



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
MATEMATIKOS IR GAMTOS MOKSLŲ FAKULTETAS

Lina Grinevičiūtė

**NANO-STRUKTŪRINIŲ PLONŲ SLUOKSNIŲ GARINIMAS,
CHARAKTERIZAVIMAS IR TAIKYMAS FAZINIŲ
PLOKŠTELIŲ FORMAVIMUI**

Baigiamasis magistro projektas

Vadovas

prof. dr. Giedrius Laukaitis

Konsultantas

j.m.d. Tomas Tolenis

KAUNAS, 2016

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

MATEMATIKOS IR GAMTOS MOKSLŲ FAKULTETAS

**NANO-STRUKTŪRINIŲ PLONŲ SLUOKSNIŲ GARINIMAS,
CHARAKTERIZAVIMAS IR TAIKYMAS FAZINIŲ
PLOKŠTELIŲ FORMAVIMUI**

Baigiamasis magistro projektas

Taikomoji fizika (621F30005)

Vadovas

prof. dr. Giedrius Laukaitis

Konsultantas

j.m.d. Tomas Tolenis

Recenzentas

doc. dr. Vytautas Stankus

Projektą atliko

Lina Grinevičiūtė

KAUNAS, 2016



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

MATEMATIKOS IR GAMTOS MOKSLŲ FAKULTETAS

(Fakultetas)

Lina Grinevičiūtė

(Studento vardas, pavardė)

Taikomoji fizika (621F30005)

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

„NANO-STRUKTŪRINIŲ PLONŲ SLUOKSNIŲ GARINIMAS, CHARAKTERIZAVIMAS
IR TAIKYMAS FAZINIŲ PLOKŠTELIŲ FORMAVIMUI“
AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

0 _____
Kaunas

Patvirtinu, kad mano, **Linos Grinevičiūtės**, baigiamasis projektas tema „NANO-STRUKTŪRINIŲ PLONŲ SLUOKSNIŲ GARINIMAS, CHARAKTERIZAVIMAS IR TAIKYMAS FAZINIŲ PLOKŠTELIŲ FORMAVIMUI“ 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)

Turinys

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS.....	4
SANTRUMPŲ SĄRAŠAS	5
IŽANGA.....	7
1. LITERATŪROS APŽVALGA	9
1.1. Nano-struktūrinių plonų sluoksnių formavimas	9
1.2. „Serial bi-deposition“ garinimo technologija	12
1.3. Elektromagnetinės spinduliuotės sąveika su medžiaga	14
1.3.1. Medžiagos optinių charakteristikų nustatymas	14
1.3.2. Šviesos poliarizacija	15
1.3.3. Dvejopas lūžio rodiklis kristaliniuose ir amorfiniuose sluoksniuose.....	16
1.3.4. Lazerinės spinduliuotės pažaidos slenkstis	17
1.4. Fazinės plokštelės	18
1.4.1. Kietųjų ir skystųjų kristalų fazinės plokštelės.....	19
1.4.2. Polimerinės fazinės plokštelės	20
1.4.3. Garinimo technologija suformuotos fazinės plokštelės	21
2. TYRIMO METODAI IR EKSPERIMENTINĖ DALIS	23
2.1. Naudota įranga.....	23
2.1.1. Garinimo elektronų spinduliu vakuuminė sistema.....	23
2.1.2. Elipsometras	24
2.1.3. Lazerio spinduliuotės pažaidos slenksčio nustatymo stendas	24
2.1.4. Spektrofotometras	25
2.1.5. Interferometras	26
2.1.6. Profilometras	26
2.2. Eksperimento eiga	26
3. REZULTATAI	29
3.1. Fazinės plokštelės regimajai šviesos sričiai.....	29
3.2. Fazinės plokštelės ultravioletinei šviesos sričiai	33
IŠVADOS.....	41
LITERATŪROS SĄRAŠAS.....	42

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1 pav. Garinimo kampu technologijos schema [1]	9
2 pav. Koloninės struktūros susidarymo schema	10
3 pav. Atomų šešėliavimo reiškinys besiformuojant dangai [6]	11
4 pav. Įvairių geometrinių formų dangų struktūros [6]	11
5 pav. Suformuotų skulptūrinių dangų SEM nuotraukos: a - koloninė MgF_2 struktūra [8], b - sraigto formos MgF_2 struktūra [8], c - kombinuota sraigto formos bei ševroninė dangos struktūra [9]	11
6 pav. Ševroninė dangos struktūra	12
7 pav. SBD technologija suformuotų dangų struktūros [15]	13
8 pav. Šviesos poliarizacijos rūšy [19]	15
9 pav. Medžiagos dalelių išsidėstymas	16
10 pav. Paprastasis E_o ir nepaprastasis E_e spinduliai anizotropinėje terpėje	16
11 pav. Lazerinės spinduliuotės pažaidos slenksčio nustatymo „1-on-1“ metodikos schema [23]	17
12 pav. Ketvirčio bangos ilgio ir pusės bangos ilgio fazinės plokštelės [21]	18
13 pav. Skystųjų kristalų fazinės plokštelės [27]	19
14 pav. Super-achromatinės polimerinės fazinės plokštelės APSAW schema (a), skirtingų fazinių plokštelių fazės vėlinimo priklausomybės nuo bangos ilgio (b) [30]	21
15 pav. Vėžiagyvis burnakojis (a) [32], burnakojos akies sandara (b) [33]	22
16 pav. Vakuuminė garinimo sistema „SIDRABE“	23
17 pav. Lazerinės spinduliuotės pažaidos slenksčio nustatymo stendo principinė schema	25
18 pav. Keturių sekcijų stiklų plovimo įrenginys	27
19 pav. Fazės vėlinimo dispersijos esant skirtingiems	29
20 pav. Fazės vėlinimo dispersijos esant skirtingiems apsisukimo laikams τ (sunormuota 1 nm)	29
21 pav. Skirtingais garinimo kampais suformuotų dangų pralaidumo spektrai prieš ir po atkaitinimo $600^\circ C$ temperatūroje. Juoda linija žymi pagrindo pralaidumą, mėlyna ir raudona ištinės linijos žymi P ir S poliarizacijų pralaidumą, mėlyna ir raudona punktyrinės linijos žymi P ir S poliarizacijų pralaidumą po atkaitinimo	31
22 pav. TiO_2 dangų įtempių priklausomybės nuo garinimo kampo (kairėje) ir bandinio, garinto 70 laipsnių kampu, po atkaitinimo $600^\circ C$ temperatūroje paviršiaus vaizdas (dešinėje)	32
23 pav. TiO_2 dangų struktūra: a – danga formuota SBD technologija ties 60° garinimo kapu, b - danga formuota SBD technologija ties 80° garinimo kapu	32
24 pav. SBD bei OAD metodikomis suformuotų dangų fazės vėlinimo dispersijos esant skirtingiems garinimo kampams (sunormuota 1 nm)	33
25 pav. SBD metodika suformuotų dangų ($\chi = 70^\circ$) fazės vėlinimo dispersijos esant skirtingiems sukiojimo laikams (sunormuota 1 nm)	33
26 pav. Al_2O_3 dangos, suformuotos esant 70° garinimo kampui, pralaidumo spektras P ir S poliarizacijoms	34
27 pav. Al_2O_3 dangos, suformuotos esant 70° garinimo kampui, lūžio rodiklių dispersijos P ir S poliarizacijoms ..	34
28 Pav. Dangos, suformuotos esant $\chi = 70^\circ$, storio pasiskirstymas per $7\text{ cm} \times 7\text{ cm}$ elemento plotą	35
29 pav. Dangos įtempių priklausomybė nuo garinimo kampo	36
30 pav. Bandinio be dangos aukščio pasiskirstymas	36
31 pav. Bandinio, su Al_2O_3 suformuota danga esant 0° garinimo kampui, aukščio pasiskirstymas	36
32 pav. Bandinio be dangos aukščio pasiskirstymas	37
33 pav. Bandinio, su Al_2O_3 suformuota danga esant 70° garinimo kampui, aukščio pasiskirstymas	37
34 pav. Dangos, suformuotos ties 70° garinimo kampu, paviršiaus nuotraukos gautos tamsaus lauko optiniu mikroskopu: kairėje – prieš valymą su vata, dešinėje – po valymo su vata	37
35 pav. Dangos, suformuotos ties 70° garinimo kampu ir 50 nm apsauginiu sluoksniu, paviršiaus nuotraukos gautos tamsaus lauko optiniu mikroskopu: kairėje – prieš valymą su vata, dešinėje – po valymo su vata	38
36 pav. Lazerio spinduliuotės sukeltų medžiagos pažeidimų morfologijos	38
37 pav. Pusės bangos ilgio (a) ir ketvirčio bangos ilgio (b) fazinių plokštelių charakteristikos	39
38 pav. Al_2O_3 $\lambda/2$ fazinės plokštelės 355 nm bangai skerspjūvio SEM nuotrauka	40
39 pav. Vaizdai gauti interferometru	40

SANTRUMPŲ SĄRAŠAS

CCD – krūvio sąsajos įtaisas (angl. **charge coupled device**)

LIDT – lazerio spinduliuotės sukeltas pažeidimo slenkstis (angl. **laser-induced damage threshold**)

LC – skystieji kristalai (angl. **liquid crystal**)

OAD – garinimas kampu (angl. **oblique angle deposition**)

SBD – serijinis garinimas dvejomis padėtimis (angl. **serial bi-deposition**)

SEM – skenuojantis elektroninis mikroskopas (angl. **scanning electron microscope**)

1-on-1 – lazerio spinduliuotės sukulto pažeidimo slenksčio nustatymo metodas, kai tik vienu lazerio impulsu apšviečiamas analizuojamas bandinio paviršiaus plotas

S-on-1 – lazerio spinduliuotės sukulto pažeidimo slenksčio nustatymo metodas, kai S impulsų apšviečiamas analizuojamas bandinio paviršiaus plotas

IŽANGA

Lazerinės technologijos yra plačiai naudojamos moksliniuose tyrimuose, telekomunikacijose, medicinoje, astronomijoje bei daugelyje kitų sričių. Lazerio generuotai spinduliuotei valdyti naudojami įvairūs optiniai elementai: veidrodžiai, poliarizatoriai, šviesos ir spektro dalikliai ir kt. Atsižvelgiant į optinių elementų poreikį bei keliamus vis didesnius reikalavimus tobulėjančioms technologijoms, reikia kuo nuodugniau iširti elementų formavimui naudojamų technologijų parametrus ir formuojamų dangų charakteristikas. Tik tada bus galima kurti elementus ne tik turinčius geras optines savybes, tačiau taip pat pasižyminčius dideliu atsparumu lazeriniams pažeidimams, temperatūros poveikiams ir kt.

Fazinės plokštelės – optiniai elementai, kurie naudojami šviesos poliarizacijos valdymui. Tai plačiai taikomi elementai, nes reikalingi daugumoje sistemų, kur naudojama poliarizuota šviesa. Tokių plokštelių taikymai gali būti įvairūs – jos naudojamos poliarizacijos keitimui, šviesos intensyvumo valdymui, poliarizacijos identifikavimui. Tokie elementai gali būti gaminami iš natūralia optine anizotropija pasižyminčių kristalų, polimerų, skystųjų kristalų ir kitų anizotropinių sluoksnių. Dauguma šių elementų yra neilgaamžiai, trapūs, jautrūs aplinkos poveikiams ar sudėtingai pagaminami. Tačiau yra galimybė išvengti visų šių minusų – formuojant fazines plokšteles garinimo technologija. Garinimo kampu „Serial Bi-Deposition“ (SBD) metodika suformuotos plonos dangos turi visas savybes kokybiškų fazinių plokštelių formavimui. Anizotropiškumas dangose gaunamas proceso metu manipuluojant padėklo padėtimi. Elektronų pluoštu išgarinti medžiagos atomai nusėdę ant kampu pakreipto pagrindo šėšeliuoja sritis, ant kurių nebegali tiesiogiai nusėsti kiti atomai ar difunduoti dėl mažos energijos. Taip formuojasi nano-sruktūrinė danga su pasviromis kolonomis, kurių dydis ir forma priklauso nuo garinimo parametrų [1].

Formuojant optinius elementus svarbu, kad dangos pasižymėtų kuo mažesniais įtempiais. Dangų formavimo metu atsiradę įtempiai deformuoja padėklą, dangos sutrūkinėja, atsilupa. Todėl galimybė kontroliuoti įtempimus ir formuoti dangas be jų yra labai svarbi norint pagaminti aukštos kokybės optinius elementus. Garinant elektronų pluoštu ir nustatčius optimalius SBD metodikos proceso parametrus galima įtempimus sumažinti iki minimalių reikšmių.

Taigi, siekiant įsisavinti nano-skulptūrinių dangų formavimo technologiją buvo iškeltas projekto tikslas: ***suformuoti fazines plokšteles iš nano-struktūrinių plonų sluoksnių, taikant garinimo elektronų pluoštu technologiją***. Šiam tikslui pasiekti buvo iškelti uždaviniai:

1. nustatyti optimalius proceso parametrus TiO_2 nano-struktūrinių plonų sluoksnių garinimui, taikant juos mažų (< 50 MPa) įtempių fazinėms plokštelėms formuoti;

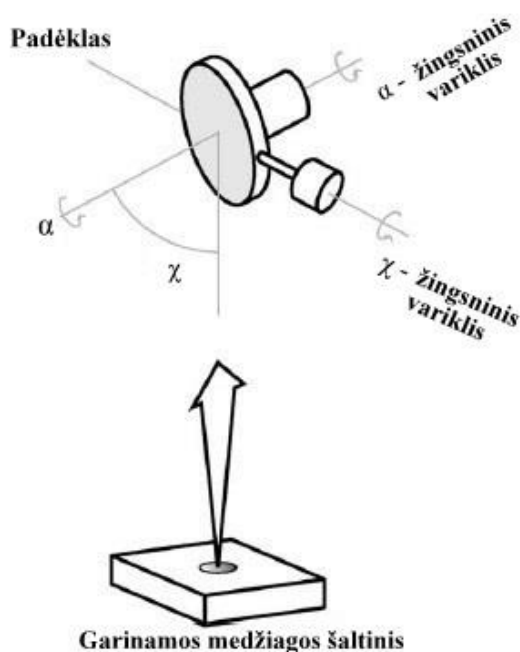
2. ištirti elektronų pluoštu užgarintų TiO₂ nano-struktūrinių plonų sluoksnių atkaitinimo įtaką optinėms ir struktūrinėms charakteristikoms;
3. nustatyti optimalius proceso parametrus Al₂O₃ nano-struktūrinių plonų sluoksnių garinimui, taikant juos fazinių plokštelių, skirtų 355 nm bangai, formavimui;
4. Suformuoti $\lambda/2$ ir $\lambda/4$ fazines plokšteles 355 nm bangai, pasižyminčias didesniu nei 80 proc. optiniu pralaidumu ir mažais (< 50 MPa) įtempiais.

1. LITERATŪROS APŽVALGA

1.1. Nano-struktūrinių plonų sluoksnių formavimas

Plonos dangos gali būti formuojamos įvairiais metodais. Visi jie yra skirstomi į tris grupes – fizikiniai, cheminiai bei šių dviejų principų kombinuotieji metodai. Optinių dangų formavimui ant padėklų dažniausiai naudojamos fizikinės dangų nusodinimo technologijos – tai garinimas elektronų spinduliu, varžinis garinimas, dulkinimas jonų pluoštu, magnetroninis dulkinimas, ir kt.

