



Kauno technologijos universitetas
Matematikos ir gamtos mokslų fakultetas

**Anizotropinių plonų sluoksnių pagrindu suformuotos
polarizuojančios dangos didelių galių lazerinėms sistemoms**

Baigiamasis magistro projektas

Lukas Ramalis
Projekto autorius

Doc. Dr. Tomas Tolenis
Vadovas
Prof. Giedrius Laukaitis
Konsultantas

Kaunas, 2019



Kauno technologijos universitetas
Matematikos ir gamtos mokslų fakultetas

**Anizotropinių plonų sluoksnių pagrindu suformuotos
polarizuojančios dangos didelių galių lazerinėms sistemoms**

Baigiamasis magistro projektas
Taikomoji fizika (6211CX015)

Lukas Ramalis
Projekto autorius

Doc. Dr. Tomas Tolenis
Vadovas
Prof. Giedrius Laukaitis
Konsultantas

Doc. Dr. Jurgita Čyviėnė
Recenzentė

Kaunas, 2019



Kauno technologijos universitetas

Matematikos ir gamtos mokslų fakultetas

Lukas Ramalis

Anizotropinių plonų sluoksnių pagrindu suformuotos poliarizuojančios dangos didelių galių lazerinėms sistemoms

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad mano, Luko Ramalio, baigiamasis projektas tema „Anizotropinių plonų sluoksnių pagrindu suformuotos poliarizuojančios dangos didelių galių lazerinėms sistemoms“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

Aš suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo faktui, man bus taikomos nuobaudos, remiantis Kauno technologijos universitete galiojančia tvarka.

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)

Ramalis, Lukas. Anizotropinių plonų sluoksnių pagrindu suformuotos poliarizuojančios dangos didelių galių lazerinėms sistemoms. Magistro baigiamasis projektas vadovas doc. dr. Tomas Tolenis; Kauno technologijos universitetas, matematikos ir gamtos mokslų fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis: Fizikiniai mokslai (F300), Taikomoji fizika (F310).

Reikšminiai žodžiai: Lazerio indukuotas pažaidos slenkstis, poliarizatorius, mikrolazeris

Kaunas, 2019. 41 p.

Santrauka

Šiuolaikiniai modernūs ir inovatyvūs optiniai prietaisai turi integruotą lazerinę sistemą, kuriai reikalingos didelės galios arba tikslumas. Šių įrenginių taikymas yra įvairus, pavyzdžiui, medžiagų apdorojime (pjovimas, gręžimas), medicinoje, ryšių technologijoje ir kita. Siekiant dažniau taikyti lazerines sistemas kasdieniniame gyvenime, reikia mažinti sistemos matmenis. Taigi, reikia naujų sprendimų optiniams komponentams, tokiems kaip poliarizatoriai, diafragmos ar erdviniai filtrai.

Siekiant pagerinti poliarizuojantį optinį komponentą, egzistuoja galimybė nusodinti mikrometrinių matmenų struktūrinę ploną plėvelę tiesiogiai ant mikrolazerinėje sistemoje esamų elementų (veidrodžių, netiesinių kristalų ir t.t.). Deja, standartiniais izotropiniais sluoksniais paremti poliarizatoriai (plonų plėvelių poliarizatoriai, kubiniai poliarizatoriai) gali būti naudojami tik kaip atskiras elementas sistemoje, nes optinis komponentas turi būti pakreiptas specifiniu kampu (Briusterio kampu). Formuojant anizotropinę, koloninės struktūros daugiasluoksnę dangą, gaunamas poliarizatorius nulinio laipsnių šviesos kritimo kampui, kuris pasižymi dideliu lazerinės spinduliuotės atsparumu.

Šiame darbe naudojama garinimo kampu metodika, garinant nanostruktūrizuotus anizotropinius sluoksnius. Amorfinių medžiagų garinimas vyksta manipuliuojant padėklo orientacija nusodinimo proceso metu, sukeltiant šešėliavimo efektą. Naudojant fizinį garų nusodinimo metodą ir keičiant padėklo kampą garų srauto atžvilgiu, gaunami skirtingo lūžio rodiklio anizotropiniai sluoksniai. Atliekamas dangos modeliavimas, kai kombinuojami sluoksniai viena kryptimi pasižymi panašiu lūžio rodikliu, o kita - skirtingu. Šiuo atveju daugiasluoksnė struktūra viena kryptimi bus tarsi vienasluoksnė danga (kurioje lūžio rodikliai panašūs), o kita kryptimi – formuojamas Brego veidrodis. Taip formuojamas šviesą poliarizuojantis optinis komponentas.

Optinė ir struktūrinė analizė parodė, kad yra galimybė formuoti nulinio laipsnių kampu poliarizatorių, naudojant silicio oksido medžiagą. Tokie optiniai elementai pasižymi dideliu lazerinės spinduliuotės atsparumu, dideliu pralaidumu arba atspindžiu, puikiu optiniu veikimu ir turi labai mažus optinius nuostolius. Šiame darbe suformuoti trys poliarizuojantys elementai ir išmatuota lazario indukuotas pažaidimų slenkstis. Skulptūrinių dangų pagrindu suformuoti poliarizatoriai pasižymi $9,8 \text{ J/cm}^2$ (p poliarizacijai) ir $11,2 \text{ J/cm}^2$ (s poliarizacijai) lazerinės spinduliuotės atsparumu.

Ramalis Lukas. Anisotropic thin film based polarizing coatings for high power lasers. Master's Final Degree Project supervisor doc. dr. Tomas Tolenis, faculty of mathematics and natural sciences, Kaunas University of Technology.

Study field and area: Physical Sciences (F300), Applied Physics (F310).

Keywords: Laser induced damage threshold, polarizers, microlaser.

Kaunas, 2019. 41 p.

Summary

Current modern and innovative optical devices feature an integrated laser system when high power or precision is needed. Applications are in a variety of areas such as material processing (cutting, drilling), medicine, communications technology, etc. In order to apply laser systems more in everyday life, the system dimensions should be reduced. Thus, novel solutions are required for optical components, such as polarizers, apertures or spatial filters.

In order to improve polarizing optical component a few microns thick structural thin film can be deposited directly on existing elements in the microlaser system (mirrors, nonlinear crystals, etc.). Unfortunately, standard isotropic multilayer coatings can only be used as a separate element (thin film polarizers, cube polarizers), in order to control the beam polarization, as it must be installed at specific angle (Brewster angle). Using a multilayer of anisotropic columnar structure to form a dielectric coating, we can achieve polarizing optical component for zero angle.

In this work, glancing angle deposition method is used to obtain nano-structured anisotropic layers. Evaporation of amorphous materials while manipulating the orientation of the substrate during process induces the self-shadowing effect. Using physical vapor deposition method and changing the angle of a substrate, different refractive index of anisotropic layers may be achieved, thus, combining the layers which has similar refractive indexes in one direction and different in other direction, polarizer is formed. In this case, multilayer in similar refractive index direction acts like a simple singlelayer, while in other direction Bragg mirror is formed.

Investigation of optical and structural properties indicates the possibility to form the all-silica polarizers for zero angle of incidence. Such optical elements exhibit high optical resistivity to laser radiation, high transmission or reflection, superior optical performance and has very low optical losses. In this work, three polarizing elements were formed, and laser induced damage threshold was measured. Sculptured thin films based polarizer resistivity to laser light value is around $9,8 \text{ J/cm}^2$ (p polarization) and $11,2 \text{ J/cm}^2$ (s polarization).

Turinys

Paveikslų sąrašas	7
Įvadas.....	9
1. Literatūros apžvalga	10
1.1. Mikrolazerinės sistemos	10
1.2. Poliarizacijos sąvokos samprata	11
1.3. Plonų plėvelių poliarizatoriai	12
1.4. Kubiniai poliarizatoriai.....	13
1.5. Sugeriantys poliarizatoriai.....	14
1.6. Nanostruktūrizuoti poliarizatoriai	14
1.7. Skulptūrinių dangų pagrindu suformuoti poliarizatoriai	15
2. Medžiagos ir tyrimų metodai	20
2.1. Optiniai matavimai	20
2.1.1. Spektrometro matavimai	20
2.1.2. Optinio mikroskopo matavimai	20
2.1.3. Interferometro matavimai	20
2.2. Struktūriniai matavimai	21
2.2.1. Lazerio indukuotos pažaidos slenksčio matavimai	21
2.2.2. Skenuojančio elektronų mikroskopo matavimai	22
2.3. Skulptūrinių dangų formavimo procesas.....	23
3. Tyrimų rezultatai ir jų aptarimas	27
3.1. Spektrometro matavimai	27
3.2. Lazerio indukuoto pažaidos slenksčio matavimai	30
3.3. Optinio mikroskopo matavimai	32
3.4. Profilometro matavimai	33
3.5. Interferometro matavimai	34
3.6. Skenuojančio elektronų mikroskopo matavimai	36
3.7. Rezultatų apibendrinimas	36
Išvados ir pagrindiniai rezultatai.....	38
Literatūros sąrašas	39

Paveikslų sąrašas

1 pav. <i>Fabry-Perot</i> rezonatoriaus principinė schema [4]	10
2 pav. Plonų plėvelių poliarizatoriaus principinė schema [7]	12
3 pav. Kubinio poliarizatoriaus principinė schema	14
4 pav. Nanostruktūrizuotų poliarizatorių modeliai [28]	15
5 pav. Skenuojančio elektronų mikroskopo nuotraukos, parodančios skulptūrinių struktūrų vystymąsi a) pradinės spiralės, b) pradinės chiralinės, c) Alq ₃ spiralės, d) Si kvadratinės spiralės. a) ir b) nuotraukos darytos 1994, tuo tarpu c) ir d) - 2007 [29]	16
6 pav. Šešėliavimo efektas nusodinimo metu, kai a) atomai atsitiktinai nusėda ant paviršiaus, b) pradedą formuotis pradinės kolonos, pakreiptos kampų, c) kolonom augant, šešėliavimo efektas daro didelę įtaką struktūrai, d) didesnių dydžių atveju atsiranda kolonų išnykimo efektas [29]	16
7 pav. Fizinio garų nusodinimo metu gauta skulptūrinė struktūra manipuluojant padėklo kampų garų srauto atžvilgiu [30]	18
8 pav. Fizinio garų nusodinimo metu suformuota tankių izotropinių ir porėtų anizotropinių sluoksnių struktūra [31]	18
9 pav. Interferometro principinė schema [33]	21
10 pav. Lazerio indukuotos pažaidos slenkščio matavimų stendo optinė schema [36]	22
11 pav. Skenuojančio elektronų mikroskopo principinė schema [37]	22
12 pav. Principinė vakuuminės kameros schema, kurioje taikoma fizinio garų nusodinimo metodika	23
13 pav. Principinė vakuuminės kameros schema, su pažymėtomis dalimis	24
14 pav. Principinė koloninės struktūros 1 sluoksnio schema	24
15 pav. Dėl šešėliavimo efekto suformuotos eliptinės formos skerspjūviai ant padėklo	25
16 pav. Lūžio rodiklių priklausomybė nuo bangos ilgio, kai danga yra garinama skirtingais kampais, šešėliavimo (<i>s</i>) ir nešešėliavimo (<i>p</i>) kryptimis	25
17 pav. Principinė anizotropinių sluoksnių schema, kur viena kryptimi lūžio rodikliai sutampa, o kita kryptimi išsiskiria	25
18 pav. Pirmojo bandinio pralaidumo intensyvumo priklausomybė nuo bangos ilgio a) <i>p</i> ir b) <i>s</i> poliarizacijai	27
19 pav. Pirmojo bandinio pralaidumo intensyvumo priklausomybė nuo bangos ilgio <i>p</i> ir <i>s</i> poliarizacijai	28
20 pav. Antrojo bandinio pralaidumo intensyvumo priklausomybė nuo bangos ilgio a) <i>s</i> ir b) <i>p</i> poliarizacijai	28
21 pav. Antrojo bandinio pralaidumo intensyvumo priklausomybė nuo bangos ilgio <i>p</i> ir <i>s</i> poliarizacijai	29
22 pav. Optilayer programine įranga sumodeliuotas antrojo bandinio, <i>s</i> poliarizacijos, spektras	29
23 pav. Optilayer programine įranga sumodeliuotos storio paklaidos antrajam bandiniui	29
24 pav. Trečiojo bandinio pralaidumo intensyvumo priklausomybė nuo bangos ilgio a) <i>p</i> ir b) <i>s</i> poliarizacijai	30
25 pav. Trečiojo bandinio pralaidumo intensyvumo priklausomybė nuo bangos ilgio <i>p</i> ir <i>s</i> poliarizacijai	30
26 pav. Pažeidimų tikimybės priklausomybė nuo spinduliuotės energijos įtekio pirmajam bandiniui <i>p</i> poliarizacijai (9,8 J/cm ²)	31
27 pav. Pažeidimų tikimybės priklausomybė nuo spinduliuotės energijos įtekio pirmajam bandiniui <i>s</i> poliarizacijai (11,2 J/cm ²)	31

28 pav. Pažeidimų tikimybės priklausomybė nuo spinduliuotės energijos įtekio antrajam bandiniui ($9,2 \text{ J/cm}^2$).....	31
29 pav. Optiniu mikroskopu užfiksuoti pažeidimai pirmajame bandinyje, kur a) 24 J/cm^2 <i>s</i> poliarizacijos spindulio pažeidimas ant dangos, b) 24 J/cm^2 <i>s</i> poliarizacijos spindulio pažeidimas ant padėklo, c) $28,4 \text{ J/cm}^2$ <i>p</i> poliarizacijos spindulio pažeidimas ant dangos ir d) $28,4 \text{ J/cm}^2$ <i>p</i> poliarizacijos spindulio pažeidimas ant padėklo	32
30 pav. Optiniu mikroskopu užfiksuoti pažeidimai antrajame bandinyje, kur a) $18,9 \text{ J/cm}^2$ spindulio pažeidimas ant dangos, o b) ant padėklo	33
31 pav. Pirmojo bandinio dangos modelis, kur žvaigždutėmis pažymėti pažeidimai <i>s</i> poliarizacijos spinduliui	34
32 pav. Elektrinio lauko pasiskirstymas pirmojo bandinio dangoje a) <i>s</i> ir b) <i>p</i> poliarizacijai	34
33 pav. Interferometro rezultatai a) pirmajam bandiniui, b) antrajam bandiniui naudojami stikliukai be dangos	35
34 pav. Interferometro rezultatai a) pirmajam bandiniui, b) antrajam bandiniui naudojami stikliukai su užgarinta danga	35
35 pav. Skenuojančio elektronų mikroskopo rezultatai, kur kairėje pirmasis sluoksnis buvo nukreiptas šešėliavimo kryptimi, o dešinėje pirmasis sluoksnis nukreiptas ne šešėliavimo kryptimi	36

Įvadas

Šiuolaikinės technologijos vystosi itin sparčiai kuriant naujus bei inovatyvius optinius įrenginius, kurie pasižymi integruota lazerine sistema. Šių įrenginių taikymas yra labai platus įvairiose srityse, kaip medžiagų apdirbime (pjaustyme, gręžime), medicinoje, ryšių technologijose ir kitur. Siekiant dažniau pritaikyti lazerines sistemas kasdienybėje, sistemos gabaritai yra mažinami, tokiu būdu ir įrenginių kaina būtų mažesnė. Dabartinių įrenginių pagaminimo kaina yra labai didelė dėl integruotų lazerinių sistemų savikainos, tačiau taikant mikrolazerines sistemas, technologijos taptų labiau prieinamos. Tad mažinant sistemos matmenis, reikalingi papildomi sprendimai optiniams komponentams, tokiems kaip poliarizatoriai, diafragmos ar erdviniai filtrai. Šiame darbe apsiribosime poliarizatoriais.

Mikrolazeriai pasižymi labai gera kokybe bei sistemos stabilumu, lyginant su standartiniais lazeriais. Tačiau pagrindinis mikrolazerių trūkumas yra tas, kad veikimas yra kokybiškas naudojant tik mažų galių impulsus. Kadangi, mikrolazerinėse sistemose yra optinių komponentų trūkumas, kurie galėtų sukontroliuoti spindulio kokybę ar poliarizaciją. Vienas iš būdų sukontroliuoti mikrolazerinių sistemų spindulio poliarizaciją galėtų būti tiesiogiai ant elementų (rezonatoriaus, veidrodžių ar netiesinių kristalų) mikrometrinių matmenų daugiasluoksnės dangos, kuri atstotų optinį komponentą lazerinėje sistemoje, nusodinimas.

