

Vilniaus universiteto
Fizikos fakulteto
Lazerinių tyrimų centras

Kamilė Kasačiūnaitė

**MACH - ZEHNDER TIPO INTERFEROMETRO INTEGRAVIMAS Į OPTINIŲ
ŠVIESOLAIDŲ**

Magistrantūros studijų baigiamasis darbas

Lazerinės fizikos ir optinių technologijų
studijų programa

Studentas

Kamilė Kasačiūnaitė

Leista ginti

2022.05.25

Darbo vadovas

doc. Domas Paipulas

Centro direktorius

prof. Aidas Matijošius

Vilnius 2022

Turinys

| | |
|--|----|
| Santrumpų sąrašas..... | 4 |
| Įvadas..... | 5 |
| 1. Literatūros apžvalga..... | 6 |
| 1.1. Skaidrių terpių modifikavimas lazerio spinduliuote | 6 |
| 1.1.1. Izotropinis lūžio rodiklio pokytis..... | 6 |
| 1.1.2. Dvejopas šviesos lūžimas..... | 6 |
| 1.1.3. Ertmių susidarymas..... | 7 |
| 1.2. Abliacija ir Beer Lamberto dėsnis | 7 |
| 1.3. Šviesolaidiniai mikrosensoriai | 8 |
| 1.3.1. Šviesolaidiniai sensoriai pagaminti pasitelkiant femtosekundinius lazerius..... | 8 |
| 1.3.2. Ilgojo periodo šviesolaidinės gardelės pagamintos pasitelkiant fs lazerinį apdirbimą..... | 9 |
| 1.3.3. Brego gardelės vienmodžiame šviesolaidyje pagamintos pasitelkiant fs lazerio spinduliuotę | 11 |
| 1.3.4. Interferenciniai jutikliai pagaminti pasitelkiant fs lazerinius impulsus | 13 |
| 1.4. Mach - Zehnder interferometrai..... | 19 |
| 1.4.1. Ertmės formavimas | 20 |
| 1.4.2. Vidinė oro ertmė | 22 |
| 1.4.3. Vidinė oro ertmė ir OŠ susiaurinimas..... | 23 |
| 1.4.4. Dvigubos šerdies MZI jutiklis..... | 24 |
| 1.4.5. MZI su Brego gardelėmis | 24 |
| 2. Metodika | 25 |
| 2.1. Šviesolaidžio paruošimas | 25 |
| 2.1.1. Šviesolaidžio nužievinimas..... | 25 |
| 2.1.2. Šviesolaidžio įtvirtinimas..... | 27 |
| 2.2. Lazerinė abliacijos schema | 27 |
| 2.3. Jutiklio testavimas..... | 29 |
| 2.4. Modeliavimas..... | 30 |
| 2.4.1. Modeliavimo programinė įranga..... | 30 |

| | |
|---|----|
| 2.4.2. Modelis | 31 |
| 3. Rezultatai | 32 |
| 3.1. Modeliavimas..... | 32 |
| 3.2. Lazerinio abliavimo parametru optimizavimas..... | 33 |
| 3.3. MZI formavimas lazerinės abliacijos būdu..... | 35 |
| 3.4. Mach - Zehnder interferometro testavimas | 36 |
| Išvados | 38 |
| Aprobacija..... | 39 |
| Literatūros sąrašas:..... | 40 |

Santrumpų sąrašas

FKŠ - fotoninių kristalų šviesolaidis

FP - Fabri - Pero

IPŠG - ilgojo periodo šviesolaidinės gardelės

LED - šviesos diodas

MFPI - mikro Fabri - Perot interferometras

MZI – Mach - Zehnder interferometras

NA - skaitinė apertūra

OKS - optinių kelių skirtumas

OSA - optinio spektro analizatorius

OŠ - optiniai šviesolaidžiai

RI - lūžio rodiklis

RIU - lūžio rodiklio vienetas

S/N - signalo triukšmo santykis

SEM - skenuojantis elektronų mikroskopas

ŠBG - šviesolaidinės Brego gardelės

ŠG - šviesolaidinės gardelės

UV - ultravioletinis

Įvadas

Jutikliai yra plačiai kasdieniniame gyvenime naudojami prietaisai. Jie nustato įvykius ar aptinka pokyčius aplinkoje ir perduoda informaciją į išvesties įrenginį. Jutiklių yra įvairiausių tipų ir dizainų. Jie gali būti skirstomi pagal paskirtį, sandarą, veikimo principą ir pan. Vienai iš kategorijų galima priskirti ir šviesolaidinius jutiklius. Optinių šviesolaidžių jutiklis yra prietaisas, per kurį matuojami objektai sąveikauja su per šviesolaidį sklindančia šviesa. Taip gaunamas moduluotas optinis signalas su informacija apie matuojamą parametą. Optinių šviesolaidžių pagrindiniai privalumai yra maži matmenys, atsparumas elektromagnetiniam poveikiui, atšiaurioms sąlygoms bei galimybė stebėti pokyčius realiu laiku.

Nešiojamų ir miniatiūrinių jutiklių industrijos sritis siūlo plačias paprastų matavimo sistemų, nebrangios gamybos ir nuotolinio, tiesioginio stebėjimo galimybes. Deja, kuriant technologijas dielektrikų pagrindu yra susiduriama su sunkumais - nėra juos paprasta tiksliai abliuoti mikrometrų skalėje. Dauguma šviesolaidžių yra pagaminti iš lydyto kvarco. Lazerinės spinduliuotės su bangų ilgiais, kurie pralaidūs šioje medžiagoje (1030 nm, 515 nm, 343 nm ar net 257 nm), naudojimas reikštų darbą daugiafotonėje sugerties srityje. Dirbant šių bangų srityje yra suformuojami dariniai, turintys didelį paviršiaus šiurkštumą. Tai daro įtaką jutiklių kokybei – šviesa yra sklaidoma nuo netolygaus paviršiaus ir taip susilpnėja matuojamas signalas. Naudojant spinduliuotę, kurios bangos ilgis yra 206 nm, lydytame kvarce vyksta tiesinė sugertis, dėl kurios suformuojamos tikslesnės struktūros turinčios mažesnę paviršiaus šiurkštumą.

Šio darbo tikslas yra išbandyti ultravioletinę spinduliuotę femtosekundinio lazerio tiesioginį Mach - Zehnderio interferometro užrašymą ant optinio šviesolaidžio. Darbo tikslui pasiekti buvo iškeltos šios užduotys:

1. Apžvelgti literatūrą, susijusią su šviesolaidiniais jutikliais ir integruotais interferometrais, sukurtais pasitelkiant lazerinę abliaciją.
2. Atlikti šviesolaidžio paviršiaus abliacijos eksperimentus ir įvertinti gautą darinį.
3. Suformuoti MZI šviesolaidyje ir ištirti jo veikimo charakteristikas.

1. Literatūros apžvalga

1.1. Skaidrių terpių modifikavimas lazerio spinduliuote

Šiame skyrelyje aptarsime skaidrių medžiagų lazerinius modifikavimo tipus ir jų skirtumus. Apdirbant skaidrias medžiagas femtosekundiniais (fs) impulsais išgaunamas poveikis medžiagai ir galutinis rezultatas yra priklausomi nuo lazerinių parametrų (impulso trukmės, bangos ilgio, energijos, pasikartojimo dažnio), apdirbamos medžiagos savybių (draustinių energijų juostos tarpo, šilumos plėtimosi koeficiento), bei naudojamo lęšio skaitinės apertūros (NA). Kai fs lazerio impulsas fokusuojamas skaidrioje medžiagoje, pakankamai didelis spinduliuotės intensyvumas gali sukelti modifikacijas, tokias kaip izotropinio lūžio rodiklio pokytis, dvigubas šviesos lūžimas arba tuštumos susidarymas.

1.1.1. Izotropinis lūžio rodiklio pokytis

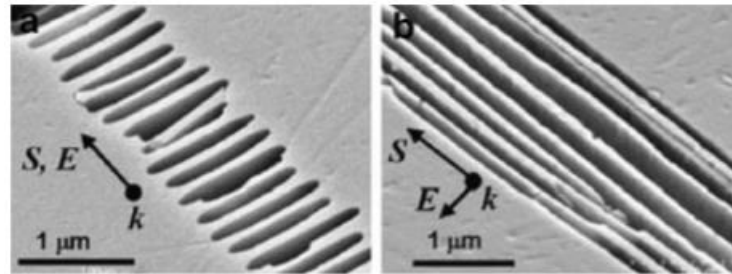
Esant slenkstinei medžiagos pažeidimo energijai yra pastebimi izotropiniai lūžio rodiklio pokyčiai kitaip vadinami I tipo modifikacija. Vienas iš galimų aiškinimo modelių yra defektų modelis. Stiklai yra sudaryti iš SiO_2 tetraedrų grandinėlių, kurių struktūra yra stabiliausia, kai žiedinių grandinėlių struktūrą sudaro 5, 6 tetraedrai. Pasitelkus Ramano spektroskopiją buvo pastebėta, kad po apšvitinimo lazeriu SiO_2 tetraedrų grandinėlėse padidėja 3 ir 4 narių žiedinių struktūrų skaičius. Be to, infraraudonųjų spindulių spektroskopija parodė Si – O – Si jungties kampo pokytį [1]. Visa tai prilygsta struktūros sutankėjimui bei lūžio rodiklio padidėjimui [2]. Ši analizė įrodo, kad slenkstinis femtosekundinis lazerio apšvitinimas veda į šildymą bei stiklo lydymą. Vėliau stiklas greitai atvėsta ir užšąla ir taip gaunamos tankesnės struktūros su didesniais lūžio rodikliais. Pavyzdžiui, lydytame kvarce naudojant 100 fs, 800 nm 40 - 150 nJ energijos impulsus, fokusuojant 0,65 NA, gaunamas izotropinis lūžio rodiklio pokytis.

1.1.2. Dvejopas šviesos lūžimas

Esant tarpinei medžiagos pažeidimo energijai buvo pastebėtas dvejopas šviesos lūžimas, dar žinomas kaip II tipo modifikacija [3]. Shimotsuna ir kt. nustatė, kad apšvitintame tūryje susidaro periodiškos, nanometrines skalės gardelės, kurių medžiagos sudėtis tarpiskai skiriasi. Taip pat, šios gardelės yra nukreiptos statmenai femtosekundinio lazerio pluošto poliarizacijai. Medžiagose susidarę dariniai susideda iš besikeičiančių nanometrines skalės tuštumų ir nepažeistos medžiagos sluoksnių. Šie nanometrines skalės medžiagos tankio ir sudėties svyravimai, vadinami „nanogardelėmis“ ir jos sukelia šviesos dvigubą lūžimą.

Nanogardelės susidaro dėl interferencijos tarp femtosekundinio lazerio impulso lauko (intensyvios elektromagnetinės bangos) ir susidarancios plazmos laisvųjų elektronų elektrinio

lauko. Ši interferencija sukelia periodišką elektronų plazmos tankio moduliacijas, sukuriančias periodiškus darinius [4]. Pavyzdžiui, lydytame kvarce, 100 fs, 800 nm, 150 - 500 nJ impulsai, fokusuoti 0,65 NA, sukelia dvigubo lūžio efektą.



1 pav. Nanogardelių elektroninio mikroskopo nuotrauka. Poliarizacija lygiagrečiai (a) ir statmena (b) užrašymo kryptims [5], E - elektrinio lauko poliarizacija (lydytame kvarce), S - skenavimo kryptis, k - pluošto kritimo kryptis.

1.1.3. Ertmių susidarymas

Tuštumos yra suformuojamos naudojant sąlyginai didelę energiją. Sufokusavus impulsus į medžiagą, netiesinės jonizacijos proceso metu fokusavimo taške įvyksta mikro sproginimas arba Kulono sproginimas, kuris gali sukurti tuštumą. Sprogimo metu stipri smūginė banga pradeda skliti apdirbama medžiaga, palikdama tuštumą. Susidariusią tuštumą supa didesnio lūžio rodiklio aplinka. Tai medžiagos sutankėjimas, sukurtas smūginės bangos [6]. Pavyzdžiui, lydytame kvarce naudojant 100 fs, 800 nm 500 nJ energijos impulsus, fokusuojami 0,65 NA, susidaro tuštumos.

1.2. Abliacija ir Beer Lamberto dėsnis

Kai lazerio pluoštas patenka į skaidrią medžiagą, dalis spinduliuotės yra absorbuojama. Spinduliuotės intensyvumas pradeda mažėti eksponentiškai pluošto sklidimo kryptimi pagal Beer Lamberto dėsnį:

$$I(z) = (1 - R)I_0 e^{-\alpha z}, \quad (1)$$

kur I_0 yra krintančio pluošto intensyvumas, R atspindys, α sugerties koeficientas ir z yra sugerties gylis, tai yra kiek pluoštas nusklido kelio medžiagoje. Sugerties koeficiento reikšmė yra:

$$\alpha = \frac{4\pi\kappa}{\lambda} \quad (2)$$

κ - ekstincijos koeficientas, o λ - spinduliuotės bangos ilgis. Tada gylis, kuriame tokia spinduliuotė bus sugerta [7]:

$$d = \frac{1}{\alpha}. \quad (3)$$

Kaip galime matyti kuo trumpesnis yra bangos ilgis, tuo mažesniame gylyje bus sugerta spinduliuotė. Taigi, taikant trumpesnius bangos ilgius abliacijos procesas tampa lengviau valdomas ir preciziškas.

Impulso trukmė taip pat yra svarbi mažinant šilumos paveiktas zonas. Femtosekundžių eilės impulsai nesąveikauja su impulso indukuota plazma, todėl pastaroji nėra kaitinama. Visiškai priešingai yra su ilgesniais impulsais, kurie indukuotą plazmą kaitina, sukeldami medžiagos persilydymą, ko rezultatas yra prastesnė medžiagos apdirbimo kokybė. Taigi, naudojant fs impulsus galime sumažinti šiluminius efektus, tokius kaip perlydyta medžiaga arba šilumos poveikis pažeidimo kraštuose [8].

1.3. Šviesolaidiniai mikrosensoriai

1.3.1. Šviesolaidiniai sensoriai pagaminti pasitelkiant femtosekundinius lazerius

Šviesolaidis yra plona, dažniausiai stiklo, gija, kuri dėl visiško vidaus atspindžio išilgai geba perduoda šviesą. Dar 1960 metais buvo numatyta, kad šviesolaidžiai gali patirti pakankamai mažus nuostolius norint perduoti optinius signalus dideliais atstumais, o aštuntajame dešimtmetyje buvo pagamintas mažų nuostolių kvarcinis šviesolaidis. Nuo to laiko telekomunikacijų sistemose sėkmingai buvo pritaikyti optiniai šviesolaidžiai (OŠ). Taip pat, jie buvo pradėti vystyti ir taikyti jutiklių ir kitose mokslo bei technologijų srityse.

Jutiklis laikomas nepakeičiama informacinės sistemos dalimi. Automatiškai valdomoje sistemoje jutikliai teikia grįžtamąjį signalą reikiamus procesam kontroliuoti. Pramoninėje ir civilinėje inžinerijoje jutikliai nurodo pagrindinius parametrus, tokius kaip įtempiai, slėgis, vibracija ir temperatūros pokyčiai. Medicinoje jie naudojami aptikti ir perduoti biocheminę informaciją.

Po šviesolaidžio išradimo buvo iškelta idėja panaudoti juos kaip jutiklius. Lyginant su įprastiniais jutikliais jie turi daugybę privalumų [9]:

- Mažas dydis ir svoris;
- Atsparumas aplinkai (vandeniui, temperatūrai);
- Atsparumas elektromagnetiniams ir radijo dažnių trikdžiams;
- Saugumas ir patogumas;
- Galimybė matuoti daug parametų;
- Didelis pralaidumas ir didelis jautrumas;

- Maža kaina ir ekonominis efektyvumas.

Šviesolaidiniai jutikliai gali būti klasifikuojami į taškinius arba paskirstytus (*angl. distributed*) jutiklius. Jei pokyčiai matuojami konkrečiuose šviesolaidžio taškuose tai šis jutiklis yra taškinis, o jei fizikinis parametras gaunamas per tam tikrą šviesolaidžio ilgį ir kaip funkcija nuo padėties tada šis jutiklis yra pasiskirstęs. Taškinių jutiklių ilgis yra ribotas, jie pateikia parametro, apskaičiuoto pagal tam tikrą erdvės tūrį, reikšmę, atitinkančią taško ilgį. Jei reikalingi kelių taškų matavimai, reikia naudoti keletą taškinių jutiklių, kuriems reikia įdiegti kelis įvedimo/išvedimo kanalus, detektorių matricas ir kt. Taškinių jutiklių, apibrėžiančių erdvinę sistemos skiriamąją gebą, skaičių riboja kaina, todėl jų nepakanka daugeliui praktinių pritaikymų [10].