Garinimas elektronų spinduliu – vienas iš terminio garinimo metodų, kurio metu naudojamas elektronų pluoštas lokaliai medžiagos įkaitinimui iki garavimo temperatūros. Visas procesas atliekamas aukštame vakuume. Šiuo metodu gali būti užnešamos įvairių medžiagų dangos - metalų, jų oksidų, fluoridų dangos. Proceso metu elektronų srautas yra nukreipiamas į norimą garinti medžiagą, kuri patalpinama aušinamame tiglyje. Elektronų spindulys įkaitina paviršius lokaliai, o tiglio yra nuolat aušinamas vandeniu. Dėl to gali būti garinamos medžiagos, kurių garavimo temperatūra viršija tūkstantį ir daugiau laipsnių pagal Celsijų. Ši garinimo technologija yra pranašesnė nei varžinio garinimo, kur galima garinti tik medžiagas, kurių garavimo temperatūra yra ženkliai mažesnė už laikiklio medžiagos lydymosi temperatūrą. Garinimo elektronų pluoštu metu nusodinamų dangų savybės priklauso nuo daug parametru: vakuumo lygio kameroje, padėklo temperatūros, garinimo greičio, padėklo medžiagos, medžiagos atomų sklidimo link padėklo kampo ir kt.[2].



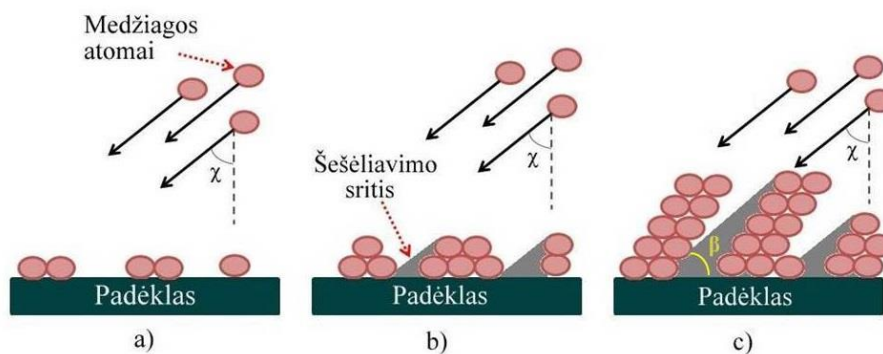
1 pav. Garinimo kampu technologijos schema [1]

Maždaug prieš 60 metų buvo pradėtos tyrinėti nusodinamų medžiagų vidinės struktūros, kurios pasižymi mažesniais matmenimis nei šviesos bangos ilgis. Iki tol jų buvo neįmanoma pamatyti su optiniu mikroskopu dėl šviesos difrakcijos sąlygų. Tik tada, kai atsirado daug didesnę skiriamąją gebą turintys elektroniniai mikroskopai, buvo pastebėta, kad prie tam tikrų sąlygų suformuotos dangos pasižymi tvarkinga struktūra nanometriniame lygmenyje. Proceso metu pakreipus padėklą kampu, danga formuojasi su tvarkinga vidine struktūra – kolonomis, mažesnėmis nei keli šimtai nanometrų. Taip atsirado OAD technologija (angl. Oblique Angle Deposition) – garinimo kampu

nanometrų. Taip atsirado OAD technologija (angl. Oblique Angle Deposition) – garinimo kampu

technologija (1 pav.) [3, 4]. Proceso metu padėklas pakreipiamas tam tikru kampu χ (kampas tarp padėklo paviršiaus plokštumos normalės ir nusodinamos medžiagos atomų srauto). Naudojant žingsninį variklį galima manipuluoti šiuo kampu, o danga pradeda formuotis porėtesnė, su tvarkingomis kolonomis. Į šią sistemą įvedus dar vieną žingsninį variklį, kuriuo būtų keičiamas kampas aplink padėklo paviršiaus normalę, galima formuoti dangas su sudėtingomis trimatėmis struktūromis – spiralinėmis, ševroninėmis ir kt. [4].

Tvarkingos nano-struktūros formavimasis garinant kampu yra sąlygotas nusodinamų medžiagos atomų šešėliavimo (žr. 2 pav.). Garinimo metu nusodinamos medžiagos atomai neįgyja daug energijos, ji neviršija 0,4 eV. Dėl to, jei padėklas nėra papildomai kaitinamas, atomai nusėda ant padėklo iškart, kai jį pasiekia ir beveik nevyksta paviršinė adatomų migracija. Nukleacijos centrų (užuomazgų, nuo kurių pradeda formuotis kolonos) susidarymas – atsitiktinis procesas, kuris priklauso nuo garinimo parametrų, tokių kaip vakuumo sąlygos, garinimo greitis, garinama medžiaga ir kt..



2 pav. Koloninės struktūros susidarymo schema: a – užuomazgų susidarymas, b – šešėliavimosi reiškinio pradžia, c – kolonų augimas

Ant padėklo nusėdus pirmiesiems atomams susidaro užuomazgos, kurių dėka atsiranda šešėliavimo efektas (2 pav. a). Užuomazgų atomai, įsitvirtinę padėklo paviršiuje, užstoja tam tikrą sritį (šešėliavimo sritis), kurią negali pasiekti kampu χ atskriejantys atomai (2 pav.b). Kadangi elektronų spinduliu išgarintos medžiagos atomai sudaro kolimuotą srautą, o patys atomai neturi daug energijos, jie iškart nusėda ant arčiausiai esančių, jau įsitvirtinusių, atomų ir formuoja kolonas (2 pav.c). Besiformuojančios kolonos plotis bei pagrindo forma priklauso nuo garinimo parametrų bei garinimo kampo [5].

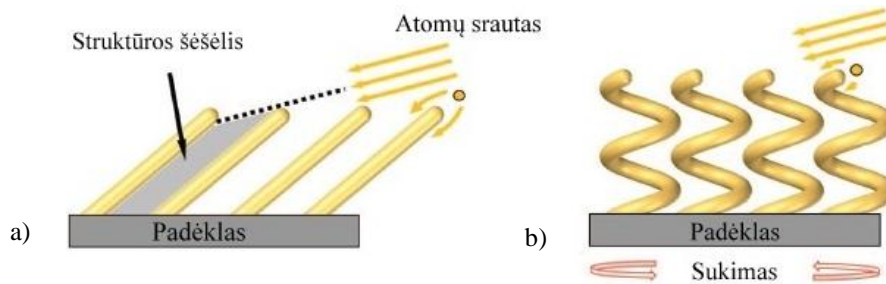
Efektyviam šešėliavimosi efektui ir kolonų formavimuisi padėklas turi būti pakreipiamas didesniu nei 30 laipsnių kampu, tačiau ne didesniu nei 90 laipsnių. Be to, kolonos pasvirimo kampas nesutampa su garinimo kampu ir yra šiek tiek mažesnis. Nustatytas sąryšis tarp garinimo kampo χ bei kolonos pasvirimo kampo β (žr. 2 pav.c) esant mažiems garinimo kampams [4]:

$$\tan \beta = \frac{1}{2} \tan \chi. \quad (1)$$

Kai garinimo kampas didesnis nei 30 laipsnių, kolonos pasvirimo kampą galima apskaičiuoti naudojantis formule [4]:

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

Kaip jau buvo minėta, manipuliuojant ne tik kampu tarp padėklo paviršiaus plokštumos normalės ir garinamos medžiagos srauto, bet taip pat ir kampu aplink padėklo paviršiaus normalę, galima formuoti sudėtingas trimates struktūras. Įtvirtinus padėklą tam tikru, pastoviu garinimo kampu χ , o patį padėklą viso proceso metu sukant aplink jo paviršiaus normalę, formuojamos spiralinės struktūros, kaip parodyta 3 paveiksle.

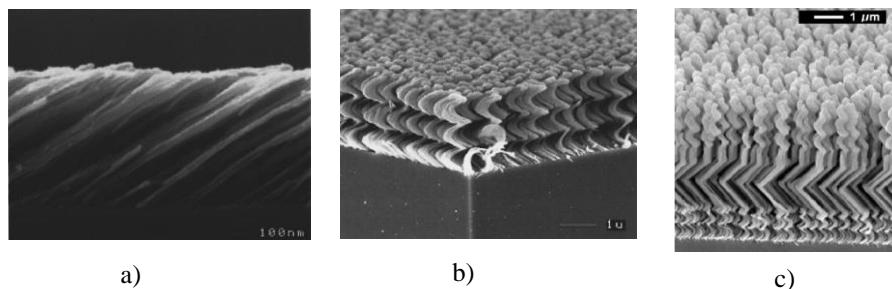


3 pav. Atomų šėšėliavimo reiškinys besiformuojant dangai - koloninės struktūros formavimosi schema (a) ir spiralinės struktūros formavimosi schema (b) [6]

Yra padaryta nemažai mokslinių darbų, kur sukuriamos įvairios struktūros: statmenos padėklui koloninės (I formos), ševroninės (V formos), C formos, spiralinės ir kt. 4 pav. pateiktos įvairios geometrinės formos struktūros, kurias galima suformuoti manipuliuojant garinimo kampais [6].

Vaizdas iš viršaus	Vaizdas iš šono

Vienos iš pirmųjų sudėtingesnių dvimačių ir trimačių struktūrų buvo formuojamos iš MgF_2 medžiagos [7, 8]. Garinant MgF_2 60 laipsnių kampu buvo suformuota koloninę struktūrą turinti danga (5 pav. a). Garinant tą pačią medžiagą, tačiau periodiškai pasukant padėklą aplink savo paviršiaus normalę mažu kampu – formuojamos sraigto formos struktūros (5 pav. b). Taip pat dažnai būna kombinuojamos dvi ar daugiau skirtingų geometrijų struktūros formuojant tą pačią dangą (5 pav.c).



4 pav. Įvairių geometrinių formų dangų struktūros [6]

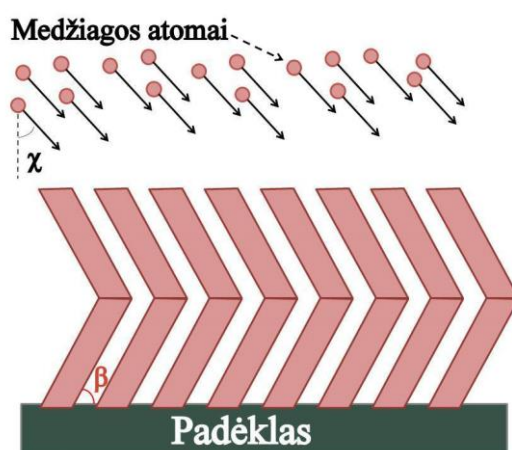
5 pav. Suformuotų skulptūrinių dangų SEM nuotraukos: a - koloninė MgF_2 struktūra [8], b - sraigto formos MgF_2 struktūra [8], c - kombinuota sraigto formos bei ševroninė dangos struktūra [9]

Skulptūrinių dangų vidinės struktūros fragmento geometrija gali būti keičiama varijuojant ne tik garinimo kampais, bet taip pat ir garinimo parametrais – garinimo greičiu, temperatūra. Šiek tiek aukštesnė temperatūra inicijuoja didesnę adatomų paviršinę migraciją dėl kurios keičiasi susidariusios medžiagos užuomazgos bei kolonos plotis. Norint, kad struktūros formuotųsi tam tikrais pastoviais atstumais viena nuo kitos ir būtų vienodas visų kolonų plotis bei forma, galima naudoti specialiai paruoštus pagrindus su paviršiuje jau suformuota struktūra. Tokia struktūra – iškilūs norimos formos dariniai tarnauja kaip užuomazgos, ant kurių formuojasi kolonos. Pagrindo paviršiuje struktūros gali būti suformuotos naudojant įvairias litografijos rūšis [10], pavyzdžiui, elektronų pluošto litografija [11].

Garinimo kampu technologija suformuotos dangos šiuo metu susilaukia nemažai dėmesio ir yra pritaikomos daugelyje sričių. Šia technologija suformuotos porėtos dangos naudojamos saulės elementų gamyboje, elektroniniuose įrenginiuose, kur reikalingos elektrai laidžios, tačiau šviesai pralaidžios dangos. Dėl savo porėtumo, optinių bei elektrinių savybių OAD metodika suformuotos dangos naudojamos sensorių, biosensorių ar optinių elementų gamyboje [12].

1.2. „Serial bi-deposition“ garinimo technologija

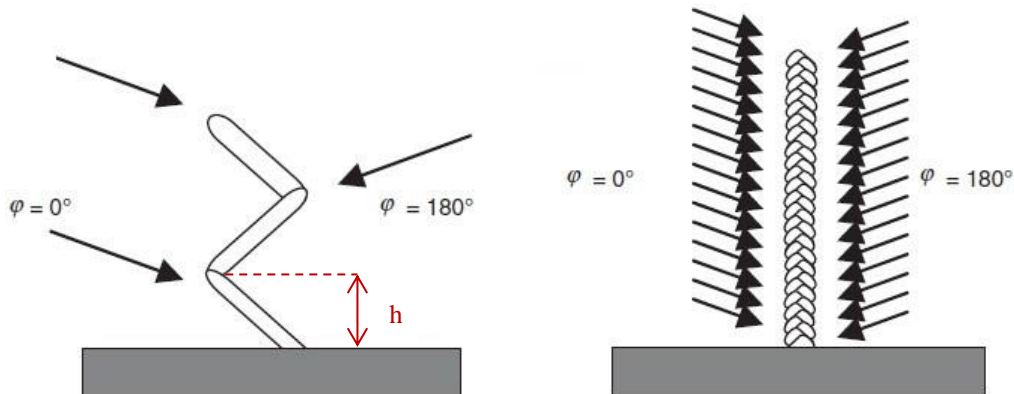
Garinimo kampu (OAD) technologijos pagrindinis minusas yra tas, kad dėl pakreipto padėklo garinimo metu, atsiranda fizinio dangos storio netolygumas. Ant padėklo srities, esančios arčiau garinimo šaltinio, užgarinama daugiau medžiagos. Ši problema išsprendžiama SBD (angl. Serial Bi-Deposition) technologija, kur padėklas periodiškai apskukamas 180 laipsnių kampu aplink paviršiaus normalę. Šia metodika suformuotos dangos vidinė struktūra – ševroninė (žr. 6 pav).



6 pav. Ševroninė dangos struktūra

SBD technologija suformuotos dangos pasižymi ne tik didesniu tolygumu, bet ir didesniu optiniu aktyvumu nei OAD suformuotos koloninės struktūros. Kaip žinoma garinimo kampu (OAD) technologija suformuotos dangos pasižymi 0.04 – 0.07 lūžio rodiklių skirtumu

skirtingomis kryptimis. Toks anizotropiškumas yra didesnis nei daugumos natūraliųjų anizotropinių medžiagų, randamų gamtoje, tačiau gali būti dar padidinamas parenkant tinkamus garinimo parametrus. Kaip ir paprasta koloninė struktūra, ševroninė struktūra pasižymi dvejopu medžiagos lūžio rodikliu. Šis reiškinys atsiranda dėl skirtingo efektyvaus lūžio rodiklio kolonų augimo kryptimi ir statmenoje šioms kolonomis plokštumoje. Priklausomai nuo ševroninės struktūros aukščio, tankumo bei nuo garinimo parametrų, gali būti pasiektas dvigubai didesnis fazės vėlinimas ir lūžio rodiklių skirtumas naudojant SBD technologiją, o ne standartinį garinimą kampu OAD [5, 13, 14].



