės poslinkis skaidulos pailgėjimo vienetui yra didesnis, negu skaiduloje be polimerinio apvalkalo.

Remiantis skaidulos elastinių ir elastooptinių savybių tyrimų rezultatais, buvo sukonstruotas skaidulinis fazės moduliatorius su pjezoelektriniu elementu ir ištirtos jo charakteristikos. Integravus fazės moduliatorių Michelsono interferometro vienoje iš šakų, buvo registruojamas šviesos intensyvumo pokytis priklausomai nuo moduliatorių valdančios įtampos. Buvo nustatyta, kad moduliatoriaus įnešamo fazės poslinkio vertė priklausomai nuo valdymo įtampos yra $0,09 \text{ rad/V}$.

Mindaugas Skirgaila

RESEARCH AND APPLICATION OF PHOTOELASTIC PROPERTIES OF
OPTICAL FIBERS FOR LIGHT MODULATION

SUMMARY

Goal of this work was to develop and investigate phase and intensity modulator based on elastic and photoelastic properties of optical fibers. For this to achieve, first Michelson interferometer setup was constructed and used to investigate optical phase shift induced in polarization-maintaining optical fiber Fujikura PM980 depending on elongation of fiber and applied force. The results of such research showed, that induced phase shift per unit of elongation in optical fiber with polymer cladding is higher than in optical fiber with polymer cladding removed.

According to investigation results of elastic and photoelastic properties, all-fiber phase modulator with piezoelectric element was designed and constructed. This modulator was integrated in one arm of the Michelson interferometer to investigate its characteristics with respect to control voltage. Based on experimental results it was evaluated that phase shift induced in the developed modulator was: 0,09 rad/V.