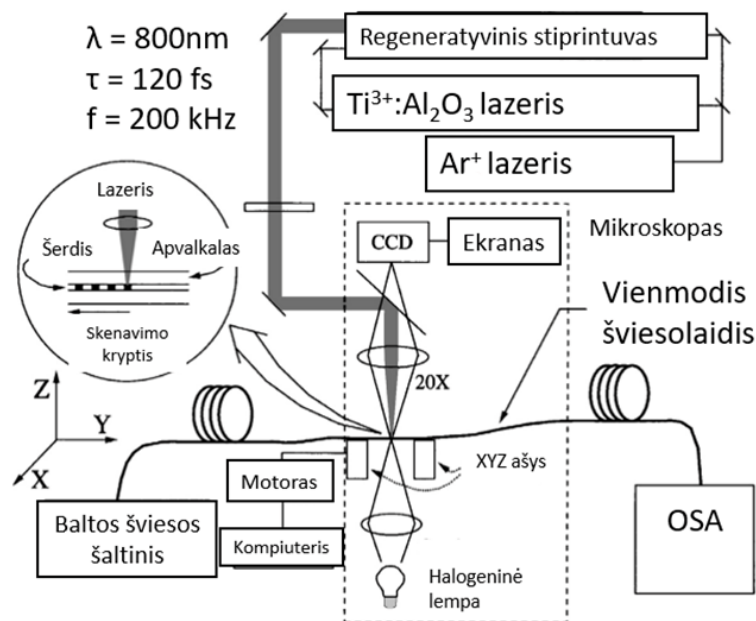
Šiuo metu taškinių jutiklių srityje dominuoja dviejų tipų konstrukcijos - šviesolaidinės gardelės ir interferometrai [9]. Pasitelkiant femtosekundinius lazerius šiems jutikliams sukurti pakanka vieno žingsnio proceso. Jo metu yra išabliuojamos aukštos paviršiaus kokybės darinys arba yra sukuriamos lūžio rodiklio modifikacijos be išankstinio šviesolaidžio paruošimo ar legiravimo. Sufokusuoto fs lazerio pluoštas krintantis į šviesolaidį yra absorbuojamas per netiesinę sąveiką tarp lazerinės šviesos ir medžiagos, tai yra daugiafotonės sugerties (keli fotonai sugeriami vienu metu, siekiant perkelti elektroną iš pagrindinės energetinės būsenos į aukštesnę), tuneliavimą bei griūtinę jonizaciją. Esant didelei energijai medžiaga yra paveikiama ir joje atsiranda anksčiau minėti pakitimai, tokie kaip lūžio rodiklio pokytis, medžiagos abliacija, mikro darinių sukūrimas, kuriems galime suteikti norimus dydžius ir formas.

1.3.2. Ilgojo periodo šviesolaidinės gardelės pagamintos pasitelkiant fs lazerinį apdirbimą

Šviesolaidinės gardelės (ŠG) su 100 - 1000 μm periodu yra vadinamos ilgojo periodo šviesolaidinėmis gardelėmis (IPŠG) ir dažnai naudojamos kaip jutikliai. Kadangi periodinį lūžio rodiklio darinį galima lengvai gauti naudojant germaniu (Ge) legiruotų stiklų fotorefrakcinį efektą, dauguma IPŠG yra gaminamos iš germaniu legiruotų kvarcinių optinių šviesolaidžių, pasitelkiant UV spindulius. Apšvitinimas UV spinduliais padidina šviesolaidžio lūžio rodiklį dėl to, kad susidaro su Ge susiję stiklo defektai. Ultravioletinių spindulių apšvitimo metodika taikoma tik su fotojautrumą turinčiais Ge legiruotais OŠ. Tačiau UV spindulių švitinimo būdu pagamintos ŠG greitai pasensta, nes lūžio rodiklio pokytis dingsta net žemesnėje nei 100 °C. Yuki ir kt. nustatė, kad fokusuoti fs lazerio impulsai sukelia nuolatinį

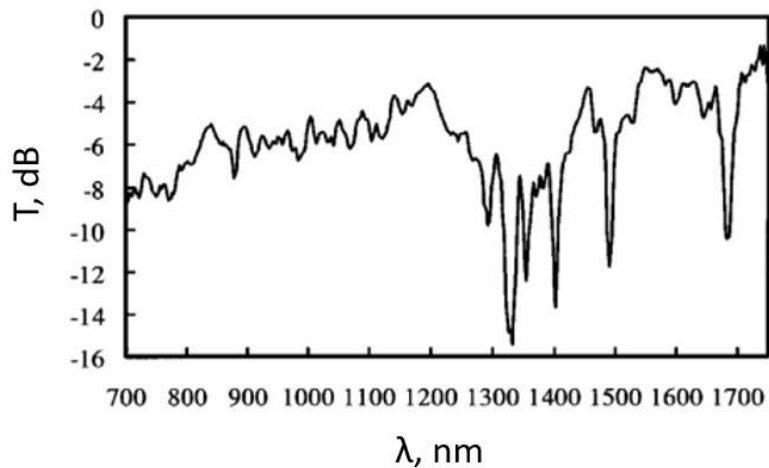
lūžio rodiklio padidėjimą įvairiuose stikluose [11]. Jie pristatė naują IPŠG gamybos būdą, kuriame taikomi fokusuoti femtosekundiniai impulsai.

Tokių jutiklių gamybos eksperimento schema yra pavaizduota antrajame paveikslėlyje (2 pav.). Naudotas OŠ buvo standartinis vienmodis šviesolaidis. Naudota Ti:safyro lazeris, kurio impulso trukmė buvo 120 fs, bangos ilgis 800 nm, o impulso pasikartojimo dažnis 200 kHz. OŠ buvo pritaisytas ant kompiuteriu valdomų XYZ ašių staliuko ir pataškiui paveiktas lazerio pluošto. Tuo pačiu metu optinio spektro analizatoriumi (OSA) buvo sekamas įrašomų IPŠG pralaidumo spektras.

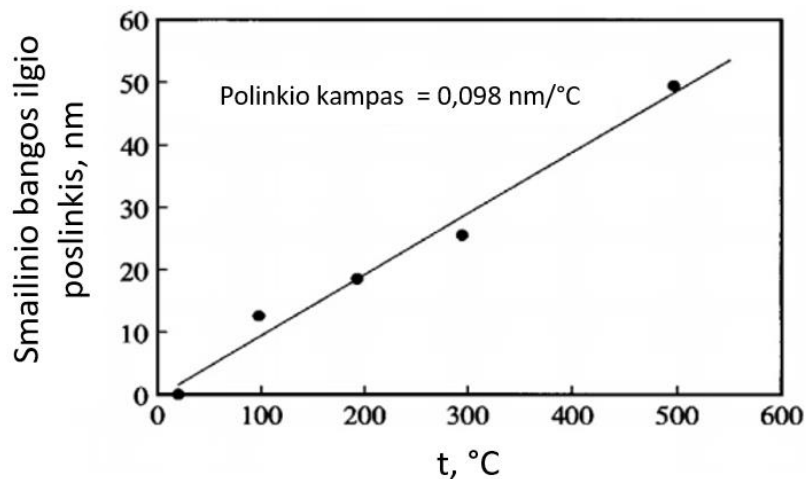


2 pav. Eksperimento schema IPŠG fabrikavimui su femtosekundiniais impulsais [11].

3 pav. parodytas 29,9 mm ilgumo ir 460 μm gardelių periodo pralaidumo spektras. Siekiant ištirti femtosekundiniais impulsais sukurtų IPŠG šiluminį atsparumą pralaidumo spektras buvo išmatuotas kaitinant šviesolaidį skirtingose temperatūrose 480 min. Taip pat, buvo pastebėta, kad po OŠ kaitinimo nuo 20 iki 500 °C atsistato pradinė išfiltruojamo bangos ilgio vertė λ_p (angl. *peak wavelength of loss*) bei pralaidumo spektro smailė T_p paklaidų ribose. Tai parodė, kad IPŠG turi šiluminį atsparumą iki 500 °C. Šiluminis λ_p poslinkis taip pat buvo ištirtas ir kaitinant IPŠG iki 500 °C. (4 pav.) demonstruoja 1,49 μm bangos ilgio λ_p poslinkį priklausomai nuo temperatūros. Šis poslinkis yra proporcingas temperatūrai, kurios jautris yra 0,098 nm/°C, kuris yra panašus į IPŠG kūrimą pasitelkiant UV spinduliuotę.



3 pav. 29,9 mm ilgumo, 460 μm gardelių periodo IPŠG pralaidumo spektras [3].

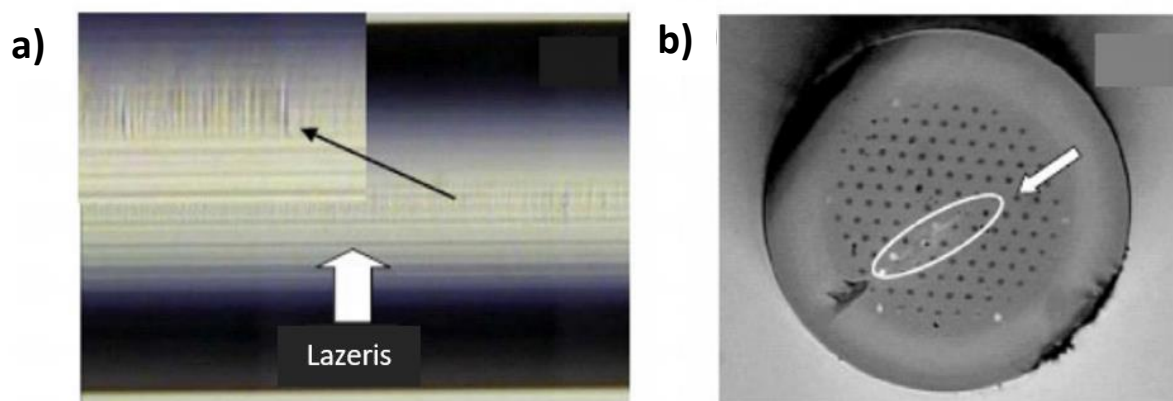


4 pav. 1,49 μm bangos ilgio λ_p poslinkio priklausomybė nuo temperatūros [11].

1.3.3. Brego gardelės vienmodžiame šviesolaidyje pagamintos pasitelkiant fs lazerio spinduliuotę

Šviesolaidinės Brego gardelės (ŠBG) taip pat gali būti sukurtos pasitelkiant fs lazerio impulsus. Pirmosios ŠBG buvo užrašytos Ge legiruotuose OŠ (Corning SMF - 28) pasitelkiant 800 nm, 120 fs impulsus bei nulinės eilės fazines kaukes. Šios gardelės yra stabilios net kaitinamos porą savaičių 300 °C. 2004 metais buvo pademonstruota ŠBG užrašymas lazeriu, nenaudojant kaukės [12]. Šios gardelės buvo stabilios net 900 °C temperatūroje. Priklausomai nuo temperatūrinio stabilumo bei medžiagos lūžio rodiklio moduliacijos, ŠBG yra skirstomos I ir II tipus. I tipo gardelės yra pagaminamos naudojant lazerinius impulsus su mažesne energija negu pažeidžiama medžiaga, o II tipo gardelės yra gaminamos su energija virš pažaidos slenksčio. Šie dariniai skiriasi savo jautrumu spinduliuotės intensyvumui, atkaitinimo ribomis bei išsidėstymu [13].

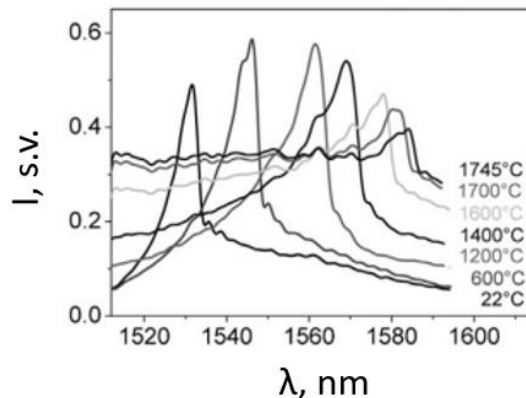
Femtosekundiniu lazeriu sukuriamos ŠBG neseniai buvo užrašytos ir fotoninių kristalų šviesolaidžiuose (FKŠ), kurie gali būti puikūs aukštų temperatūrų sensoriai. 2005 metais, pasinaudojus 267 nm femtosekundiniu lazeriu buvo užrašytos gardelės vandenilio turinčio gryno kvarco fotoniniame kristale [12]. Vandenilio buvimas padidino jautrumą šviesai (fotojautrumą), tačiau atkaitinimo testai parodė, kad šios gardelės nėra II tipo. Taikant tą patį metodą buvo pabandyta užrašyti gardeles ir Ge legiruotus FKŠ. Šių gardelių struktūra pavaizduota 5 pav. Šios gardelės veikė atspindėdamos vieną modą, o temperatūrinis atsparumas siekė 700 °C. Jos buvo geresnės nei I tipo gardelės vienmodžiuose šviesolaidžiuose [14]. Kiti nauji ŠBG jutikliai yra paremti femtosekundinių impulsų sukurtais mikro dariniais oro pripildytuose tarpeliuose, kurie yra sukurti veikti aukštose temperatūrose - virš 800 °C [15].



5 pav. Optiniu mikroskopu padarytos FKŠ užrašytų Brego gardelių nuotraukos (a) išilgai bei (b) FKŠ skerspjūvis [14]. Nuotraukose a) juoda rodykle bei b) balta rodykle yra nurodytos Brego gardelės.

Safyro bangolaidžių lydymosi temperatūra yra labai aukšta (2050 °C), o optinės absorbcijos nuostoliai yra santykinai maži. Taigi safyras naudojamas gaminti atspariems aukštai temperatūrai prietaisams. Grobnic ir kt. pirmieji pristatė atspindinčių šviesą ŠBG gamybą daugiamodyje safyro šviesolaidyje. Šios ŠBG išliko stabilios iki 1500 °C temperatūros [16]. 2009 m. Busch ir kt. IR fs lazeriu gamino safyro ŠBG, o pagamintos gardelės neparodė atspindžio stiprumo pablogėjimo esant aukštai temperatūrai iki 1745 °C [17] (6 pav.). Visgi, esant labai aukštai temperatūrai, ŠBG atspindžio signalo ir triukšmo santykis (STS) sumažėjo dėl stipraus foninio triukšmo, kurį sukelia šiluminė juodojo kūno spinduliuotė. Dviejų parametru (įtempio ir temperatūros) jutiklis buvo sukurtas remiantis safyro ŠBG [17]. Stebint terminio juodojo kūno spinduliuotės signalo lygį kaip temperatūros atskaitos tašką, bangos

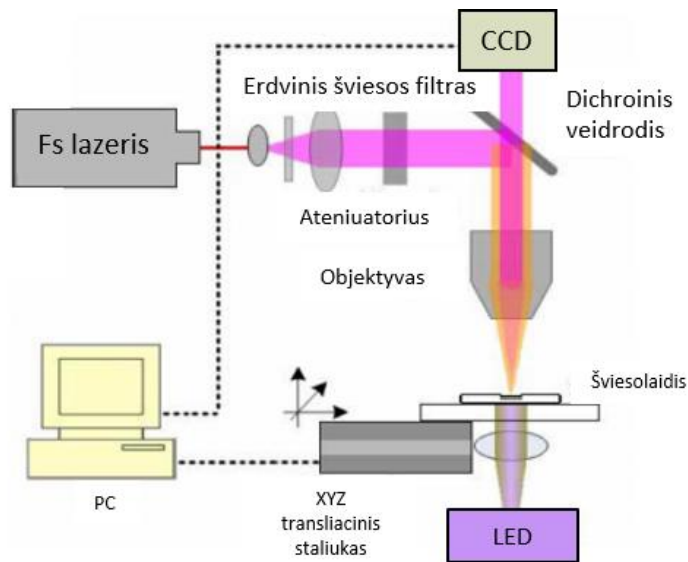
ilgio poslinkis, priklausantis nuo temperatūros, buvo atsietas nuo įtempio. Šis jutiklis gali būti naudingas stebint įtempius aukštoje temperatūroje.



6 pav. Safyro šviesolaidyje užrašytų Brego gardelių atspindžio spektrai iki 1745 °C.

1.3.4. Interferenciniai jutikliai pagaminti pasitelkiant fs lazerinius impulsus

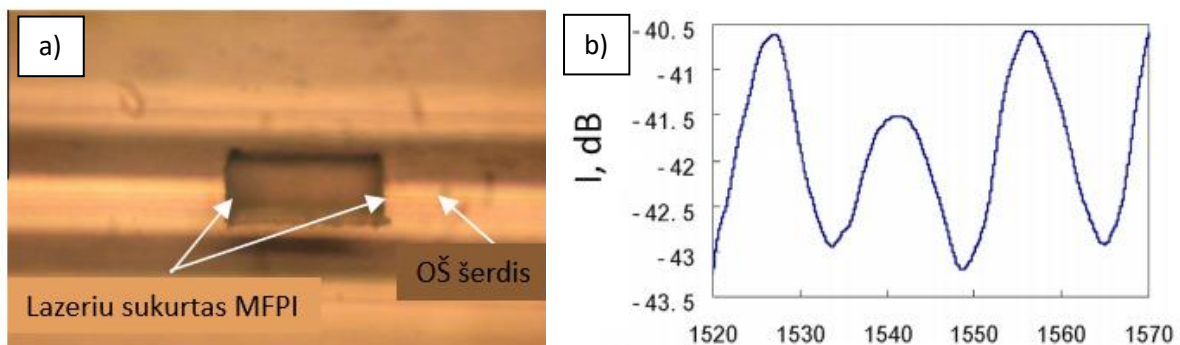
Be fs lazerio panaudojimo šviesolaidžio šerdies lūžio rodiklio keitimui, jie gali būti pritaikomi medžiagos šalinimui [18]. Kai fs lazerio impulsai sufokusuojami į silicio dioksido medžiagą, netiesinės jonizacijos proceso metu fokusavimo taške įvyksta mikro arba kitaip Kulono sprogimas, kuris gali sukurti mikro darinį. Lyginant su ilgų impulsų lazeriais, naudojamais medžiagų apdirbimui, impulso energija yra lokalizuota. Todėl šiluminiai ir mechaniniai aplinkinės medžiagos pažeidimai yra minimalūs, o deformacijos ir abliacijos slenksčius galima tiksliai apibrėžti. Pirmąjį fs lazerio panaudojimą gaminant mikro Fabry - Perot (FP) interferometrą (MFPI) buvo aprašytas 2007 metais [19]. Fs lazerinės sistemos schema, skirta gaminti MFPI (7 pav.), naudojant Ti:Safyro lazerinę sistemą (800 nm). Impulsų, kurių pasikartojimo dažnis 1 - 5 kHz, energija siekė iki 100 μ J, o trukmė 100 fs. Atspindėjęs nuo dichroinio veidrodžio pluoštas objektyvu ($NA = 0,65$) buvo sufokusuotas į kvarcinį šviesolaidį. Šviesos diodas (LED) buvo naudojamas apšviesti mėginį, kad MFPI jutiklį po abliacijos būtų galima stebėti realiu laiku, naudojant CCD kamerą, prijungtą prie optinio mikroskopo. Kompiuteriu valdomas trijų ašių transliacijos staliukas (100 nm skiriamoji geba X kryptimi, 125 nm Y kryptimi ir 7 nm Z kryptimi) buvo naudojamas norint atlikti reikiamus OŠ padėties pakitimus.