7 pav. SBD technologija suformuotų dangų struktūros: kairėje – kolonos aukštis daug didesnis nei stulpelio plotis, dešinėje – stulpelio aukštis mažesnis nei kolonos plotis (φ nurodo kampą aplink bandinio plokštumos normalę) [15]

Garinimo kampu technologijoje daug įtakos optiniam aktyvumui turi garinimo kampas ir didžiausias anizotropiškumas pasiekiamas parenkant garinimo kampą artimą 70 laipsnių. Nustačius optimalų garinimo kampą ir kolonos aukštį h (žr. 7 pav.) optinis aktyvumas gali būti dar labiau padidintas. Garinant SBD metodika ir parenkant bandinio apsisukimo aplink savo paviršiaus normalę laikus tokius, kad kolonos aukštis būtų mažesnis nei kolonos plotis, formuojasi ne pasviros, o statmenos padėklui kolonos. Žiūrint iš viršaus kiekviena kolona yra elipsės formos dėl ko padidėja lūžio rodiklių skirtumas šėšėliavimo ir jam statmena kryptimis. Iš atliktų tyrimų buvo nustatyta, kad tuomet, kai kolonos aukštis h didesnis nei 20 nm, danga pasižymi optinėmis charakteristikomis kaip OAD metodu suformuotos dangos. Jei h mažiau nei 20 nm, optinis aktyvumas stipriai išauga ir pasiekia maksimalias reikšmes, kai h ne didesnis nei 5 nm [15].

Sudėtingesnių 3D struktūrų formavime plonuose sluoksniuose šiuo metu dominuoja optinė ir elektronų pluošto litografija. Didelis šių metodų minusas yra tai, kad šios technologijos yra labai brangios, procesai trunka ilgai ir realizuojami tik medžiagose, kurias galima ėsdinti. Puiki alternatyva šioms trimačių struktūrų kūrimui dangose yra garinimo kampu technologija. Ji pranašesnė už ankščiau išvardintus metodus tuo, kad trimatės struktūros neėsdinamos, o formuojamos proceso metu. SBD proceso metu atitinkamai parenkant garinimo kampą, sukiojimo aplink padėklo paviršiaus normalę kampus bei dažnumą, galima formuoti labai

sudėtingas trimates struktūras – statmenas padėklui spirales, sraigto formos struktūras ir kt. Ši technologija pirmąją prieš litografijas ne tik tuo, kad procesas yra greitas, bet ir tuo, kad struktūros gali būti formuojamos iš daug įvairių medžiagų, iš kurių formuojami standartiniai ploni sluoksniai garinimo ar dulkinimo technologijomis [16].

1.3. Elektromagnetinės spinduliuotės sąveika su medžiaga

1.3.1. Medžiagos optinių charakteristikų nustatymas

Lūžio rodiklis n ir sugerties koeficientas k – medžiagos optinės charakteristikos, kurios tiesiogiai siejasi su kompleksine dielektrine funkcija $\varepsilon(\omega)$:

$$n(\omega) + ik(\omega) = \sqrt{\varepsilon(\omega)} = \hat{n}(\omega); \quad (3)$$

čia $\hat{n}(\omega)$ vadinamas kompleksiniu lūžio rodikliu, i – menamasis vienetas. Dielektrinės funkcijos ε , kaip ir optinių konstantų priklausomybė nuo dažnio ω vadinama dispersija. Tik vakuume šviesos greitis nepriklauso nuo dažnio (arba bangos ilgio). Dielektrinė konstanta apibūdina medžiagos elektrinį poliariziškumą ir sugerties savybes. Lūžio rodiklis bei sugerties koeficientas gali kisti priklausomi nuo medžiagos savybių. Tai priklauso nuo medžiagos struktūrinių parametrų – tankio, atomų išsidėstymo, stochiometrijos.

Modeliuojant optinių dangų charakteristikas dažnai pasirenkama zona, kur pralaidumas naudojamai elektromagnetinei spinduliuotei yra didžiausias. Tuomet sugertis yra minimali. Lūžio rodiklio modeliavimui, kai sugerties galima nepaisyti, naudojama Sellmeier'io formulė[17]:

$$n^2(\lambda) \approx 1 + \frac{a_1\lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_1^2} + \frac{a_2\lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_2^2} + \frac{a_3\lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_3^2}; \quad (4)$$

čia λ – bangos ilgis, $a_1, a_2, a_3, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ – koeficientai, gaunami derinant (4) formulės išraišką su eksperimentiniais duomenimis naudojant mažiausių kvadratų principo algoritmus.

Optinių charakteristikų nustatymui taip pat dažnai naudojama Cauchy dispersijos formulė:

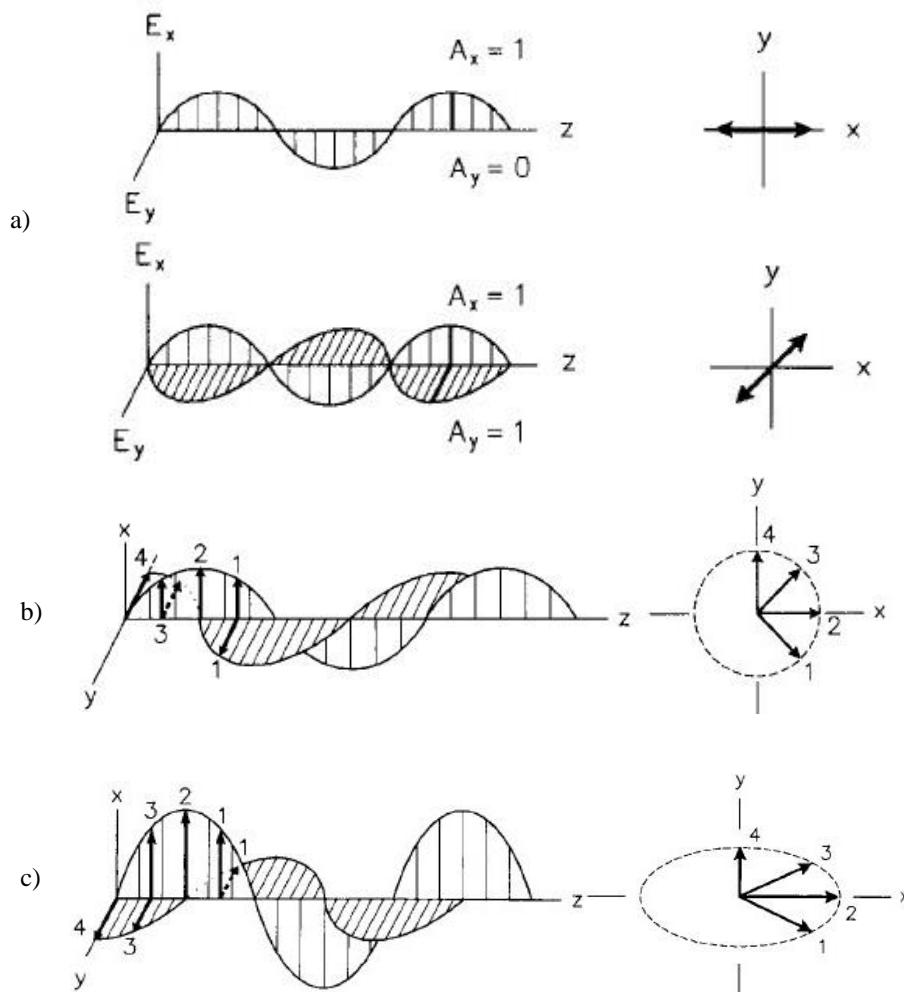
$$n(\lambda) = A + \frac{B}{\lambda^2} + \frac{C}{\lambda^4}; \quad (5)$$

čia A, B ir C yra koeficientai, gaunami iš žinomo pralaidumo ar atspindžio spektro .

Cauchy formulė yra šiek tiek paprastesnės išraiškos nei Sellmeier'io, tačiau vis dar tinka daugumos medžiagų optinių charakteristikų nustatymui regimojo spektro diapazone, jei nėra šviesos sugerties. Tačiau norit tiksliai nustatyti medžiagos lūžio rodiklį bei sugerties koeficientą, patartina naudoti Sellmeier'io formulę, kuri yra tikslesnė [18].

1.3.2. Šviesos poliarizacija

Šviesos poliarizacija – tai elektromagnetinės bangos savybė, kuri nusako elektrinio lauko virpesių orientaciją plokštumoje, statmenoje sklidimo kryptčiai. Dipoliai spinduliuoja poliarizuotą šviesą, tačiau jų orientacija chaotiška, todėl gamtoje šviesa atrodo nepoliarizuota – elektrinis laukas visomis kryptimis statistiškai vienodas. Pastatę optiniame kelyje poliarizatorių, mes praleidžiame tik viena kryptimi orientuotą spinduliuavimą, visi kiti sulaikomi ir taip išskiriama poliarizuota šviesa. Yra kelios šviesos poliarizacijos rūšys – tiesinė, eliptinė bei apskritiminė poliarizacijos (8 pav.).



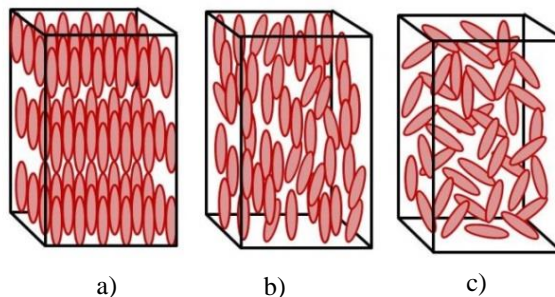
8 pav. Šviesos poliarizacijos rūšys: a – tiesiškai poliarizuota šviesa, b – apskritimiškai poliarizuota šviesa, c – eliptiškai poliarizuota šviesa [19]

Jei atstojamasis elektrinio lauko vektorius statmenoje plokštumoje jo sklidimo kryptčiai brėžia tiesę – tokia šviesa vadinama tiesiškai poliarizuota (8 pav. a). Priklausomai nuo elektrinio lauko dedamųjų x ir y plokštumose intensyvumo, tiesinės poliarizacijos kryptis gali būti skirtinga, tačiau elektrinio lauko E_x ir E_y fazės visada sutampa. Jei tiesiškai poliarizuotos šviesos vienos iš dedamųjų fazė bus užvėlinta 90 laipsnių arba 270 laipsnių, o E_x ir E_y amplitudės

vienodos, šviesa taps apskritimiškai poliarizuota (8 pav. b). Priklausomai nuo to, kiek laipsnių pasislinks viena iš elektrinio vektoriaus dedamųjų, apskritiminė poliarizacija gali būti kairinė arba dešininė. Tuo atveju, jei fazės vėlinimas nelygus nei 90 laipsnių, nei 270 laipsnių arba E_x ir E_y amplitudės skiriasi – šviesa tampa eliptiškai poliarizuota (8 pav. c). Tokia poliarizacija taip pat gali būti kairinė arba dešininė [19, 20].

1.3.3. Dvejopas lūžio rodiklis kristaliniuose ir amorfiniuose sluoksniuose

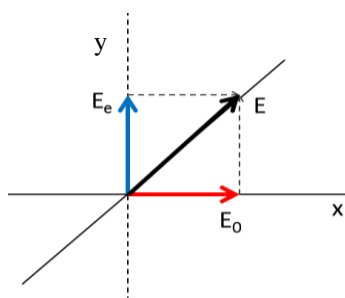
Medžiagos, kurių savybės priklauso nuo krypties vadinamos anizotropinėmis medžiagomis. Anizotropija gali būti įvairaus pobūdžio savybių – optinių, mechaninių, elektrinių ir t.t. Yra daug medžiagų gamtoje, kurios pasižymi natūralia anizotropija – tai įvairūs kristalai, kurie būna kietieji arba skystieji. Kristalų anizotropiškumą lemia tvarkingai visomis kryptimis išsidėsčiusios dalelės (9 pav. a).



9 pav. Medžiagos dalelių išsidėstymas: a – kietuosiuose kristaluose, b – skystuosiuose kristaluose, c – skysčiuose

Skystieji kristalai yra tarpinė būsena tarp kietos kristalinės medžiagos ir skystos medžiagos. Jų struktūros dalelės yra išsidėsčiusios tvarkingai, tačiau pati medžiaga yra skystos būsenos (9 pav. b). Skysčiuose dalelės išsidėsčiusios chaotiškai (9 pav. c).

Dėl kristaluose esančios tvarkingos kristalinės struktūros, tačiau skirtingos priklausomai nuo krypties, šios medžiagos yra anizotropinės. Šviesai pereinant per elementą, padarytą iš anizotropinės medžiagos svarbi optinė anizotropija. Jei tiesiškai poliarizuotą elektromagnetinę



10 pav. Paprastas E_o ir nepaprastasis E_e spinduliai anizotropinėje terpėje

bangą išskaidytume į E_o ir E_e dedamąsias (10 pav.), pamatytume, kad pereinant per kristalą, dedamosios sklinda skirtingais greičiais, todėl stebimas fazės vėlinimas. Ta kryptis, kuria medžiagos lūžio rodiklis yra mažesnis, vadinama greitąja (arba nepaprastąja) ašimi. Tai ašiai statmena, kurios lūžio rodiklis didesnis - lėtoji (arba paprastoji) ašis. Kadangi viena kryptimi šviesa sklinda greičiau, todėl atsiranda fazės vėlinimas, kuris keičia šviesos poliarizaciją [21].

1.3.4. Lazerinės spinduliuotės pažaidos slenkstis

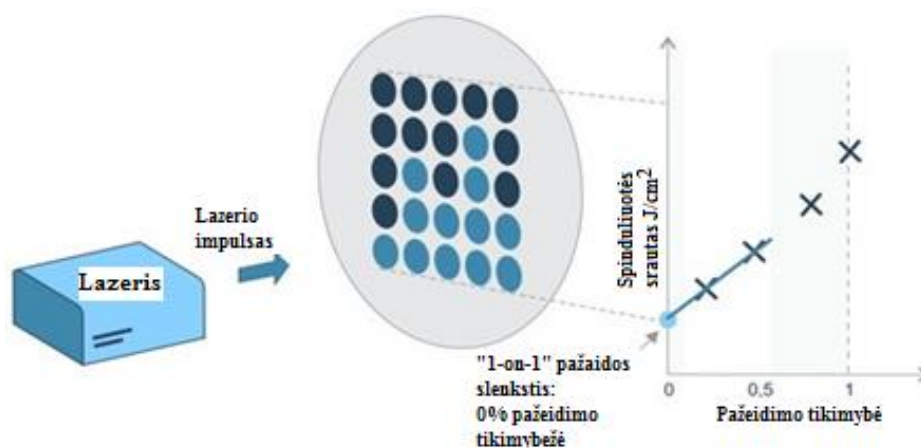
1962 metais, dar nespėjus praeiti nei vieneriems metams nuo to laiko, kai buvo sukurtas rubino lazeris, mokslininkai paskelbė, kas labiausiai apriboja šio lazerio veikimo trukmę. Didžiausia problema buvo ta, kad generuojama lazerio spinduliuotė išdegina skyles ant rubino padengtuose sidabro sluoksniuose – tai pirmieji užfiksuoti lazerio sukelti pažeidimai [22]. Šiuolaikinėse lazerinėse sistemose, kur generuojami itin didelės galios šviesos impulsai, optinių elementų atsparumas lazerio spinduliuotei kritiškai svarbus. Tokiose sistemose metalinius veidrodžius pakeitė dielektriniai veidrodžiai, kurių pažaidos slenkstis daug didesnis nei metalų.

Lazerinės spinduliuotės pažaidos slenkstis LIDT (angl. Laser Induced Damage Threshold) - tai fizikinė optinio elemento charakteristika, kuri nurodo maksimalią spinduliuotės galią, kuri dar nesukelia negrįžtamų medžiagos struktūros pokyčių. LIDT dažnai išreiškiamas vienetais, kurie apibūdina lazerio spinduliuotės srautą per ploto vienetą (J/cm^2) arba šviesos intensyvumą ploto vienetu (W/cm^2).