Vienas iš būdų norint įgyvendinti šią idėją – formuoti skulptūrinių dangų dielektrinę daugiasluoksnę dangą, kuri pasižymi anizotropiškumu. Manipuliuojant dangos garinimo kampais, garų srauto atžvilgiu, galima formuoti vienai poliarizacijai Brego veidrodį, tuo tarpu kitai poliarizacijai – tarsi vienasluoksnę (to paties lūžio rodiklio) dangą. Tokiu būdu pasiekamas poliarizacijų išsiskyrimas specifiniam bangos ilgiui.

Šiame darbe tiriamos daugiasluoksnės anizotropinės silicio oksido skulptūrinės dangos, kurios pasižymi skirtingu šviesos pralaidumu statmenoms poliarizacijoms. Taigi, iš to suformuojamas pagrindinis magistro projekto tikslas – skulptūrinių dangų pagrindu suformuoti poliarizatorių nulinio laipsnių šviesos kritimo kampui.

Siekiant įgyvendinti darbo tikslą, suformuluoti šie pagrindiniai uždaviniai:

1. Ištirti suformuotų poliarizatorių optines charakteristikas.
2. Atlikti suformuotų poliarizatorių struktūrinę analizę.
3. Ištirti poliarizatoriaus lazerine spinduliuote indukuotų pažeidimų kilmę.

1. Literatūros apžvalga

1.1. Mikrolazerinės sistemos

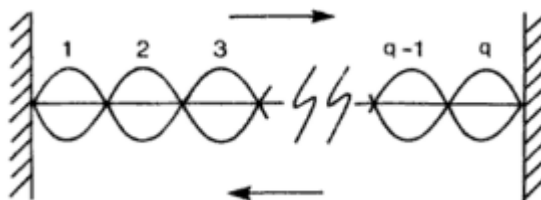
Mikrosistemos – tai optinių, elektroninių arba mechaninių komponentų kombinacija, kurios gabaritai yra mažesni nei 100 μm bent vienoje dimensijoje. Dėl tokių įrenginių kompaktiškumo, didelio patikimumo, aukšto funkcionalumo bei mažesnio svorio mikrosistemos yra potencialus tyrimų objektas. Mikrolazerinės sistemos pasižymi tokia pačia savybe – kompaktiškumu. Kitas svarbus aspektas – išlaikyti šios sistemos funkcionalumą, tačiau, norint tai pasiekti, optiniai komponentai turi būti nuolat tobulinami.

Mikrolazerinių sistemų pagrindinis komponentas yra lazeris, kuris susideda iš aktyvios terpės ir optinio rezonatoriaus. Nuo aktyvios terpės priklauso išėjimo spinduliuotės energija arba galia, o rezonatorius kontroliuoja erdvinę kokybę bei lazerio spektrinį linijos plotį. Šie du elementai yra pagrindiniai faktoriai nustatant specifinius lazerio spinduliuotės parametrus, pasižyminčius aukštu erdvinio ir laikiniu koherentiškumu. Būtent dėl šios priežasties optinio rezonatoriaus dizainas ir konstrukcija yra nuolat tobulinami [1, 2, 3].

Per pastaruosius metus optiniai rezonatoriai buvo sėkmingai vystomi ir naudojami komercinėse lazerinėse sistemose. Optinis rezonatorius – tai optinių komponentų konstrukcija, leidžianti šviesos spinduliui sklirti uždara trajektorija. Tokie rezonatoriai yra gaminami skirtingų formų [4, 5]. Vienas iš paprasčiausių ir dažniausiai naudojamų lazerio rezonatorių yra *Fabry-Perot* – kai tam tikroje aplinkoje vienas priešais kitą įkonstruojami veidrodžiai. Toks rezonatorius fiziškai izoliuoja šviesos spindulį vienoje plokštumoje (1 pav.). Įprastai *Fabry-Perot* rezonatoriai taikomi kietos būsenos lazeriams (kristalams). Jų skersinių režimų savybės priklauso nuo bendrų nustatymų (įskaitant oro erdvės ilgį). Tokio elemento stabilumas gali būti specifikuojamas pagal tris pagrindinius aplinkos sąlygų parametrus, kurie turi išlikti po kiekvieno šviesos spindulio atsikartojančio rato. Atstumas tarp veidrodžių turi atitikti šviesos bangos ilgį, kad išliktų optinė bangos fronto fazė, amplitudė bei amplitudės pasiskirstymas skersai ašiai. Iš esmės turi galioti tokia išraiška:

$$\lambda = \frac{2nL}{q},$$

čia λ yra bangos ilgis, q – sveikasis skaičius, n yra vidutinis lūžio rodiklis terpėje, kurios ilgis yra L .



1 pav. *Fabry-Perot* rezonatoriaus principinė schema [4]

Tobulėjant technologijoms bei augant įvairiems lazerinių sistemų reikalavimams, buvo sukurtas kitas rezonatoriaus dizainas – žiedinis. Šiuo atveju šviesos spinduliai gali nuolat osciliuoti ratu, kai jie nesusitinka vienas prieš kitą ir nesudaro stovinčios bangos. Būtent dėl šios priežasties lazerio terpėje pašalinami inversijos nuostoliai, kurie žinomi kaip erdviniai skylės išdegimai.

Abiejų dizainų atveju gali būti konstruojamas papildomas optinis elementas, kurį turi pereiti šviesos spindulys. Toks elementas skirtas kompensuoti šviesos nuostolius rezonatoriuje. Kaip žinome, šviesos spindulys, sąveikaudamas su kitu kietu kūnu ir atsispindėdamas, gali patirti įvairias sklaidas, kaip difrakciją. Linijinis ir žiedinis rezonatoriai pasižymi keletu svarbių skirtumų. Kaip jau buvo minėta, žiediniame rezonatoriuje šviesa cirkuliuoja dviem skirtingomis kryptimis. Kai rezonatoriaus struktūroje įkonstruojamas iš dalies atspindintis veidrodis, gauname du skirtingus išėjimo spindulius. Tuo tarpu linijinio rezonatoriaus atveju spindulys, perėjęs per iš dalies atspindintį veidrodį, gali atsispindėti atgal į rezonatorių. Būtent dėl šios priežasties žiedinis rezonatorius yra taikomas tam tikriems lazerio šaltiniams, kurie yra jautrūs optiniams grįžtamiesiems signalams.

Viena iš mikrolazerinių sistemų problemų yra mikrolazerio generuojama spinduliuotė, kurios poliarizacija yra mišri, todėl nukenčia įvairūs stabilūs parametrai, kaip optinė galia arba dažnio keitimas nelinejiniuose kristaluose. Kad ši problema būtų išspręsta, buvo pasiūlyta kombinuoti veidrodžių sistemą su Briusterio kampo tipo poliarizatoriais, tačiau dėl to atsiranda papildomų optinių nuostolių, atsispindėjimų nuo Briusterio plokštelių ir t.t. Didelių galių impulsiniuose lazeriuose tokie faktoriai gali sukelti optinių pažeidimų riziką.

1.2. Poliarizacijos sąvokos samprata

Šviesos banga yra elektromagnetinė banga, kuri sugeba pernešti energiją vakuume. Elektromagnetinė banga susideda iš elektrinio ir magnetinio lauko komponentų, kurie tarpusavyje sudaro 90° kampą [6]. Dalelės, turinčios tam tikrą krūvį, vibruoja viena kitos atžvilgiu, taip sukeldamos šviesos bangas. Įprastu atveju šių skersinių bangų virpesių orientacija plokštumoje, statmenoje sklidimo krypties, yra vienoda visomis kryptimis – tai natūrali šviesa (saulės spinduliai). Tačiau pasinaudojus tam tikromis priemonėmis, įmanoma šią virpesių orientaciją kontroliuoti, taip gaunant poliarizuotą šviesą. XIX amžiaus pradžioje prancūzų mokslininkas Etienne – Louis Malus pastebėjo šį fenomeną, pritaikydamas dvigubo lūžio rodiklio efektą kristaluose [7].

Egzistuoja trijų tipų plokščių bangų poliarizacijos: apskritiminė, elipsinė ir tiesinė. Skirtingi poliarizacijos tipai turi skirtingas taikymo sritis. Dažniausiai poliarizuota šviesa taikoma vaizdavimo programose, kad sumažintų atspindžius ar pagerintų kontrastą paviršiaus įtempių vertinime matuojant magnetinių laukų, temperatūros, molekulinę struktūrą, cheminės sąveikos ar akustinės vibracijos pokyčius ir t.t. [8, 9, 10, 11]. Šiame darbe apsiribosime tiesine poliarizacija, kai sklindančios elektromagnetinės bangos virpesių orientacija plokštumoje yra tik vienos krypties. Kad tai pasiektume, naudojami įvairūs poliarizatoriai, skirti šviesos poliarizacijos išskyrimui ar lazerinės spinduliuotės intensyvumui kontroliuoti.

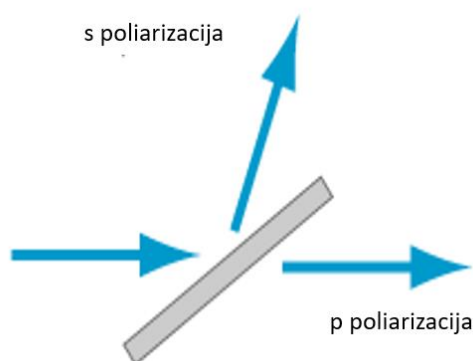
Šviesą poliarizuojantys optiniai komponentai privalo pasižymėti dideliu išsiskyrimo santykiu, plačiu bangos ilgio diapazonu, geru pralaidumu arba atspindžiu vienai poliarizacijai ir svarbiausia - aukštu lazerinės spinduliuotės atsparumu. Visgi pagrindinis faktorius, lemiantis optinių komponentų naudojimą, yra lazerinės spinduliuotės pažeidimų slenksčio vertė. Pagrindinė strategija didinant dangų atsparumą lazeriniam poveikiui yra minimizuoti medžiagos absorbciją bei defektų kiekį elemente. Defektų atsiradimą lemia daugybė faktorių, susijusių su pačiu gamybos procesu. Kadangi dangoje sluoksniai yra nanometrinių dydžių, menkiausi nešvarumai kameroje ar medžiagoje gali sukelti defektų atsiradimą, tad reikalinga itin kruopšti įrenginių priežiūra bei jų stabilizavimas proceso metu.

Jau XVIII amžiuje Etienne-Louis Malus nagrinėjo optinius reiškinius, susijusius su įvairiais kristalais, tokiais kaip „spar“ [7]. Tuomet mokslininkas pastebėjo, jog dėl dvigubo lūžio rodiklio efekto kristaluose įmanoma išskirti šviesą į du skirtingų poliarizacijos būsenų spindulius. Teorija gana plačiai išnagrinėta ir šio mokslininko bendraminčių [12]. Iš esmės, šie eksperimentai padarė pradžią optinių poliarizatorių atsiradimui. Dabar gaminami poliarizatoriai remiasi dviem pagrindiniais principais – naudojant izotropines dangas, pritaikant Briusterio kampo efektą, arba naudojant anizotropines medžiagas, panaikinant vieną poliarizaciją sugertimi.

1.3. Plonų plėvelių poliarizatoriai

Vieni iš plačiausiai naudojamų optinių poliarizatorių yra izotropinių dangų pagrindu suformuoti Briusterio kampo plonų plėvelių poliarizatoriai. Dažniausiai šie elementai naudojami kaip poliarizacijų perjungimo arba kaip izoliacijos komponentas lazerinėse optinėse sistemose [13]. Pagrindinės šio komponento charakteristikos: p poliarizacijos pralaidumas (T_p), ekstinkcijos koeficientas, kontrastas, poliarizuojančio bangos ilgio diapazonas ir lazerinės spinduliuotės atsparumas. Dėl didelių perspektyvų lazerinių sistemų technologijose šie optiniai elementai susilaukia itin didelio dėmesio, tad yra nuolatos tyrinėjami, naujinami bei tobulinami [14, 15, 16]. Jau 2005 metais mokslininkai aprašė poliarizatorių, kur ekstinkcijos koeficientas siekė 200:1, tuo tarpu p poliarizacijos pralaidumas buvo didesnis nei 98 %. Žinoma, tobulėjant dangų nusodinimo metodikai, medžiagų kokybei ir kitiems faktoriams, parametrai paraleliai gerėja. Dabartiniai poliarizatoriai siekia 1000:1 ekstinkcijos koeficientą, ties 632 nm bangos ilgiu arba gali pasiekti itin didelį atspindį (99.5 %) [17, 18].

Kaip jau minėta anksčiau, plonų plėvelių poliarizatoriai yra pagrįsti Briusterio kampo efektu. Įprastu atveju spinduliuotei kritus į dielektrinį paviršių Briusterio kampu, s poliarizacijos spindulys atspindi apie 16 % intensyvumu, priklausomai nuo dielektriko lūžio rodiklio. Žinoma, tokie poliarizatoriai būtų visiškai neefektyvūs, nes net ir perėjusi spinduliuotė per tokį optinį komponentą nebūtų visiškai p poliarizuota. Norint sustiprinti poliarizacijų išsiskyrimą, vietoj įprastos naudojama interferencinė dielektrinė danga. Paprasčiausiu atveju optinis komponentas sudarytas iš stiklo, kuris yra padengtas tam tikra daugiasluoksne dielektrine danga [7]. Kaip žinome, Briusterio kampas įvairioms dangoms varijuoja skirtingais kampais, tad reikia pakreipti atitinkamu kampu optinį elementą. Kombinuojant antireflekcinę dangą ant elemento kitos pusės, perėjusios spinduliuotės p poliarizacijos atspindžiai yra sumažinami (2 pav.). Tokiu būdu suformuotas plonų plėvelių poliarizatorius bus taikomas 45° kampu [7].



2 pav. Plonų plėvelių poliarizatoriaus principinė schema [7]

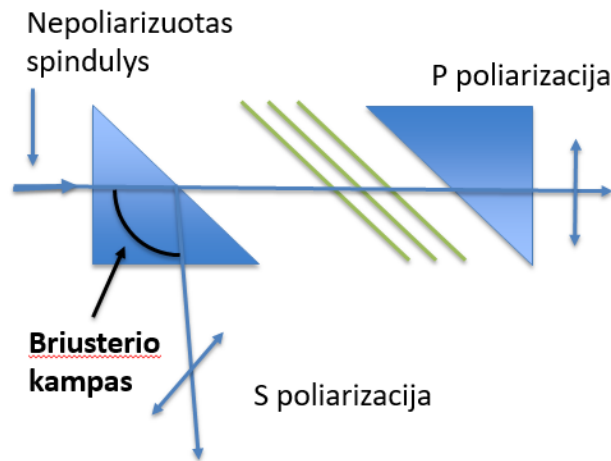
Plonų plėvelių poliarizatoriai plačiai taikomi lazerinėse optinėse sistemose, nes yra patogūs naudoti bei pasižymi labai dideliu lazerinės spinduliuotės atsparumu. Lazerio indukuotos pažaidos slenksčio vertės siekia apie 15 J/cm^2 , „12 ns, 1064 nm bangos ilgio lazeris“ [12, 13]. Nepaisant šio optinio komponento privalumų, plonų plėvelių poliarizatoriai sukelia tam tikrų problemų. Kadangi elementas paremtas izotropinių dangų pagrindu, lazerinėje sistemoje jis turi būti pakreipiamas tam tikru kampu. Negana to, šie poliarizatoriai patiria spindulio pasislinkimą tarp krintančio ir perėjusio per elementą spindulių. Tam reikalinga papildoma sistemos kalibracija, kuri sukelia nepatogumų lazerinėse optinėse sistemose [7].

1.4. Kubiniai poliarizatoriai

Kaip jau buvo minėta anksčiau aptartame skyriuje, izotropinių dangų pagrindu paremti plonų plėvelių poliarizatoriai pasižymi geru lazerinės spinduliuotės atsparumu, tačiau patiriamas šviesos pluošto nunešimas. Tęsiant šios srities tyrimus, buvo suprojektuotas optinis komponentas, sudarytas iš dviejų atskirų prizmių, kurios yra suklijuotos tarpusavyje ir įgauna kubo pavidalą (3 pav.). Norint pasiekti abiejų prizmių poliarizacijos išsiskyrimą, prieš jas klijuojant, yra padengiama daugiasluoksnė interferencinė danga.