7 pav. Mikroapdirbimo schema naudota MFPI gaminimui [12].

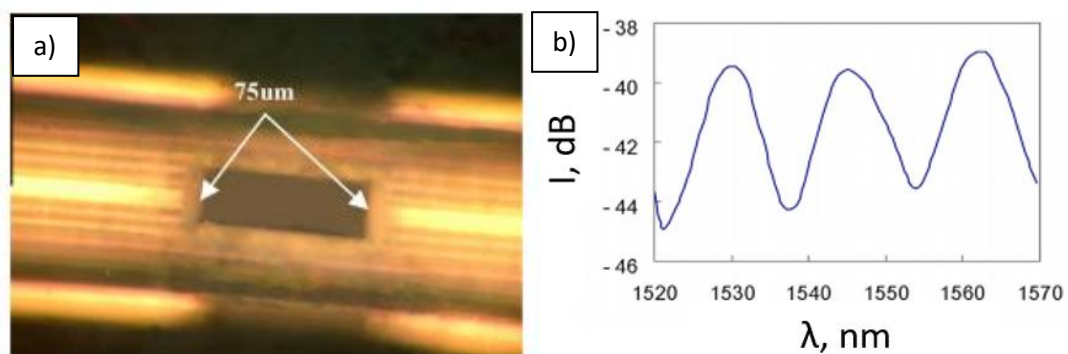
Eksperto metu lazerio bangos ilgis buvo 800 nm, impulso plotis - 120 fs, o pasikartojimo dažnis - 1 kHz. Pluošto dėmės dydis buvo 5 μm , o impulso energija - 20 μJ . Vienmodis šviesolaidis (SMF - 28, Corning) ir fotoninių kristalų šviesolaidis (Crystal Fiber, ESM - 12 - 01) buvo atitinkamai sumontuoti ant XY ašiu staliuko ir judėjo 300 $\mu\text{m/s}$ greičiu. Buvo atliktas vienas praėjimas 80 $\mu\text{m} \times 30 \mu\text{m}$ plote ir toks procesas buvo pakartotas kelis kartus, kol susidarė reikiamo dydžio ertmės.

8 pav. a) dalyje parodyta MFPI su 80 μm ertmės ilgiu optinė nuotrauka, o 8 pav. b) dalyje - atspindžio spektras, matuojamas Si720 (Micron Optics). Bangos ilgio skiriamoji geba yra 0,25 pm, o bangos ilgis – 1520 - 1570 nm su 1 pm tikslumu. Iš 8 pav. b) matyti, kad interferencinės juostelės yra pakankamai kontrastingos, kad būtų galima naudoti šiuos jutiklius, tačiau juostelių matomumas yra santykinai mažas dėl šiurkščių FP ertmės paviršių, kuriuos sukuria abliacijos produktai, prilipę prie apdirbtų paviršių, todėl FP ertmės viduje susidaro gana stiprus šviesos sklaidymas.



8 pav. a) 80 μm ilgio MFPI vienmodžiame šviesolaidyje, b) bei 80 μm MFPI atspindžio spektras [12].

9 pav. a) parodyta MFPI jutiklio su 75 μm ertmės ilgio optinė mikrografija FKŠ. Galima pastebėti, kad tokio darinio abu kraštai yra tvarkingi ir lygiagretūs. Lyginant su vienmodžio šviesolaidžio pagrindu pagamintais MFPI, FKŠ pagrindu sukurtu MFPI interferencinių juostelių skyra pagerėjo keliais dB (9 pav. b)). To priežastys yra: (i) FKŠ yra visiškai pagamintas iš gryno lydyto kvarco, kuris sumažina abliacijos produkto liekanas ir šviesos sklaidą [11]; (ii) FKŠ apvalkalas yra 2D fotoninių kristalų darinys su oro skylėmis, išsidėsčiusiomis per šviesolaidžio ilgį. Tai padeda greitai išsklaidyti lazerio abliacijos metu generuojamą šilumą ir slėgį, taigi galima efektyviai sumažinti šiluminę žalą FKŠ skersinėse koordinatėse.

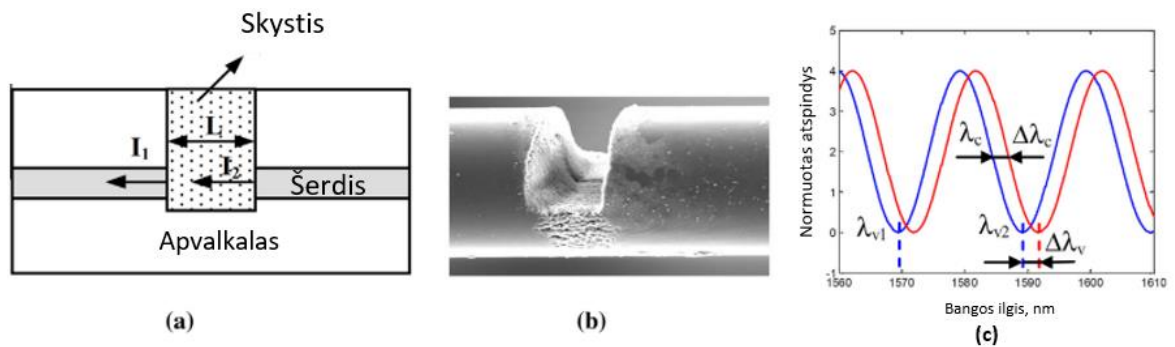


9 pav. a) 75 μm ilgio MFPI FKŠ, b) 75 μm MFPI atspindžio spektras [12].

Atitinkamai buvo ištirtas MFPI, pagrįsto vienmodžiais šviesolaidžiais, jautrumas. Vienmodžio šviesolaidžio pagrindu veikiančio MFPI jutiklio ir FKŠ pagrindu veikiančio MFPI jutiklio bangos ilgio poslinkis buvo matuojamas stebint pralaidumo spektro minimumą ties 1550 nm. Eksperimentiniai rezultatai rodo, kad vienmodžio šviesolaidžio MFPI jutiklio ir FKŠ MFPI jutiklio bangos ilgio ir deformacijos jautrumas yra atitinkamai 0,006 nm/ $\mu\epsilon$ ir 0,0045 nm/ $\mu\epsilon$.

Tao Wei ir kt., taip pat pademonstravo FPI, kurio interferencinių juostelių matomumas buvo 16 dB, pasitelkdami fs lazerinį bei vienos pakopos mikro apdirbimą ant vienmodžio OŠ [20]. 10 pav. parodyta bangolaidyje užrašyto FPI jutiklio schema, elektroniniu mikroskopu (SEM) padaryta nuotrauka, ir interferencijos spektro simuliacija. Prietaisas buvo pagamintas vienmodžiame šviesolaidyje, naudojant fs lazerį (Legend - F, Coherent), kurio pasikartojimo dažnis, centro bangos ilgis ir impulsų plotis buvo atitinkamai 1 kHz, 800 nm ir 120 fs [21]. Ertmės ilgis buvo apie 60 μm , apskaičiuotas pagal SEM nuotraukos vaizdą. Mikro įpjovos gylis siekė maždaug 72 μm , taip pat buvo atidengta pluošto šerdis. FPI ertmė buvo išgauta labai arti

(2 mm) šviesolaidžio galo. Mažas atstumas nuo galo užtikrina mažą lenkimo sukkelto įtaiso sulaužymo tikimybę.



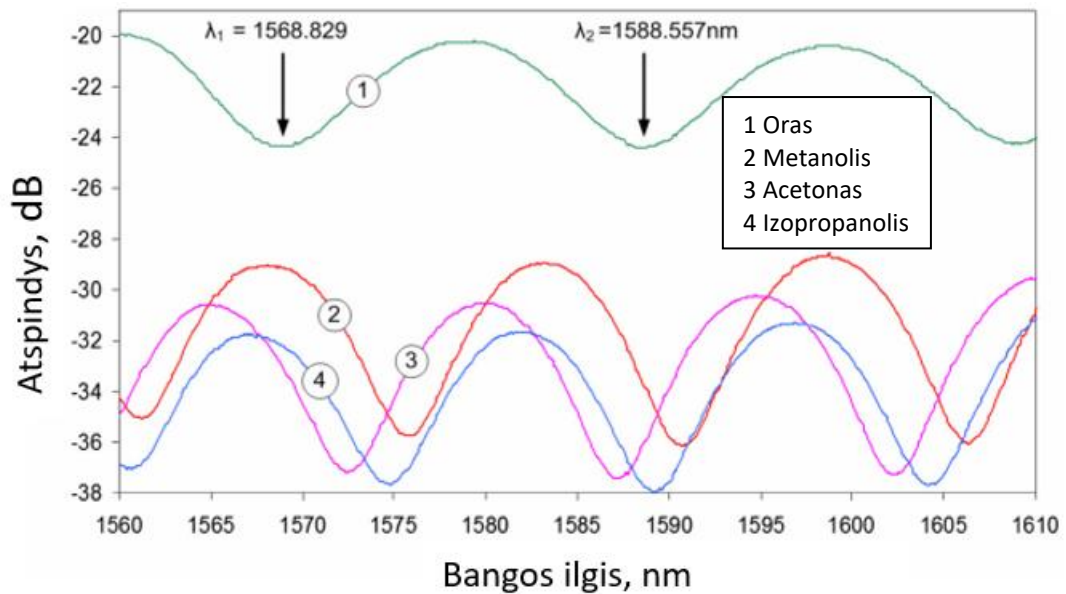
10 pav. a) FPI jutiklio schema, b) elektroniniu mikroskopu (SEM) padaryta fs lazeriu sukurto FBI šviesolaidyje nuotrauka, ir c) interferencijos spektro simuliacija [27].

Dviejų gretimų interferencijos minimumų fazių skirtumas yra 2π . Todėl optinį erdmės ilgį galima apskaičiuoti pagal:

$$Ln = (\lambda_{v1} \cdot \lambda_{v2}) / 2(\lambda_{v1} - \lambda_{v2}) \quad (4)$$

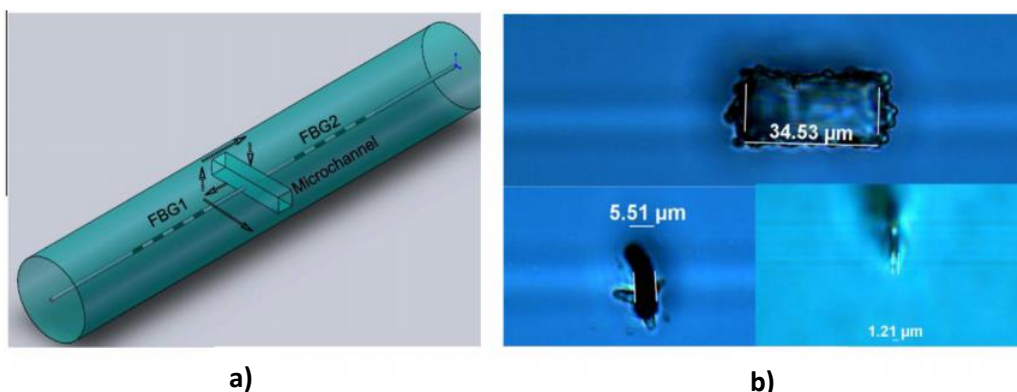
kur λ_{v1} ir λ_{v2} yra dviejų gretimų minimumų centriniai bangos ilgiai interferencijos spektre.

Norint įvertinti lūžio rodiklio matavimo galimybes, šviesolaidinis FPI buvo išbandytas naudojant įvairius skysčius, įskaitant metanolį, acetoną ir izopropanolį kambario temperatūroje [27]. Įvairiuose skysčiuose panardinto prietaiso atspindžio spektrai parodyti 11 pav. Signalo intensyvumas sumažėjo, kai prietaisas buvo panardintas į skysčius. Tai įvyko dėl sumažėjusio lūžio rodiklio kontrasto, ko pasekmė yra sumažėję Fresnelio atspindžiai tarp erdmės sienelių. Tačiau interferencinės juostelės išlaikė panašų matomumą. Spektrinis atstumas tarp dviejų gretimų minimumų taip pat sumažėjo, o tai rodo terpės lūžio rodiklio padidėjimą erdmės viduje. Pasinaudojus (4) lygtimi buvo apskaičiuotos skysčių lūžio rodiklių reikšmės: $n(\text{metanolis}) = 1,3283$, $n(\text{acetonas}) = 1,3577$ ir $n(\text{izopropanolis}) = 1,3739$, kurios buvo artimos literatūroje priimtoms vertėms.



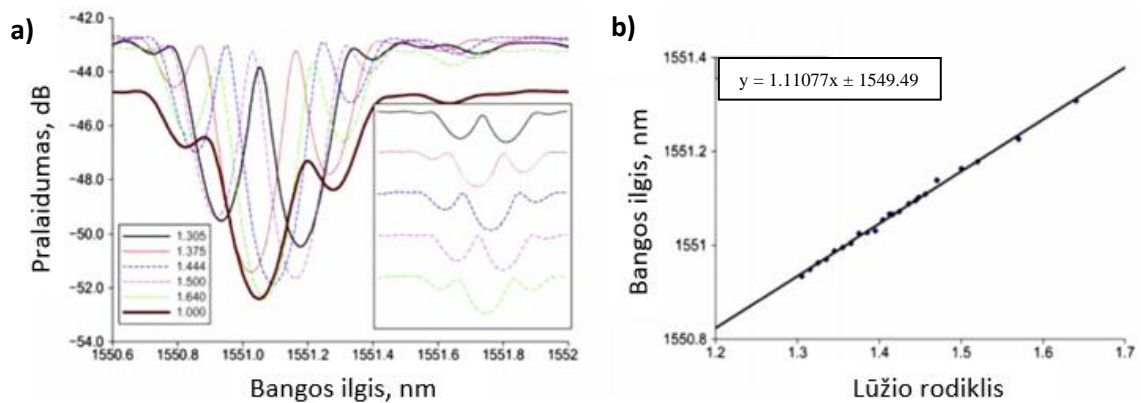
11 pav. FPI pralaidumo spektras ore, metanolyje, acetone bei izopropanolyje [27]

2011 m. Zhou ir kt. pristatė darbą apie mikro kanalų užrašymą OŠ, naudojant fs lazerinį ir cheminį ėsdinimą [22]. 12 pav. a) yra suprojektuoto mikro kanalo ŠBG - FP įrenginio schema, susidedanti iš FP ertmės, kurią suformuoja atskirta ŠBG pora. Pasitelkiant UV spinduliuotę, konstrukcijos šviesolaidyje yra užrašomos dvi 2 mm ilgio ŠBG, kurių centrinis bangos ilgis yra 1551 nm, o atspindys - 3 dB. FP ertmės, kuri yra skirtis tarp dviejų ŠBG, ilgis yra apie 1 mm, o ertmės viduryje esantis mikro kanalas yra sukurtas naudojant fs lazerio indukuotą cheminį ėsdinimą. 12 pav. b) pavaizduoti trijų mikro kanalų vaizdai po ėsdinimo proceso (1,21 μm , 5,51 μm , 34,53 μm).



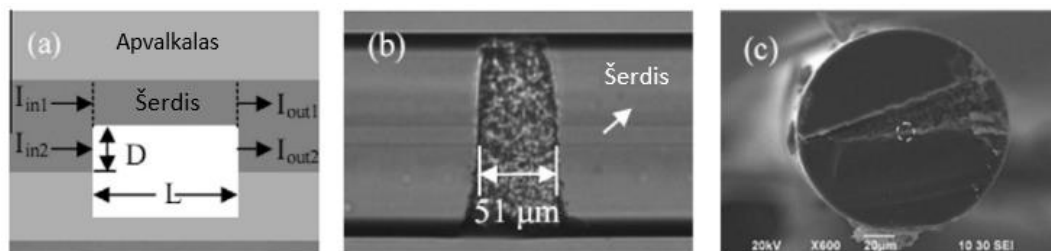
12 pav. a) ŠBG-FP mikro kanalo schema; pažymėtos rodyklės nurodo sufokusuoto lazerinio pluošto judėjimą fabrikavimo metu. b) fs lazeriu užrašytos po cheminio ėsdinimo padarytos mikro kanalų nuotraukos [28].

Pagaminti mikro kanalo ŠBG - FP jutiklis buvo ištestuoti merkiant į skirtingas alyvas, norint patikrinti lūžio rodiklio matavimo galimybes. 13 pav. a) parodyta 5 μm mikro kanalo mėginio spektrinės raidos pokytis didėjant lūžio rodikliui. 5 μm mikro kanalo ŠBG - FP bangos ilgio smailės ir lūžio rodiklio santykis pateiktas 13 pav. b). Stebima tiesinė priklausomybė, lūžio rodiklio jautrumas yra apie 1,1 nm/RIU (lūžio rodiklio vienetą). Šis siauras mikro kanalo FBG - FP įrenginys gali aptikti lūžio rodiklio pokyčius iki 1,7 vertės.