Labiausiai spinduliuotei pralaidžioms medžiagoms (pavyzdžiui, lydytas kvarcas, deimantas, safyras ir kt.) lazerinės spinduliuotės pažeidimai atsiranda dėl terminės lazerio impulso absorbcijos, kai spinduliuotė yra nuolatinės veikos. Tokie pažeidimai atsiranda dėl medžiagos išsilydymo ar garavimo. Tačiau, jei kalbama apie trumpus impulsus, atsiranda kitokie medžiagos pažaidos mechanizmai. Jei šviesos impulso trukmė yra 10^{-8} s – 10^{-10} s, pažeidimus sukelia elektrinio lauko pasiskirstymas medžiagoje, terminiai reiškiniai. Esant impulso trukmei 10^{-10} s – 10^{-13} s – atsiranda griūtinė jonizacija, kuri pažeidžia elemento medžiagą. Jei impulso trukmė dar mažesnė nei 10^{-13} s, pažeidimus pradeda indukuoti daugiafotonė absorbcija [23, 24].

Optinių elementų lazerinės spinduliuotės pažaidos slenkstis nustatomas testiniais matavimais. Šiuo metu naudojamos bei ISO standartais pripažintos testavimo metodikos yra „1-on-1“ ir „S-on-1“.

„1-on-1“ metodika yra viena paprasčiausių LIDT nustatymo metodikų. Jos metu



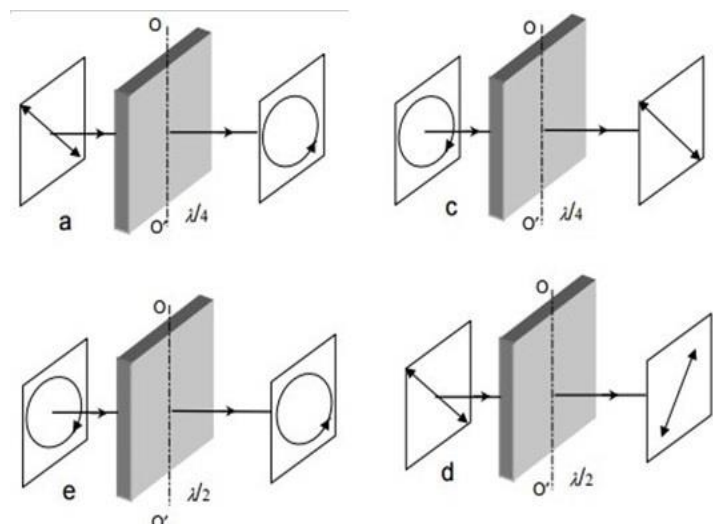
11 pav. Lazerinės spinduliuotės pažaidos slenkščio nustatymo „1-on-1“ metodikos schema [23]

analizuojamo paviršiaus plotas yra suskirstomas į atskirų plotelių matricą (žr. 11 pav.). Kiekvienas matricos taškas apšviečiamas atskirai vieną kartą konkretaus galingumo lazerio šviesos impulsu ir fiksuojama ar tas taškas pasižeidė ar ne. Kai vienoje eilutėje esantys visi taškai apšviesti, skaičiuojama medžiagos pažeidimo tikimybė. Po to, lazerio spinduliuotės galingumas padidinamas ir apšviečiama sekanti matricos eilutė. Lazerio spinduliuotės galingumas didinamas tol, kol kartojant procedūrą matricos eilutėje esantys visi ploteliai pasižeidžia – tikimybė pažeisti bandinį lygi 100 %. LIDT vertė nustatoma modeliuojant gautą medžiagos pažeidimo tikimybės priklausomybę nuo lazerio spindulio intensyvumo.

„S-on-1“ metodika iki šiol yra viena iš tiksliausių LIDT nustatymo būdų. Jos metu nustatoma ne tik pažaidos slenkstis, tačiau kartu įvertinamas ir elemento senėjimas. Šio testavimo metu elemento paviršiaus plotas taip pat suskirstomas į matricą atskirų plotelių. Kiekvienas matricos elementas paveikiamas serija konkretaus dydžio lazerio impulsų, tarp kurių nustatytas pastovus laiko tarpas. Impulsų skaičius gali siekti 10 000 impulsų kiekvienam taškui. Tačiau, jei medžiaga pasižeidžia viduryje impulsų serijos, lazerio apšvita sustabdoma, kad nebūtų dar labiau pažeistas bandinys. LIDT vertė nustatoma analizuojant medžiagos pažeidimo tikimybės priklausomybę nuo lazerio apšvitos impulsų skaičiaus, esant konkrečiam šviesos intensyvumui [25].

1.4. Fazinės plokštelės

Fazinė plokštelė – tai optinis elementas, kuris skirtas pro jį prasklindančios šviesos poliarizacijos keitimui. Šio elemento veikimo principas paremtas medžiagos, iš kurios jis pagamintas, dvejopu lūžio rodikliu skirtingomis kryptimis. Šviesai sklindant per fazinę plokštelę atsiranda fazės skirtumas dėl kurio keičiasi šviesos poliarizacija. Plačiausiai naudojamos dviejų tipų fazinės plokštelės – ketvirčio ir pusės bangos ilgio plokštelės (12 pav.). Jos taip vadinamos



12 pav. Ketvirčio bangos ilgio ir pusės bangos ilgio fazinės plokštelės [21]

dėl to, kad šviesai perėjus per šį elementą, jos fazė užvėlinama atitinkamai ketvirtį bangos (90 laipsnių) arba pusę bangos ilgio (180 laipsnių) dėl ko keičiasi šviesos poliarizacijos rūšis arba kryptis.

Norint pagaminti fazinę plokštelę, svarbu tinkamai pasirinkti anizotropinę medžiagą ir žinoti koks yra jos lūžio rodiklių skirtumas Δn skirtingomis kryptimis. Fazės vėlinimą δ galima apskaičiuoti formule :

$$\delta = \frac{2\pi D \Delta n}{\lambda}; \quad (6)$$

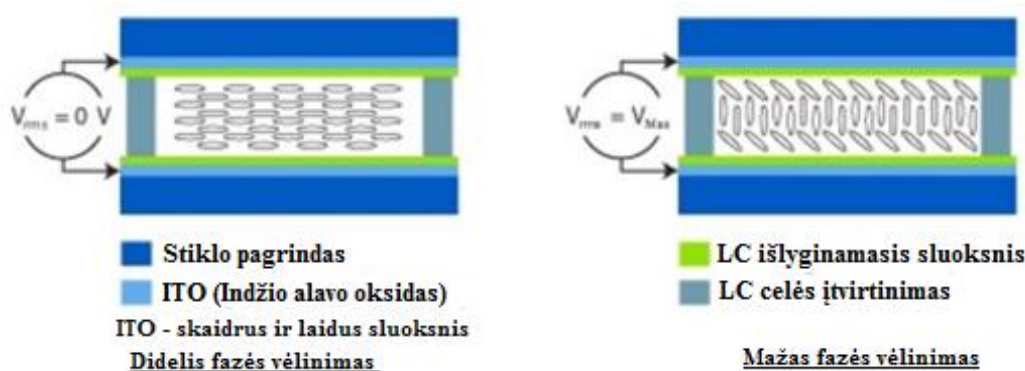
čia D – dangos storis, Δn – medžiagos lūžio rodiklių skirtumas x ir y kryptimis, λ – bangos ilgis.

Paprastos fazinės plokštelės, pagamintos iš kristalų, tinka naudoti tik konkrečiam bangos ilgiui, tačiau kitomis technologijomis galima gaminti achromatinės fazinės plokštelės, kurios veikia kaip pusės ar ketvirčio bangos ilgio fazinės plokštelės plačiam bangų diapazonui.

1.4.1. Kietųjų ir skystųjų kristalų fazinės plokštelės

Vienos iš populiariausių fazinių plokštelių yra kietųjų kristalų fazinės plokštelės. Jos išpjaunamos iš natūralia anizotropija pasižyminčio kristalo, kruopščiai parenkant tinkamą storį bei optinės ašies orientaciją. Dažniausiai tam naudojami kristalinio kvarco, kalcito, žėručio, magnio fluorida kristalai. Gamyboje yra labai sudėtinga pagaminti optinį elementą iš kristalo, nes tai yra kieta, trapi medžiaga, o fazinei plokštei reikia labai plono sluoksnio medžiagos. Todėl dažnai daromos ne pirmos eilės, o aukštesnių eilių fazinės plokštelės. Tai reiškia, jog pereinant per kristalą šviesa kelis kartus (ar net kelias dešimtis) pakeičia poliarizacijos būseną, o prasklidusios per elementą galutiniame rezultate yra norimos poliarizacijos. Tačiau dėl to atsiranda šviesos nuostolių [26].

Ne tik kietieji, tačiau ir skystieji kristalai gali būti panaudoti fazinių plokštelių gamyboje. Tokių optinių elementų schema pateikta 13 pav. Nematiniai skystieji kristalai patalpinami tarp dviejų



13 pav. Skystųjų kristalų fazinės plokštelės [27]

borosilikatinio stiklo ar lydyto kvarco plokštelių, ant kurių vidinių paviršių yra suformuoti skaidrūs elektrodai. Ant elektrodų užneštas fotorezisto plonas sluoksnis, kuris tiesiogiai kontaktuoja su skystaisiais kristalais. Patalpintos elektriniame lauke skystųjų kristalų dalelės išsirikiuoja terpėje taip, kad pasireiškia anizotropija. Priklausomai nuo elektrinio lauko didumo, keičiasi dalelių išsidėstymas, o kartu su juo keičiasi ir fazės vėlinimas. Todėl didžiausias tokių fazinių plokštelių privalumas yra tai, jog priklausomai nuo keičiamo elektrinio signalo, jos gali būti pritaikomos prie naudojamos bangos ilgio šviesos. Dėl to vienas toks elementas gali pakeisti daug kietųjų kristalų fazinių plokštelių, kur kiekvienas elementas skirtas tik vienam konkrečiam bangos ilgiui. Tačiau dėl savo sudėtingos konstrukcijos, kur reikalingas išorinis energijos šaltinis elektriniam laukui generuoti, skystųjų kristalų fazinės plokštelės užima daug vietos, todėl yra nepatogios naudoti kompaktiškose sistemose [28, 29].

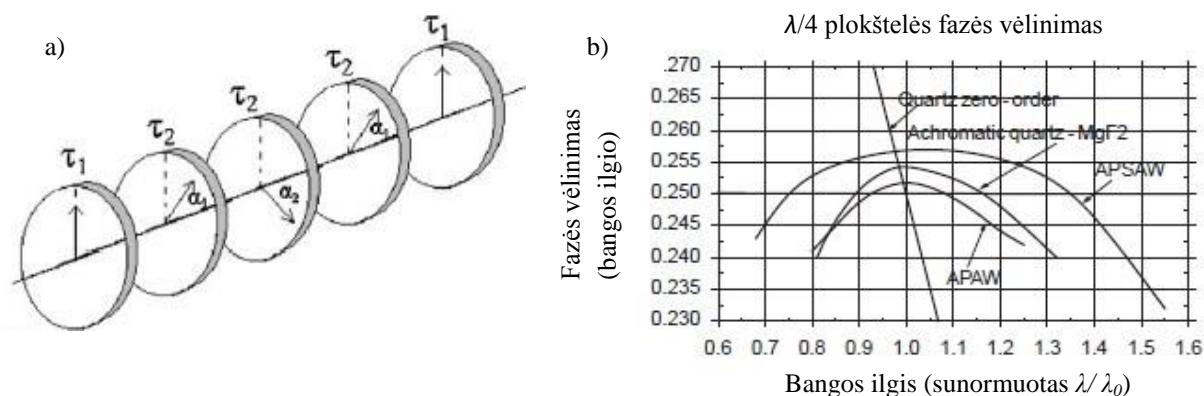
1.4.2. Polimerinės fazinės plokštelės

Polimerinės fazinės plokštelės yra plačiai naudojamos dėl savo žemos savikainos ir nesudėtingos gamybos lyginant su kristalinėmis plokštelėmis. Pagrindinė tokių optinių elementų konstrukcija – anizotropinis polimero sluoksnis patalpinamas tarp dviejų stiklo plokštelių. Kadangi polimerų molekulės yra pailgos ir esant jų tvarkingam išsidėstymui – medžiaga pasižymi dvejopu lūžio rodikliu skirtingomis kryptimis. Priklausomai nuo polimero storio gali būti gaminamos nulinės-eilės fazinės plokštelės (kai fazės vėlinimas mažesnis nei 2π) arba aukštesnių eilių, pasirinktai monochromatinei bangai. Paėmus PMMA (polymetilmthacrylate) sluoksnį ir jį mechaniškai tempiant, polimero molekulės pradeda orientuotis tempimo kryptimi, sukurdamos medžiagoje anizotropiją. Priklausomai nuo to, kiek bus tempiamas polimeras, priklauso jo optinis aktyvumas per jį pereinant šviesai.

Tiksliose matavimo sistemose, kur naudojami keičiamo bangos ilgio lazeriai ar spektroskopinėse sistemose, reikalingi optiniai elementai ne vienam bangos ilgiui, o platesniam bangos ilgių ruožui. Tokios fazinės plokštelės, kurios pritaikytos tam tikram bangų diapazonui vadinamos achromatinėmis. Tačiau tokiose sistemose neįmanoma naudoti kelių skirtingiems bangų ilgiams pritaikytų kristalinių ar polimerinių fazinių plokštelių, nes jos labai jautrios aplinkos temperatūrai, bangos ilgiui bei šviesos kritimo kampui. Dėl to buvo sugalvota sudėtingesnė fazinių plokštelių konstrukcija, kur vienas elementas gali būti naudojamas kaip vienos rūšies fazinė plokštelė keliems bangos ilgiams.

Yra keli būdai kaip galima pagaminti achromatinės fazinės plokšteles. Vienas jų, kai kombinuojamos dvi ar daugiau fazinių plokštelių, pagamintų iš skirtingų medžiagų (pavyzdžiui, kvarco ir magnio fluorida). Tačiau tokio elemento efektyvumui daug įtakos turi temperatūra ir kampas, ties kurio krenta šviesa. Kitas achromatinių fazinių plokštelių gamybos būdas, tai derinti

tos pačios medžiagos kelis sluoksnius, pakreipiant jų optinės ašies orientaciją. 14 pav. pateikta achromatinės fazinės plokštelės, kuri pagaminta iš atskirų PMMA sluoksnių, principinė schema.



14 pav. Super-achromatinēs polimerinēs fazinēs plokštelēs APSAW schema (a), skirtingu faziņu plokštelu fāzēs vēlinimo priklausomybēs nuo bangos ilgio (b) [30]

Taip pat dešinėje pateiktas grafikas, kuriame palyginami keturių skirtingu faziņu plokštelu vēlinimai bei jų priklausomybēs nuo bangos ilgio [30]. Iš 14 pav.b pateikto grafiko matome, kad super-achromatinē fazinē plotkelē, pagaminta tik iš vienos medžiagos, šiuo atveju PMMA, pasižymi mažesne priklausomybe nuo bangos ilgio nei tos, kurios pagamintos iš kvarco ir MgF_2 kristalu. Optiniai elementai pagaminti iš polimeru, nors ir pasižymi geromis optinėmis charakteristikomis, tačiau jie yra jautrūs išoriniams veiksniams, pvz., temperatūrai, drėgmei ir kt.