Poliarizuojantys šviesos pluoštą, sklaidantys optiniai elementai yra itin plačiai naudojami optikoje ir lazerinėse optinėse sistemose, kai reikia išskirti dvi viena kitai statmenas šviesos poliarizacijos būsenas (*s* ir *p* poliarizacijas). Paprastai plonų plėvelių poliarizatoriai gaminami naudojant optines interferencines dangas arba dvigubo lūžio rodiklio kristalus. Kristalų atveju galima pasiekti didelį išsiskyrimo koeficientą ir platų spektro regioną, tačiau, tobulėjant mikrotechnologijoms, iš dalies didelis šių medžiagų dydis nėra tinkamas taikant mikrolazerinėse sistemose. Negana to, gamtoje išgaunami dvigubo lūžio rodiklio kristalai yra labai reti, tad jų kaina didesnė, o apdirbimo procesas yra sudėtingas. Atsižvelgus į šias problemas, plonų plėvelių poliarizatoriai dažniausiai paremti šviesos interferencijos principu kombinuojant daugiasluoksnės dangas. Optiniai nuostoliai tokiose dangose gali būti labai maži, o šių komponentų forma pritaikoma įvairiems specifiniams poreikiams [19].

Kaip žinome, skirtingos lazerinės sistemos susiduria su itin specifiniais reikalavimais, tad kubiniai poliarizatoriai šioje srityje labai tinkami, nes yra daugybė skirtingų parametrų poreikius atitinkančių dizainų (Nicolo, Glan-tipo, Wollastono, Nomarskio, Rochono prizmės) [20]. Iš esmės šie poliarizatoriai, paremti dvigubo lūžio rodiklio medžiagomis, gali būti plačiai pritaikomi, tačiau nėra sukurtas dizainas, atitinkantis visus reikalavimus. Pavyzdžiui, norint padidinti bangos ilgio diapazoną, nukenčia lazerinės spinduliuotės indukuota pažeidimų slenksčio vertė bei atsiranda optinių nuostolių [21]. Šiuose optiniuose elementuose itin didelį apribojimą lazerio spinduliuotės atsparumo atžvilgiu sukelia klajai tarp prizmių, tad šiuolaikinės gamybos procese daugelis taiko optinio kontakto metodą [22].



3 pav. Kubinio poliarizatoriaus principinė schema

Kubiniai poliarizatoriai pasižymi labai geru lazerinės spinduliuotės atsparumu. Jeigu naudosisime didelio kontrasto kubinius poliarizatorius, pažaidos slenksčio vertė gali siekti iki $3,46 \text{ J/cm}^2$ (8 ns, 355 bangos ilgio lazeris), tuo tarpu norint juos taikyti didelių galių lazerinėms sistemoms, galima pasiekti iki $13,73 \text{ J/cm}^2$ „9 ns, 532 nm bangos ilgio lazeris“ lazerio indukuotos pažeidimų slenksčio vertės [18, 23, 24].

1.5. Sugeriantys poliarizatoriai

Anksčiau minėti poliarizatoriai yra izotropinių dangų pagrindu paremti optiniai komponentai, kurie turi būti pakreipti tam tikru kampu, norint sėkmingai juos naudoti. Siekiant kurti mikrolazerines sistemas, pagrindinis tikslas yra kompaktiškumas, mažinant optinių komponentų kiekį ir jų gabaritus sistemoje, bet išlaikant kokybiškumą. Egzistuoja galimybė taikyti anizotropinių dangų pagrindu paremtus poliarizatorius, kurie būtų tinkami naudoti 0° kampu.

Šiandienos pasaulyje egzistuoja 0° kampu sugeriantys poliarizatoriai, paremti dichroizmo efektu. Paprasčiausiu atveju tai gali būti polimerinė medžiaga, kuri yra ištempama viena kryptimi, tokiu atveju danga įgauna anizotropiškumą, kai polimerinės grandys orientuojasi pagal tempimo kryptį. Taikant tokį komponentą, šviesos poliarizacija, kuri sklinda orientuotų polimerinių grandinių kryptimi, yra absorbuojama, tuo tarpu statmena poliarizacija yra praleidžiama. Kaip žinome, absorbuota šviesos spinduliuotė medžiagoje virsta į šilumą, tad sugeriantys poliarizatoriai labai lengvai pažeidžiami nuo perkaitimo. Šių optinių elementų lazerio indukuota pažeidimų slenksčio vertė gali nesiekti net 1 J/cm^2 „8 ns, 355 nm bangos ilgio lazeris“.

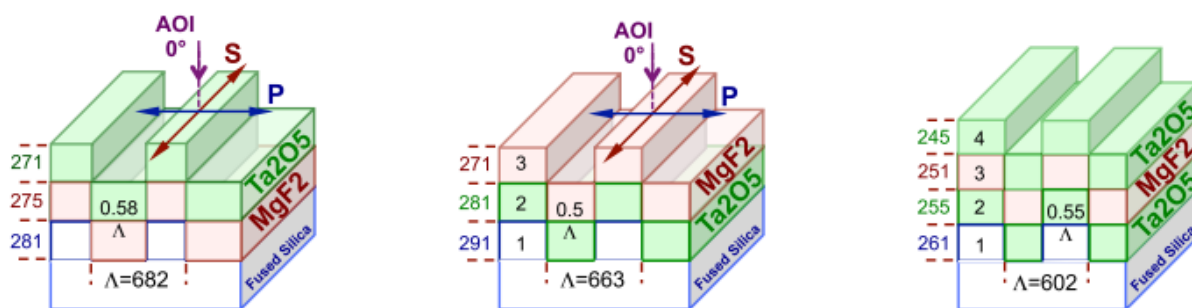
Tobulėjant nanotechnologijoms, polimerines anizotropines medžiagas pakeitė į stiklą įterptos metalų (sidabro, vario) nanodalelės. Principas yra paremtas šviesos poliarizacijos absorbcija dėl nanodalelių elektrinio plazmonų rezonanso mechanizmo. Šie stiklo poliarizatoriai yra daug brangesni, tačiau siūlo geresnį efektyvumą, kalbant apie poliarizacijos ekstinkcijos koeficientą [7, 25, 26].

1.6. Nanostruktūrizuoti poliarizatoriai

Tobulėjant esdinimo technologijoms, optinių komponentų gamybai yra pritaikomos periodinės gardelės ant paviršiaus. Šviesą poliarizuojančių optinių elementų gamyboje buvo suprojektuota danga su tam tikra periodine gardele, su metalinėmis vielomis, įkonstruotomis jose. Tokiu atveju elektromagnetinės bangos, kurių elektrinių laukų sudedamoji dalis sklinda lygiagrečiai su

metalinėmis vielomis, sukels elektronų judėjimą išilgai šių vielų. Kadangi elektronai gali lengvai judėti šia kryptimi, šviesos viena poliarizacija yra atspindima (dalis šviesos energijos proceso metu yra sugeriama dėl Joule vielos įkaitimo). Tuo tarpu statmena elektrinio lauko dedamoji, sklindanti per šį optinį elementą, patirs tik mažus energijų atspindžius, nes elektronai šiomis kryptimis negali judėti [7, 27].

Nors, palyginus su dichroizmo efektu pasižyminčiais poliarizatoriais, šių elementų absorbcija yra daug mažesnė, visgi atsparumas lazerinei spinduliutei yra per menkas, kad jį būtų galima pritaikyti didelių galių lazerinėms sistemoms. Tačiau periodinių gardelių potencialą išvelgė kiti mokslininkai, kurie suprojektavo paviršių (neturintį difrakcijos efekto) su periodine gardele, ant kurios buvo įprastais garinimo metodais nusodintos aukštą lūžio rodiklį turinčios struktūros. Gardelės plotis, medžiagų parinkimas, dangų storiai ir kiti su dizainu susiję parametrai buvo parinkti atitinkamai norint pasiekti maksimalų efektyvumą, siaurą šviesos bangos diapazoną ir didelį poliarizacijų selektyvumą artimame infraraudonųjų spindulių regione (4 pav.) [28].

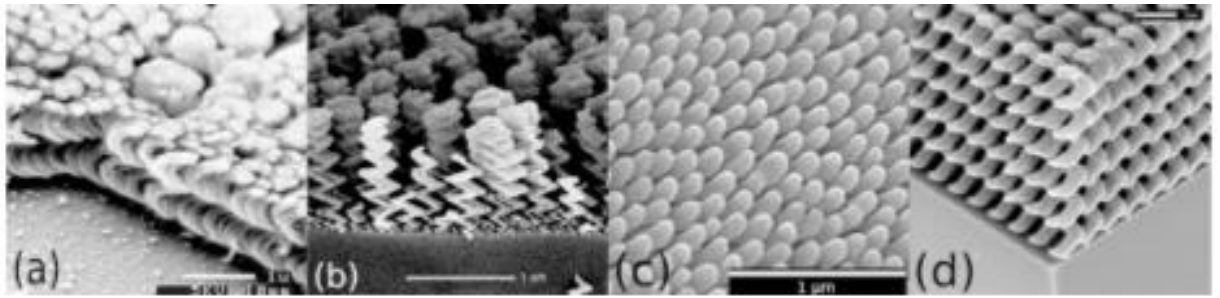


4 pav. Nanostruktūrizuotų poliarizatorių modeliai [28]

Minėtas poliarizatoriaus modelis turi didelį lazerinės spinduliuotės atsparumą, nes danga pasižymi mažu defektų kiekiu, sumažintu elektrinio lauko stiprinimu, o parinktos medžiagos turi labai mažą absorbciją. Lazerio indukuotos pažaidos slenkstis siekia $6,3 \text{ J/cm}^2$, „6,2 ns, 1064 nm bangos ilgio lazeris“ [28].

1.7. Skulptūrinių dangų pagrindu suformuoti poliarizatoriai

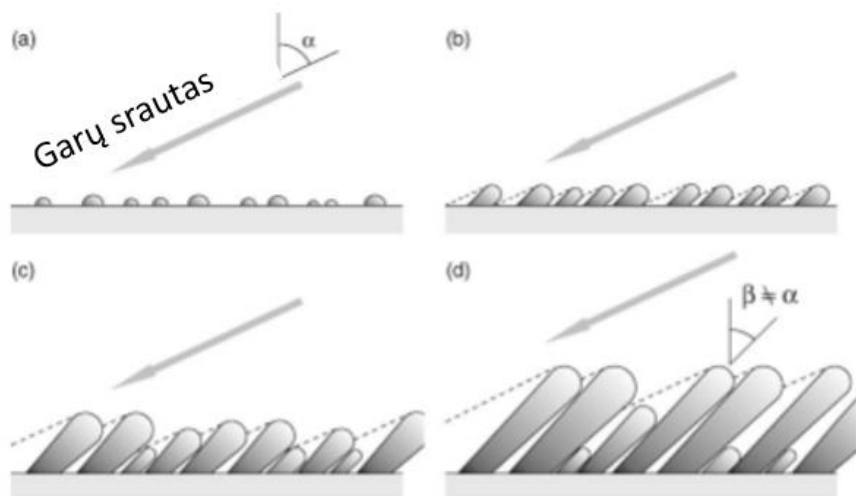
Kampu pakreiptas dangų nusodinimo metodas domino mokslininkus jau daugiau kaip 100 metų dėl įvairių dangų savybių pagerinimo, pavyzdžiui, dichroizmo efekto, dvigubo lūžio rodiklio ir anizotropinės varžos [29]. Plėvelės mikrostruktūra, kurianti šias naujas ir patobulintas savybes bei galimybes, priklauso nuo šešėliavimo efekto ir koloninių struktūrų formavimosi nusodinimo metu. Garinimo kampu technologija yra modifikuotos sistemos rezultatas, kai padėklo kampas garų srauto atžvilgiu yra manipuluojamas proceso metu. Šiuo atveju yra naudojama vakuuminė kamera, kur taikomas elektronų patrankos šaltinis. Struktūros, kurias galima išgauti garinimo kampu technologija, tapo kokybiškesnėmis (5 pav.). Žinoma, moderniose technologijose sukontroliuoti sudėtingas struktūras padeda kompiuterizuota variklių sistema bei storio matavimo prietaisai proceso metu.



5 pav. Skenuojančio elektronų mikroskopo nuotraukos, parodančios skulptūrinių struktūrų vystymąsi a) pradinės spiralės, b) pradinės chiralinės, c) Alq₃ spiralės, d) Si kvadratinės spiralės. a) ir b) nuotraukos darytos 1994, tuo tarpu c) ir d) - 2007 [29]

Skulptūrinių dangų susidarymo priežastis paremta šešėliavimo efektu. Toks šešėliavimas yra įmanomas, jeigu garų srautas yra gerai kolimuotas. Esant plačiam garų srauto kampų pasiskirstymui, šešėliavimas bus labai menkai nustatomas ir kontroliuojamas. Tad, siekiant išgauti skulptūrines dangas, visų pirma, atstumas tarp garų srauto šaltinio ir padėklo turi būti pakankamai didelis, negana to, privaloma pašalinti visas fizines kliūtis šiame kelyje. Būtent todėl yra taikomas elektronų patrankos šaltinio nusodinimo metodas vakuuminėje kameroje. Žinoma, įmanoma taikyti ir kitus nusodinimo metodus, kaip dulkinimo metodą, tačiau šiuo atveju išgausime platesnį garų srauto kampų pasiskirstymą dėl didelio taikinio dydžio ir sklaidos nuo darbinų dujų.

Aptarkime principą, kaip ir kodėl susidaro koloninė struktūra taikant garinimo kampu technologiją. 6 paveikslėlyje matome kampu α pakreiptą padėklą garų srauto atžvilgiu. Ateinančių garų dalelių srautas ir pradinių branduolių formavimasis ant padėklo yra atsitiktinis procesas. Pamažu šie atsitiktiniai branduoliai pradeda augti sudarydami kolonas (6 pav. b). Augant kolonom, jos sudaro tarsi šešėlį, kuris užstoja tam tikrus plotus, tad ateinantis garų srautas nebeapgarina tų paviršių (6 pav. c). Galiausiai gretimos kolonos gali visiškai suspenduoti viena kitos augimą, visiškai užstodamos viena kitą. Per tam tikrą laiką mažesnius dydžius turinčios kolonos yra visiškai šešėliuotos, tad jų augimas sustoja. 6 paveikslėlyje d) matome, jog proceso metu, dėl šešėliavimo efekto, atsiranda kolonų išnykimas [29].



6 pav. Šešėliavimo efektas nusodinimo metu, kai a) atomai atsitiktinai nusėda ant paviršiaus, b) pradeda formuotis pradinės kolonos, pakreiptos kampu, c) kolonom augant, šešėliavimo efektas daro didelę įtaką struktūrai, d) didesnių dydžių atveju atsiranda kolonų išnykimo efektas [29]

Garinimo technologijos vakuuminėse kamerose nagrinėjamos jau ilgą laiką, tad yra sudarytas struktūrinių zonų modelis, kuris iš esmės parodo, kokių dangų galima tikėtis su apytiksliais proceso parametrais. Yra išskirtos trys pagrindinės zonos, kurių pagrindinis skirtumas – adatomų mobilumas paviršiuje ar tūryje. Kadangi elektronų pluoštu garinimo technologija nesuteikia didelės energijos garų srauto atomams, šių paviršinė bei tūrinė difuzija yra labai maža, todėl dominuoja šešėliavimo efektas [29, 30].

Nors struktūrinių zonų modelis buvo tobulinamas, randamos tarpinės struktūros, keičiami ar pridedami tam tikri parametrai, tačiau svarbiausia išvada, kad tai visgi yra tik modelis, kaip aproksimacija, kuri padeda suprasti, kokių dangų galima tikėtis. Analizuojant skulptūrines dangas, reikia įvertinti visus specifinius parametrus, kaip antai: padėklo kampas garų srauto atžvilgiu, nusodinimo greitis ir temperatūra, vakuuminės kameros slėgis, padėklo tipo ir, žinoma, pasirinktos medžiagos. Jau seniai žinoma, kad kolonų pasvirimo kampas nesutampa su padėklo kampu garų srauto atžvilgiu, tad įvertinus visus parametrus buvo manoma, kad „struktūros auga pagal tangento ir Taitso taisyklės“ [30]. Tangento taisyklė buvo vienas iš pirmųjų bandymų apibūdinti eksperimentinius duomenis:

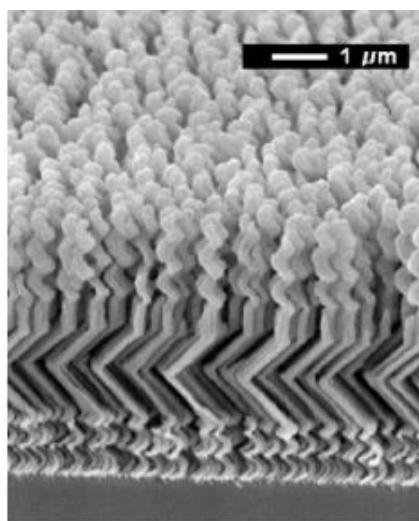
$$\tan \alpha = 2 \tan \beta,$$

čia α ir β yra padėklo ir kolonų pakreipimo kampas, atitinkamai. Ši tangento taisyklė tinkama tik garinant iki tam tikrų kampų, tačiau didinant α , atsiranda dideli neatitikimai. Tad buvo pasiūlyta Taitso išraiška nustatant kampų priklausomybę:

$$\beta = \alpha - \arcsin\left(\frac{1 - \cos \alpha}{2}\right).$$

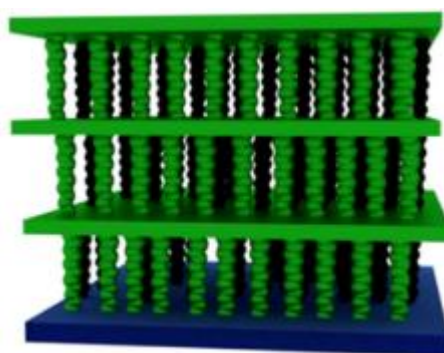
Nepaisant to, kad šios išraiškos pakankamai sėkmingai aprašo skulptūrinių dangų kolonų kampų išsidėstymą priklausomai nuo padėklo padėties, tačiau menkesni nusodinimo proceso parametrų pakitimai sudaro per didelę įtaką sukeldami neatitikimus tarp teorinio modelio ir eksperimento.