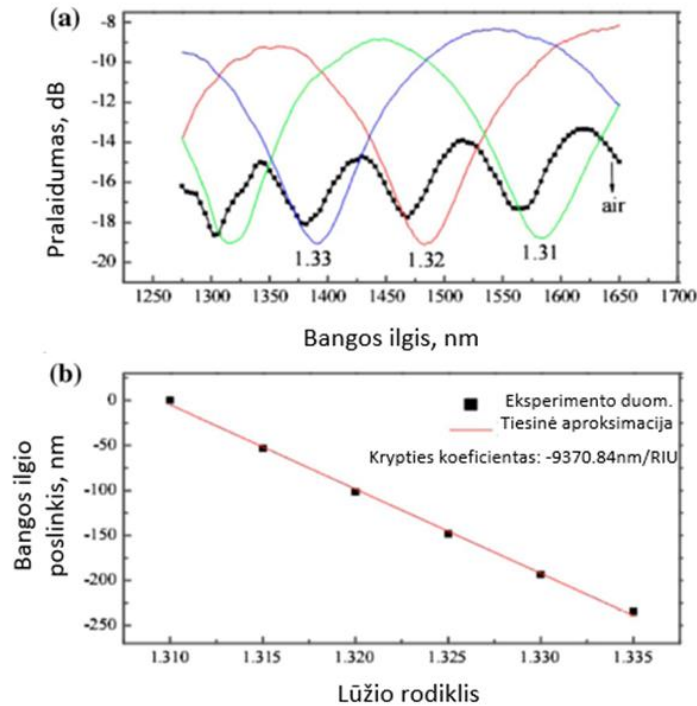


13 pav. a) 5 μm mikro kanalo ŠBG-FP spektro raida prie skirtingų lūžio rodiklių (b) Tiesinė bangos ilgio poslinkis esant skirtingiems lūžio rodikliams, poslinkio koeficientas 1.1 nm/RIU [28].

2010 m. Ying Wang ir kt. pristatė kompaktišką šviesolaidinį Mach - Zehnder interferometrą (MZI), skirtą lūžio rodiklio matavimams su dideliu jautrumu ir tikslia jutiklio vieta [23]. Vienoje interferometro atšakoje yra mikro ertmė, suformuota pašalinant dalį šviesolaidžio šerdies ir apvalkalo fs lazeriniu mikro apdirbimo metu, o kita atšaka lieka nepakitusi su likusia šviesolaidžio šerdies dalimi. Šviesolaidinio MZI schema, optinio mikroskopo nuotrauka ir elektroninio mikroskopo (SEM) nuotrauka parodyta 14 pav.



14 pav. Fs lazerio impulsais sukurtas MZI, (a) interferometro schema (iš viršaus), kur D reiškia išabliuoto šviesolaidžio šerdies dydį; L ertmės ilgis. (b) Mikroskopi darytos MZI nuotraukos (vaizdas iš šono), (c) SEM darytos mikro ertmės nuotraukos [30].



15 pav. MZI interferencinis spektras (a) pralaidumo spektras (b) bangos ilgio poslinkis priklausomai nuo lūžio rodiklio mikro ertmėje [30].

Norėdami išbandyti sistemos atsaką į lūžio rodiklio pokyčius, šviesolaidinio MZI darinys buvo panardintas į skirtingą lūžio rodiklį turinčių skysčių seriją. Lūžio rodiklių diapazonas buvo 1,305 - 1,340 (ties 489,3 nm), o intervalas - 0,005. Buvo fiksuojami pralaidumo spektrai, kurių skiriamoji geba 0,1 nm. Kiekvieną kartą po to, kai buvo išmatuojamas mėginys, šviesolaidis buvo kruopščiai nuplaunamas metanoliumi, kol pradinis spektras (t. y. etaloninis spektras) buvo atstatytas, o mikro ertmėje neliko skysčio likučių. Tipiniai MZI įrenginio perdavimo spektrai pavaizduoti 15 pav. (a). 1,31 lūžio rodiklio skysčio spektras turėjo du rezonansinius bangos ilgius 1275 - 1650 nm (1314,87 ir 1584,47 nm) bangų ilgio srityje, o laisvo spektro diapazonas (*angl. Free Spectral Range*) buvo 270 nm. Bangos ilgio poslinkis, atitinkantis skirtingas lūžio rodiklio reikšmes tarp 1,31 ir 1,335, parodytas 15 pav. (b). Gautas itin didelis jautrumas - 9370,84 nm/RIU. Šį didelį jautrumą lemia dvi priežastys: labai platus MZI įrenginio spektrinis diapazonas ir mažas optinio kelio skirtumo pokytis, atsirandantis dėl vienoje MZI atšakoje esančio skysčio.

1.4. Mach - Zehnder interferometrai

Šiame poskyryje plačiau apžvelgsime Mach - Zehnder interferometrus (MZI). Šiais interferometrais galima stebėti santykinius fazių poslinkius, kuriuos sukelia optinio kelio skirtumas (OKS). OKS atsiranda šviesai, kuri sklinda šviesolaidžiu, persiskyrus į du pluoštus, keliaujančius skirtingomis terpėmis (atskiromis MZI atšakomis). Šviesos šaltinio skleidžiama

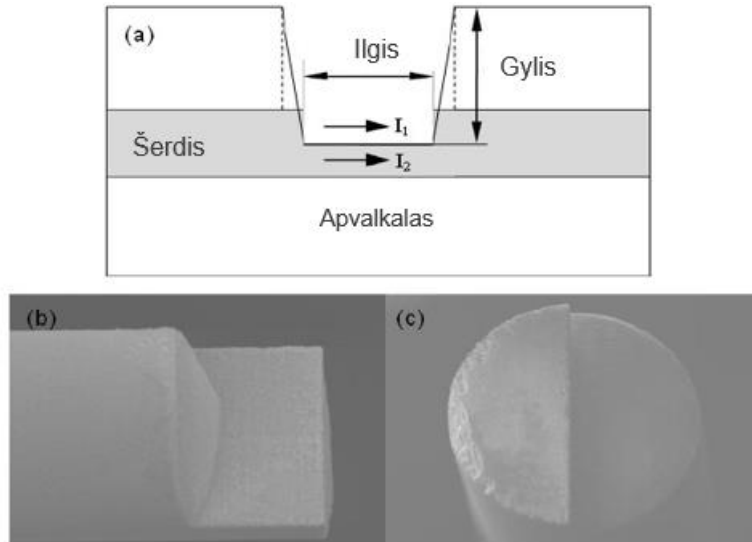
šviesa padalijama į du šviesos pluoštus, viena signalo dalis keliauja pirmine terpe (šerdimi), o antroji keliauja pro matuojamą terpę (16 pav.). Abiem pluoštams vėl susijungus, vyksta interferencija ir spektre matomos juostelės. Etaloninio (pirminio) kelio parametrai: lūžio rodiklis, fizinis ilgis ir pan., nesikeičia. Norint gauti puikias skirtingų fizinių dydžių matavimo charakteristikas, šviesolaidžio jutiklio srityje reikia sukurti reikiamą OKS. Remiantis juo, buvo pasiūlyta daug skirtingų MZI schemų. fs lazerio savybė sufokusuoti pluoštą į mažo skersmens dėmę įgalina šviesolaidžių mikro apdirbimą. Mikro apdirbimas šviesolaidžio viduje leidžia sukurti MZI darinį, didelį jautrumą ir stabilumą [24]. Toliau bus apžvelgiami skirtingi MZ interferometrinių jutiklių dizainai, pagaminti pasitelkiant lazerius, taip pat jų jutimo principus, privalumus ir trūkumus.

1.4.1. Ertmės formavimas

Vienas iš paprasčiausių MZI darinių yra pagaminamas fs lazeriu pašalinant pluošto apvaskalą ir pluošto šerdį [25], taip suformuojant mikrometrų eilės ertmę, kuri sąveikauja su aplinka (16 pav.). Iš darinio diagramos matyti, kad yra du šviesos perdavimo keliai. Vienas yra trapecijos formos ertmė, kitas - likusi šviesolaidžio šerdis. Interferencijos intensyvumą galima išreikšti taip [26]:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos\varphi \quad (5)$$

kur I_1 ir I_2 yra atitinkamai pirmojo ir antrojo šviesos kelio intensyvumai, $\varphi = 2\pi\Delta n_{eff}L/\lambda$ yra fazių skirtumas kur: $\Delta n_{eff} = n_{šerdies} - n_{ertmė}$ yra MZI ertmės ir OŠ šerdies lūžio rodiklio (RI) skirtumas; λ yra bangos ilgis vakuume; L yra MZI ilgis, o $\phi = 0$ yra pradinė interferencijos fazė. Kai $I_1 = I_2$ interferencinių juostelių (spektrinio intensyvumo moduliacijos) matomumas pasiekia didžiausią vertę. Iš (5) lygties, kai $\varphi = \frac{2\pi\Delta n_{eff}L}{\lambda_m} + \varphi_0 = (2m + 1)\pi$, pamatysime spektrinio intensyvumo minimumus (įdubimus), kai m yra sveikas skaičius. Tai reiškia, kad fazių skirtumas tarp dviejų gretimų intensyvumo minimumų yra $\frac{2\pi\Delta n_{eff}L}{\lambda_{m+1}} = \frac{2\pi\Delta n_{eff}L}{\lambda_m} = 2\pi$. Todėl dviejų gretimų bangos ilgių skirtumą, taip pat žinomas kaip spektrinį diapozoną (FSR), galima apskaičiuoti kaip $FSR = \lambda_m - \lambda_{m+1} = \frac{\lambda_m - \lambda_{m+1}}{\Delta n_{eff}L}$, o $L = \frac{\lambda_m \lambda_{m+1}}{\Delta n_{eff}(\lambda_m - \lambda_{m+1})}$ yra teorinis ertmės ilgis.



16 pav. Ertmės suformavimas fs lazeriu (a) schema, (b) nuotrauka iš šono [26].

Naudojant pateiktas formules, teorines MZI ilgio reikšmes galima palyginti su eksperimentiniais rezultatais, taip pat galima pastebėti, kad padidėjus L arba padidėjus Δn_{eff} , FSR sumažėja. Δn_{eff} pokytis rodo, kad išorinis aplinkos lūžio rodiklis (RI) keičiasi, kai šviesolaidžio šerdies RI yra pastovus. Kai temperatūra arba RI aplink MZI keičiasi, pasikeičia ir Δn_{eff} , bei pasislenka spektrinio intensyvumo minimumo vertė. Taigi supančią aplinką galima analizuoti per spektrus. m -osios eilės interferencijos bangos ilgis yra $\lambda_m = \frac{2\Delta n_{eff}L}{2m+1}$. Taigi RI jautrumą galima pažymėti kaip [27]:

$$S_{RI} = \frac{d\lambda_m}{dn_{eec}} = \frac{2L}{2m+1} \left(\frac{dn_{šerdis}}{dn_{aplinka}} - \frac{dn_{ertmė}}{dn_{aplinka}} \right) \quad (6)$$

kur $n_{aplinka}$ yra aplinkos RI dydis. Kai keičiasi temperatūra, dėl skirtingų šerdies ir ertmės termooptinių koeficientų, Δn_{eff} efektyvusis RI pokytis keičiasi, o jautrumą temperatūrai galima išreikšti kaip:

$$S_T = \frac{d\lambda_m}{dT} = \frac{2L}{2m+1} (\gamma_{šerdis} - \gamma_{ertmė}) \quad (7)$$

kur $\gamma_{šerdis}$ ir $\gamma_{ertmė}$ yra termooptiniai šviesolaidžio šerdies bei MZI ertmės koeficientai.

Galimi ir kitokie MZI dizainai. Vienas iš jų yra ta pati ertmė tik padengta aliuminio oksido sluoksniu (Al_2O_3) [28]. Šis MZI tipas nėra toks jautrus kaip prieš tai minėtas, tačiau jo jautrumą galima reguliuoti metalo sluoksnio storiumi. Ėsdinant metalo sluoksnį ir šiam mažėjant jutiklis tampa jautresnis aplinkos lūžio rodiklio pokyčiams. Toks MZI yra naudingas aptinkant

dujas, jei šviesolaidžio ertmė padengiama dujoms jautria medžiaga, pvz. paladžio (Pd) danga, kuri yra jautri medžiaga vandenilio dujoms [29].

MZI ertmės yra kuriamos taip pat V formos. Norint gauti mažesnius signalo nuostolius ir didesnę FSR reikia rinktis kuo trumpesnes ertmes. Dar vienas išorinio sluoksnio abliacijos MZI pavyzdys yra kanalų kūrimas skersai šviesolaidžio [30], kai išgręžiamos skylės skersai šviesolaidžio. Tuomet šviesolaidžiu keliaujanti šviesa ties pirmuoju kanalu yra išskaidoma. Dalis šviesos pradeda keliauti šviesolaidžio apvalkalu, kita dalis kerta ertmę. Prie antros ertmės dalis išskaidytos šviesos interferuoja. Kuo daugiau kanalų, tuo aiškiau stebimos interferencinės juostelės.

Paminėtina, kad ertmių sienelės sukurtos pasitelkiant fs impulsus negali būti statmenos. Šios trapecijos formos ertmės susidaro dėl Gauso formos pluošto. Kai pluoštas yra skenuojamas statmenai šviesolaidžiui ir po truputį įgilinamas į medžiagą, impulso energija nepasiskirsto vienodai abiejose pusėse, taip sukuriant nedidelę kampą. Taip pat, susiformuojančias nuosėdas yra sunku pašalinti. Galiausiai, trapecijos formos ertmės turi įtakos jutiklio parametrui. Dėl trapecijos formos ertmės ilgis varijuoja taip sukeldamas netikslumus matavimuose. Optimizuojant lazerio parametrus galima pagerinti paviršiaus kokybę. Pasitelkiant cheminį išdėtinimą ar abliavimą vandenyje galima gauti geresnius paviršiaus šiurkštumo parametrus.

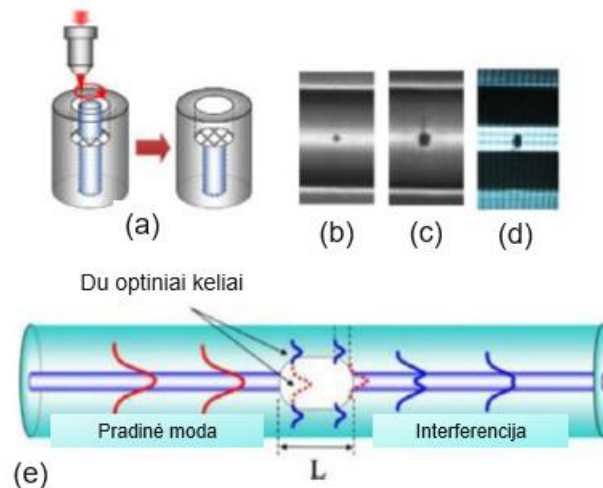
1.4.2. Vidinė oro ertmė

Kito tipo MZI kuriame formuojant vidines oro ertmes. Nors ir jutikliai su išorinėmis ertmėmis pasižymi dideliu jautrumu, visgi yra gana trapūs bei signalai nestabilūs dėl jų didelių matmenų. Taigi norint tvirtesnių jutiklių yra daromos vidinės oro ertmės. Kuriant šiuos jutiklius yra gręžiamos skylės OŠ gale fs lazeriu, o tada šviesolaidžio galai yra sulydomi taip suformuojant oro ertmes šviesolaidžio tūryje.

Galimos įvairios vidinių oro ertmių konfigūracijos šviesolaidžiuose: viena simetrinė oro ertmė (17 pav.) [31], dvi simetrinės [32], viena horizontaliai nesimetrinė, dvi horizontaliai nesimetrinės, viena vidinė ertmė su mikro kanalais [33] bei viena ertmė su plyšiu į aplinką [34] ir kt. Galime pastebėti, kad vidinės oro ertmės yra skirstomos pagrįdė į simetrines ir nesimetrines, kurios gali būti pavienės arba kelios. Simetriškuose MZI, kurių diametras yra panašus į šviesolaidžio šerdies, yra sudėtinga šviesą priversti keliauti šviesolaidžio apvalkalu, todėl yra mažai kontakto su išoriniais parametrais, bet šių jutiklių ertmės dydis keičiasi, kai keičiasi temperatūra, taigi jie dažniausiai naudojami matuoti tik temperatūroms. Asimetriškose ertmėse, kurių diametras daug didesnis nei šviesolaidžio šerdies, šviesa gali lengvai skliti

apvaskalu, taip sukuriamas jautrumas aplinkos lūžio rodikliui. Šie du dariniai taip pat gali būti patobulinti pridendant mikro kanalus. Pavyzdžiui, aukštesnės eilės modos (tos, kurios sklinda OŠ apvaskalu) gali būti slopinamos pasitelkiant mikro kanalus. Taip pat, šie mikro kanalai gali būti naudojami mikro skysčiams ar dujoms matuoti.