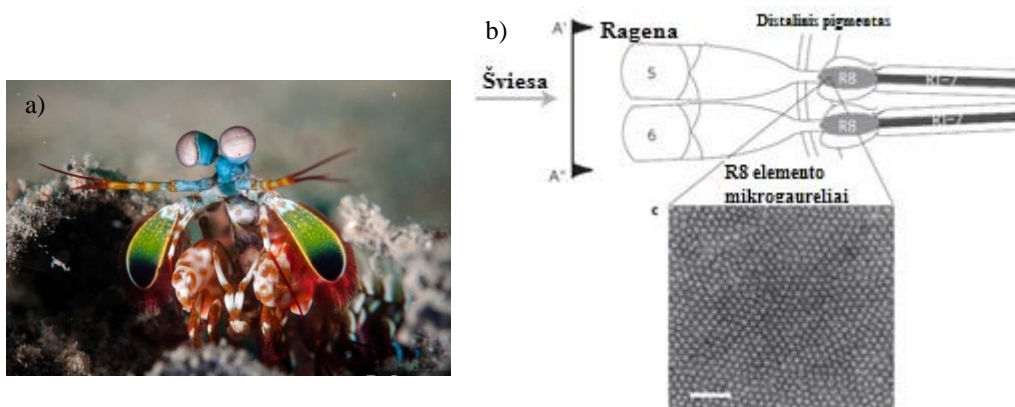
1.4.3. Garinimo technologija suformuotos fazinēs plokštelēs

Fazinēs plokštelēs pagamintos iš kristalo pasižymi ilgaamžiškumu, tačiau gamybos proceso kaina yra labai didelē, o norint padaryti kokybišką elementą su tikslu fāzēs vēlinimo pasiskirstymu per visą plokštelę atsiranda matmenų apribojimas. Kita faziņu plokštelu rūšis – polimerinēs plokštelēs, kurios yra neilgaamžės, nes pasižymi mažu atsparumu šilumos pokyčiams, ypač naudojant jas UV spinduliuotēs sričiai. Nors polimerines plokšteles galima formuoti ir labai dideliu matmenų, tačiau jos nepasižymi tikslumu fāzēs vēlinimui. Visu šių išvardintu trūkumu neturi garinimo technologija suformuotos fazinēs plokštelēs.

Garinimo elektronu pluoštu ar varžiniu garinimu standartiškai formuojami sluoksniai yra izotropiniai, tačiau garinimo kampu technologija formuojamos dangos pasižymi dvejopu medžiagos lūžio rodikliu skirtingomis kryptimis. Dėl formuojamos medžiagos anizotropiškumo ši technologija gali būti pritaikoma ir faziņu plokštelu gamybai. Vienas šios technologijos privalumu – nėra elemento dydžio ribojimo, galima formuoti didesnius nei keliu centimetru diametro elementus. Taip pat galimas platus naudojamu medžiagu pasirinkimas, galima garinti

įvairius metalų oksidus, fluoridus. Dėl šių savybių, garinimo būdu suformuotos fazinės plokštelės gali konkuruoti su kitomis jų rūšimis [31].

Dažnai atsiranda poreikis fazinių plokštelių, kurios būtų tinkamos ne vienam konkrečiam bangos ilgiui, tačiau plačiam naudojamoms spinduliuotės ruožui. Tokios fazinės plokštelės vadinamos achromatinėmis, o gamtoje jos gali būti randamos kai kurių gyvūnų natūralioje akių sandaroje. 2009 metais Robertsas pademonstravo, kad vėžiagyviai burnakojai gali atskirti dešininę ir kairinę apskritimines šviesos poliarizacijas kaip skirtingus signalus sklindančius nuo vyriškos ar moteriškos lyties individų. Vėžiagyvis burnakojis (lot. Stomatopoda, angl. Mantis shrimp) ir šios rūšies individo akių sandara parodyta 15 pav. Dėl R8 ląstelėse esančių pigmentų, ji yra ideali achromatinė plokštelė skirta regimajam šviesos diapazonui [33].



15 pav. Vėžiagyvis burnakojis (a) [32], burnakojos akies sandara (b) [33]

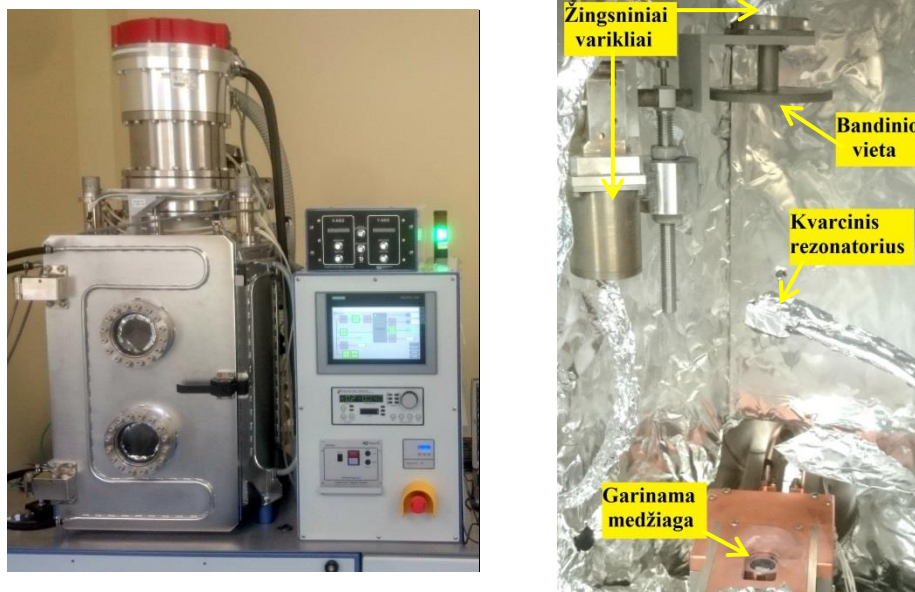
Teoriškai pademonstruota, kad garinimo kampu technologija įmanoma formuoti achromatinės fazinės plokšteles. Norint pagaminti tokią plokštelę reikia įvairių sluoksnių plonų dangų, per kuriuos perėjusi šviesa būtų užvėlinama vienodai kiekvienam bangos ilgiui. Achromatinė fazinė plokštelė skirta regimajam šviesos diapazonui 400 nm – 700 nm bangos ilgių ruože buvo suformuota 180° fazės vėlinimui, tačiau pasižymi iki 24,38° laipsnių fazės vėlinimo svyravimu skirtingiems bangos ilgiams [34]. Teoriniais skaičiavimais parodyta, jog teisingai parenkant garinamų dangų parametrus, galima suformuoti tokias achromatinės fazinės plokšteles, kurios pasižymi mažesniu nei 5° fazės vėlinimo nuokrypiu regimajame šviesos diapazone [35, 36].

2. TYRIMO METODAI IR EKSPERIMENTINĖ DALIS

2.1. Naudota įranga

2.1.1. Garinimo elektronų spinduliu vakuuminė sistema

Ekspimento metu TiO_2 ir Al_2O_3 medžiagų sluoksniai buvo formuojami ant padėklų naudojant vakuuminę garinimo elektronų spinduliu sistemą „SIDRABE“ (16 pav.). Pradiniam vakuumui kameroje sudaryti naudojamas rotacinis siurblys, kuris kamerą atsiurbia iki darbinio slėgio (8 Pa), o pasiekti aukštam vakuumui naudojamas turbo-molekulinis siurblys, kuris įmontuotas virš kameros.



16 pav. Vakuuminė garinimo sistema „SIDRABE“

Šioje vakuuminėje kameroje įmontuota garinimo elektronų pluoštu sistema bei varžinis garintuvas. Ekspimentų metu buvo nusodinamos TiO_2 ir Al_2O_3 dangos garinant elektronų pluoštu, SBD metodika. Elektronų pluoštas medžiagos kaitinimui sudaromas naudojant volframinį katodą, kuris šiluminiu būdu emituoja elektronus. Naudojant aukštą įtampą (10 kV) elektronų srautas įgreitinamas ir nukreipiamas į medžiagą. Kadangi katodas įmontuotas po tigliu, tam kad nebūtų užteršiama nusodinama danga katodo dalelėmis, elektronų srautas turi būti užlenkiamas 270 laipsnių kampu link garinamos medžiagos. Nusodinamų dangų storiai nustatomi naudojant kvarcinio rezonatoriaus sistemą, kuri įmontuota virš elektronų patrankos. Kvarcinis rezonatorius ne tik parodo užgaravusios medžiagos sluoksnio storį garavimo metu, tačiau matuoja ir nusodinamos medžiagos ant padėklų greitį (matavimo tikslumas – 0,1 Å/s). Šio rezonatoriaus veikimo principas pagrįstas kvarcinio kristalo mikrobalsu. Proceso metu kvarcinis rezonatorius yra žadinamas tam tikru rezonansiniu signalu, kuris keičiasi dėl

užgaravusios medžiagos masės. Tiksliau, rezonansinės smailės vieta slenkasi į mažesniųjų dažnių pusę. Sistemoje naudojamų kvarcinių rezonatorių darbinis dažnio intervalas 6 – 5 MHz.

Kameroje bandiniai įtvirtinami laikiklyje, kurio pozicija keičiama naudojant du žingsninius variklius. Vienas variklis keičia χ kampą tarp bandinio paviršiaus normalės ir garinamos medžiagos srauto krypties, kitas α – kampą aplink bandinio paviršiaus normalę. Atstumas nuo garinamos medžiagos iki padėklų – 30 cm. Proceso metu buvo keičiamas garinimo kampas bei periodiškai keičiama bandinio padėtis 180° kampu aplink bandinio paviršiaus normalę.

2.1.2. Elipsometras

Elipsometre naudojamos šviesos poliarizacija – eliptinė. Jos elektrinio lauko amplitudės galima išskirti į x ir y dedamąsias. Suminio elektrinio lauko intensyvumo vektoriaus priklausomybė šviesos sklidimo kryptimi nuo laiko gali būti aprašyta naudojantis kompleksine forma:

$$\vec{E}(t) = \begin{bmatrix} E_x(t) \\ E_y(t) \end{bmatrix} = Re \left\{ \begin{bmatrix} X e^{i\Delta} \\ Y \end{bmatrix} e^{i\omega(t-t_0)} \right\}; \quad (7)$$

čia ω dažnis, Δ - fazių skirtumas. Iš formulės matyti, kad elektrinio lauko brėžiamos elipsės forma priklauso nuo fazių skirtumo ir amplitudžių santykio. Amplitudžių santykis gali būti išreikštas kampu ψ . Taigi, (7) formulę galima išreikšti *Jones* vektoriais:

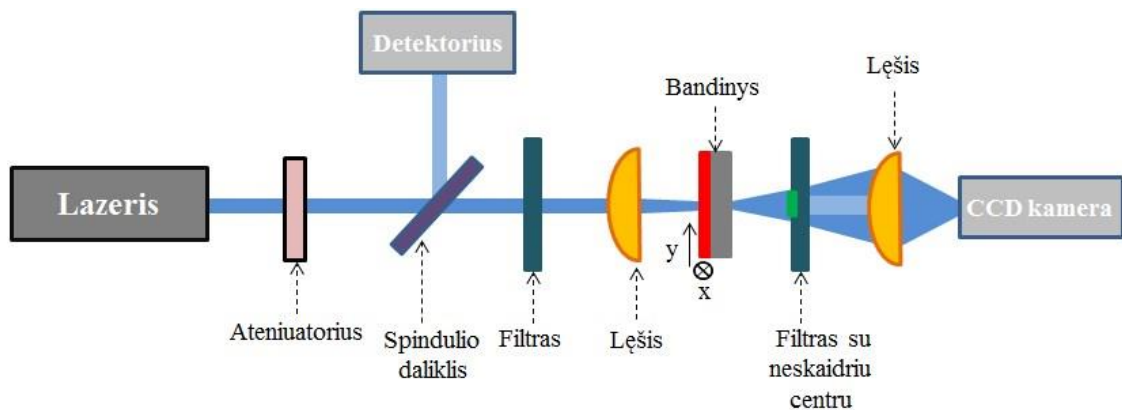
$$\begin{bmatrix} \sin \psi e^{i\Delta} \\ \cos \psi \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Šie vektoriai apibūdinami realiu kampu ψ ir Δ (Delta). Tai parametrai, kurie ir yra nustatomi matuojant elipsometru [37].

Suformuotų bandinių fazės vėlinimo nustatymui buvo naudotas elipsometras M—2000X-210 (*Wollam*), kuriame įmontuota 75 W galios Xe lempa, o matavimo diapazonas nuo 210 nm iki 1000 nm. Juo buvo išmatuota visų bandinių pralaidumo fazinė charakteristika Δ . Visi matavimai atlikti šviesai krentant statmenai į bandinio paviršių.

2.1.3. Lazerio spinduliuotės pažaidos slenkščio nustatymo stendas

Negrižtami vidiniai medžiagos struktūros pokyčiai, atsiradę dėl sąveikos su lazerio generuojama spinduliuote, vadinami lazeriniais dangos pažeidimais. Mažiausia energija, nuo kurios pasižeidžia danga – lazerio spinduliuotės pažaidos slenkstis LIDT. Įvertinti eksperimentų metu suformuotų dangų atsparumą lazerio spinduliuotei buvo naudota įvairių optinių elementų ir prietaisų stendas, kurio principinė schema parodyta 17 pav.



17 pav. Lazerinės spinduliuotės pažaidos slenksčio nustatymo stendo principinė schema

Sistemoje naudojamas lietuviškas įmonės „Ekspla“ lazeris, kurio emituojamos šviesos bangos ilgis 355 nm, spindulio diametras lygus 30 μm , o impulso trukmė – 3 ns. Lazerio šviesos pluoštas sklinda per atenuatorių, kuris keičia šviesos intensyvumą. Vėliau spindulys padalinamas spindulio dalikliu, kur žinoma dalis šviesos atsispindi nuo elemento ir patenka į detektorių, kuris nustato naudojamos spinduliuotės intensyvumą. Praėjusi šviesa pro spindulio daliklį pereina per filtrą, kad išvengti nereikalingų atspindžių, patenka į sferinį lęšį ir yra sufokusuojama į analizuojamą bandinį. Bandinio plote yra sudaroma atskirų plotelių matrica, kur kiekvieną elementą apšviečia nustatyto intensyvumo spinduliuotė („1-on-1“ metodika plačiau aprašyta 1.3.4. skyriuje). Jei analizuojamas bandinys nepasižeidžia, CCD kamera nedetektuoja jokie signalo, nes perskildęs per elementą spindulys yra blokuojamas filtro su neskaidriu centru. Tuo atveju, jei danga pasižeidžia, atsiradus pažeidimui, šviesa nuo jo yra išsklaidoma į visas puses, o dalis šviesos, sufokusuota lęšio, patenka į CCD kamerą. Taip kiekvienas plotelių matricos elementas yra tiriamas du kartus. Jei abu kartus nuo to pat taško CCD kamera detektuoja išsklaidytos šviesos signalą, tariama, kad toje vietoje danga pasižeidė. Galutiniam patvirtinimui, nuo kokio lazerio šviesos intensyvumo danga pasižeidžia, bandinys analizuojamas optiniu mikroskopu, kurio pagalba galima pamatyti visus taškus, kuriuose danga buvo pažeista.

2.1.4. Spektrofotometras

Spektrofotometrija – tai bandinio optinio pralaidumo ir atspindžio matavimo metodas infraraudonajame, ultravioletiniame ir matomos šviesos diapazonuose. Mūsų naudotame spektrofotometre įmontuoti šviesos šaltiniai – deuterio bei volframo hlogeninės lempos. Darbe naudotas spektrofotometras „PerkinElmer Lambda 950“ gali matuoti bandinių pralaidumą nuo 180 nm iki 2000 nm bangos ilgio šviesai.