Manipuliuojant skirtingais parametrais, galima gauti įvairių koloninių struktūrų, kurios galimai atitiktų tam tikrus reikalavimus pagal poreikius. Iki dabar buvo pasakojama apie padėklo kampo keitimą garų srauto atžvilgiu. Taip formuojasi viena kryptimi nukrypusios kolonos, tačiau, modifikavę sistemą, įtaisę papildomą motorizuotą variklį, galime sukurti padėkliuką aplink savo ašį. Kontroliuodami šias dvi padėtis, galime suformuoti dar įvairesnes struktūras (7 pav.).



7 pav. Fizinio garų nusodinimo metu gauta skulptūrinė struktūra manipuluojant padėklo kampu garų srauto atžvilgiu [30]

Pakreipus tam tikru kampu padėkliuką ir užprogramavus motorizuotą variklį, kad jis sukėtų padėkliuką aplink savo ašį kas 180° su kelių sekundžių pertraukomis, galima suformuoti anizotropinę struktūrą iš tiesių kolonų (8 pav.) [31]. Kombinuojant daugiasluoksnią struktūrą, formuojamas poliarizatorius 0° kampui, kai viena poliarizacija yra praleidžiama, o kita poliarizacija yra atspindima.



8 pav. Fizinio garų nusodinimo metu suformuota tankių izotropinių ir porėtų anizotropinių sluoksnių struktūra [31]

Formuojant skulptūrinių dangų pagrindu norimus optinius elementus, galima pritaikyti įvairius dizainus. Vienas iš pavyzdžių būtų naudoti Brego veidrodžio dizainą ir kombinuoti anizotropinius mažo lūžio rodiklio sluoksnius su tankiais izotropiniais didelio lūžio rodiklio sluoksniais, taip manipuluojant interferencijos efektu gaunamos dvi veidrodžio zonos statmenoms poliarizacijoms (lygiagrečiai šešėliavimo efektui ir statmenai) [32].

Skulptūrinių dangų pagrindu suformuoti optiniai elementai pasižymi labai dideliu lazerinės spinduliuotės atsparumu, kai pažeidimų slenksčio riba siekia $24,4 \text{ J/cm}^2$ (5,4 ns, 355 nm bangos ilgio lazeris) [31, 32]. Potencialiai įmanoma pasiekti ir didesnę lazerinės spinduliuotės atsparumą, tačiau jį riboja defektų kiekis dangoje. Pritaikius įvairias technologijas stabilizuojant vakuuminėje kameroje vykstančius procesus, stengiamasi pašalinti šią priežastį. Be to, skulptūrinės dangos yra porėtos, vadinasi, optinis elementas gali būti jautrus aplinkai (gali absorbuoti aplinkoje esančias daleles).

Nepaisant išvardytų trūkumų, skulptūrinių dangų pagrindu suformuoti poliarizatoriai būtų tinkamas ir unikalus sprendimas mikrolazerinių sistemų taikymui. Siekiant kurti kompaktiškas lazerines

sistemas ir mažinant optinių komponentų kiekį jose, skulptūrinė daugiasluoksnė danga gali būti tiesiogiai nusodinta ant rezonatoriaus. Tokiu būdu generuojamos lazerinės spinduliuotės viena poliarizacija bus atspindėta atgal į rezonatorių, tuo tarpu kitos poliarizacijos būsenos spinduliuotė praeis.

Šio magistrinio projekto metu modeliuojamas daugiasluoksnės dangos dizainas naudojant tris skirtingas padėklo pozicijas, t. y. trijų sluoksnių kombinaciją su skirtingais lūžio rodikliais. Tokiu būdu dėl skirtingų lūžio rodiklių statmenoms poliarizacijoms gaunamas poliarizacijų išsiskyrimas tam tikram bangos ilgiui.

2. Medžiagos ir tyrimų metodai

2.1. Optiniai matavimai

Siekiant nustatyti skulptūrinių dangų savybes, šiame darbe buvo atlikti įvairūs optiniai tyrimai. Naudojamas interferometras, kurio paskirtis – išsiaiškinti skulptūrinių dangų pagrindu suformuoto optinio komponento plokštiškumą. Taip pat reikalingi spektrometro matavimai nustatant dangos pralaidumo intensyvumo priklausomybę nuo bangos ilgio regimojoje spektro srityje. Analizuojamas dangos lazerinės spinduliuotės atsparumas bei pažeidimų kilmė poliarizuotai spinduliuotei.

2.1.1. Spektrometro matavimai

Spektrometras yra skirtas nustatyti įvairių komponentų ar aplinkos optines savybes, cheminei analizei, fluorescencijai ar Ramano sklaidai tirti. Spektrometras yra optinis instrumentas, kuris fiksuoja spektrines linijas ir matuoja jų bangos ilgį bei intensyvumą. Įrenginys tinkamas aptikti silpnus šviesos signalus.

Šiame darbe analizuojamas optinis komponentas – poliarizatorius, kuris išskiria šviesos poliarizacijas ties tam tikru bangos ilgiu. Tiriant optinio komponento spektrą, taikomas spektrometras, kuriame yra įtaisytas poliarizatorius. Įrenginio jautrumas yra apie 80 fotonų vienam skaičiui, 0,1 nm – 10 nm skiriamoji geba, 0,05 nm atsikartojamumas. Poliarizatoriai formuojami iš silicio oksido medžiagos, tad naudojama spektro regimoji ir infraraudonoji sritys. Visuose matavimuose naudosisime pralaidumo režimą.

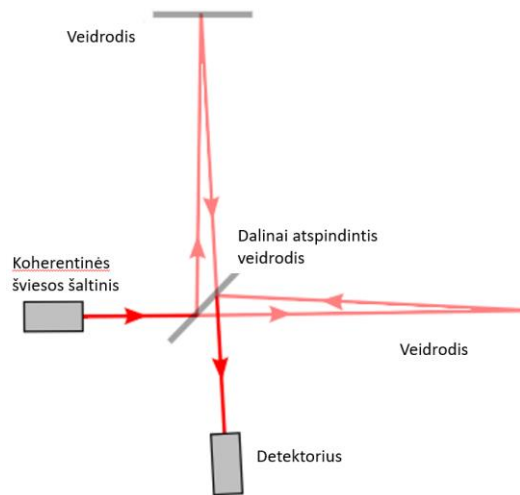
2.1.2. Optinio mikroskopo matavimai

Darbo metu, naudojamas optinis mikroskopas, analizuoti pažeidimų morfologijai. Tikrinant užgarintos dangos lazerinį atsparumą, taikomas destruktivus metodas, kurio metu įvyksta pažeidimas. Šie atsiradę pažeidimai, vizualiai stebimi optiniu mikroskopu, norint išsiaiškinti jų kilmę. Įrenginio didinimas siekia nuo 10 iki 500 kartų, o skiriamoji geba siekia 150 nm. Įrenginyje įmontuota kamera, kuri tiesiogiai sujungta su kompiuteriu, tad vaizdai yra fiksuojami ir apdorojami virtualioje aplinkoje.

2.1.3. Interferometro matavimai

Interferometras plačiai taikomas optiniams matavimams, norint tirti mažus neatitikimus, lūžio rodiklio pokyčius ar paviršiaus nelygumus. Šiuo atveju yra svarbu nustatyti optinio komponento plokštiškumą. Kaip jau buvo minėta anksčiau, formuojamos struktūros yra koloninės, tad šiuo tyrimu tikrinamas nusodinimo plokštiškumas, nes siekiama taikyti optinį komponentą lazerinėse sistemose. Visų pirma, tiriamas kvarcinio stikliuko plokštiškumas, tada po nusodinimo proceso matavimas pakartojamas su kolonine struktūra.

Interferometras paremtas superpozicijos principu, tad bangų kombinacija pateikia svarbių savybių apie tiriamą paviršių. Naudojamas koherentinės šviesos šaltinis, todėl bangų dažniai yra vienodi. Pagrindinis parametras, apibūdinantis tiriamo paviršiaus savybes, yra fazės poslinkis tarp koherentinių bangų. 9 paveikslėlyje matome principinę interferometro schemą, kurioje šviesa, praeinanti pro dalinai atspindintį veidrodį, padalijama į du spindulius. Vienas iš šių spindulių atsispindi nuo veidrodžio, o kitas spindulys atsispindi nuo tiriamo paviršiaus. Galiausiai šie spinduliai vėl grįžta, patiria superpozicijos principą ir yra nukreipiami į detektorius.



9 pav. Interferometro principinė schema [33]

Medžiagų įtempiams įvertinti, pasirinktas Stoney metodas [34]. Ant 25,4 mm diametro kvarcinio stikliuko, padengti žinomo storio silicio oksido sluoksniai. Išmatavus bandinius su interferometru, naudojama įtempių matavimo formulė apskaičiuoti plokštiškumui.

$$\sigma = \frac{1}{6} \left(\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_1} \right) \frac{E}{(1-\nu)} * \frac{t_s^2}{t_f}$$

čia σ – įtempis, R_1 bandinio kreivumas prieš garinimą, R_2 kreivumas po garinimo, E – Jungo modulis ($7,17 * 10^{10}$ Pa), ν – Puasono santykis (0,17), t_s - pagrindo storis, t_f – dangos storis.

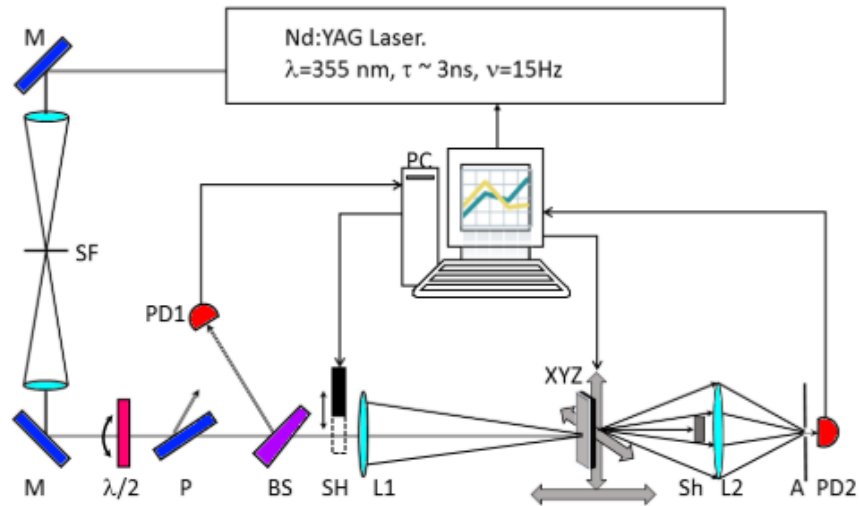
Interferometro įrenginiu naudojama 632,8 nm bangos ilgio šviesa, o matavimus atlikti galima nuo 0,5 mm iki 350 mm storio dangoms.

2.2. Struktūriniai matavimai

2.2.1. Lazerio indukuotos pažaidos slenksčio matavimai

Lazerio indukuotos pažaidos slenksčio matavimo stendas buvo naudojamas, dangų lazerinės spinduliuotės atsparumo slenksčių nustatymams. Naudojamas impulsinis lazeris, nanosekundiniame režime, 355 nm bangos ilgiui.

Matavimams atlikti naudojamas trečios harmonikos impulsinis ND:YAG lazeris (15 Hz dažnio). 10 paveikslėlyje matome optinės sistemos schemą, kuri sudaryta iš įvairių optinių komponentų. (SF) erdvinis filtras, skirtas Gauso pluoštui formuoti. Slopintuvas, kuris sudarytas iš $\lambda/2$ fazinės plokštelės ir poliarizatoriaus (P), skirtas keisti spindulio impulso energijai, nekeičiant impulso trukmės ar spindulio formos. Atliekant lazerio indukuotos pažaidos slenksčio tyrimą, dėl lazerio spindulio savifokusacijos reiškinio, kita bandinio pusė gali būti pažeista, tad papildomai įmontuotas mažo atstumo fokusuojantis lęšiukas (L1). Išsklaidytai šviesai surinkti naudojamas lęšiukas (L2). Visa lazerinio atsparumo matavimo įranga buvo kontroliuojama kompiuteriu. Darbo metu taikoma „1 on 1“ metodika [35].

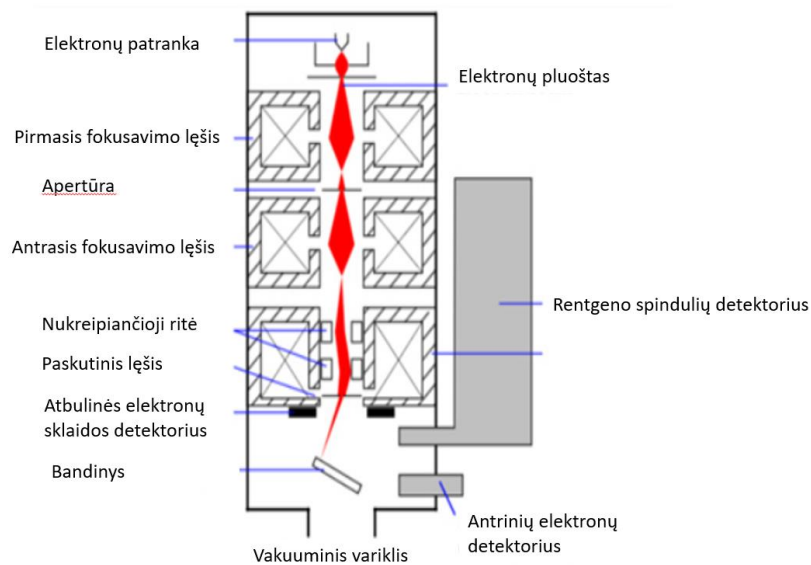


10 pav. Lazero indukuotos pažaidos slenksčio matavimų stendo optinė schema [36]

2.2.2. Skenuojančio elektronų mikroskopo matavimai

Žmogaus akis gali atskirti nenaudodama jokių papildomų lęšių du atskirus taškus, kai jie yra nutolę vienas nuo kito per 0,2 mm. Šis atstumas vadinamas akies rezoliucija. Šiuolaikiniai optiniai mikroskopai gali didinti tūkstantį kartų. Tačiau optinių mikroskopų rezoliuciją riboja ne tik lęšių kokybė ar jų skaičius, bet ir šviesos šaltinio bangos ilgis. Skenuojantis elektronų mikroskopas skirtas vizualizuoti mažų matmenų struktūras (rezoliucija siekia 1 – 20 nm), naudojant sufokusuotą elektronų pluoštą. Elektronai sąveikauja su tiriamo paviršiaus atomais, sukeldami įvairius signalus (antrinių elektronų emisiją, atbulinę sklaidą, rentgeno spindulių emisiją), kurie suteikia paviršiaus topografijos informaciją [37].

Veikimo principas yra paremtas elektronų sąveika su tiriamo paviršiaus atomais. Kaip matome iš 11 paveikslėlio, viršuje yra iš katodo emituojami elektronai, kurie toliau nukreipiami į apačią, bandinio link. Elektronų pluoštas, norint sufokusuoti elektronus, kurie pasiekia tiriamojo bandinio paviršius, pereina pro lęšių ir diafragmų kombinaciją.