MZI, paremti vidinėmis oro ertmėmis reikalauja sulydymo etapo. Tai apsunkina šių jutiklių pagaminimo procesą. Tačiau jie gali būti naudojami matuoti temperatūrą, lūžio rodiklio pokyčius, taip pat skysčių, dujų ir mikro skysčių koncentracijas. Šių ertmių dydis yra jų

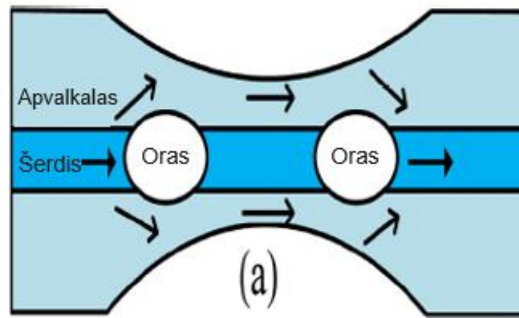


17 pav. (a) Šviesolaidžio galo gręžimas fs lazeriu, (b) - (d) mikro ertmės mikroskopo nuotrauka. (e) MZI su viena simetrine vidine oro ertme schema [26].

trūkumas. Dėl mažo ertmės dydžio šviesa gali būti išsklaidyta arba atspindėta ir taip sumažinti signalo intensyvumą. Taip pat, mažas ertmės dydis duoda nepastovų FSR ir matavimų nestabilumą. Šie jutikliai neturi didelio jautrumo, tačiau veikia aukštose temperatūrose.

1.4.3. Vidinė oro ertmė ir OŠ susiaurinimas

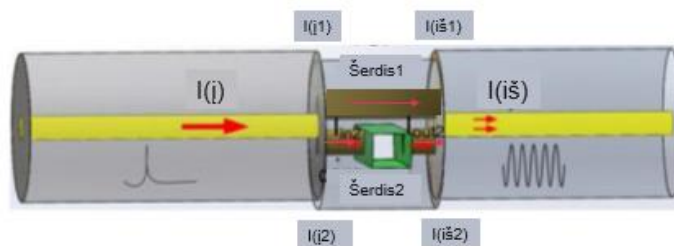
Interferometrai su vidinėmis oro ertmėmis negali matuoti dviejų parametų vienu metu (18 pav.). Visgi, yra tyrimų, kurie parodo, kad tai galima realizuoti pasitelkiant vidines oro ertmes ir šviesolaidžio susiaurinimą [35]. Taip suplonintas šviesolaidis paskatina daugiau šviesos keliauti OŠ apvaskalu, sąveikauti daugiau su aplinka. Taigi jutikliai turintys šviesolaidžio susiaurinimus pasižymi dideliu jautrumu. Susiaurintas šviesolaidžio diametras daro įtaką jutiklio jautrumui - tai procesas, kurį galima valdyti. Kuo siauresnis yra šviesolaidis, tuo jautresnis yra jutiklis.



18 pav. MZI su vidine oro ertme ir OŠ susiaurinimu schema [26].

1.4.4. Dvigubos šerdies MZI jutiklis

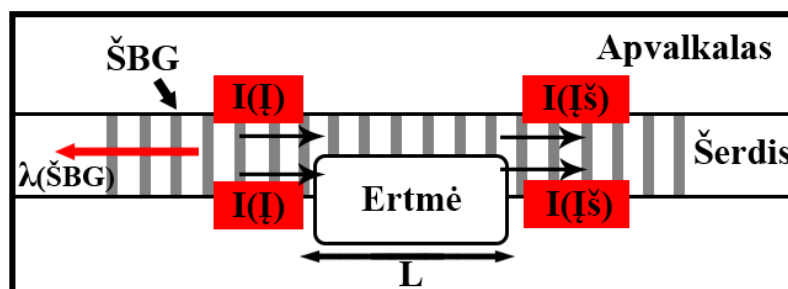
Dar vienas išskiriamas įdomus MZI sudarymo metodas yra, kai sukuriama dviguba šerdis ir vidinė oro ertmė (19 pav.) [36]. Du vienmodžiai šviesolaidžiai yra sujungiami į vieną, o pasitelkiant fs impulsus yra sukuriamas mikro kanalas. MZI, sukurti sudant, gali matuoti įvairius parametrus, nes dėl darinio yra sužadintos įvairios modos. Šie jutikliai yra efektyvūs matuojant skysčius.



19 pav. Dvigubos šerdies MZI schema [26].

1.4.5. MZI su Brego gardelėmis

Paskutinis čia aptariamas MZI yra kombinacija su šviesolaidinėmis Brego gardelėmis (20 pav.). Tai dar vienas jutiklis, kuriuo vienu metu galima matuoti lūžio rodiklio bei temperatūros pokyčius. ŠBG paprastai yra nejautrios lūžio rodiklio pokyčiams, tačiau yra jautrios temperatūrai. Šie jutikliai yra sukuriami ant įrašytų Brego gardelių, kai dalis medžiagos yra pašalinama ir sukuriamos ertmės.



20 pav. MZI su Brego gardelėmis schema. $I(I)$ - įsklandantis šviesos pluoštas, viena jo dalis keliauja pro MZI ertmė, kita pro likusios šerdies dalį, $I(Iš)$ - šviesos pluoštas už MZI ertmės.

2. Metodika

Šiame skyriuje pateikiami naudojami eksperimentiniai metodai. Aptarimas pradedamas nuo šviesolaidžio paruošimo mikroapdirbimui bei jo įtvirtinimo metodų. Toliau seka išsami lazerinės sistemos, svarbiausio šio darbo įrankio, naudojamo erdmės tipo Mach - Zehnder interferometro ant šviesolaidžio užrašymui, apžvalga. Galiausiai pateikiamas modeliavimo programos, naudotos suprasti ir numatyti pralaidumo spektro dėsningumus, aprašymas.

2.1. Šviesolaidžio paruošimas

Šiame darbe buvo naudotas komerciškai prieinamas vienmodis šviesolaidis SMF - 28 (Corning). Šis šviesolaidis gali būti instaliuojamas ilgais nuotoliais, naudojamas metro, mobiliam ryšiui ir šviesolaidiniam ryšiui namuose. Šio šviesolaidžio parametrai nurodyti lentelėje:

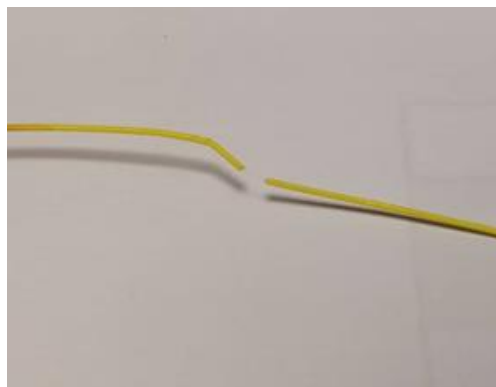
1 lentelė. SMF - 28 šviesolaidžio parametrai.

| | |
|---|--|
| Šerdies diametras | 8,2 μm |
| Apvalkalo diametras | 125 μm |
| Išorinio apvalkalo (Hytrel [®]) diametras | 900 μm |
| Veikimo diapazonas | 1260 - 1625 nm |
| Nuostoliai | ≤ 0.32 dB/km esant 1310 nm ≤ 0.18 dB/km esant 1550 nm |
| Apvalkalo lūžio rodiklis | 1,4659 |
| Šerdies lūžio rodiklis | 1,4712 |

2.1.1. Šviesolaidžio nužievinimas

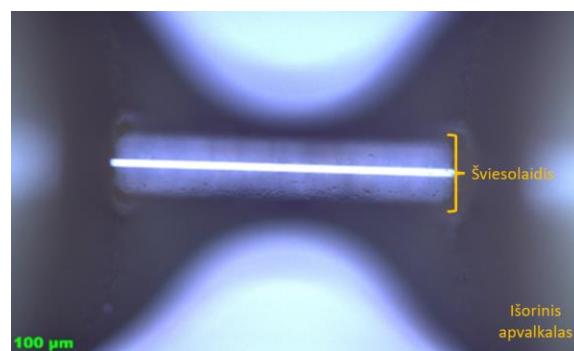
Pirmajame eksperimento pasiruošimo etape, prieš šviesolaidžio įtvirtinimą, reikia pašalinti išorinį šviesolaidžio apvalkalą. Šis šviesolaidis yra padengtas tvirtu termoplastiniu elastomeru - Hytrel[®], kuris yra atsparus mechaniniam dėvėjimuisi ir dažnai yra naudojamas robotikos bei automobilių pramonėje. Išorinis apvalkalas buvo šalinamas centrinėje šviesolaidžio dalyje, tai leidžia patogiai formuoti mikroertmes bei išorinis apvalkalas buvo šalinamas šviesolaidžio galuose, ant kurių vėliau yra montuojami jungiamieji antgaliai. Kadangi išorinio apvalkalo nebuvo galima pašalinti tiesiog pasitelkus specialias nužievinimo žnyples, buvo bandoma apvalkalą nuėsdinti įvairiais rūgštiniais ir šarminiais junginiais. Deja, šis metodas buvo neefektyvus. Tuomet buvo pabandyta apvalkalą suminkštinti mirkant

acetone. Šviesolaidis su apvaskalu buvo įrėžiamas norimoje vietoje, kad acetonas lengviau prasiskverbtų į termoplastinį elastomerą ir tuomet mirkomas dažniausiai apie 12 valandų. Tada, pasitelkus nužievinimo žnyplės, suminkštintas Hytrel® apvaskalas buvo mechaniškai pastumiamas į kraštus, taip atidengiant norimą vietą lazerinei abliacijai. Šviesolaidžio galai taip pat buvo nužievinami, tačiau jų mirkymas užtrukdavo daug trumpiau, užtekdavo keletos minučių. Visgi šis nužievinimo metodas buvo nelabai efektyvus, kadangi šviesolaidis dažnai lūždavo dar bandant žnyplėmis pašalinti apvaskalą. O jei pavykdavo nuimti apvaskalą, šviesolaidis vis vien likdavo deformuotas ir trapus (21 pav.).



21 pav. a) deformavęsis ir pažeistas šviesolaidis nužievinant apvaskalą replėmis.

Galiausiai buvo nuspręsta išbandyti šviesolaidžio nužievinimą Carbide lazerine sistema (UAB Light Conversion), kurios centrinis bangos ilgis yra 1030 nm. Pasirinkta impulsų trukmė siekė 220 fs, vidutinė galia ant bandinio 1,65 W, atstumas tarp linijų 10 μm , skenavimo greitis 66 mm/s, objektyvas $f = 100$ mm. Skenavimas buvo atliekamas naudojant skenavimo sistemą Excelliscan (Scanlab). Tai leido pašalinti dalį apvaskalo itin sparčiai. Skenavimas buvo atliekamas pasluoksniui. Skeneriams praskenavus vieną sluoksnį ant viršaus buvo kartojamas kitas sluoksnis, galiausiai pašalinant dalį apvaskalo ir atidengiant pusę šviesolaidžio (22 pav.).



22 pav. Nužievinamas šviesolaidis pasitelkiant lazerinę sistemą.

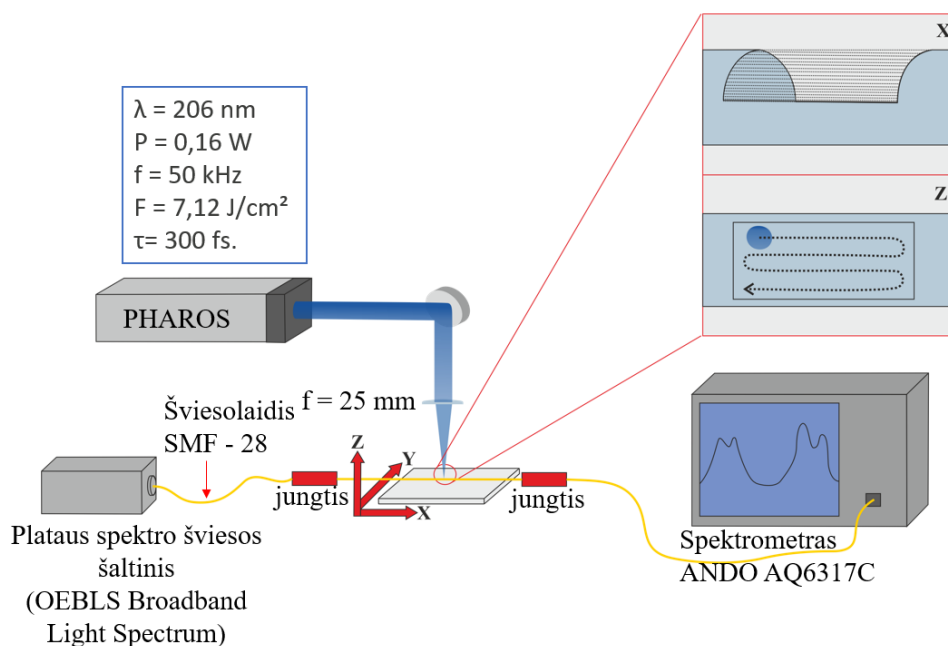
Šis išorinio apvalkalo pašalinimas buvo ne tik saugus, tačiau likusi apvalkalo dalis leido išlaikyti tvirtą šviesolaidžio struktūrą abliacijos etapui.

2.1.2. Šviesolaidžio įtvirtinimas

Antrajame pasiruošimo etape, reikėjo parinkti tinkamą šviesolaidžio tvirtinimo metodą. Kadangi šviesolaidis dažnai lūždavo gamybos metu, buvo bandomi skirtingi įtvirtinimo mechanizmai. Šie lūžimai vykdavo dėl uždedamų antgalių ant šviesolaidžio galų, kurie sukurdavo įtempius šviesolaidžio paviršiuje. Antgaliai arba jungtys buvo skirtos prijungti šviesolaidį prie plataus spektro šviesos šaltinio ir spektrometro tiesioginiam spektro stebėjimui. Iš pradžių šviesolaidis buvo pritvirtintas prie mikroskopo stikliuko su lipnia juoste, kad šviesolaidis nejudėtų abliacijos metu. Taip pat, buvo išbandytas specialus šviesolaidžio laikiklis bei šviesolaidžio pritvirtinimas prie stikliuko su karštais kljais, siekiant išvengti įtempių. Galiausiai buvo sukurtas ir išbandytas lovelis mikroskopo stikliuke, kuriame šviesolaidis lengvai įsistatydamas, ir buvo priklijuojamas tiesiog lipnia juoste papildomam prilaikymui. Deja, kai buvo uždedami antgaliai ant šviesolaidžio galų, apdirbimo metu šviesolaidis lūždavo. Taigi, nei vienas iš išvardytų metodų nepasiteisino. Vėliau, buvo nuspręsta pakeisti abliacijos algoritmą, dėl kurio pavyko išspręsti šviesolaidžio trapumo problemą. Jis bus aptartas kitame skyrelyje.

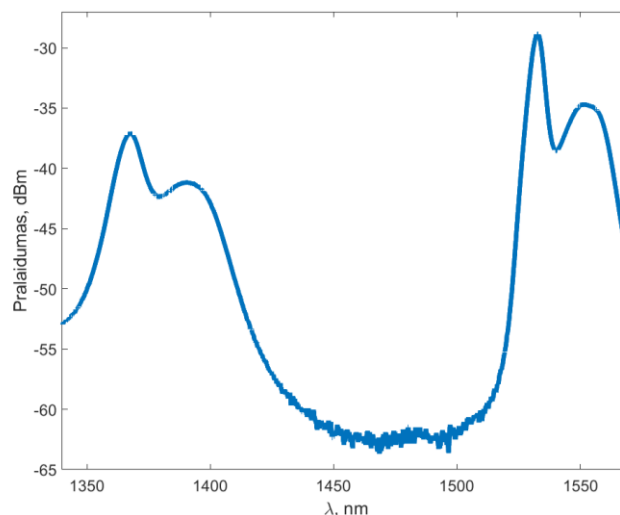
2.2. Lazerinė abliacijos schema

23 pav. pavaizduota lazerinės abliacijos sistemos schema. Šviesolaidis su pašalintu apvalkalu buvo pritvirtintas ant stiklinės plokštelės, kuri yra padedama ant kompiuteriu



23 pav. Eksperimento schema.

valdomo Aerotech staliuko, sudaryto iš trijų transliacinių ašių. Šios ašys yra kontroliuojamos pasitelkiant kompiuterinę programą DMC (UAB Direct machine control). Šiame darbe naudojama Yb:KGV lazerinė sistema Pharos (UAB Light Conversion), kurios fundamentinės harmonikos bangos ilgis yra 1030 nm. 206 nm bangos ilgio UV spinduliuotė gaunama naudojant V harmonikos modulį. Pasirinkta impulsų trukmė siekė 300 fs. Lazerio spinduliuotės vidutinė galia 0,16 W, impulsų pasikartojimo dažnis 50 kHz. Transliacinių staliukų judėjimo greitis buvo parinktas 2 mm/s. Esant didesniems greičiams transliacinių staliukų judėjime atsiranda paklaida dėl nespėjimo išibėgėti iki tolygaus greičio ir taip skenuojamas šviesolaidis yra abliuojamas netolygiai, arba didinant išibėgėjimo atstumą apdirbimo laikas labai išaugdavo. Lazerio V harmonikos pluoštas iš pradžių yra nukreipiamas dielektriniais veidrodžiais ir sufokusuojamas glaudžiamuoju lęšiu ant bandinio. Stebėti pralaidumo spektras buvo naudojamas plataus spektro šaltinis (24 pav.) (OEBS Broadband Light Spectrum, O/E Land Inc.) bei spektrometras (ANDO AQ6317C). Spektras buvo matuojamas 1520 - 1570 nm diapozone.



24 pav. Šviesos šaltinio spektras.