Dalis bandinių buvo matuojami su skirtingos krypties poliarizacijomis P ir S – lygiagrečia ir statmena poliarizacija kritimo plokštumai. Į spektrofotometrą bandiniai buvo statomi taip, kad

P poliarizacijos kryptis sutaptų su suformuotos dangos šešėliavimo kryptimi, o *S* poliarizacija būtų jai statmena.

2.1.5. Interferometras

Interferometras – optinis prietaisas, kurio veikimas pagrįstas šviesos interferencijos principu. Interferometre „MarSurf FI 1040 Z“ įmontuotas lazeris, kuris spinduliuoja 632 nm bangos ilgio šviesą. Sugeneruotas lazerio spindulys pirmiausiai krenta į spindulį dalinančią pusiau skaidrią plokštelę. Dalis spindulio atsispindi ir sklinda link nejudamai įtvirtinto veidrodžio, kita dalis praeina per plokštelę ir sklinda link analizuojamo paviršiaus statmeno spinduliui. Abu spinduliai, vienas – atsispindėjęs nuo nejudančio veidrodžio, kitas – atsispindėjęs nuo analizuojamo bandinio paviršiaus, juda viena kryptimi ir interferuoja. Interferencinis vaizdas stebimas kompiuterio ekrane, kuris automatiškai apdorojamas programine įranga. Šiuo interferometru buvo nustatomi visų bandinių paviršiaus išsigaubimai prieš garinimą bei po garinimo, kur kiekvieno matavimo rezultatas pateikiamas 2D ir 3D paviršiaus nelygumų grafikų pavidalu su visa reikalinga informacija – vidutinėmis aukščio pasiskirstymo reikšmėmis, padėklo išsilenkimo reikšme tarp žemiausios ir aukščiausios bandinio paviršiaus vietos.

2.1.6. Profilometras

Profilometras – paviršiaus nelygumų, reljefo matuoklis. Šis mikroskopas naudojamas įvairių paviršių savybių tyrimui. Analizuoti galime įvairiausių medžiagų bandinius: metalų, plastikų, puslaidininkių, organinių, biologinių medžiagų paviršius. Suformuotų medžiagų topografinė paviršiaus analizė atliekama, naudojant profilometrą. Tyrimo metu nurodžius tiriamos atkarpos ilgį bei kontaktinę jėgą, adatėlė nuleidžiama ant bandinio ir braukiama išilgai dangos paviršiumi. Profilometras fiksuoja nedidelius paviršiaus nelygumus vertikalia ašimi priklausomai nuo padėties. Tokio tipo matuoklių matavimo ribos yra nuo kelių nanometrų iki 1 mm vertikaloje plokštumoje, o horizontali skiriamoji geba priklauso nuo skenavimo greičio. Matavimo metu generuojamas signalas paverčiamas ir konvertuojamas į skaitmeninį signalą, kuris analizuojamas ir pateikiamas kaip rezultatas. Mūsų naudojamas profilometras – „Veeco Dektak 150“.

2.2. Eksperimento eiga

Prieš pradėdant eksperimento garinimo procesus, didelis dėmesys buvo skiriamas naudojamų pagrindukų paviršiaus švarumui. Naudojami padėklai – lydyto kvarco padėkliukai (25,4 mm diametro, 1 mm storio). Visi padėklai buvo plaunami specialiame stiklų plovimo įrenginyje, prieš tai nuvalius jų paviršius spiritu. Stikliukai sudedami į specialius laikiklius ir



18 pav. Keturių sekcijų stiklų plovimo įrenginys– vonelėje nr.1 – šarminis tirpalas, 2 – vanduo, 3 – distiliuotas vanduo, 4 – džiovinimas IR spinduliais

dedami į įrenginį. Pirmojoje vonelėje (18 pav. pirma iš kairės) yra specialus šarminis tirpalas, kuriame įmerkiamas stikliukas yra veikiamas ultragarsu 5 min. Po to stikliukas automatiškai perkeliamas į antrąją vonelę su paprastu vandeniu, kur veikiamas 1 min ultragarsu ir 4 min skalaujamas. Trečioje vonelėje stikliukas nuplaunamas distiliuotame vandenyje ir perkeliamas į ketvirtąją vonelę, kurioje yra džiovinamas infraraudonaisiais spinduliais 5 min. Po nuplovimo stikliukai būna itin švarūs – nelieka plaušelių nuo vatos, valymo defektų, dulkių, kas daro įtaką defektų susidarymui dangoje.

Visi ploni sluoksniai buvo garinami vakuuminėje kameroje elektronų pluoštu. Norima garinti medžiaga patalpinama variniame tiglyje, kuris proceso metu yra aušinamas. Garinamos medžiagos nusodinimo greitis visų procesų metu – 3 \AA/s , vakuumas – $1,7 \cdot 10^{-3} \text{ Pa}$. Nusodinamos medžiagos oksidacijai užtikrinti procesų metu buvo naudojamas papildomas deguonies kiekis – 2 sccm (standartinių kubinių centimetrų per minutę, angl. standard cubic centimeters per minute). Apibendrintai garinimo parametrai, kurie buvo naudojami eksperimentuose, pateikti 1 lentelėje.

TiO ₂			Al ₂ O ₃		
Bandinio nr.	χ , laipsn.	τ , s	Bandinio nr.	χ , laipsn.	τ , s
1	0	5	1	0	5
2	30		2	30	
3	60		3	60	
4	70		4	70	
5	80		5	80	
6	85	5	6	70	3
7	70		7		5
8			10		
9			15		

1 lentelė. Procesų parametrai, kur χ – garinimo kampas tarp bandinio paviršiaus plokštumos ir garinamos medžiagos srauto, τ - apsisukimo aplink bandinio paviršiaus plokštumos normalę periodiškumo laikas

Pirmiesiems eksperimentams buvo pasirinkta medžiaga, kuri pasižymi aukščiausiu medžiagos lūžio rodikliu regimajame diapazone – TiO_2 . Atliekant eksperimentus su TiO_2 buvo užgarinti bandiniai skirtingais kampais $\chi = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 70^\circ, 80^\circ$ ir 85° naudojant SBD technologiją. Kita serija bandinių buvo užgarinta parinkus optimalų garinimo kampą ($\chi = 70^\circ$), tačiau keičiant 180° apsisukimo aplink bandinio paviršiaus plokštumos normalę periodiškumo laikus τ , kurie buvo lygūs 5 s, 10 s ir 15 s. Kiekvieno proceso metu buvo suformuotos 300 nm storio dangos. Užgarinti bandiniai buvo tyrinėjami elipsometru bei spektrofotometru.

Tyrimams dangų, skirtų ultravioletinei spinduliuotei, TiO_2 nebetinka, nes pasižymi didele UV srities šviesos sugertimi, dėl to buvo pasirinkta kita medžiaga – Al_2O_3 . Ji pasižymi didžiausiu lūžio rodikliu tarp medžiagų, kurios naudojamos UV optinių elementų gamyboje. Eksperimento metu SBD technologija buvo suformuotos Al_2O_3 dangos $0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 70^\circ$ ir 80° kampais. Kita serija bandinių buvo užgarinta esant vienodam garinimo kampui ($\chi = 70^\circ$), tačiau keičiant 180° apsisukimo aplink bandinio paviršiaus plokštumos normalę periodiškumo laikus τ . Buvo pasirinkti trys laikai – 3 s, 5 s ir 10 s. Visi bandiniai buvo matuojami su elipsometru ir spektrofotometru.

Eksperimento metu buvo nustatinėjamas dangos storio tolygumas per visą padėklo plotą. Tam buvo suformuotos dangos ant didelio diametro stiklų – 7 cm x 7 cm keičiant apsisukimo aplink bandinio paviršiaus plokštumos normalę laikus τ (3 s, 5 s ir 10 s). Po užgarinimo kiekvienas bandinys buvo matuojami spektrofotometru 15 skirtingų vietų. Iš gautų pralaidumo spektrų, naudojant „OptiLayer“ programą, buvo modeliuojami dangos storiai skirtingose vietose ir įvertinamas dangos storio tolygumas per padėklą.

Šiame darbe taip pat buvo tyrinėjama garinimo kampo įtaka suformuotos dangos įtempiams. Bandinių įtempiai prieš ir po užgarinimo buvo nustatinėjami interferometru. Matuojant interferometru gaunamas viso paviršiaus nelygumo pasiskirstymas išreikštas parametru „Power“. Šis parametras parodo paviršiaus netolygumą nuo aukščiausios iki žemiausios reikšmės ir yra išreikštas bangos ilgio dalimi. Norint sužinoti koks paviršiaus išsigaubimas nanometrais, šią reikšmę reikia padauginti iš 632 nm bangos ilgio, kadangi tokia banga naudojama interferometre. Turint bandinio išsilenkimo duomenis prieš ir po garinimo, dangos įtempių vertės buvo apskaičiuojamos naudojantis Stoney formule [38]:

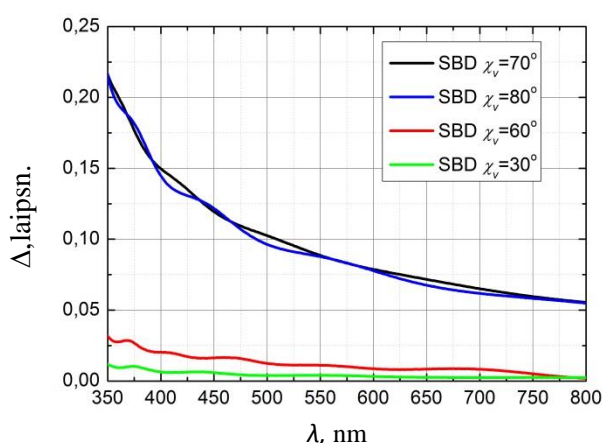
$$\sigma = \frac{1}{6} \left(\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_1} \right) \frac{E}{(1-\nu)} \cdot \frac{t_s^2}{t_f}; \quad (9)$$

čia σ – įtempis, R_1 – bandinio kreivumas prieš garinimą, R_2 – kreivumo spindulys po garinimo, E – Jungo modulis, ν – Puasono santykis, t_s – padėklo storis, t_f – dangos storis.

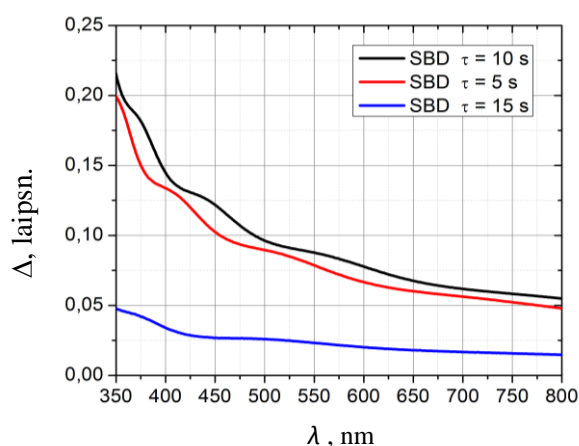
3. REZULTATAI

3.1. Fazinės plokštelės regimajai šviesos sričiai

Norint suformuoti fazinę plokštelę, naudojant optimalius garinimo parametrus, reikia ištyrinėti plonų sluoksnių fazines charakteristikas. Tam buvo užgarintos dvi serijos TiO_2 bandinių. Pirmosios serijos metu bandiniai suformuoti keičiant garinimo kampą χ nuo 0 laipsnių iki 80 laipsnių, antrosios – skirtingais apsisukimo aplink garinamo paviršiaus plokštumos normalę laikais τ (kai $\chi = 70^\circ$). Visi šie bandiniai buvo tyrinėjami elipsometru, o fazės vėlinimo Δ dispersijos pateiktos 19 ir 20 pav.



19 pav. Fazės vėlinimo dispersijos esant skirtingiems garinimo kampams (sunormuota 1 nm)



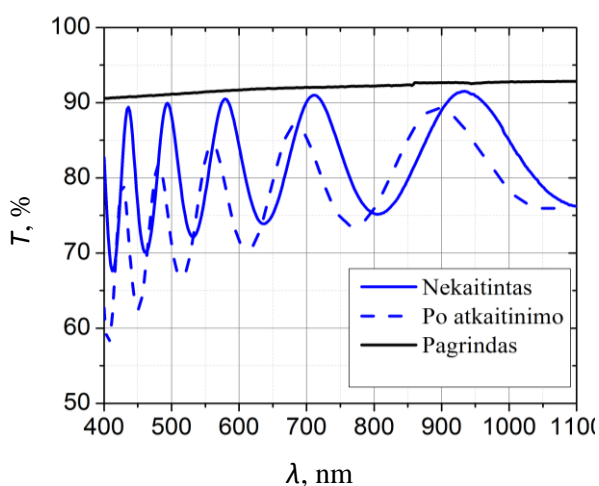
20 pav. Fazės vėlinimo dispersijos esant skirtingiems apsisukimo laikams τ (sunormuota 1 nm)

19 pav. matome, kad dangos formavimo metu keičiant garinimo kampą χ , fazės vėlinimo vertė keičiasi. Bandiniai, kurie buvo užgarinti mažesniais nei 30 laipsnių kampais fazės vėlinimu nepasižymi, nes šešėliavimo efektas yra nežymus. Esant 30 laipsnių kampui dar nesiformuoja ryški koloninė struktūra, dėl to medžiagos lūžio rodiklio skirtumas greitąja ir lėtąja kryptimis yra nedidelis. Didinant garinimo kampą, dėl šešėliavimosi pradeda formotis tvarkingos medžiagos kolonos, o didžiausias fazės vėlinimas buvo nustatytas bandiniui, suformuotam 70 laipsnių garinimo kampui. 532 nm ilgio bangai perėjus per tokios dangos 1 nanometrą, ji užvėlinama 0,093 laipsnio. Dangos, kurios suformuotos ties 60° ir 80° garinimo kampais pasižymi mažesniu fazės vėlinimu – atitinkamai 0,09 ir 0,013 laipsnio 532 nm bangai. Panašios tendencijos garinant Ta_2O_5 , ZrO_2 ir TiO_2 medžiagas pateikiamos kitų mokslininkų darbe – jų teigimu didžiausias lūžio rodiklio skirtumas greitąja ir lėtąja ašimis gaunamas garinant atitinkamai 70°, 70° ir 65° kampais [14].

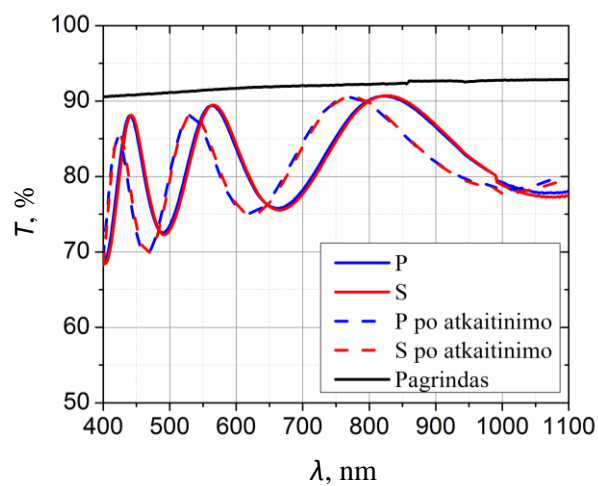
Nustačius pastovų garinimo kampą, kuriam esant fazės vėlinimas didžiausias, toliau buvo tyrinėjama sukiojimo laiko aplink bandinio paviršiaus normalę τ įtaka dangos optiniam aktyvumui. Iš gautų rezultatų (20 pav.) buvo nustatyta, kad didžiausias fazės vėlinimas 0,091

laipsnių 532 nm ilgio bangai gaunamas garinant dangą, kai $\tau = 10$ s. Bandiniai, užgarinti τ esant lygiam 5 s ir 15 s pasižymėjo atitinkamai 1,1 ir 3,6 karto mažesniu fazės vėlinimu. Kai $\tau = 10$ s, o garinimo greitis buvo nustatytas 3 Å/s, suformuotos ševroninės dangos kolonos aukštis (2,7 nm) mažesnis nei pačios kolonos plotis. Šie rezultatai sutampa su kitų mokslininkų gautais rezultatais, kurie teigia, kad didžiausias fazės vėlinimas regimajame diapazone gaunamas tuomet, kai ševroninės struktūros vienos kolonos aukštis mažesnis nei 5 nm [15].