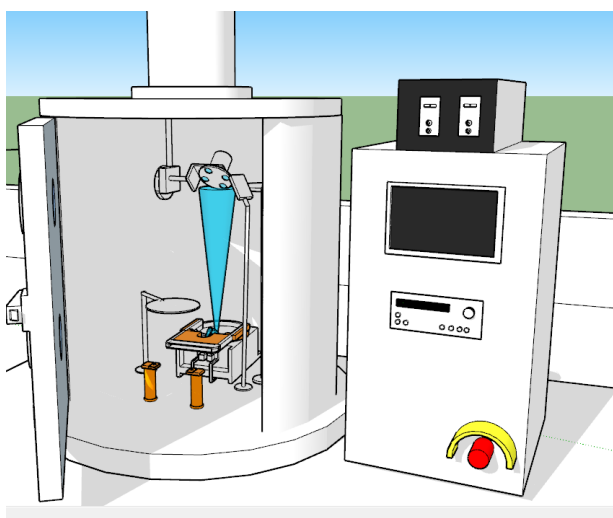
11 pav. Skenuojančio elektronų mikroskopo principinė schema [37]

Skenuojantis elektronų mikroskopas vizualizuoja paviršiaus topografiją naudodamas didelės energijos elektronų pluoštą. Elektronams sąveikaujant su paviršiaus atomais, išgaunami antriniai elektronai, atbulinė sklaida, ir charakteringi rentgeno spinduliai. Šie signalai yra užfiksuojami detektoriais, kurie toliau yra analizuojami kompiuterio ekrane.

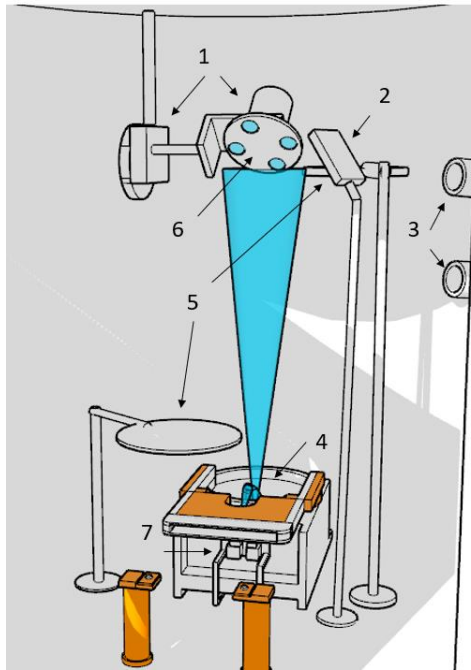
2.3. Skulptūrinių dangų formavimo procesas

Norint pradėti norimos dangos formavimo procesą, visų pirma, reikalingas daugiasluoksnio paviršiaus modelis. Magistrinio darbo metu yra formuojamas poliarizatorius, kombinuojant anizotropinius sluoksnius su izotropiniais, tad svarbu išsiaiškinti, kokių storių prireiks nusodinant dangą pagal poreikius. Teoriniams spektrų modeliavimams buvo naudojama programinė įranga Optilayer. Praėjusių tiriamųjų projektų metu buvo išsiaiškinti naudojami lūžio rodikliai, tad šio darbo metu taikysime jau esamus parametrus.

Sumodeliavę daugiasluoksnės dangos struktūrą, taikysime fizinio garų nusodinimo technologiją, kurioje papildomai yra įstatyti du motorizuoti varikliai. Ši modifikuota sistema vadinama garinimo kampu technologija. 12 paveikslėlyje pavaizduotas vakuuminės kameros įrenginys su kvarcinio rezonatoriaus sistema, elektronų pluošto nukreipimo valdymu ir vakuuminės kameros valdymo centru kompiuteriu.



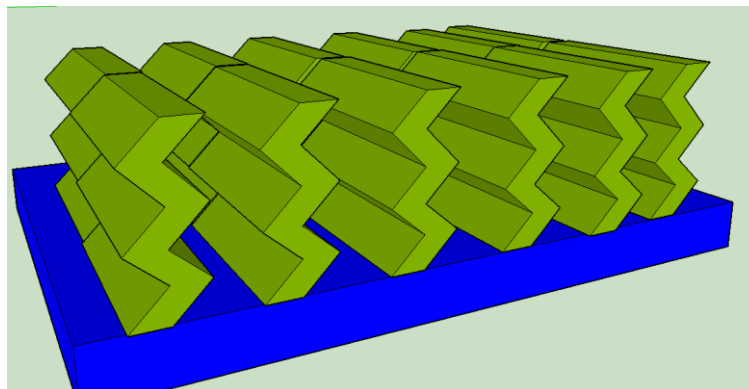
12 pav. Principinė vakuuminės kameros schema, kurioje taikoma fizinio garų nusodinimo metodika



13 pav. Principinė vakuuminės kameros schema, su pažymėtomis dalimis

13 paveikslėlyje matome pagrindines šio įrenginio dalis, pažymėtas numeriais: 1 – motoriukai, kurie reguliuojami kompiuterine programa, jie skirti pakreipti bandinį tam tikru kampu ir sukti jį aplink savo ašį, 2 – kvarcinis stikliukas garinimo greičiui reguliuoti, 3 – jutikliai vakuumo slėgiui matuoti, 4 – tigris, į kurį tankiai sudedama garinama medžiaga, 5 – dvi sklendės, skirtos pradėti ir užbaigti garinimo procesą, 6 – laikiklis su bandiniais, 7 – elektronų patrankos šaltinis.

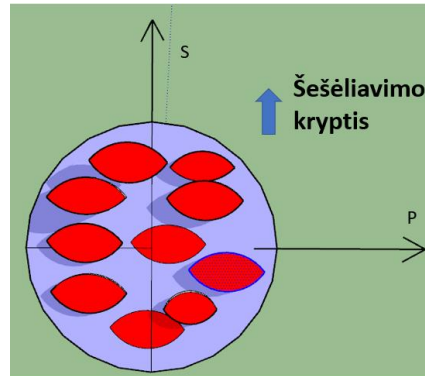
Garinimo metu formuojant izotropinę sluoksnį padėklas yra nuolat sukamas aplink savo ašį, o anizotropinių sluoksnių atveju padėklas yra ap sukamas 180° aplink savo ašį ir sustoja 6 s, tada vėl yra sukamas 180° ir t.t. Tokiu būdu formuojamos anizotropinės kolonos, pavaizduotos 14 paveikslėlyje.



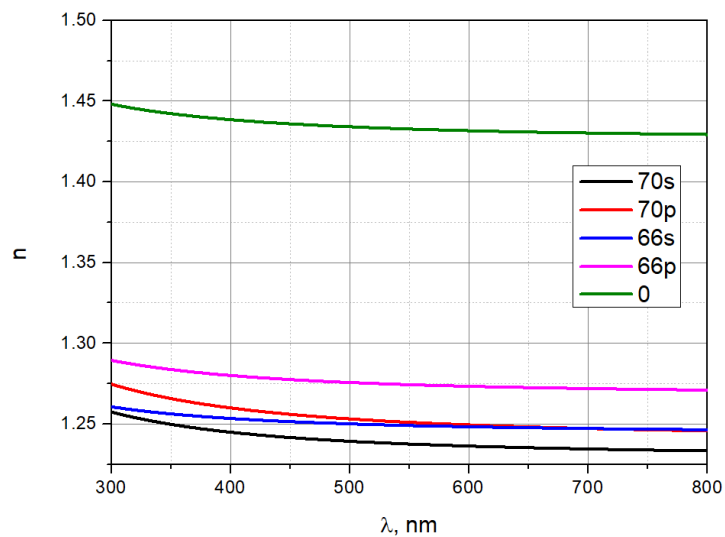
14 pav. Principinė koloninės struktūros 1 sluoksnio schema

Šio darbo metu formuojamas poliarizatorius, tad modeliuojama daugiasluoksnė danga naudojant 3 skirtingus sluoksnius. Pirmas sluoksnis yra izotropinis tankus sluoksnis, kuris nusodinamas padėklui esant 0° kampu garų srauto atžvilgiu. Antrasis ir trečiasis sluoksniai yra anizotropiniai ir yra garinami 70° ir 66° kampais. Išskirkime dvi kryptis, viena kitai statmenas s ir p (15 pav.). Iš empirinių duomenų nustatyta, jog garinant 70° kampu s kryptimi lūžio rodiklis sutampa su p kryptimi, garinant 66° kampu lūžio rodikliu (16 pav.). Pritaikius šią informaciją, kombinuojama daugiasluoksnė danga, kai viena

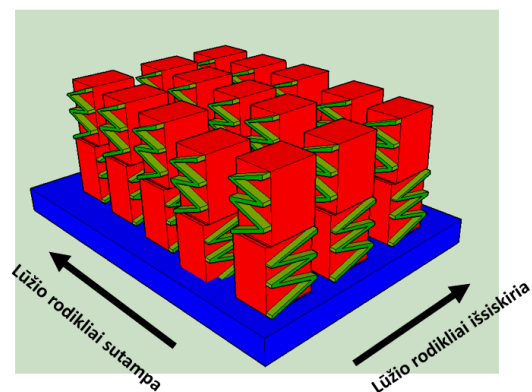
kryptimi lūžio rodikliai sutampa (formuojama tarsi vienasluoksė danga), o kita kryptimi lūžio rodikliai išsiskiria (formuojamas veidrodis) (17 pav.). Norint to pasiekti, tarp sluoksnių formavimo proceso, padėkliukas yra pasukamas 90° aplink savo ašį, kad sutaptų norimos kryptys ir lūžio rodikliai. Vadinasi, gauname rezultatą, kad vienos poliarizacijos elektromagnetinė banga yra praleidžiama, o kitos poliarizacijos elektromagnetinė banga patiria dalinį atspindį.



15 pav. Dėl šešėliavimo efekto suformuotos eliptinės formos skerspjūviai ant padėklo



16 pav. Lūžio rodiklių priklausomybė nuo bangos ilgio, kai danga yra garinama skirtingais kampais, šešėliavimo (s) ir nešešėliavimo (p) kryptimis



17 pav. Principinė anizotropinių sluoksnių schema, kur viena kryptimi lūžio rodikliai sutampa, o kita kryptimi išsiskiria

Sluoksnių storiai siekia nanometrinius dydžius, todėl privalomas kruopštus sistemos kalibravimas suderinant kvarcinio rezonatoriaus kalibracinį koeficientą. Kadangi nusodinimo procesui įtakos gali daryti labai daug veiksnių, papildoma kalibracija reikalinga prieš kiekvieną garinimą. Kvarcinio rezonatoriaus kalibracinio koeficiento nustatymas plačiai aptartas praeituose tiriamuosiuose projektuose magistro studijų metu.

3. Tyrimų rezultatai ir jų aptarimas

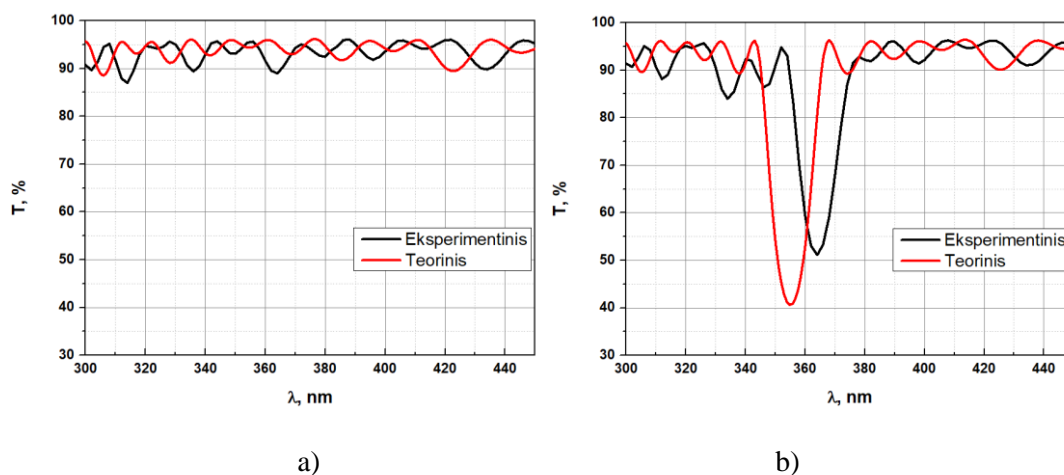
Pagrindinis žingsnis, taikant fizinį garų nusodinimo metodą, yra atlikti kruopščią sistemos kalibraciją. Procesų metu stengiamasi išlaikyti identišką sąlygas - slėgį ($16 \cdot 10^{-4}$ mbar), vakuumo siurbimo laiką (1 h), medžiagos kiekį tiglyje, švaros lygį kameroje, nes kiekvienas parametras turi įtakos nusodinimo procesui. Įprastu atveju garinamas aštuonių sluoksnių veidrodis pasirinktam bangos ilgiui. Sistemos kalibracijos metodas yra aprašytas ankstesniuose tiriamuosiuose darbuose, kai siekiama suderinti kvarcinio rezonatoriaus kalibracinį koeficientą.

Atlikus sistemos kalibraciją, vyksta kvarcinių stikliukų paruošimas. Stikliukai yra kruopščiai nuplaunami specialioje vonelėje, kad neliktų jokių pašalinių medžiagų ant paviršiaus. Šis pasiruošimas „vyksta ISO 5 standartus atitinkančiame švaros kambaryje“ [38].

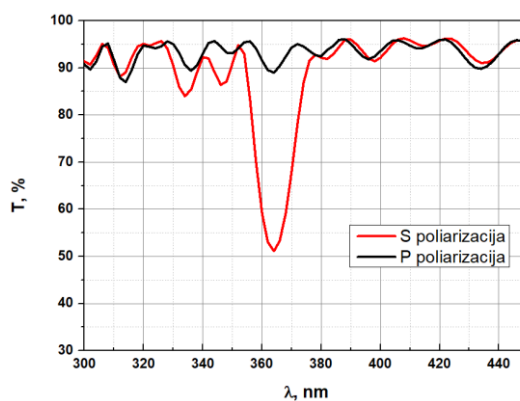
Magistrinio projekto metu atlikti trys skirtingi eksperimentai, su skirtingais optinio komponento reikalavimais. Skulptūrinių dangų pagrindu suformuoti optiniai komponentai, spektro atžvilgiu gali būti sumodeliuojami pagal įvairius poreikius naudojant Optilayer programinę įrangą.

3.1. Spektrometro matavimai

Pirmojo eksperimento metu, pagrindinis tikslas yra pasiekti didelį poliarizacijų išsiskyrimą ties 355 nm bangos ilgiu. Taikomas anksčiau aprašytas 3 skirtingų sluoksnių kombinacijos modelis, kuris suprojektuotas Optilayer programine įranga. Norint pasiekti didelį poliarizacijų išsiskyrimą, užgarinti 46 sluoksniai, nes lūžio rodiklių išsiskyrimas, formuojant Brego veidrodį viena kryptimi, yra nedidelis ($\Delta n = 0,035$). Rezultatai pateikti 18 ir 19 paveikslėliuose.



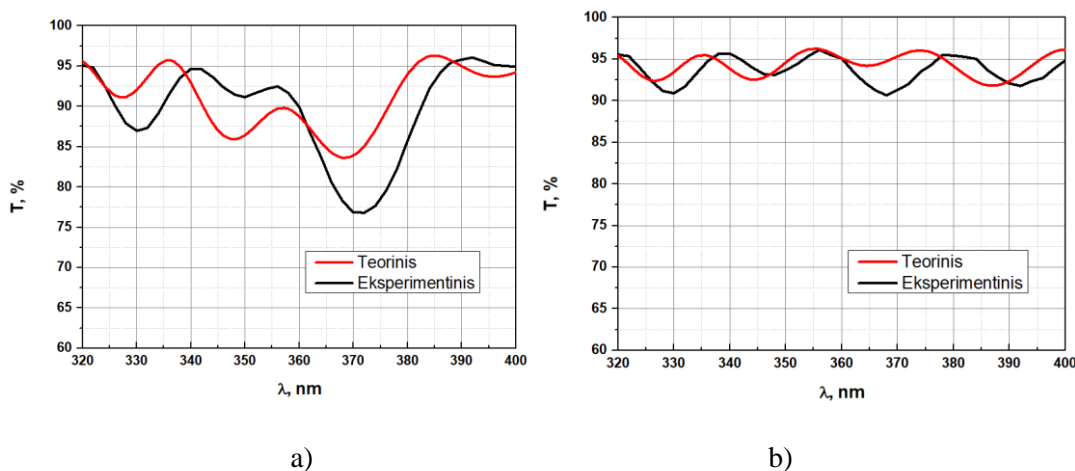
18 pav. Pirmojo bandinio pralaidumo intensyvumo priklausomybė nuo bangos ilgio a) p ir b) s poliarizacijai



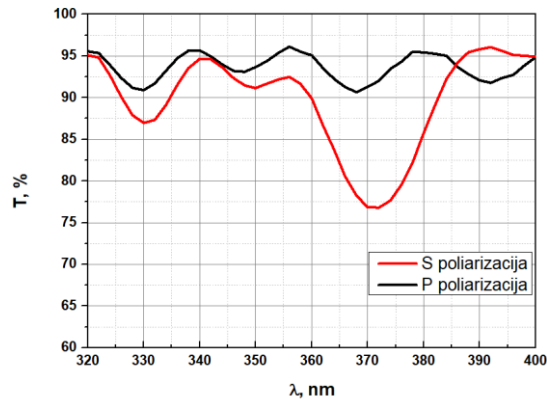
19 pav. Pirmojo bandinio pralaidumo intensyvumo priklausomybė nuo bangos ilgio p ir s poliarizacijai

Palyginus teorinį su eksperimentiniu spektrus, matome, jog eksperimentiškai veidrodžio zona gavosi pasislinkusi į raudoną spektrinės juostos pusę per 2 %, o norimas pralaidumo intensyvumas yra apie 10 % procentų didesnis. Gauti rezultatai neatitinka teorinio modelio galimai dėl sistemos kalibracijos netikslumų. Atlikus tolimesnius modeliavimus Optilayer programine įranga išsiaiškinta, kad užgarinti storiai nėra ketvirčio 355 nm bangos ilgio optinio storio. Tai paaiškina pralaidumo intensyvumo padidėjimą veidrodžio zonoje [39]. Eksperimento spektro poslinkį, į raudoną spektrinės juostos pusę, lemia bendras dangos sluoksnių storis, kuris šiuo atveju yra apie 2 % didesnis (gauta iš Optilayer programos modeliavimų).