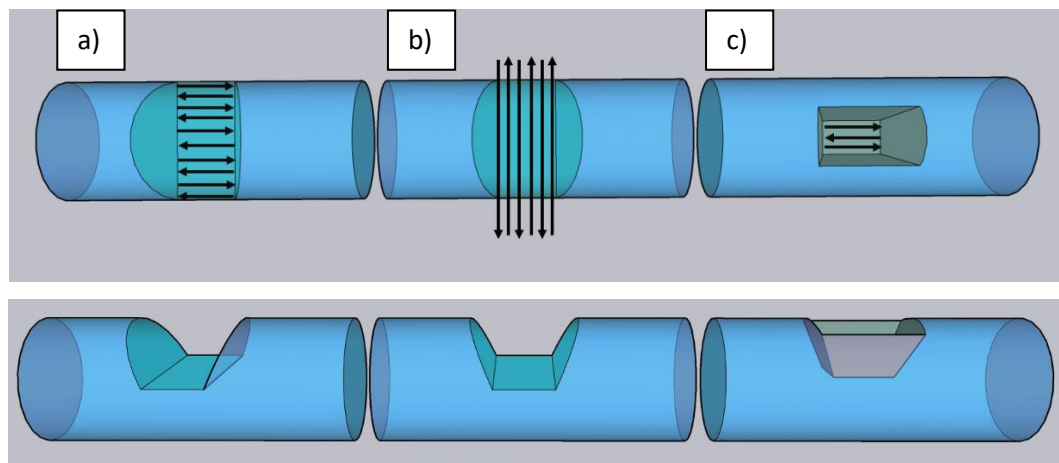
Šiam tyrimui buvo pasirinktas $f = 25$ mm židinio nuotolio CaF glaudžiamasis lęšis. Remiantis formule:

$$D_f = \frac{4\lambda f}{\pi D_L}, \quad (8)$$

kur λ - bangos ilgis, D_L pluošto diametras prieš lęšį, f lęšio židinio nuotolis. Toks lęšis idealiu atveju gali sufokusuoti lazerio pluoštą į dėmelę, kurios diametras siekia 11 μm . Buvo išmatuotas pluošto profilis skirtingose lęšio pozicijose. Norint išmatuoti lazerio pluoštą buvo

pasitelkta 4f sistema (25 mm ir 200 mm židinio nuotolio CaF lęšiai), kuri padidino atvaizdą 7,9 kartus ir atvaizdavo pluoštą židinio plokštumoje į CCD kamerą (Spiricon), kurios matavimo diapazonas yra 190 - 1300 nm. Išmatuoto pluošto dėmė gerai atitinka teorinius rezultatus, efektyvus dėmės diametras židinyje yra $11 \mu\text{m}$ y kryptimi ir $14 \mu\text{m}$ x kryptimi $1/e^2$ aukštyje.

Interferometro kūrimo metu buvo išbandytos įvairios šviesolaidžio skenavimo metodikos. Viena pirmųjų metodikų yra pavaizduota 25 pav. a). Skenavimas buvo atliekamas pasluoksniui tolygiai didinant praskenuojamą plotą bei kiekvieno sluoksnio metu keičiant lęšio poziciją z koordinatėje, pagal iš anksto nustatytą medžiagos pašalinimo kiekį per sluoksnį. Šis metodas buvo pasirinktas siekiant išvengti galutinės ertmės paviršiaus išsigaubimo. Esant pakartotiniams testams buvo pasirinktos paprastesnė bei spartesnė skenavimo metodika (25 pav. b)). Šviesolaidis buvo skenuojamas skersai viso diametro. Visgi, kuriamos struktūros buvo labai trapios. Šviesolaidžio galuose uždėdavus jungtis, siekiant stebėti pralaidumo spektrą apdirbimo metu, buvo sukuriami įtempiai abliuojamoje srityje. Dėl to vos pradėjus abliaciją šviesolaidis lūždavo. Taigi, galiausiai buvo pasirinkta neskenuoti skersai viso šviesolaidžio diametro, o kurti „baseiniuko“ tipo įpjovas (25 pav. c)). Šis skenavimo būdas leido kurti tvirtas ertmės tipo struktūras, išlaikant šviesolaidžio cilindriškumą ir stebėti tiesiogiai pralaidumo spektro kitimus apdirbimo metu.



25 pav. Šviesolaidžio abliavimo algoritmai. a) pusės cilindro b) skersai šviesolaidžio diametro c) „baseiniuko“ tipo ertmės formavimas.

2.3. Jutiklio testavimas

Interferometro lūžio rodiklio jautrumui nustatyti, buvo naudojama skirtingų koncentracijų druskos tirpalas. 32,4 g NaCl buvo maišoma su 600 ml distiliuoto vandens taip gaunant 5,1 % tirpalą. Tada pasinaudojus Abės refraktometru buvo nustatoma skysčio lūžio

rodiklis. Palaipsniui, tirpalas būdavo skiedžiamas distiliuotu vandeniu ir sekamas lūžio rodiklio pokytis refraktometru. Paruoštų tirpalų lūžio rodikliai buvo: 1,41, 1,339, 1,3375, 1,3365, 1,335.

Interferometras prijungtas prie plataus spektro šviesos šaltinio bei spektrometro buvo merkiamas į skirtingų koncentracijų druskos tirpalus. Pralaidumo spektras buvo fiksuojamas su 0,5 nm skyra. Prieš pakeičiant druskos tirpalą, MZI ertmė būdavo kruopščiai išplaunama spiritu bei išdžiovinama.

2.4. Modeliavimas

2.4.1. Modeliavimo programinė įranga

RSoft CAD programa leidžianti modeliuoti šviesolaidžių, optinių ir kitų fotoninių įrenginių sistemas. Ji veikia kaip integruotų modulių (BeamPROP, FullWAVE, BandSOLVE, ModePROP, DiffractMOD, GratingMOD) valdymo programa.

Šiam darbui konkrečiai buvo naudojamas BeamPROP modulis. Veikiantis pluošto sklaidimo modeliu (*angl. BPM - Beam propagation model*), skirtu kurti pluošto sklaidimo šviesolaidžiais simuliacijoms.

BPM iš esmės yra metodas, leidžiantis aproksimuoti tikslią bangos lygtį monochromatiniai šviesai, gautas lygtis sprendžiant skaitiniu būdu. Skaičiavimai vyksta su skaliarinio lauko apribojimais (t. y. nepaisant poliarizacijos efektų) ir parenkama sistema yra paraksiali (t. y. sklaidimas ribojamas siauru kampų diapazonu).

Skaliarinio lauko prielaida leidžia aprašyti Helmholtzo lygtį monochromatinėms bangoms:

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} + k(x, y, z)^2 \phi = 0 \quad (9)$$

Čia skaliarinis elektrinis laukas parašytas kaip $E(x, y, z, t) = \phi(x, y, z, t)e^{-i\omega t}$ ir žymėjimas $k(x, y, z) = k_0 n(x, y, z)$ buvo įvestas erdviškai priklausomam bangos skaičiui, kai $k_0 = 2\pi/\lambda$ yra bangos skaičius laisvoje erdvėje. Uždavinio geometriją visiškai apibrėžia lūžio rodiklio skirstinys $n(x, y, z)$.

Tipiškai sklindančių bangų, sparčiausias lauko pokytis yra fazės pokytis, atsirandantis dėl sklaidimo išilgai ašies. Darant prielaidą, kad ašis daugiausia yra išilgai z krypties, naudinga šį greitą pokytį pašalinti, įvedant vadinamąjį lėtai kintantį lauką u :

$$\phi(x, y, z) = u(x, y, z)e^{ikz} \quad (10)$$

Čia k yra pastovus skaičius, kurį reikia pasirinkti, kad būtų parodytas lauko ϕ vidutinis fazės pokytis. Įvedus pateiktą išraišką į Helmholtzo lygtį, gaunama tokia lėtai kintančio lauko lygtis:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + 2ik \frac{\partial u}{\partial z} + (k^2 - \mathbf{k}^2)u = 0 \quad (11)$$

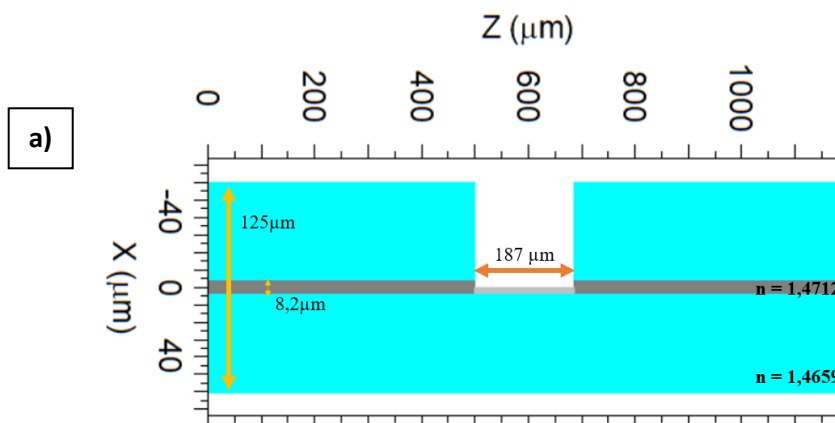
Aukščiau pateikta lygtis visiškai atitinka tikslią Helmholtzo lygtį, išskyrus tai, kad ji išreiškiama per u . Dabar daroma prielaida, kad u ir z kitimas yra lėtas, todėl pirmasis pateiktas narys gali būti nepaisomas antrojo atžvilgiu; tai yra lėtai kintančios gaubtinės aproksimacija ir šiame kontekste ji taip pat vadinamas paraksialiniu arba paraboliniu aproksimavimu. Su šia prielaida ir po nedidelio pertvarkymo aukščiau pateikta lygtis sumažėja iki:

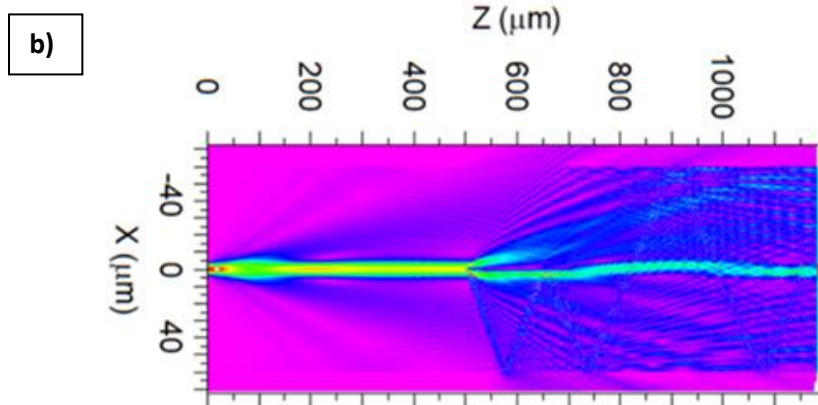
$$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{i}{2k} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + (k^2 - \mathbf{k}^2)u \right) \quad (12)$$

Tai yra pagrindinė BPM lygtis (3D); supaprastinimas iki dvimatės (2D) gaunamas pašalinant bet kokią priklausomybę nuo y . Atsižvelgiant į įvesties lauką $u(x, y, z = 0)$, aukščiau pateikta lygtis nustato lauko raidą erdvėje $z > 0$.

2.4.2. Modelis

RSoft Cad programoje buvo sumodeliuotas Mach - Zehnder interferometras su ertme (26 pav. a)). Ertmės plotis buvo $187 \mu\text{m}$. Ertmės plotis buvo parinktas pagal atliktus abiacijos eksperimentus ir realiai išmatuotas ertmės pločio vertes. Šviesolaidžio šerdies bei apvalkalo lūžio rodikliai buvo parinkti pagal SMF - 28 šviesolaidžio vertes. Buvo atlikti du modeliavimo eksperimentai, tai yra kaip kinta pralaidumo spektras keičiant šerdies įpjovimo gylį (nuo visiškai neįpjautos šerdies iki nupjautos) bei kaip slenkasi pralaidumo spektro minimumas





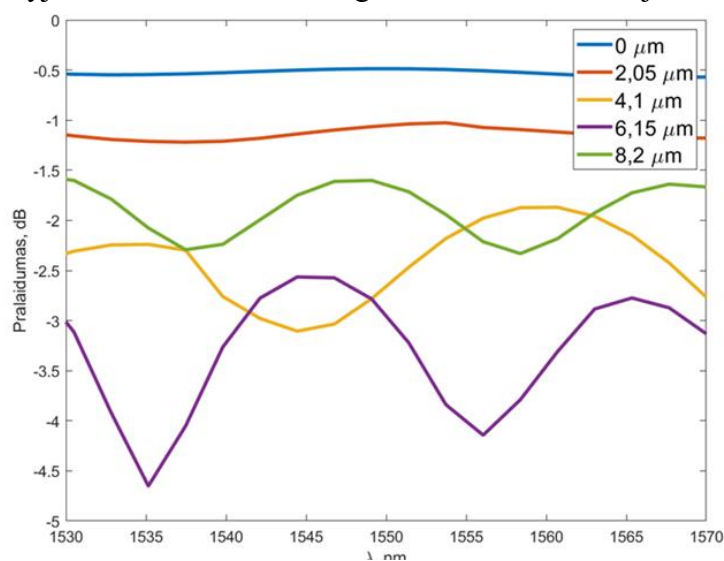
26 pav. a) Mach - Zehnder interferometro modelis šviesolaidyje, b) elektrinio lauko pasiskirstymas MZI interferometre.

esant skirtingiems aplinkos lūžio rodikliams (nuo 1,41 iki 1,335). Eksperimento metu programoje sumodeliuojamas norimas MZI modelis. Viename šviesolaidžio gale yra paleidžiama sklusti šviesa ir tada stebimas elektrinio lauko pasiskirstymą šviesolaidyje (26 pav. b)). Modeliavimo metu yra stebimas MZI interferometru praėjusios šviesos intensyvumas.

3. Rezultatai

3.1. Modeliavimas

Modeliavimo metu buvo atlikti pralaidumo spektro skaičiavimai keičiant šviesolaidžio šerdies įpjovimo gylį nuo neįpjautos šerdies iki visiškai pašalintos, aplinkos lūžio rodiklis 1 (oras) (27 pav.). Galime pastebėti, kad pralaidumo spektras turi mažus nuostolius, bei mažo matomumo interferencines juosteles, kai šerdis neįpjauta. Įpjovai gilėjant atsiranda didesni nuostoliai šviesolaidyje, bet kartu ir kontrastingesnės interferencinės juostelės. Iš modeliavimo

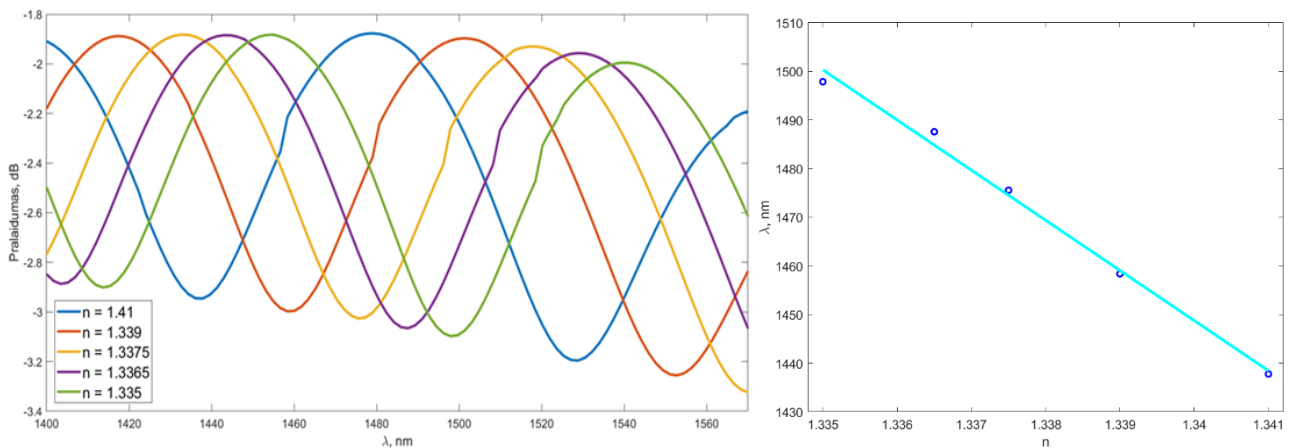


27 pav. Sumodeliuoto MZI šerdies įpjovos gylio įtaka pralaidumo spektrui.

rezultatų matyti, kad kontrastingiausios interferencinės juostelės yra tada kai yra pašalinama

daugiau nei pusė šviesolaidžio šerdies ir galime tikėtis apie 1,5 - 2 dB kontrasto. Taip pat, didinant įpjovos gylį yra stebimas pralaidumo spektro minimumų slinkimasis spektre. Esant šerdies įpjovai iki centro pralaidumo spektro minimumas yra stebimas ties 1545 nm bangos ilgiu, o esant 6,15 μm įpjovai minimumai yra ties 1535 nm bei 1552 nm.