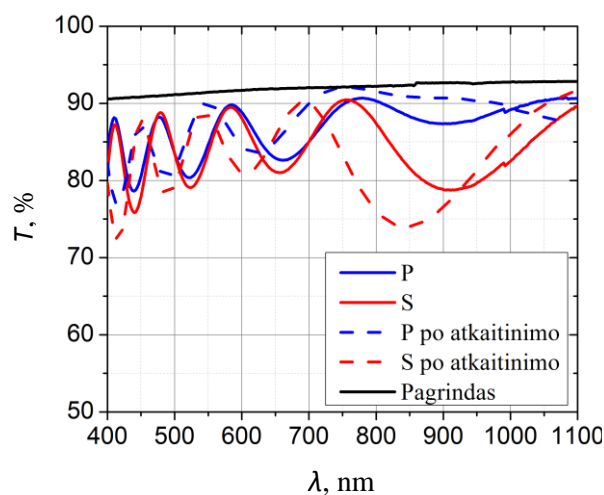
Kokybiškų fazinių plokštelių gamyboje labai svarbu, kad elementas pasižymėtų kuo didesniu optiniu pralaidumu naudojamai spinduliutei. TiO₂ plonų sluoksnių pralaidumai buvo nustatinėjami spektrofotometru 400 nm – 1100 nm ilgio bangų ruože. Suformuotų dangų spektrai ir tų pačių dangų spektrai po atkaitinimo 600° C temperatūroje pateikti 21 pav.



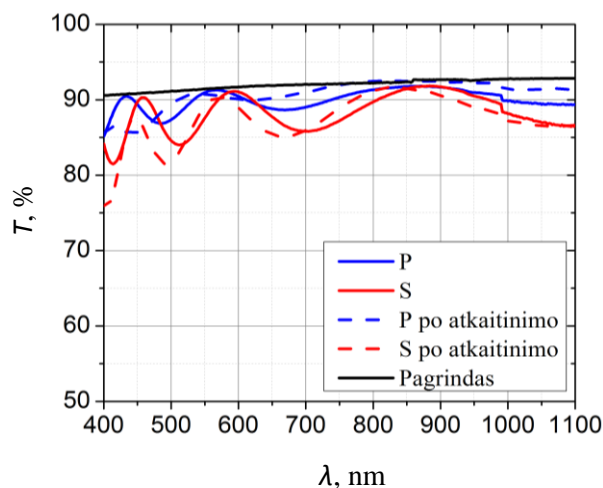
a) $\chi = 0^\circ$



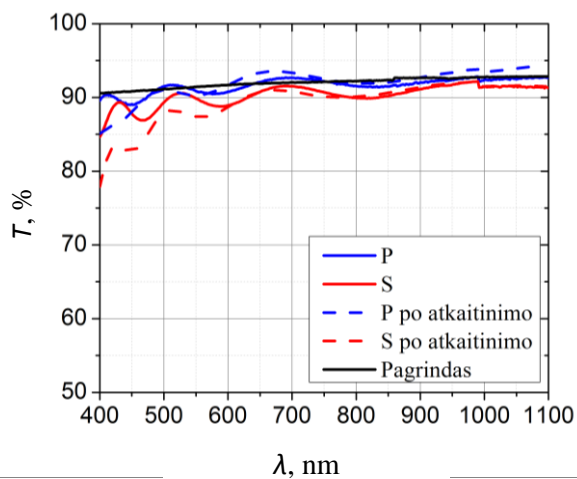
b) $\chi = 30^\circ$



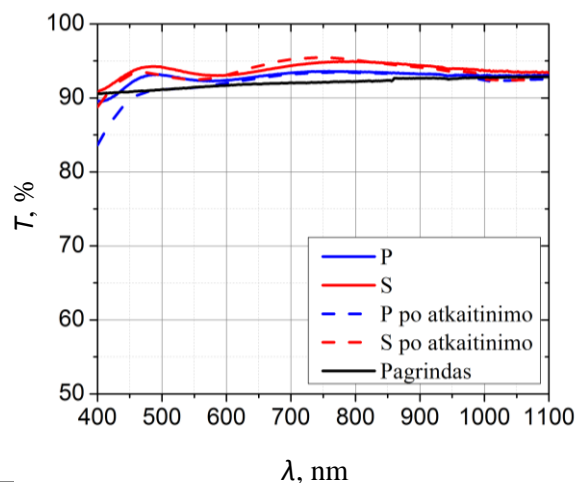
c) $\chi = 60^\circ$



d) $\chi = 70^\circ$



e) $\chi = 80^\circ$

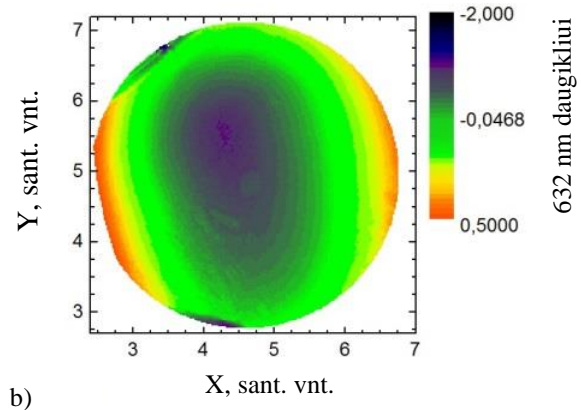
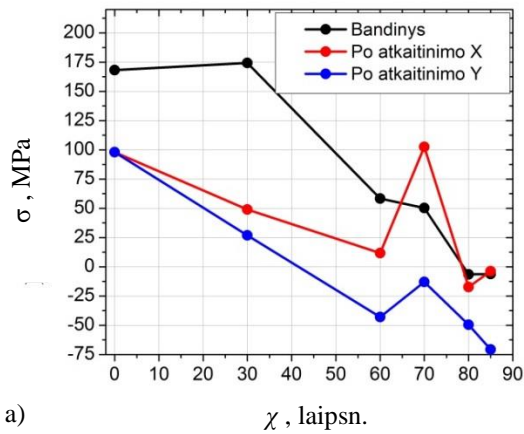


f) $\chi = 85^\circ$

21 pav. Skirtingais garinimo kampais suformuotų dangų pralaidumo spektrai prieš ir po atkaitinimo 600°C temperatūroje. Juoda linija žymi pagrindo pralaidumą, mėlyna ir raudona išsitiesinės linijos žymi P ir S poliarizacijų pralaidumą, mėlyna ir raudona punktyrinės linijos žymi P ir S poliarizacijų pralaidumą po atkaitinimo

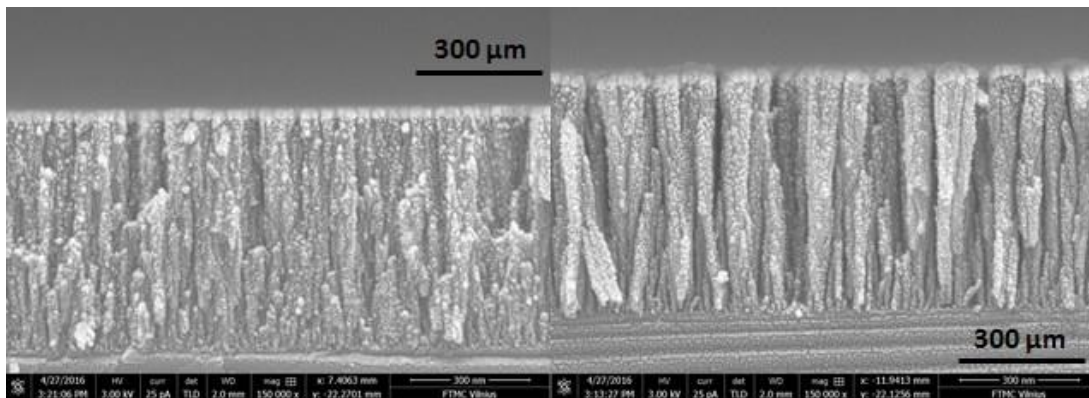
Izotropinės 300 nm storio dangos (garinimo kampas $\chi = 0^\circ$) pralaidumas pateiktas 21 pav.a). Palyginus su padėklo lūžio rodikliu, TiO_2 dangos lūžio rodiklis didelis, todėl spektre matoma intensyvi interferencija. Didinant garinimo kampą lūžio rodiklis mažėja, o garinant ties 80 laipsnių kampu interferencija sumažinama iki 5 % visame 500 nm – 1100 nm bangos ilgių ruože 21 pav. e). Kai garinimo kampas lygus 85 laipsniams, dangos lūžio rodiklis tampa mažesnis nei padėklo 21 pav. f). Atkaitinus bandinius 600°C temperatūroje 4 valandas pasikeitė visų bandinių pralaidumas. Bandinio, garinto 0 laipsnių kampu pralaidumas sumažėjo 5 % 500 nm – 600 nm bangų ruože ir tuo pat metu spektras pasislinko per 3 % į trumpesniųjų bangų pusę. Tai reiškia, jog dėl atkaitinimo optinis dangos storis sumažėjo. Visa to priežastis gali būti medžiagos kristalizacija, dėl kurios galėjo atsirasti šviesos sklaida, mažinanti optinį pralaidumą. Kitų mokslininkų darytuose tyrimuose su TiO_2 buvo pastebėta, kad ši medžiaga atkaitinta jau prie 500°C linkusi sudaryti anatazo ar rutilo kristalus [39]. Tačiau atkaitinimo įtaka nėra tokia didelė toms dangoms, kurios buvo formuojamos didesniais garinimo kampais. Be to, skirtingomis kryptimis pralaidumas pakito skirtingai. P poliarizacijai (lygiagreti šešėliavimo kryptčiai) atkaitinimo įtaka buvo mažesnė, nes ta kryptimi gaunama porėtesnė danga ir struktūros pokyčiai turi mažiau įtakos nei S kryptimi (statmena šešėliavimui).

Analizuojant dangų įtempius buvo nustatyta, kad didinant garinimo kampą įtempiai mažėja ir pereina iš gniuždančiųjų į tempiančiuosius, kai garinama didesniu nei 70 laipsnių kampu (žr. 22 pav.). Kai garinimo kampas lygus 80 laipsnių ir didesnis, medžiaga įtempiais nepasižymi.



22 pav. TiO₂ dangų įtempimų σ priklausomybės nuo garinimo kampo χ (a) ir bandinio, garinto 70 laipsnių kampu, po atkaitinimo 600° C temperatūroje paviršiaus vaizdas (b)

Gniuždantieji įtempiai atsiranda dėl skirtingų dangos bei pagrindo plėtimosi koeficientų ir kuo tankesnė danga (kuo mažesnis garinimo kampas), tuo šie įtempiai didesni. Atkaitinus bandinius buvo pastebėta, kad tik izotropinėje dangoje, kuri garinta ties 0 laipsnių garinimo kampu, įtempiai skirtingomis kryptimis vienodi. Tačiau anizotropinėse dangose P ir S kryptimis įtempiai po atkaitinimo skiriasi. Didžiausias įtempimų skirtumas 80 MPa P ir S kryptimis buvo nustatytas dangoje, garintoje esant 70 laipsnių kampui. Šio bandinio paviršiaus vaizdas, gautas interferometru, pateiktas 22 pav. Garinant dangą didesniu kampu, 80 laipsnių, įtempimų skirtumas po atkaitinimo yra mažesnis ir lygus 30 MPa. TiO₂ suformuotų dangų esant 60 ir 80 laipsnių garinimo kampams struktūrų nuotraukos pateiktos 23 pav. Matome, kad garinant 60° kapu danga formuojasi tankesnė nei garinant 80° kampu.



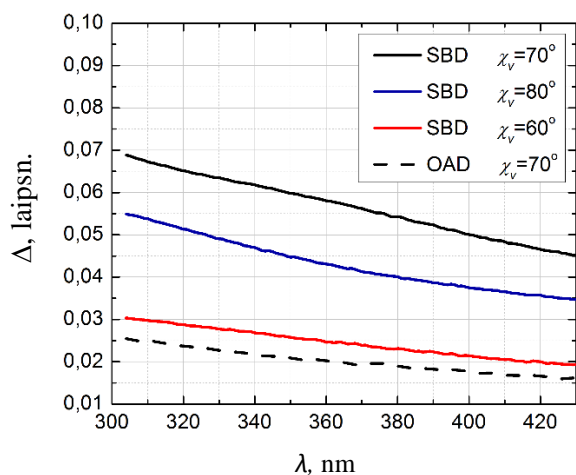
23 pav. TiO₂ dangų struktūra: a – danga formuota SBD technologija esant 60° garinimo kapui, b - danga formuota SBD technologija esant 80° garinimo kapui

Iš gautų rezultatų galime spręsti, kad norint pagaminti kokybišką fazinę plokštelę regimajam šviesos diapazonui, patartina pasirinkti 80 ° garinimo kampą bei 10 s periodą sukiojimui aplink bandinio paviršiaus normalę. Garinant šiais parametrais danga pasižymi ne tik aukštu optiniu pralaidumu, tačiau ir mažais įtempiais, kurie nedaug kinta dangas atkaitinus aukštoje temperatūroje. Šie rezultatai sutampa su kitų mokslininkų išvadomis, kad garinant TiO₂ ties 82 laipsnių kampu danga gaunama labiausiai atspari kaitinimui ir drėgmei [40].

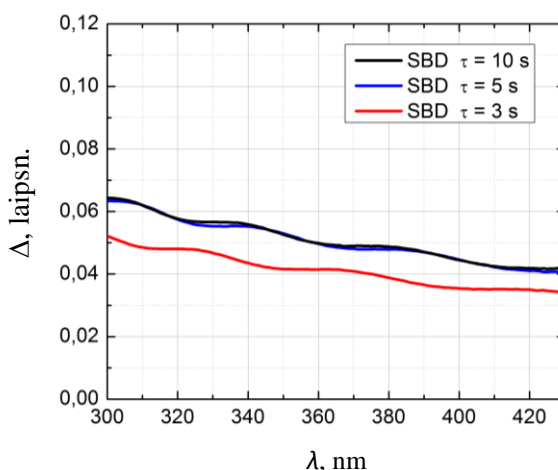
3.2. Fazinės plokštelės ultravioletinei šviesos sričiai

Dar nedaug mokslinių darbų padaryta tyrinėjant garinimo kampu technologijos pritaikymą dangoms, kurios gali būti naudojamos UV srityje. Kadangi TiO_2 pasižymi didele sugertimi ultravioletinei spinduliutei, tenka ieškoti alternatyvių medžiagų. Sekantiems eksperimentams, buvo nuspręsta formuoti ir analizuoti dangas iš Al_2O_3 . Ši medžiaga pasižymi aukščiausiu lūžio rodikliu tarp medžiagų, kurios pralaidžios ultravioletinei spinduliutei.