Antrojo eksperimento metu, pagrindinis tikslas yra pasiekti labai mažą atspindį (0,2%) vienai poliarizacijai ir maksimalų poliarizacijų išsiskyrimą 355 nm bangos ilgio spinduliui. Danga sumodeliuojama Optilayer programine įranga. Rezultatai pateikti 20 ir 21 paveikslėliuose.

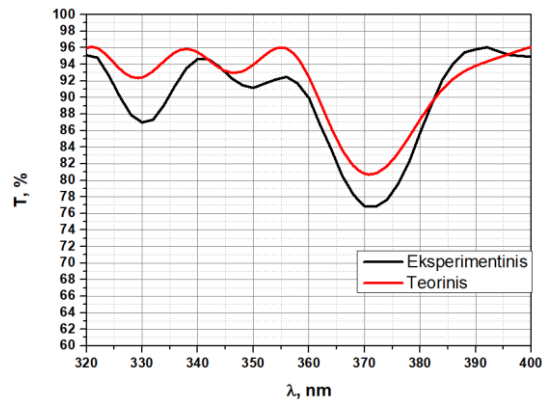


20 pav. Antrojo bandinio pralaidumo intensyvumo priklausomybė nuo bangos ilgio a) s ir b) p poliarizacijai

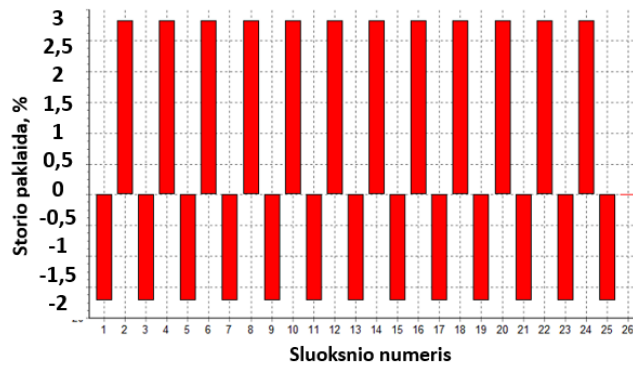


21 pav. Antrojo bandinio pralaidumo intensyvumo priklausomybė nuo bangos ilgio p ir s poliarizacijai

Iš rezultatų matome, jog norima atspindžio vertė ties 355 nm bangos ilgiu buvo pasiekta (0,2 %). Čia pralaidumo intensyvumas siekia 96,3 %, o padėklo (be dangos) atspindžio intensyvumas siekia 3,5 %. Iš rezultatų taip pat matome, jog poliarizacijų norimas išsiskyrimas nevisiškai atitinka teorinį modelį. Teoriškai, poliarizacijų pralaidumo intensyvumai turi skirtis apie 6 %, o eksperimentiškai išsiskyrimą pasiekėme apie 4 %. Atlikus tolimesnius modeliavimus, taikant Optilayer programinę įrangą, pastebėjome, jog užgarinti sluoksnių storiai skiriasi nuo teorinių verčių (22 pav.). Garinant 70° kampu, storiai yra per maži, tuo tarpu 66° kampu yra per dideli (23 pav.). Būtent todėl stebimas interferencinių linijų intensyvumo išsiskyrimas tarp teorinio ir eksperimentinio modelių [39].



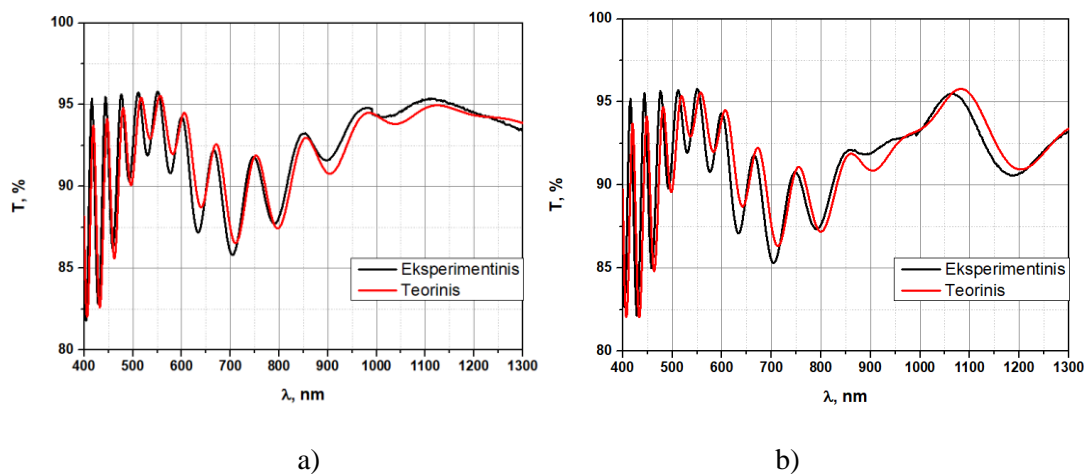
22 pav. Optilayer programine įranga sumodeliuotas antrojo bandinio, s poliarizacijos, spektras



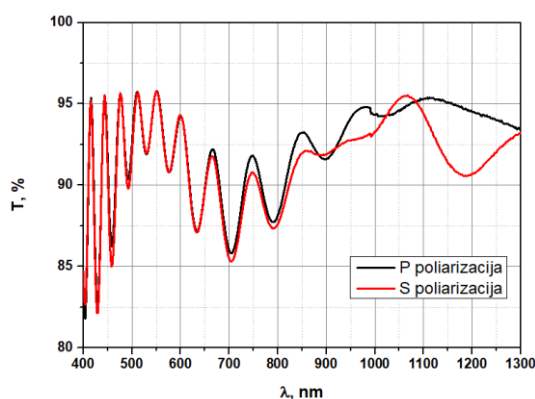
23 pav. Optilayer programine įranga sumodeliuotos storio paklaidos antrajam bandiniui

Trečio eksperimento metu, pagrindinis tikslas yra vienai poliarizacijai pasiekti labai mažą atspindį (0,25 %) ties 1123 nm bangos ilgiu, o kitai poliarizacijai kuo didesnę atspindį šiam bangos ilgiui ir

pasiekti 561 nm bangos ilgiui mažą atspindį (mažesnę nei 2 %) abiem poliarizacijoms. Kaip ir anksčiau minėtuose eksperimentuose, visų pirma buvo padarytas dizainas su Outilayer programine įranga. Gauti spektriniai matavimai pateikti 24 ir 25 paveikslėliuose.



24 pav. Trečiojo bandinio pralaidumo intensyvumo priklausomybė nuo bangos ilgio a) *p* ir b) *s* poliarizacijai

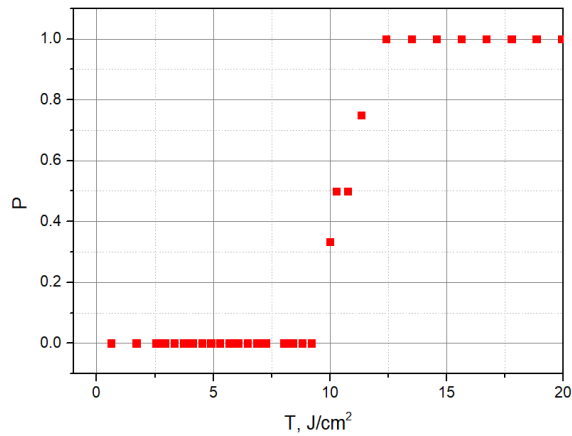


25 pav. Trečiojo bandinio pralaidumo intensyvumo priklausomybė nuo bangos ilgio *p* ir *s* poliarizacijai

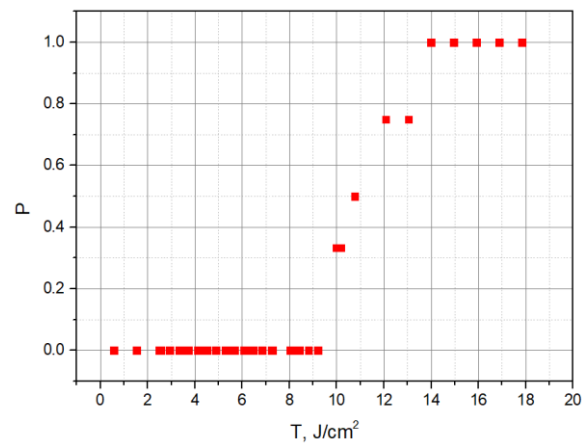
Palyginus šiuos du spektrus, gaunamas itin geras atitikimas. Naudojant skulptūrinių dangų pagrindu suformuotas dangas, šio eksperimento metu buvo išpildyti visi reikalavimai. Ši danga sumodeliuota ir užgarinta su ateities perspektyva naudoti jas tiesiogiai ant itrio aliuminio granato kristalų, kai pasiekiamas poliarizacijų išsiskyrimas, su geru atspindžiu vienai poliarizacijai, pirmai harmonikai, tuo tarpu mažas atspindys, abiem poliarizacijoms, antrai harmonikai.

3.2. Lazero indukuoto pažaidos slenksčio matavimai

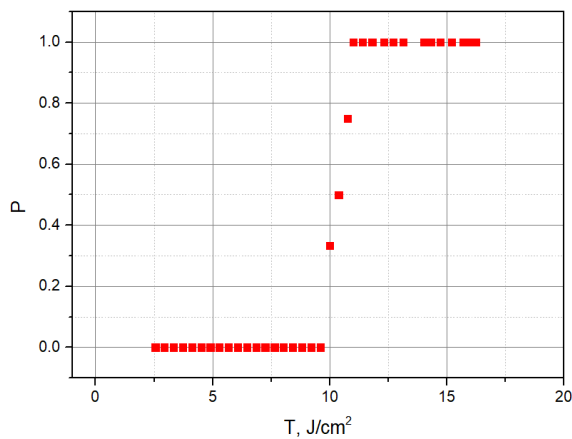
Lazerinės spinduliuotės atsparumo tyrimas atliktas pirmajam ir antrajam eksperimentams. Rezultatai pavaizduoti 26, 27 ir 28 paveikslėliuose. Kaip matome, pirmasis bandinys pasižymi lazerinės spinduliuotės atsparumu *p* poliarizacijai $9,8 \text{ J/cm}^2$, o *s* poliarizacijai $11,2 \text{ J/cm}^2$. Antrasis bandinys pasižymi mažesne lazerio indukuotos pažaidos slenksčio verte – $9,2 \text{ J/cm}^2$. Tyrimų metodikoje matavimai atlikti 355 nm bangos ilgiui 3 ns impulsų lazeriu ir taikomas „1 on 1“ metodas.



26 pav. Pažeidimų tikimybės priklausomybė nuo spinduliuotės energijos įtėkio pirmajam bandiniui p poliarizacijai ($9,8 \text{ J/cm}^2$)



27 pav. Pažeidimų tikimybės priklausomybė nuo spinduliuotės energijos įtėkio pirmajam bandiniui s poliarizacijai ($11,2 \text{ J/cm}^2$)



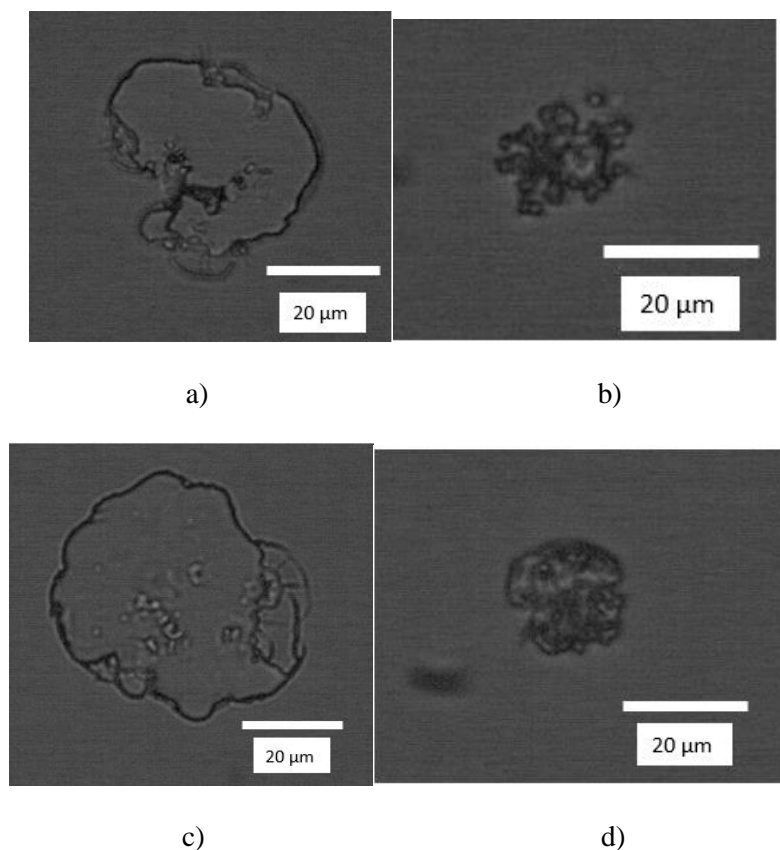
28 pav. Pažeidimų tikimybės priklausomybė nuo spinduliuotės energijos įtėkio antrajam bandiniui ($9,2 \text{ J/cm}^2$)

Lazerio indukuotos pažaidos slenksčio vertei turi įtakos daug įvairių faktorių. Tikėtina, jog garinant skulptūrinės dangas susidaro tam tikras kiekis defektų ant paviršiaus [29, 30, 40]. Defektų atsiradimo priežastis gali būti labai įvairi. Padėklo paruošimo metu galimai nepavyko švariai atlikti plovimo proceso arba kameros užterštumo lygis buvo nepakankamai mažas ir sukėlė pašalinių medžiagų

atsiradimą ant paviršiaus. Siekiant išsiaiškinti pažeidimų kilmę, reikalinga papildoma paviršiaus morfologijos analizė.

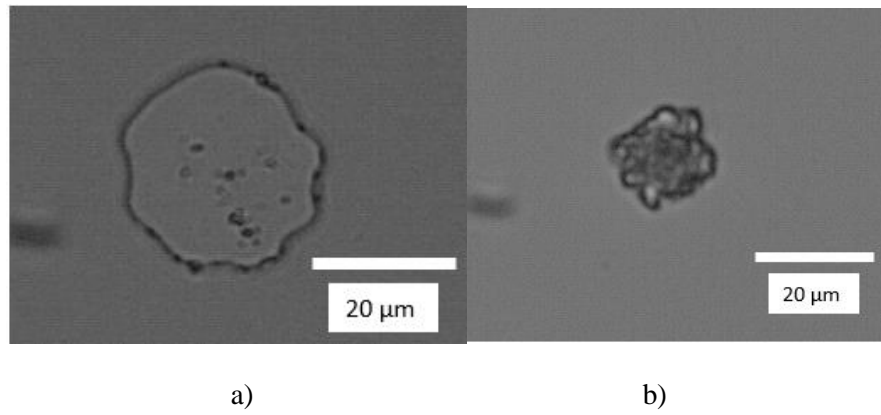
3.3. Optinio mikroskopo matavimai

Optiniu mikroskopu, užfiksuojamos pažeistos vietos dangose. 29 paveikslėlyje matome pirmojo bandinio pažeidimus p ir s poliarizacijoms. Tyrimo metu pastebėta, kad p poliarizuotos šviesos lazerio indukuotus pažeidimus riboja sankirta tarp dangos ir padėklo (kvarcinio stikliuko), o s poliarizacijos pažeidimus riboja kitos sritys, tačiau optiniu mikroskopu nebuvo galima nusakyti šių sričių. Stebint pirmojo eksperimento optinio mikroskopo nuotraukas, matome, jog ant dangos susidarė skylės, o ties padėklu susidarė taškinės morfologijos pažeidimai [41].