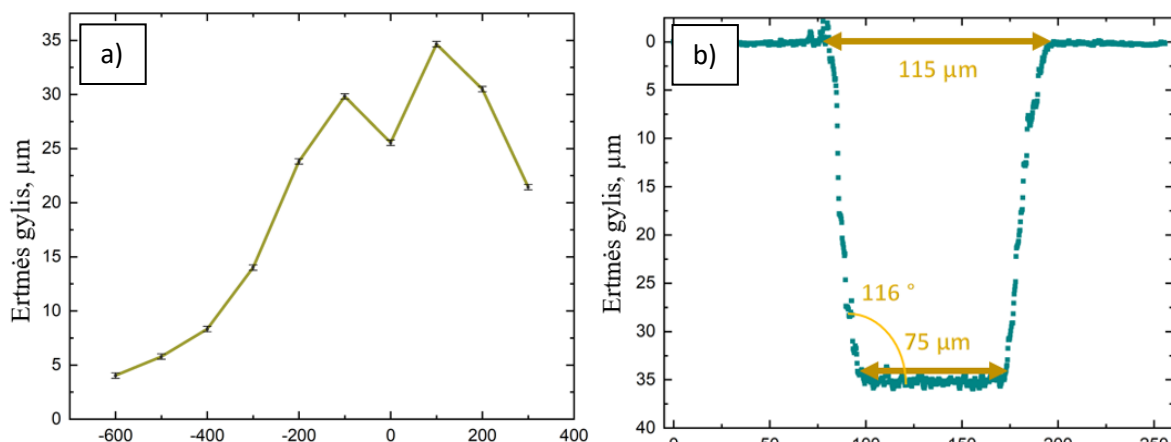
Taip pat, buvo atlikti skaičiavimai kaip MZI, su įpjova iki šerdies vidurio, pralaidumo spektras keičiasi keičiant aplinkos lūžio rodiklį nuo 1,41 iki 1,335 (28 pav.). Mažėjant lūžio rodikliui pralaidumo, spektras slenkasi į ilgesnių bangų pusę (į dešinę). Šio MZI jautrumas, pagal skaičiavimus, atitinka -10311 nm/RIU.



28 pav. MZI pralaidumo spektras esant skirtingiems aplinkos lūžio rodikliams bei interferometro jautrumo kreivė.

3.2. Lazerinio abliavimo parametru optimizavimas

Toliau pasitelkiant UV fs impulsus buvo formuojamos MZI trapecijos formos ertmės. Algoritmo metu medžiagos šalinimas vyko pasluoksniui: Gauso profilio pluoštu skenuojamas

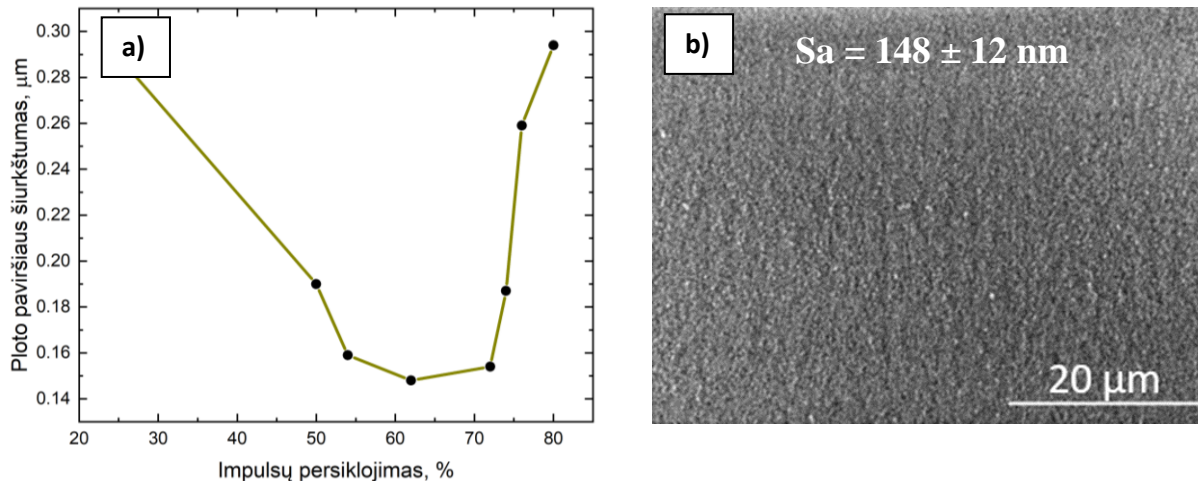


29 pav. a) Ertmės abliavimo efektyvumo priklausomybė nuo skirtingų lęšio pozicijų b) 100 μm lęšio pozicijoje ertmės profilis.

100 μm plotis. Skenavimas vyko 2 mm/s greičiu, impulsų energijos tankis $F = 7,12 \text{ J/cm}^2$, 30

sluoksnių. Buvo tiriama skirtingų lęšio pozicijų įtaka medžiagos pašalinimo kiekiui. Pozicija buvo keičiama nuo 600 μm žemiau židinio iki 300 μm aukščiau židinio (toliau nuo bandinio) (29 pav. a)). Nustatyta, kad efektyviausia abliacijai lęšio pozicija yra 100 μm. Šioje pozicijoje buvo pašalinta $34.66 \pm 0,25$ μm storio medžiagos sluoksnis. Gautos ertmės plotis apatinėje dalyje ir sienelės kampas buvo 75 μm ir 116 °, atitinkamai (29 pav. b)).

Naudojant efektyviausią abdikacijos poziciją (100 μm virš židinio) buvo atliekami paviršiaus šiurkštumo testai. Impulsų persiklojimas buvo keičiamas 25 - 80 % ribose.

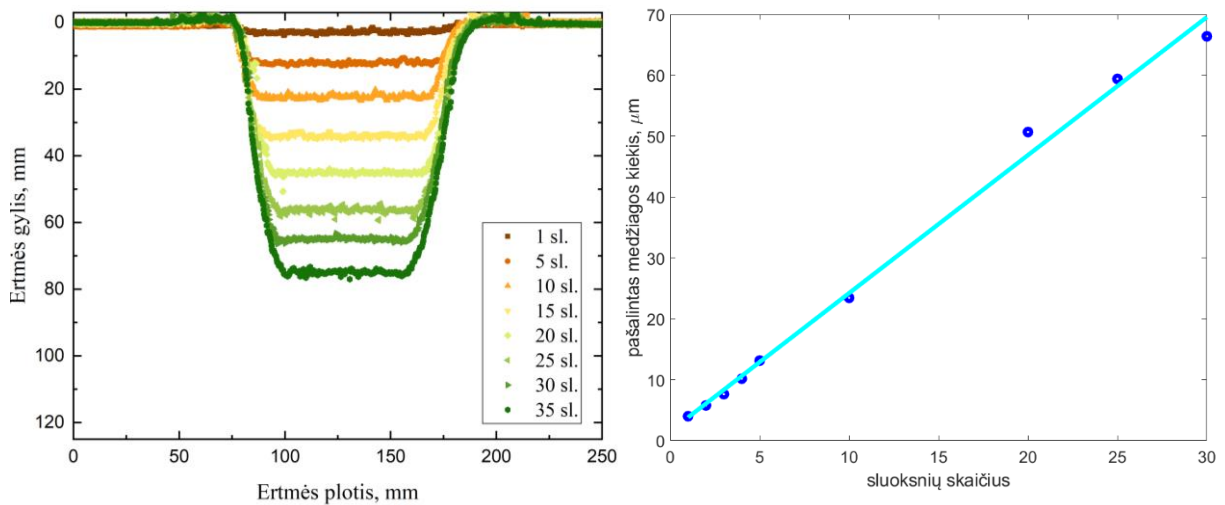


30 pav. Kairėje paviršiaus ploto paviršiaus šiurkštumo priklausomybė nuo impulsų persiklojimo, dešinėje mažiausio šiurkštumo paviršiaus SEM nuotrauka.

Paviršiaus šiurkštumo matavimai buvo atlikti profilometru (The Olympus LEXT[®] OLS5000 laser scanning microscope). Matuojamas buvo trapecijos formos ertmės dugnas. Buvo nustatyta vidutinė šiurkštumo vertė ploto vienetu. Tai dydis nurodantis nuokrypį nuo aritmetinio paviršiaus šiurkštumo vidurkio pasirinktame plote. Nustatyta, kad didžiausias paviršiaus šiurkštumas yra nuo 25 % iki 50 % ir nuo 75 % iki 80 % persiklojimo. Tuo tarpu, mažiausias šiurkštumas yra 50 - 75 % ribose ir pasiekia minimalią vertę kai impulsų persiklojimas yra 62 % ($Sa = 148 \pm 12$ nm) (30 pav.). Taip pat, įvertinus medžiagos pašalinimo efektyvumą buvo pastebėta, kad 62 % impulsų persiklojimų srity buvo ne tik geriausia paviršiaus kokybė, bet ir efektyviausiai vyksta abliacija (30 pav.). Vizualiam įvertinimui papildomai buvo naudojamas skenuojantis elektroninis mikroskopas (SEM) (30 pav.). Paviršiaus kokybė interferometruose yra labai svarbi. Esant dideliame paviršiaus šiurkštumui susidaro šviesos sklaidymas, kuris savo ruožtu blogina interferencinių juostelių matomumą.

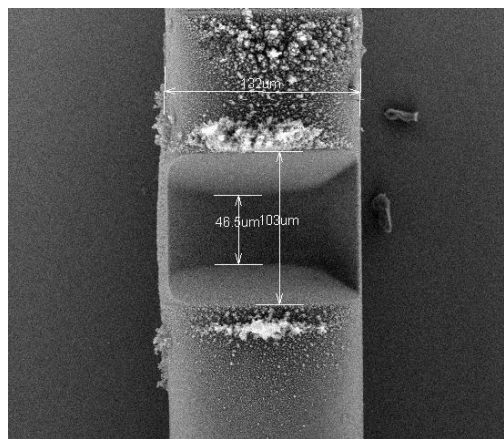
Galiausiai, radus geriausius lazerio parametrus ertmės formavimui, buvo galima įvertinti kiek sluoksnių reikia, norint pašalinti šviesolaidžio apvalkalą ir dalį šerdies. Šviesolaidžio paviršius buvo skenuojamas nuo 1 iki 35 sluoksnių (31 pav. a)). 30 sluoksnių pašalino 63,3 μm

medžiagos. Taigi, kiekvienas sluoksnis pašalina apie 2,1 μm medžiagos. Kiekvieno sluoksnio skenavimo metu yra pašalinamas tolygus kiekis medžiagos (31 pav. b)). Tai yra susiję su



31 pav. Kairėje atliktas skirtingas sluoksnių skaičius šviesolaidyje, skenuojant prieš tai nustatytais geriausiai lazeriniais parametrais. Dešinėje pašalintos medžiagos kiekio priklausomybė nuo padarytų sluoksnių skaičiaus.

naudojamu trumpu bangos ilgiu, ko pasėkoje spinduliuotė yra sugerama medžiagos paviršiuje ir abliacijos procesas tampa kontroliuojamas mikrometriniu tikslumu. Norint pasiekti šviesolaidžio šerdies centrą reikia 29 sluoksnių (32 pav.).

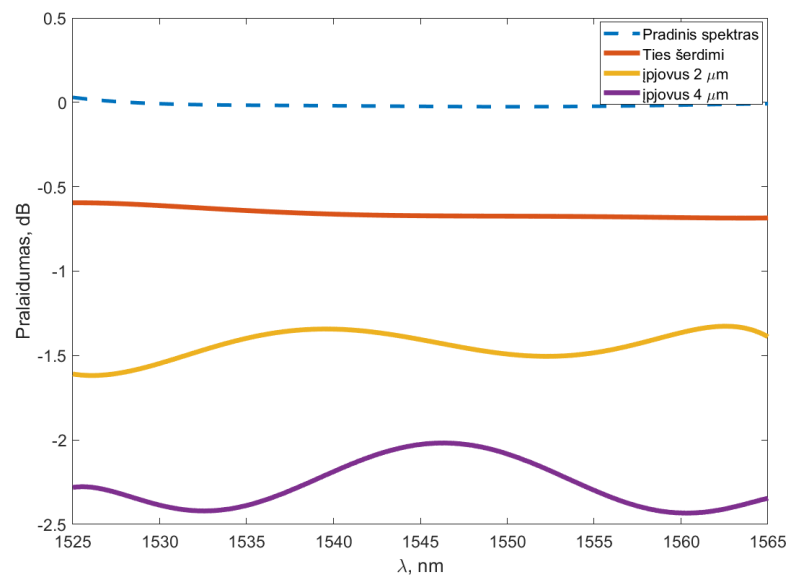


32 pav. Suformuoto MZI ertmės šviesolaidyje SEM nuotrauka.

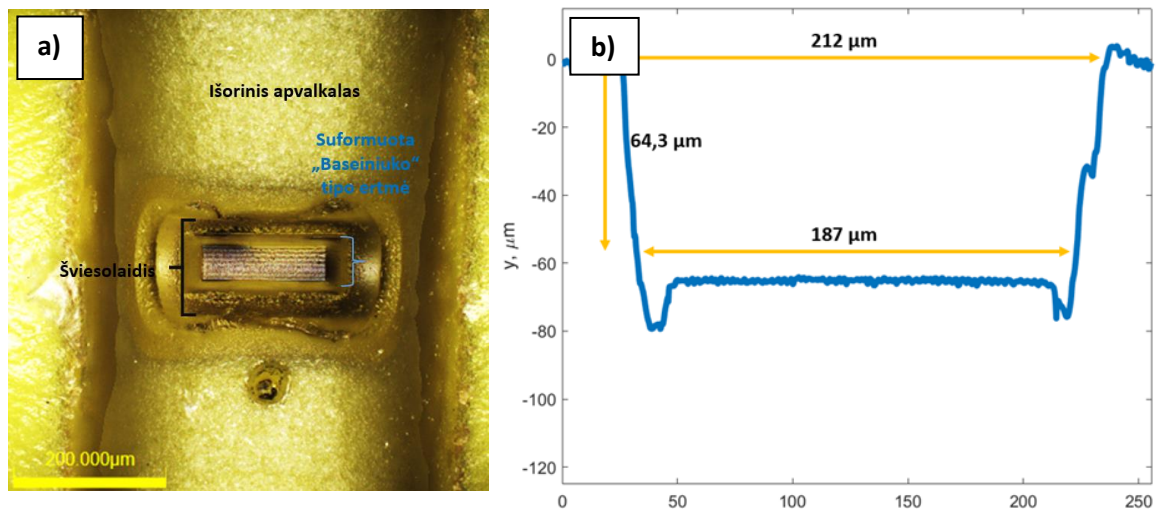
3.3. MZI formavimas lazerinės abliacijos būdu

Prieš formuojant MZI ertmę iš pradžių buvo nužievinamas apvaskalas. Tada formuojama 200 μm pločio išilgai bei 70 μm skersai „baseiniuko“ tipo ertmė (34 pav.). Fabrikavimo metu įgilinimai buvo stebimi spektrometro spektro kritimai (33 pav.) bei patikrinama profilometru ar koreliuoja su signalu. Priartėjus prie šviesolaidžio šerdies buvo stebimi pirmieji nuostoliai ir

intensyvumo sumažėjimas spektre bei tolygus jo kritimas su kiekvienu skenuojamu sluoksniu. Buvo suformuota 187 μm pločio bei 64,3 μm gylio „baseiniuko“ geometrijos ertmė.



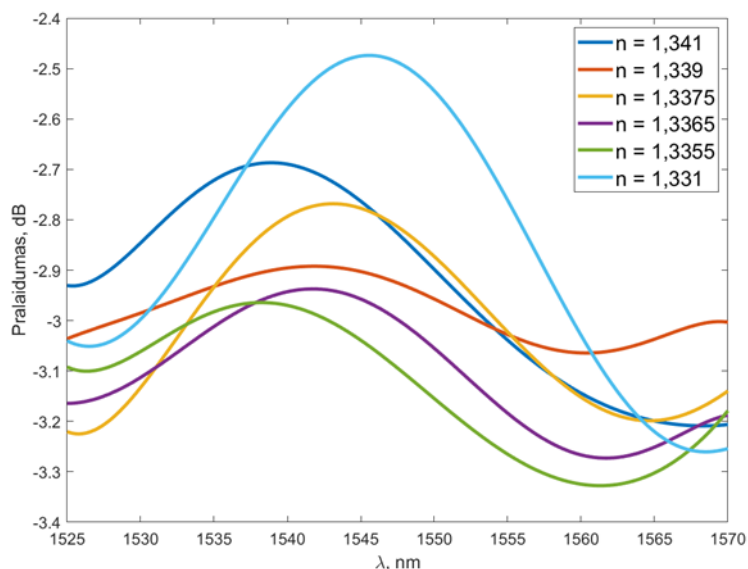
33 pav. Pralaidumo spektro pokyčiai lazerinės abliacijos metu.



34 pav. a) „Baseiniuko“ tipo ertmė b) ertmės profilis.

3.4. Mach - Zehnder interferometro testavimas

Norėdami ištirti interferometro jautrumą skirtingiems skysčio lūžio rodikliams, panardinome jį į skirtingų koncentracijų druskos tirpalus kambario temperatūroje 24 °C. Tirpalo lūžio rodiklis kito nuo 1,41 iki 1,331 dėl skirtingų NaCl bei distiliuoto vandens proporcijų. Išmatuoti spektrai pateikti (35 pav.). Spektre matome minimumus bei maksimumus, didžiausia stebima amplitudė buvo 0,5 dB. Tačiau, lyginant su modeliavimo rezultatais, išmatuotuose spektruose nėra pastebimas tolygus pralaidumo spektro minimumo



35 pav. MZI, kuris buvo panardintas į šešis skirtingo lūžio rodiklio durskos tirpalo pralaidumo spektras.

poslinkis, keičiantis lūžio rodikliui. Tai reiškia, kad stebimas pralaidumo spektras nėra interferencinio pobūdžio. Šiam rezultatui gali būti kelios priežastys. Viena iš priežasčių galėtų būti, kad abliacijos metu nepriartėjome prie šerdies, bet atlikus matavimus su profilometru įsitikinome, kad taip nėra. Taip pat, tai gali būti susiję su V harmonikos sukuriama defektais. Jei šviesolaidyje yra sukuriama spalviniai centrai, tai likusioje šerdyje labai padidėja sklaida, šerdimi šviesa nebesklinda ir interferencija nėra stebima. Dar viena iš priežasčių galėtų būti, kad naudotas šviesos šaltinis nėra pakankamo koherentiškumo ilgio ir tada negalima gauti didelio kontrasto spektro.