29 pav. Optiniu mikroskopu užfiksuoti pažeidimai pirmajame bandinyje, kur a) 24 J/cm^2 s poliarizacijos spindulio pažeidimas ant dangos, b) 24 J/cm^2 s poliarizacijos spindulio pažeidimas ant padėklo, c) $28,4 \text{ J/cm}^2$ p poliarizacijos spindulio pažeidimas ant dangos ir d) $28,4 \text{ J/cm}^2$ p poliarizacijos spindulio pažeidimas ant padėklo

30 paveiksliuke matome antrojo bandinio pažeidimų morfologiją. Kaip matome, stebimi panašūs rezultatai – ant dangos atsirado skylės, o ant padėklo taškinės morfologijos pažeidimai.



30 pav. Optiniu mikroskopu užfiksuoti pažeidimai antrajame bandinyje, kur a) 18,9 J/cm² spindulio pažeidimas ant dangos, o b) ant padėklo

Optiniu mikroskopo matavimai suteikė informacijos apie pažeidimų morfologiją bei sritį, kuri riboja lazerinės spinduliuotės atsparumą. Tačiau kaip minėta, pirmojo bandinio atveju *s* poliarizacijai stebimi pažeidimai ne padėklo ir dangos sankirtoje, tad reikalinga papildoma analizė, norint išsiaiškinti pažeidimų gylį.

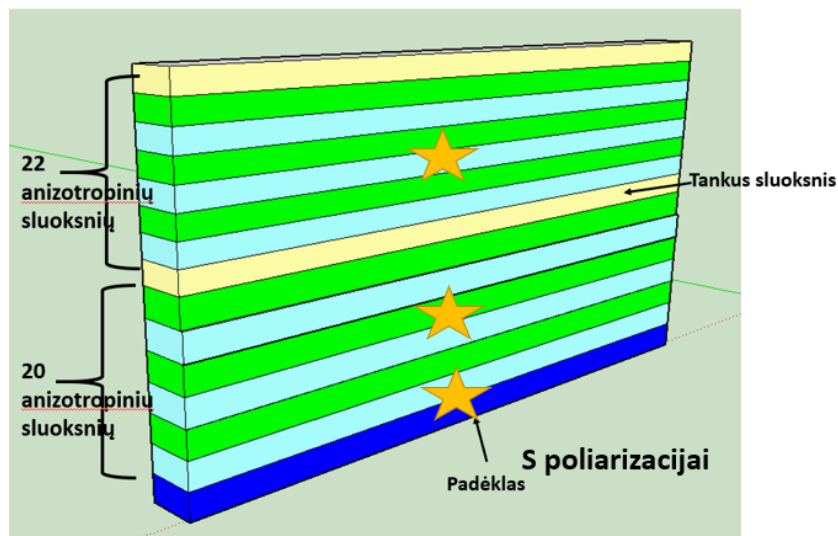
3.4. Profilometro matavimai

Pirmojo eksperimento atveju, dangos storis siekia 3300 nm. Išmatavus lazerio indukuotų pažeidimų gylį matome, jog *p* poliarizacijos spindulio išmuštos skylės visos siekia apie 3200 – 3250 nm. Vadinasi šiai poliarizacijai lazerinį atsparumą riboja sritis tarp padėklo ir dangos.

S poliarizacijos atveju stebime skirtingus pažeidimų gylis. Vietomis, pažeidimų gylis siekia 3200 nm, kitur – apie 850 nm arba 2300 nm. Taigi *s* poliarizacijos lazerinį atsparumą kartais apriboja sritis tarp padėklo ir dangos, bet dažniau gylis siekia sritį, kur formuojamas Brego veidrodis šiai poliarizacijai (31 pav.).

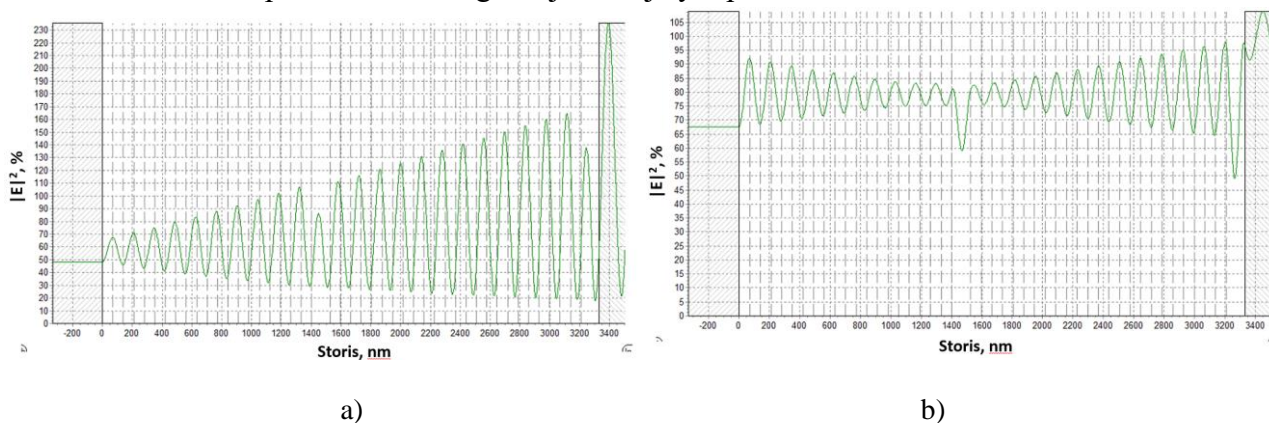
Antrojo eksperimento atveju, dangos storis siekia 2200 nm, o lazerio indukuotų pažeidimų gylis siekia apie 2100 nm.

Lazerio indukuoto pažeidimų slenksčio vertei įtakos turi labai daug veiksnių. Lazerinį atsparumą galėjo sumažinti padėklo nekokybiškas nuplovimas, paruošimas. Perkeliant padėklą iš švaros kambario į vakuuminę kamerą, galėjo stikliukas pasidengti nešvarumais ir t.t. [40].



31 pav. Pirmojo bandinio dangos modelis, kur žvaigždutėmis pažymėti pažeidimai s poliarizacijos spinduliui

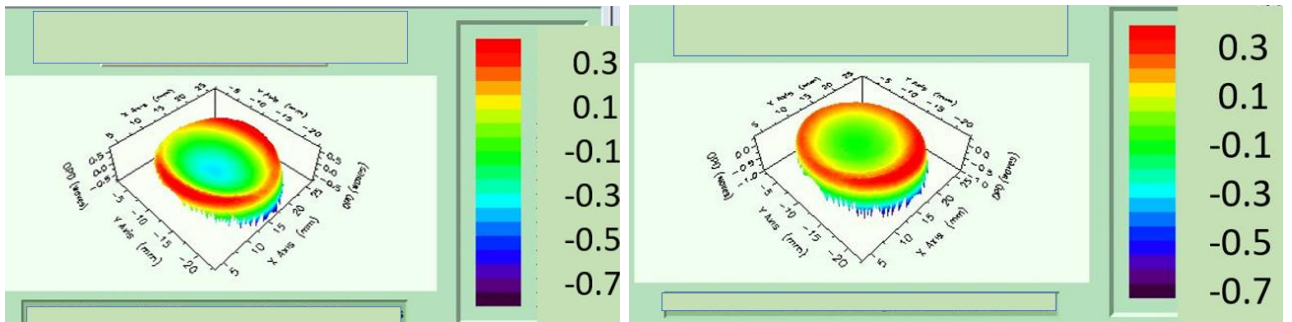
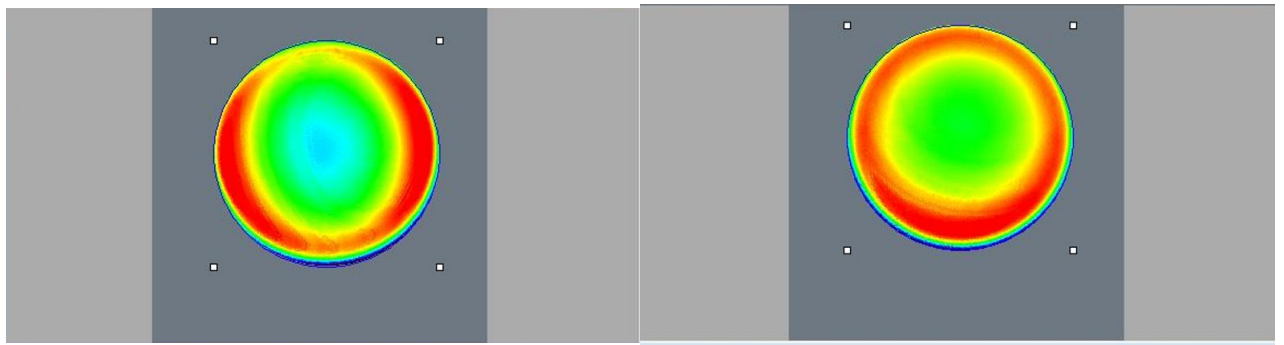
Lazerinės spinduliuotės atsparumo apribojimus dangos ir padėklo sankirtoje, galima aiškinti elektrinio lauko pasiskirstymu tarp sluoksnių (32 pav.). Grafike matome, jog didžiausiai elektrinis laukas susikuria ties padėklu, tad danga šioje vietoje yra pažeidžiama.



32 pav. Elektrinio lauko pasiskirstymas pirmojo bandinio dangoje a) *s* ir b) *p* poliarizacijai

3.5. Interferometro matavimai

Prieš vykdant dangos nusodinimo procesą, kvarcinis stikliukas yra analizuojamas interferometru (33 pav.). Nusodinama danga yra porėta, auga koloninė struktūra, tad šiuo tyrimu norima išsiaiškinti, kokią įtaką plokštiškumo parametrai padaro kampu garinama daugiasluoksnė danga.

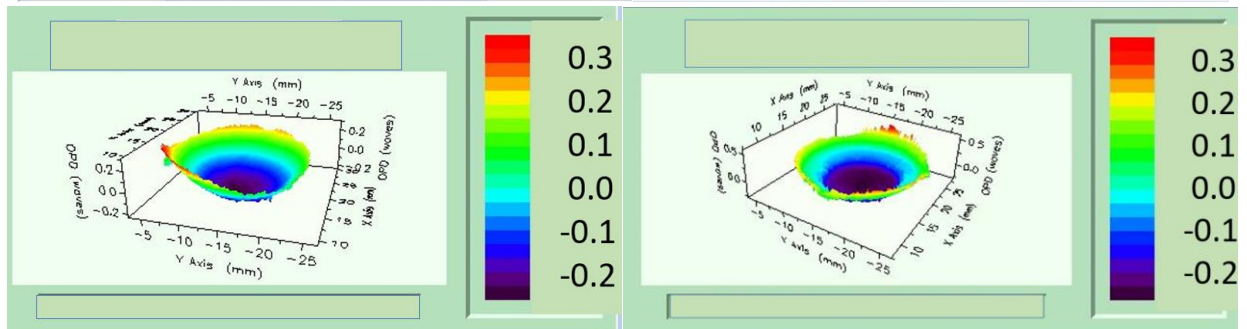
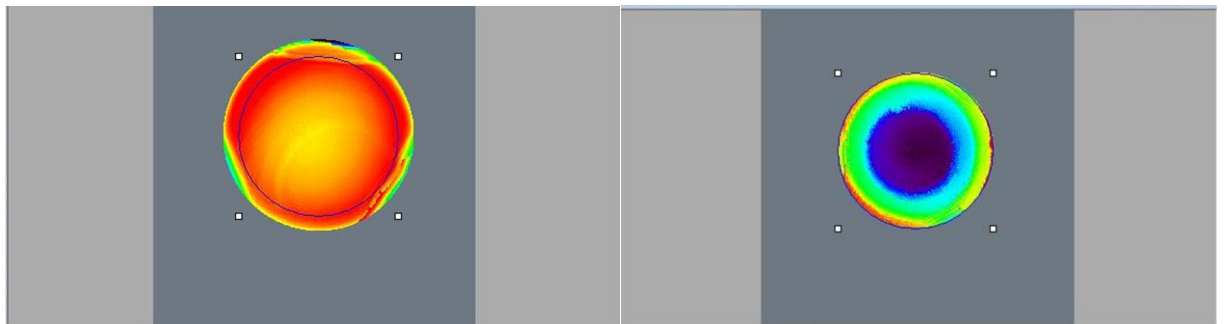


a)

b)

33 pav. Interferometro rezultatai a) pirmajam bandiniui, b) antrajam bandiniui naudojami stikliukai be dangos

Užgarinus dangas, stikliukai buvo pakartotinai išmatuojami su interferometru (34 pav.).



a)

b)

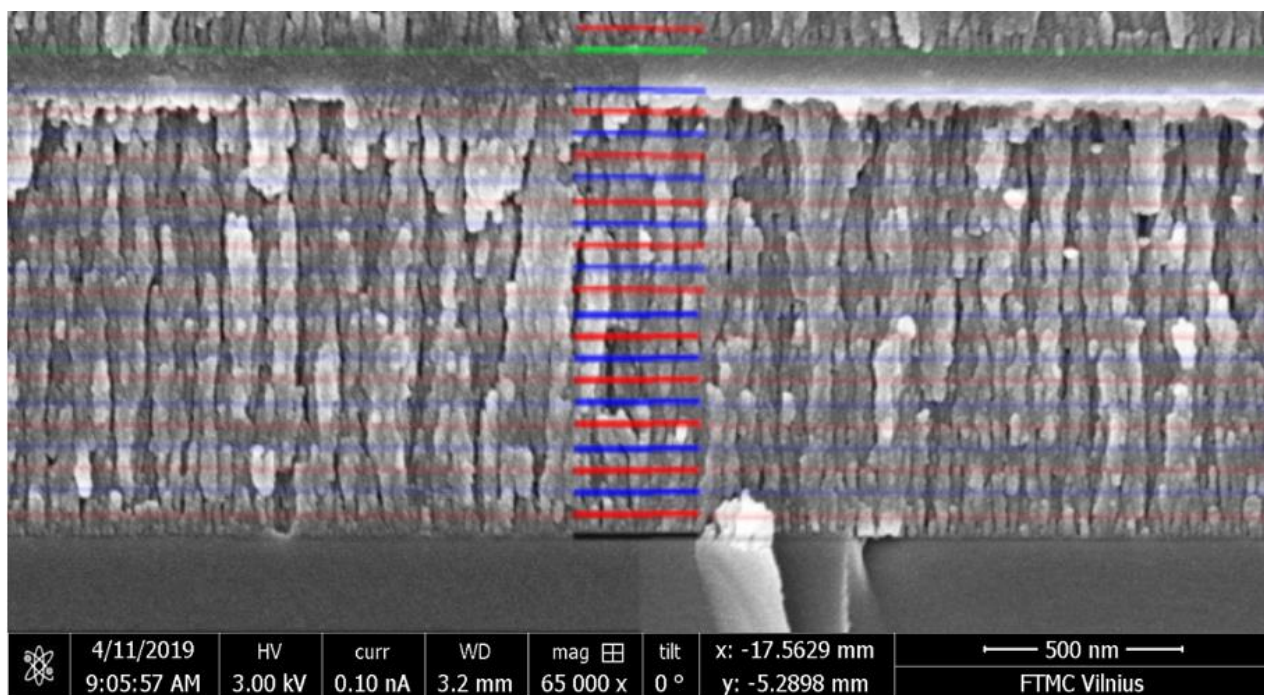
34 pav. Interferometro rezultatai a) pirmajam bandiniui, b) antrajam bandiniui naudojami stikliukai su užgarinta danga

Pritaikyta įtempiams matuoti *Stoney* metodas (kuris aprašyti ankstesniame skyriuje). Pirmojo bandinio atveju įtempiai dangoje yra $\sigma = 6,42$ MPa, o antrojo bandinio - $\sigma = 17,8$ MPa. Lyginant

šiuos rezultatus su egzistuojančiais poliarizuojančiais optiniais komponentais, matome, jog dangoje įtampiai yra labai maži (gali siekti apie 50 MPa, įprastuose optiniuose elementuose) [18, 23].

3.6. Skenuojančio elektronų mikroskopo matavimai

Pirmojo eksperimento metu, į garinimo procesą buvo patalpintos dvi stačiakampės, suraižytos silicio plokštelės, viena kitos atžvilgiu pasuktos 90° kampu. Užgarinus kolonines struktūras ant dangos, šios plokštelės buvo laužiamos per pusę. Tokiu būdu, galima atvaizduoti ant silicio plokštelių užgarintų skulptūrinių dangų skerspjūvį. 35 paveikslėlyje matome, skenuojančio elektronų mikroskopo nuotrauką, kur kairėje yra silicio plokštelės skerspjūvis, kur pirmasis užgarintas sluoksnis nukreiptas šešėliavimo kryptimi, o dešinėje – statmena šešėliavimui kryptimi. Tarp nuotraukų matome paryškintą keturių spalvų skalę. Skalėje juoda spalva reiškia, kad tai yra padėklas, raudona spalva atvaizduoja sluoksnį, kai padėklas pakreiptas 70° kampu garų srauto atžvilgiu, mėlyna spalva, kai padėklas pakreiptas 66° kampu, o žalia spalva, kai padėklas pakreiptas 0° kampu. Įsižiūrėjus į nuotrauką, matome, jog šešėliavimo kryptimi užgarintų sluoksnių atveju, formuojasi storesnės kolonos. Išanalizavus nuotrauką, matome, jog kolonų augimas nesiplečia, t.y. nedominuoja išnykimo efektas dangoje [29, 30, 42].



35 pav. Skenuojančio elektronų mikroskopo rezultatai, kur kairėje pirmasis sluoksnis buvo nukreiptas šešėliavimo kryptimi, o dešinėje pirmasis sluoksnis nukreiptas ne šešėliavimo kryptimi

3.7. Rezultatų apibendrinimas

1 lentelėje pavaizduoti dviejų eksperimentų rezultatai. Spektrometro matavimuose įvertintas padėklo pralaidumas, kuris šiuo atveju siekia 3,5 %. Poliarizacijų išsiskyrimą galima išskaičiuoti iš s ir p poliarizacijų pralaidumo intensyvumų.

1 lentelė. Visi rezultatai

Experimento numeris	Lazerio indukuota pažeidimų slenksčio vertė, J/cm ²	Pralaidumas <i>s</i> poliarizacijai, %	Pralaidumas <i>p</i> poliarizacijai, %	Įtempiai, MPa	Pažeidimų gylis, nm	Dangos storis, nm
Pirmas	9,8 (<i>p</i>) ir 11,2 (<i>s</i>)	54,5	99	6,42	3200 (<i>p</i>), 2300 (<i>s</i>) ir 850 (<i>s</i>)	3300
Antras	9,2	96	99,8	17,8	2100	2200
Trečias	-	92,9	95,3	-	-	2800

Gauti trys šviesą poliarizuojantys optiniai komponentai, su specifiniais reikalavimais. Lyginant šiuos poliarizatorius, su izotropinių sluoksnių pagrindu paremtais poliarizatoriais (plonų plėvelių poliarizatoriai, kubiniai poliarizatoriai), lazerinis atsparumas yra labai panašus [12, 13, 24]. Skulptūrinės dangos iš silicio oksido medžiagos, įprastai pasižymi labai aukštu lazerinės spinduliuotės atsparumu (24,4 J/cm²) [31,32, 43]. Deja, ekstinkcijos koeficientas, skulptūrinių dangų pagrindu suformuotoms dangoms siekia 1:1,8, tačiau anizotropiniai poliarizatoriai yra tinkami 0° šviesos kritimo kampui. Potencialiai, tokio tipo poliarizatorius būtų galima tiesiogiai formuoti ant elementų, esančių lazerinėje sistemoje, taip mažinant sistemos gabaritus.

Išvados ir pagrindiniai rezultatai

1. Suformuoti trys poliarizatoriai nulinio laipsnių šviesos kritimo kampui, iš kurių du 355 nm bangos ilgiui, trečiasis 1123 nm bangos ilgiui. Dėl kvarcinio rezonatoriaus kalibracinio koeficiento netikslumų, gauti pirmojo ir antrojo bandinių spektrai yra pasislinkę į ilgesnių bangų pusę per 2 %.
2. Garinimo kampu technologija padengti ploni silicio oksido sluoksniai pasižymėjo aukštu lazerinės spinduliuotos atsparumu (pirmasis bandinys $9,8 \text{ J/cm}^2$ *p* poliarizacijai ir $11,2 \text{ J/cm}^2$ *s* poliarizacijai, antrasis bandinys $9,2 \text{ J/cm}^2$).
3. Nustatyta, kad skulptūrinių dangų pagrindu suformuotame poliarizatoriuje, *s* poliarizacijos lazerio pažeidimų slenksčio vertę riboja veidrodžio zonos sritis, o *p* poliarizacijai – dangos ir padėklo sankirta.

Literatūros sąrašas

1. GAUTHIER, R.C. Anisotropic resonator analysis using the Fourier–Bessel mode solver. *Optics Communications*, [interaktyvus]. 2018, 410, pp.317–327 [žiūrėta 2019 m. vasario 22 d.]. Prieiga per: sciencedirect
2. WANG, X. Thermally tunable dielectric resonator filter. *Journal of Alloys and Compounds*, [interaktyvus]. 2018, 749, pp.363–368 [žiūrėta 2019 m. vasario 28 d.]. Prieiga per: sciencedirect
3. ZHANG, H. Relative intensity noise reduction with fiber ring resonator. *Optics Communications*, [interaktyvus]. 2018, 429, pp.163–165 [žiūrėta 2019 m. vasario 26 d.]. Prieiga per: sciencedirect
4. HALL, D.R. *The Physics and Technology of Laser Resonators*. Bristol: Institute of physics, 1992 [žiūrėta 2019 m. vasario 22 d.].
5. PAXTON, A.H. *Laser resonators and beam control VII*. Bellingham, WA, USA 2004 [žiūrėta 2019 m. vasario 15 d.].
6. ZHU, M. Theoretical and experimental research on spectral performance and laser induced damage of Brewsters thin film polarizers. *Applied Surface Science*, [interaktyvus]. 2011, 257(15), pp.6884–6888 [žiūrėta 2019 m. vasario 24 d.]. Prieiga per: sciencedirect
7. MACLEOD A. *Thin-Film Optical Filters, 4th edition, by H. Angus Macleod*, vol. 53, no. 4. 2012 [žiūrėta 2019 m. balandžio 2 d.].
8. KOZHEVNIKOV, S. Polarized neutron channeling in weakly magnetic films. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, [interaktyvus]. 2019, 927, 87-100 [žiūrėta 2019 m. balandžio 5 d.]. Prieiga per: doi:10.1016/j.nima.2019.02.022
9. FEEHAN, J. Therapeutic applications of polarized light: Tissue healing and immunomodulatory effects. *Maturitas*, 116, [interaktyvus]. 2018, 11-17 [žiūrėta 2019 m. vasario 28 d.]. Prieiga per: doi:10.1016/j.maturitas.2018.07.009
10. MOROZHENKO, V. Manifestation of the Faraday effect in non-polarized light under optical resonance conditions. *Optics Communications*, 426, [interaktyvus]. 2018, 423-426 [žiūrėta 2019 m. vasario 24 d.]. Prieiga per: doi:10.1016/j.optcom.2018.05.062
11. RUSHNOVA, I. Electrically switchable photonic liquid crystal devices for routing of a polarized light wave. *Optics Communications*, 413, [interaktyvus]. 2018, 179-183 [žiūrėta 2019 m. vasario 21 d.]. Prieiga per: doi:10.1016/j.optcom.2017.12.029
12. XU, N. Study on Brewster angle thin film polarizer using hafnia–silica mixture as high-refractive-index material. *Optical Engineering*, 57(02), [interaktyvus]. 2018, 1 [žiūrėta 2019 m. balandžio 3 d.]. Prieiga per: doi:10.1117/1.oe.57.2.025101
13. ZHU, M. Theoretical and experimental research on spectral performance and laser induced damage of Brewsters thin film polarizers. *Applied Surface Science*, 257(15) [interaktyvus]. 2011, 6884-6888 [žiūrėta 2019 m. vasario 22 d.]. Prieiga per: doi:10.1016/j.apsusc.2011.03.023
14. OLIVER, J. Thin-film polarizers for the OMEGA EP laser system. *Laser-Induced Damage in Optical Materials*: [interaktyvus]. 2005 [žiūrėta 2019 m. vasario 20 d.]. Prieiga per: doi:10.1117/12.638809
15. MOTOKOSHI, S. Development of Newly Designed Polarizer for High-Power Laser. *Japanese Journal of Applied Physics*, 32 [interaktyvus]. 1993, (Part 2, No. 11B) [žiūrėta 2019 m. balandžio 10 d.]. Prieiga per: doi:10.1143/jjap.32.11660

16. GU, P. F. Laser-induced damage resistance of thin-film polarizers prepared by ion-assisted deposition. *Optics Letters*, [interaktyvus]. 1994, 19(2), 81 [žiūrėta 2019 m. balandžio 5 d.]. Prieiga per: doi:10.1364/ol.19.000081
17. LAYERTEC. Datasheet - Laser mirror. [interaktyvus]. N.d.[žiūrėta 2019 m. balandžio 5 d.]. Prieiga per internetą: <https://www.layertec.de/en/shop/datasheet-143764/>
18. ALTECHNA. Custom Laser Optics & Technologies. [interaktyvus]. N.d. [žiūrėta 2019 m. balandžio 8 d.]. Prieiga per internetą: <https://www.altechna.com/products/?cat=14>
19. YANG, K. Design and fabrication of ultra-high precision thin-film polarizing beam splitter. *Optics Communications*, 284(19), [interaktyvus]. 2011, 4650-4653 [žiūrėta 2019 m. balandžio 4 d.]. Prieiga per: doi:10.1016/j.optcom.2011.06.038
20. OLYMPUS. Fundamental Concepts in DIC Microscopy. [Interaktyvus]. N.d. [žiūrėta 2019 m. balandžio 8 d.]. Prieiga per internetą: <https://www.olympus-lifescience.com/ru/microscope-resource/primer/techniques/dic/dicintro/>
21. FAN, J. A study on transmitted intensity of disturbance for air-spaced Glan-type polarizing prisms. *Optics Communications*, 223(1-3), [interaktyvus]. 2003, 11-16 [žiūrėta 2019 m. balandžio 14 d.]. Prieiga per: doi:10.1016/s0030-4018(03)01618-3
22. MYATT Chris. Optical Contacting: Changing the Interface of Optics. *Precision photonics*. [interaktyvus]. 2006 [žiūrėta 2019 m. balandžio 10 d.], Prieiga per: <http://www.precisionphotonics.com/>
23. THORLABS. Polarizing Beamsplitters. [interaktyvus]. N.d. [žiūrėta 2019 m. gegužės 1 d.]. Prieiga per internetą: https://www.thorlabs.com/navigation.cfm?guide_id=2318
24. XU, N. Study on Brewster angle thin film polarizer using hafnia-silica mixture as high refractive index material. *Pacific Rim Laser Damage 2017: Optical Materials for High-Power Lasers*. [interaktyvus]. 2017 [žiūrėta 2019 m. balandžio 4 d.], Prieiga per: doi:10.1117/12.2269710
25. HOYA OPTICS. Special glass. [interaktyvus]. N.d. [žiūrėta 2019 m. balandžio 15 d.]. Prieiga per internetą: http://www.hoyaoptics.com/oe/index.html#special_glass_2
26. MOISEEV, S. G. Thin-film polarizer made of heterogeneous medium with uniformly oriented silver nanoparticles. *Applied Physics A*, 103(3), [interaktyvus]. 2010, 775-777 [žiūrėta 2019 m. balandžio 15 d.]. Prieiga per: doi:10.1007/s00339-010-6210-2
27. EDMUNDOPTICS. Wire Grid Polarizers - Wire Grid Polarizer. [interaktyvus]. N.d. [žiūrėta 2019 m. balandžio 16 d.]. Prieiga per internetą: <https://www.edmundoptics.com/c/wire-grid-polarizers/688/>
28. HOBBS, D. S. Pulsed laser damage resistance of nano-structured polarizers for 1064nm. *Laser-Induced Damage in Optical Materials 2018: 50th Anniversary Conference*. [interaktyvus]. 2018 [žiūrėta 2019 m. gegužės 14 d.], Prieiga per: doi:10.1117/12.2500339
29. HAWKEYE, M. M. *Glancing angle deposition of thin films: Engineering the nanoscale*. 2014 [žiūrėta 2019 m. gegužės 6 d.], Chichester: Wiley.
30. MICHAEL T. *Glancing angle deposition*. 2010, Prieiga per: sciencedirect
31. GRINEVIČIŪTĖ, L. Highly Resistant Zero-Order Waveplates Based on All-Silica Multilayer Coatings. *Physica Status Solidi (a)*, 214(12), [interaktyvus]. 2017, 1700764 [žiūrėta 2019 m. balandžio 6 d.]. Prieiga per: doi:10.1002/pssa.201700764
32. TOLENIS, T. Next generation highly resistant mirrors featuring all-silica layers. *Scientific Reports*, 7(1). [interaktyvus]. 2017 [žiūrėta 2019 m. balandžio 15 d.], Prieiga per: doi:10.1038/s41598-017-11275-0

33. RENISHAWPLC. Interferometry explained. [interaktyvus]. N.d. [žiūrėta 2019 m. balandžio 25 d.]. Prieiga per internetą: <https://www.renishaw.com/en/interferometry-explained--7854>
34. JANSSEN, G. Celebrating the 100th anniversary of the Stoney equation for film stress: Developments from polycrystalline steel strips to single crystal silicon wafers. *Thin Solid Films*, 517(6), [interaktyvus]. 2009, 1858-1867 [žiūrėta 2019 m. balandžio 25 d.]. Prieiga per: doi:10.1016/j.tsf.2008.07.014
35. LIDARIS. 1-on-1 Test of Laser-Induced Damage Threshold. [interaktyvus]. N.d. [žiūrėta 2019 m. balandžio 23 d.]. Prieiga per internetą: <http://lidaris.com/laser-damage-testing/1-on-1-test/>
36. TOLENIS Tomas. *Modelling, formation and characterization of nano-sculptured thin films*. Daktaro disertacija. [interaktyvus]. 2017 [žiūrėta 2019 m. balandžio 5 d.].
37. NANOSCIENCE. Scanning Electron Microscopy. [interaktyvus]. N.d. [žiūrėta 2019 m. gegužės 5 d.]. Prieiga per internetą: <https://www.nanoscience.com/techniques/scanning-electron-microscopy/>
38. TERRAUNIVERSAL. FS209E and ISO Cleanroom Standards. [interaktyvus]. N.d. [žiūrėta 2019 m. balandžio 26 d.]. Prieiga per internetą: <https://www.terrauniversal.com/cleanrooms/iso-classification-cleanroom-standards.php>
39. PASCHOTTA, R. Quarter-wave Mirrors. [interaktyvus]. 2019, [žiūrėta 2019 m. balandžio 15 d.]. Prieiga per internetą: https://www.rp-photonics.com/quarter_wave_mirrors.html
40. ZHANG, D. Effect of substrate defects on LIDT of (BiTm)₃(GaFe)₅O₁₂ films grown by LPE. *Applied Surface Science*, 484, [interaktyvus]. 2019, 169-174 [žiūrėta 2019 m. gegužės 13 d.]. Prieiga per: doi:10.1016/j.apsusc.2019.04.102
41. LIDARIS. Overview of Laser-Induced Damage Morphology. [interaktyvus]. N.d. [žiūrėta 2019 m. balandžio 15 d.]. Prieiga per internetą: <http://lidaris.com/glossary-2/laser-induced-damage-morphology/>
42. ALIREZA Bananej. The effect of porosity on the laser induced damage threshold of TiO₂ and ZrO₂ single layer films. Elsevier. [žiūrėta 2019 m. balandžio 15 d.]. *Optics & Laser Technology* [interaktyvus]. 2010, 1187–1192. Prieiga per: sciencedirect
43. OLIVER J. B. Electron-beam–deposited distributed polarization rotator for high-power laser applications. *Optics express*. [interaktyvus]. 2014, vol 22, [žiūrėta 2019 m. gegužės 18 d.]. Prieiga per: doi.org/10.1364/OE.22.023883