Išvados

- Naudojant 206 nm ir 25 mm lęšį, parinkus optimalius abliavimo parametrus šviesolaidžio paviršiuje galima formuoti precizines įpjovas iki šviesolaidžio šerdies (62,5 μm gylio) su dugno šiurkštumu $S_a = 148 \pm 12$ nm ir sienelių statumų 116 °.
- Dirbant tiesinės sugerties režime, dėl trumpo bangos ilgio, spinduliuotė yra sugerama medžiagos paviršiuje, kas leidžia kontroliuoti išabliuojamos srities tikslumą mikrometriniu tikslumu. Naudojant šviesolaidžio skenavimo pasluoksniui algoritmą gauta tiesinė medžiagos pašalinimo priklausomybė (2,1 μm/sluoksni).
- Skersiniai pjūviai išilgai šviesolaidžio itin sunkiai formuojasi kai šviesolaidis turi antgalius prijungtus prie matavimo prietaisų. Toks laisvės laipsnių apribojimas sukelia didelius įtempius pjūvio vietoje, ko pasekoje tikimybė šviesolaidžiui lūžti tampa itin didelė (~ 100 %). Norint išvengti lūžimo reikia parinkti pjūvio geometriją, kuri neleistų formotis lenkimo įtempiams pjūvio vietoje, pvz. formuojant įgilinimus išlaikant šviesolaidžio formą (cilindriškumą).
- Darbo metu buvo suformatuos 187 μm matmenų MZI interferometro prototipas šviesolaidyje, tačiau tyrimų metu nepavyko išmatuoti interferencijos, tiek dujinėje tiek skysčio terpėje. Tokią situaciją galima paaiškinti tuo, kad vienas iš interferometro pečių (šviesolaidis) po UV spinduliuotės apdirbimo yra pažeidžiamas, nors šis pažeidimas vizualiai nėra matomas. Šie rezultatai rodo, kad 206 nm spinduliuotės panaudojimas šviesolaidžių abliacijai nėra tinkamas interferometrų formavimui dėl galimai pažeidžiamos šerdies, tačiau tam įrodyti reikia detalesnių tyrimų.

Aprobacija

Pranešimas konferencijoje

SPIE Photonics Europe 2022, Strasbūras, Prancūzija. K. Kasaciunaite, S. Butkus, D. Paipulas, Integration of Mach - Zehnder interferometer on optical fiber using UV femtosecond laser pulses (2022).

Literatūros sąrašas:

- [1] K. I. Kawamura, N. Sarukura, M. Hirano, N. Ito, and H. Hosono, “Periodic nanostructure array in crossed holographic gratings on silica glass by two interfered infrared-femtosecond laser pulses,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 79, no. 9, pp. 1228–1230, 2001, doi: 10.1063/1.1398618.
- [2] V. R. Bhardwaj *et al.*, “Femtosecond laser-induced refractive index modification in multicomponent glasses,” *J. Appl. Phys.*, vol. 97, no. 8, 2005, doi: 10.1063/1.1876578.
- [3] V. Koubassov *et al.*, “Ultrafast laser-induced melting of glass,” *Appl. Phys. A Mater. Sci. Process.*, vol. 79, no. 3, pp. 499–505, 2004, doi: 10.1007/s00339-003-2474-0.
- [4] Q. Sun, F. Liang, R. Vallée, and S. L. Chin, “Nanograting formation on the surface of silica glass by scanning focused femtosecond laser pulses,” *Opt. Lett.*, vol. 33, no. 22, p. 2713, 2008, doi: 10.1364/ol.33.002713.
- [5] C. Hnatovsky *et al.*, “Fabrication of microchannels in glass using focused femtosecond laser radiation and selective chemical etching,” *Appl. Phys. A Mater. Sci. Process.*, vol. 84, no. 1–2, pp. 47–61, 2006, doi: 10.1007/s00339-006-3590-4.
- [6] R. Osellame, G. Cerullo, and R. Ramponi, “Femtosecond Laser Micromachining: Photonic and Microfluidic Devices in Transparent Materials,” *Top. Appl. Phys.*, vol. 123, pp. 3–18, 2012, doi: 10.1007/978-3-642-23366-1.
- [7] J. Krüger and W. Kautek, “Ultrashort pulse laser interaction with dielectrics and polymers,” *Adv. Polym. Sci.*, vol. 168, pp. 247–289, 2004, doi: 10.1007/b12683.
- [8] X. J. Zeng, X. Mao, R. Greif, and R. E. Russo, “Ultraviolet femtosecond and nanosecond laser ablation of silicon: ablation efficiency and laser-induced plasma expansion,” *High-Power Laser Ablation V*, vol. 5448, p. 1150, 2004, doi: 10.1117/12.544401.
- [9] Y. J. Rao and Z. L. Ran, “Optic fiber sensors fabricated by laser-micromachining,” *Opt. Fiber Technol.*, vol. 19, no. 6 PART B, pp. 808–821, 2013, doi: 10.1016/j.yofte.2013.07.016.
- [10] G. Rajan, “Optical fiber sensors: Advanced Techniques & Applications,” no. 1, p. 575, 2015, [Online]. Available: <https://www.crcpress.com/Optical-Fiber-Sensors-Advanced-Techniques-and-Applications/Rajan/p/book/9781482228250>.
- [11] Y. Kondo, K. Nouchi, T. Mitsuyu, M. Watanabe, P. G. Kazansky, and K. Hirao, “Fabrication of long-period fiber gratings by focused irradiation of infrared femtosecond laser pulses,” *Opt. Lett.*, vol. 24, no. 10, p. 646, 1999, doi: 10.1364/ol.24.000646.
- [12] E. G. Turitsyna and S. Webb, “Simple design of FBG-based VSB filters for ultra-dense WDM

- transmission ELECTRONICS LETTERS 20th January 2005,” *Electron. Lett.*, vol. 41, no. 2, pp. 40–41, 2005, doi: 10.1049/el.
- [13] C. W. Smelser, S. J. Mihailov, and D. Grobnic, “Formation of Type I-IR and Type II-IR gratings with an ultrafast IR laser and a phase mask,” *Opt. Express*, vol. 13, no. 14, p. 5377, 2005, doi: 10.1364/opex.13.005377.
- [14] Y. Li, D. N. Wang, and L. Jin, “Single-mode grating reflection in all-solid photonic bandgap fibers inscribed by use of femtosecond laser pulse irradiation through a phase mask,” *Opt. Lett.*, vol. 34, no. 8, p. 1264, 2009, doi: 10.1364/ol.34.001264.
- [15] R. Chen *et al.*, “Fiber bragg gratings in air-hole microstructured fibers for high-temperature pressure sensing,” *Bragg Gratings, Photosensit. Poling Glas. Waveguides, BGPP 2012*, vol. 35, no. 9, pp. 1443–1445, 2013, doi: 10.1364/bgpp.2012.btu4e.2.
- [16] D. Grobnic, S. J. Mihailov, C. W. Smelser, and H. Ding, “Sapphire fiber bragg grating sensor made using femtosecond laser radiation for ultrahigh temperature applications,” *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 16, no. 11, pp. 2505–2507, 2004, doi: 10.1109/LPT.2004.834920.
- [17] S. J. Mihailov, D. Grobnic, and C. W. Smelser, “High-temperature multiparameter sensor based on sapphire fiber Bragg gratings,” *Opt. Lett.*, vol. 35, no. 16, p. 2810, 2010, doi: 10.1364/ol.35.002810.
- [18] A. Marcinkevicius *et al.*, “Microfabrication in Silica,” *Opt. Lett.*, vol. 26, no. 5, pp. 277–279, 2001.
- [19] Y.-J. Rao, M. Deng, D.-W. Duan, X.-C. Yang, T. Zhu, and G.-H. Cheng, “Micro Fabry-Perot interferometers in silica fibers machined by femtosecond laser,” *Opt. Express*, vol. 15, no. 21, p. 14123, 2007, doi: 10.1364/oe.15.014123.
- [20] T. Wei, Y. Han, H.-L. Tsai, and H. Xiao, “Miniaturized fiber inline Fabry-Perot interferometer fabricated with a femtosecond laser,” *Opt. Lett.*, vol. 33, no. 6, p. 536, 2008, doi: 10.1364/ol.33.000536.
- [21] T. Wei, Y. Han, Y. Li, H.-L. Tsai, and H. Xiao, “Temperature-insensitive miniaturized fiber inline Fabry-Perot interferometer for highly sensitive refractive index measurement,” *Opt. Express*, vol. 16, no. 8, p. 5764, 2008, doi: 10.1364/oe.16.005764.
- [22] K. Zhou, Z. Yan, L. Zhang, and I. Bennion, “Refractometer based on fiber Bragg grating Fabry-Pérot cavity embedded with a narrow microchannel,” *Opt. Express*, vol. 19, no. 12, p. 11769, 2011, doi: 10.1364/oe.19.011769.
- [23] Y. Wang, M. Yang, D. N. Wang, S. Liu, and P. Lu, “Fabricated By Femtosecond Laser

- Micromachining for Refractive Index Measurement With High Sensitivity,” *Water*, vol. 27, no. 3, pp. 370–374, 2010.
- [24] Y. Yu, L. Jiang, S. Wang, J. Yang, and B. Li, “Strain-insensitive optical fiber Mach-Zehnder interferometric temperature sensor,” *2011 Int. Conf. Opt. Instruments Technol. Opt. Sensors Appl.*, vol. 8199, p. 81991N, 2011, doi: 10.1117/12.921252.
- [25] L. Zhao, L. Jiang, S. Wang, H. Xiao, Y. Lu, and H. L. Tsai, “A high-quality Mach-Zehnder interferometer fiber sensor by femtosecond laser one-step processing,” *Sensors*, vol. 11, no. 1, pp. 54–61, 2011, doi: 10.3390/s110100054.
- [26] Y. Zhao, H. Zhao, R. qing Lv, and J. Zhao, “Review of optical fiber Mach-Zehnder interferometers with micro-cavity fabricated by femtosecond laser and sensing applications,” *Opt. Lasers Eng.*, vol. 117, no. September 2018, pp. 7–20, 2019, doi: 10.1016/j.optlaseng.2018.12.013.
- [27] X. Y. Sun *et al.*, “Highly sensitive refractive index fiber inline Mach-Zehnder interferometer fabricated by femtosecond laser micromachining and chemical etching,” *Opt. Laser Technol.*, vol. 77, pp. 11–15, 2016, doi: 10.1016/j.optlastec.2015.07.026.
- [28] Z. Li *et al.*, “Label-free detection of bovine serum albumin based on an in-fiber Mach-Zehnder interferometric biosensor,” *Opt. Express*, vol. 25, no. 15, p. 17105, 2017, doi: 10.1364/oe.25.017105.
- [29] M. Wang, M. Yang, J. Cheng, J. Dai, M. Yang, and D. N. Wang, “Femtosecond laser fabricated micro Mach-Zehnder interferometer with Pd film as sensing materials for hydrogen sensing,” *Opt. Lett.*, vol. 37, no. 11, p. 1940, 2012, doi: 10.1364/ol.37.001940.
- [30] Y. Liu, S. Qu, and Y. Li, “Liquid refractive index sensor with three-cascaded microchannels in single-mode fiber fabricated by femtosecond laser-induced water breakdown,” *Appl. Phys. B Lasers Opt.*, vol. 110, no. 4, pp. 585–589, 2013, doi: 10.1007/s00340-012-5296-y.
- [31] M. Park *et al.*, “Ultracompact intrinsic micro air-cavity fiber mach-zehnder interferometer,” *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 21, no. 15, pp. 1027–1029, 2009, doi: 10.1109/LPT.2009.2021278.
- [32] L. Jiang, J. Yang, S. Wang, B. Li, and M. Wang, “Fiber Mach-Zehnder interferometer based on microcavities for high-temperature sensing with high sensitivity,” *Opt. Lett.*, vol. 36, no. 19, p. 3753, 2011, doi: 10.1364/ol.36.003753.
- [33] T. Y. Hu and D. N. Wang, “Optical fiber in-line Mach-Zehnder interferometer based on dual internal mirrors formed by a hollow sphere pair,” *Tech. Dig. 18th Microoptics Conf. MOC 2013*,

- vol. 38, no. 16, pp. 3036–3039, 2013, doi: 10.1364/ol.38.003036.
- [34] T. Y. Hu, Y. Wang, C. R. Liao, and D. N. Wang, “Miniaturized fiber in-line Mach–Zehnder interferometer based on inner air cavity for high-temperature sensing,” *Opt. Lett.*, vol. 37, no. 24, p. 5082, 2012, doi: 10.1364/ol.37.005082.
- [35] B. Li, L. Jiang, S. Wang, Q. C. Mengmeng Wang, and J. Yang, “A new Mach-Zehnder interferometer in a thinned-cladding fiber fabricated by electric arc for high sensitivity refractive index sensing,” *Opt. Lasers Eng.*, vol. 50, no. 6, pp. 829–832, 2012, doi: 10.1016/j.optlaseng.2012.01.024.
- [36] Z. Li *et al.*, “Highly-sensitive gas pressure sensor using twin-core fiber based in-line Mach-Zehnder interferometer,” *Opt. Express*, vol. 23, no. 5, p. 6673, 2015, doi: 10.1364/oe.23.006673.

Kamilė Kasačiūnaitė

MACH - ZEHNDER TIPO INTERFEROMETRO INTEGRAVIMAS Į OPTINĮ ŠVIESOLAIDĮ

Santrauka

Optinis šviesolaidis yra prietaisas, pasižymintis unikaliomis jutiklių technologijų savybėmis. Jį galima naudoti ne tik signalo perdavimui, bet ir matavimams. Lyginant su elektriniai ir didelių gabaritų jutikliais, šviesolaidiniai jutikliai turi akivaizdžių privalumų. Jie yra maži, atsparūs neigiamiems aplinkos poveikiams, saugūs, gali matuoti daug parametų bei pasižymi dideliu jautrumu. Iki šiol yra sukurta daug įvairių OŠ jutiklių: šviesolaidiniai girokopai, netiesiniai sklaidos jutikliai, šviesolaidinės gardelės ir interferometrai. Vieni iš tokių šviesolaidinių jutiklių yra Mach - Zehnder interferometrai, susilaukę didelio susidomėjimo dėl išgaunamų kontrastingų interferencinių juostelių, didelio jautrumo bei universalumo.

Šiame darbe demonstruojamas MZI ertmės prototipo sukūrimas, naudojant UV (206 nm) fs impulsus. Darbo metu eksperimentiškai buvo nustatyti geriausi abliacijos parametrai mažiausio šiurkštumo paviršiui gauti, interferometro sienelių statmenumas. Taip pat, buvo nustatytas geriausias abliacijos algoritmas siekiant išvengti paviršiaus įtempimų, kurie sukelia šviesolaidžio lūžimus. Galiausiai, jutiklis buvo išbandytas esant skirtingoms druskos tirpalo koncentracijoms.

Gauti rezultatai parodė, kad esant 62 % impulsų persiklojimui yra suformuojamos struktūros su mažiausiu paviršiaus šiurkštumu $S_a = 148 \pm 12$ nm bei sienelių statumu 116° . Pritaikius geriausius abliacijos parametrus buvo formuojamas MZI prototipas. Deja, skenuojami šviesolaidžiai sulūždavo dėl paviršiaus įtempimų, atsiradusių tvirtinant jį jungtimis prie matavimo prietaisų. Galiausiai formuojant struktūras, išlaikančias šviesolaidžio cilindriškumą, buvo išvengta lūžimų. Suformavus 187 μ m MZI ertmės prototipą, jis buvo merkiamas į skirtingos koncentracijos druskos tirpalus, bet interferencinis spektras nebuvo stebimas, dėl galimai pažeidžiamos šerdies. Tam įrodyti reikia detalesnių tyrimų.

INTEGRATION OF MACH - ZEHNDER TYPE INTERFEREMETER IN OPTICAL FIBER

Summary

Optical fiber is a device with unique sensor technology features. It can be used not only for signal transmission, but also for measurements. Compared to electrical and bulky optical sensors fiber - optic sensors have definite advantages. These sensors are small, environmentally resistant, safe, highly sensitive and can measure many parameters. Many different OS sensors have been developed: fiber - optic gyroscopes, nonlinear scatter sensors, fiber - optic gratings, and interferometers. An example of fiber - optic sensor is Mach - Zehnder interferometer, which has attracted a great deal of interest due to its high sensitivity and high fringe visibility.

This thesis describes the formation of MZI cavity using UV (206 nm) fs pulses. Firstly, the optimum ablation parameters were obtained experimentally to achieve the lowest surface roughness and the perpendicularity of the interferometer walls. Secondly, the best ablation algorithm has been chosen to avoid surface stresses that cause fiber breakage. Finally, the sensor was tested at different salt concentrations.

Experimental results showed that at 62 % pulse overlap, structures with the lowest surface roughness $S_a = 148 \pm 12$ nm and wall angle of 116° are formed. Applying the best ablation parameters, a MZI trench was attempted to be formed. Unfortunately, the scanned fiber optics broke due to the surface tensions caused by attaching it via connectors to the measuring devices. Finally, fractures were averted by forming structures that retained the cylindricality of the fiber. After the prototype of the $187 \mu\text{m}$ MZI cavity was formed, it was immersed in salt solutions of different concentrations, but the interference spectrum was not observed due to the potentially damaged core. More detailed research is needed to argue this hypothesis.