Fazės vėlinimo tyrimui buvo užgarintos dvi serijos Al_2O_3 bandinių. Pirmosios serijos metu bandiniai suformuoti keičiant garinimo kampą χ nuo 0 laipsnių iki 80 laipsnių, antrosios – skirtingais apsisukimo aplink garinamo paviršiaus plokštumos normalę laikais τ (kai $\chi = 70^\circ$). Visi šie bandiniai buvo tyrinėjami elipsometru. Dangų fazės vėlinimo dispersijos pateiktos 24 ir 25 pav.



24 pav. SBD bei OAD metodikomis suformuotų dangų fazės vėlinimo dispersijos esant skirtingiems garinimo kampams (sunormuota 1 nm)



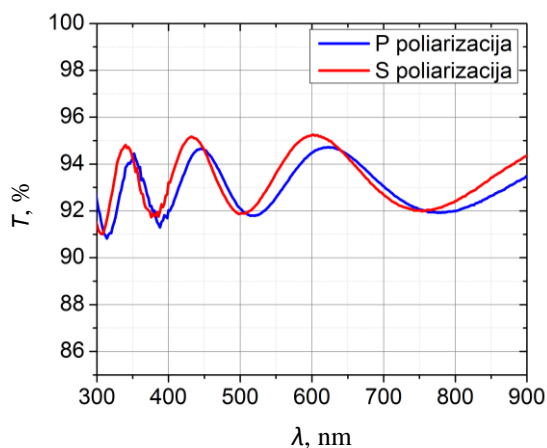
25 pav. SBD metodika suformuotų dangų ($\chi = 70^\circ$) fazės vėlinimo dispersijos esant skirtingiems sukiojimo laikams (sunormuota 1 nm)

Iš gautų rezultatų matome, kad didžiausias fazės vėlinimas (0,06 laipsnio 355 nm bangai) buvo nustatytas dangoje, užgarintoje ties 70 laipsnių kampu. Bandiniai, kurie buvo garinami 60 ir 80 laipsnių kampais fazės vėlinimas sumažėja atitinkamai 2,4 ir 1,5 karto 355 nm bangai. Padidinus garinimo kampą iki 80 laipsnių fazės vėlinimas sumažėja, nes formuojantis dangai šėšėliavimas vyksta nebe tvarkingas ir danga gaunama labai porėta, o dauguma garinamos medžiagos atomų nebusėda ant bandinio paviršiaus ir pralekia pro jį. 24 pav. grafike taip pat atidėta kreivė (punktyrinė linija), kuri vaizduoja fazės vėlinimą dangoje, kuri suformuota OAD metodika esant garinimo kampui $\chi = 70^\circ$. Bandinys buvo įtvirtintas stacionariai ir nebuvo sukiojamas aplink paviršiaus normalę garinimo metu. Matome, kad tuo pat kampu garinant, tačiau sukiojant bandinį aplink paviršiaus normalę kas 5 sekundes, fazės vėlinimas 355 nm bangai padidėja 2.9 karto. Tai svarbu ne vien dėl geresnių fazinių charakteristikų, bet ir dėl

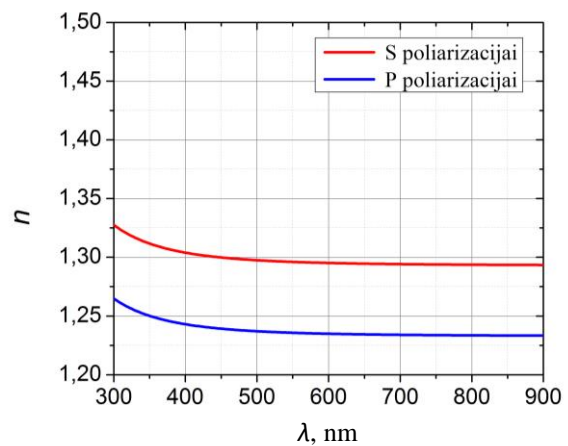
dangos tolygumo. Garinant SBD technologija danga gali būti formuojama tolygi per visą elemento plotą, ko negalima padaryti formuojant AOD metodu.

Iš atliktų eksperimentų žinome, jog didžiausias fazės vėlinimas gaunamas formuojant dangą 70° garinimo kampū. Toliau buvo tyrinėjama sukiojimo laiko aplink bandinio paviršiaus normalę τ įtaka dangos optiniam aktyvumui. Matome, kad esant $\tau = 3$ s, fazės vėlinimas mažesnis nei esant 5 s ir 10 s. Taip yra galimai todėl, kad 3 s yra per trumpas laiko tarpas formuoti tvarkingai struktūrai, nes 0,67 sekundės užima pats sukimasis aplink paviršiaus normalę, kol bandinys apsukamas 180 laipsnių.

Žinant, kad didžiausias fazės vėlinimas gaunamas tada, kai danga formuojama ties 70° kampū, buvo nustatomas tokios dangos pralaidumas bei lūžio rodikliai greitąja ir lėtąja kryptimis.



26 pav. Al_2O_3 dangos, suformuotos esant 70° garinimo kampū, pralaidumo spektras P ir S poliarizacijoms



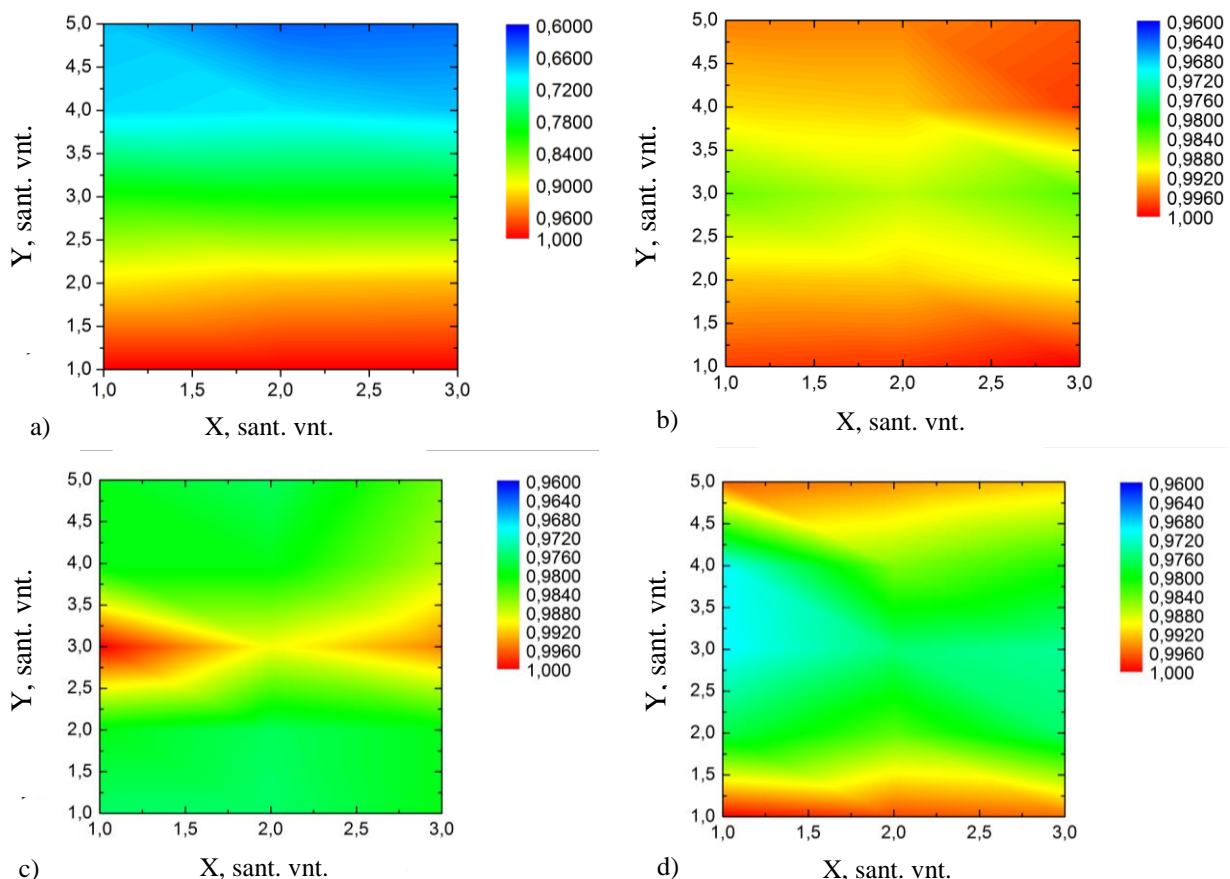
27 pav. Al_2O_3 dangos, suformuotos esant 70° garinimo kampū, lūžio rodiklių dispersijos P ir S poliarizacijoms

Ties 355 nm ilgio banga pralaidumas siekia 94,21 % ir 93,67 % atitinkamai P ir S poliarizacijai. Analizuojant šiuos spektrus buvo sumodeliuoti lūžio rodikliai kiekvienai poliarizacijai naudojant “OptiLayer” programą. Gautos lūžio rodiklio dispersijos pateikto 27 pav. 355 nm ilgio bangai lūžio rodikliai lėtąja ir greitąja kryptimis lygūs 1,316 ir 1,254. Žinome, kad standartiškai garintos Al_2O_3 dangos lūžio rodiklis 355 nm ilgio bangai lygus 1,78. Garinimo kampū technologija formuojamų dangų lūžio rodikliai gaunami mažesni dėl porėtos struktūros. Taigi, 70° laipsnių kampū garintos Al_2O_3 dangos lūžio rodiklių skirtumas Δn lygus 0,062. Taip pat sumodeliavus dangų, užgarintų esant 60° bei 80° kampais, pralaidumo spektrus Δn gavome atitinkamai 0,015 ir 0,039. Kadangi iki šiol nėra padarytų tyrimų, kur būtų nustatytos Al_2O_3 medžiagos lūžio rodiklio vertės dangose, suformuotose SBD technologija, palyginti savo rezultatų su kitų mokslininkų darbais negalime. Tačiau, žinant, kad fazės vėlinimas yra didžiausias, kai lūžio rodiklio skirtumas didžiausias, galima teigti, kad mūsų gauta tendencija yra teisinga – esant 70° garinimo kampū suformuota danga pasižymi didžiausiu fazės vėlinimu bei didžiausiu lūžio rodiklių

skirtumu greitąja bei lėtąja ašimis. Tokia lūžio rodiklių tendencija pastebima ir Ta₂O₅, WO₃ bei BiO₃ dangoms [31].

Kita šiame darbe sprendžiama problema – dangos storio tolygumo pasiskirstymas per visą padėklo plotą. Tai aktualu todėl, kad formuojant dangas, kai garinimo metu padėklas pakreiptas kampu, ant bandinio apačios, kuri yra arčiau garinimo šaltinio, nusodinama daugiau medžiagos. Taip pat garinimo elektronų pluoštu metu, dalelių srautas gali pasiskirstyti netolygiai, dėl ko per visą elementą neišlaikomos pastovios charakteristikos, ypač turint didelių matmenų padėklus. Ši problema išsprendžiama SBD technologija, kai garinimo metu padėklas sukiojamas aplink savo paviršiaus normalę 180° su tam tikru periodu.

Kadangi jau žinome, kad 70° laipsnių kampu formuojama danga pasižymi geriausiomis optinėmis charakteristikomis, todėl būtent šis kampas buvo pasirinktas pastovus tyrinėjant dangos tolygumą. Tyrimo metu buvo nustatinėjama sukiojimo laiko aplink bandinio paviršiaus normalę τ įtaka dangos storio tolygumui ir gauti rezultatai pateikti 28 paveiksle.

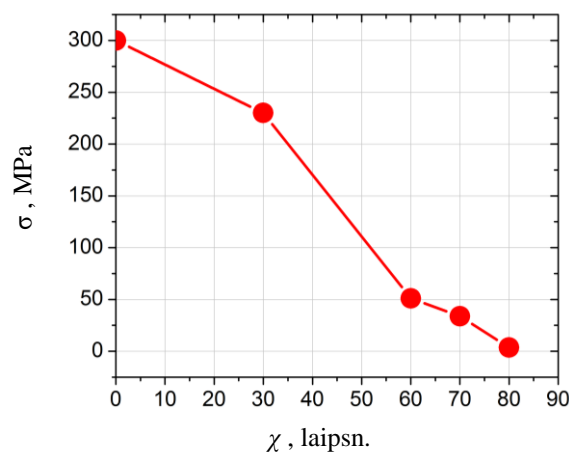


28 Pav. Dangos, suformuotos esant $\chi = 70^\circ$, storio pasiskirstymas per 7 cm x 7 cm elemento plotą (sunormuotos vėrtės): a - danga suformuota nesukiojant bandinio aplink paviršiaus normalę, b – danga suformuota, kai $\tau = 3$ s, c - danga suformuota, kai $\tau = 5$ s, d - danga suformuota, kai $\tau = 10$ s

Matome, kad jei garinimo metu padėklas nebus sukiojamas aplink bandinio paviršiaus normalę, dangos storis per padėklą skiriasi apie 40 procentų. Proceso metu sukiojant bandinį kas 10 s

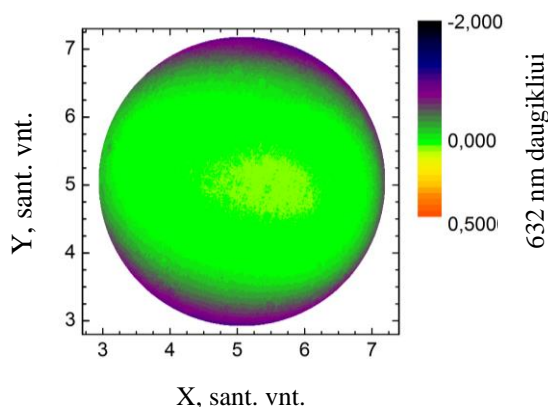
galima formuoti dangas, kurių storio tolygumas per visą padėklą svyruoja iki 3 procentų. Padidinus sukiojimo dažnumą – τ lygus 3 s ir 5 s, dangų storis svyruoja 2 procentų ribose. To užtenka, norint pagaminti kokybišką optinį elementą.

Gaminant optinius elementus, mūsų atveju – fazines plokšteles, svarbu ne tik optiniai parametrai. Optinių elementų kokybę taip pat lemia ir dangų vidiniai įtempiai, kurie gali deformuoti padėklą. Dangų įtempiai buvo skaičiuojami naudojantis (9) formule, o elemento plokštiškumas prieš garinimą bei po garinimo buvo nustatinėjamas interferometru. Įtempių priklausomybė nuo garinimo kampo pateikta 29 pav. Elektronų pluoštu garinant Al_2O_3 medžiagą, kai garinimo padėklas nėra pakreiptas proceso metu, suformuota danga pasižymi gniuždančiais įtempiais, kurių vertė lygi 300 MPa.

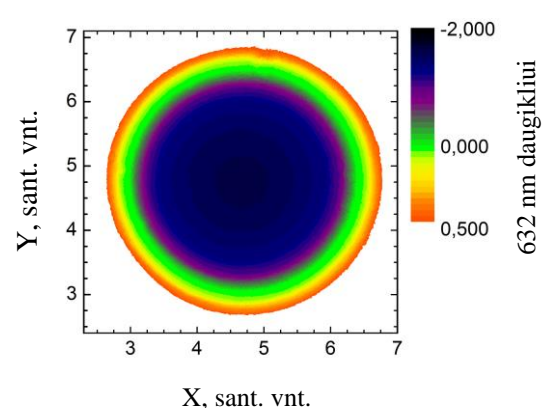


29 pav. Dangos įtempių priklausomybė nuo garinimo kampo

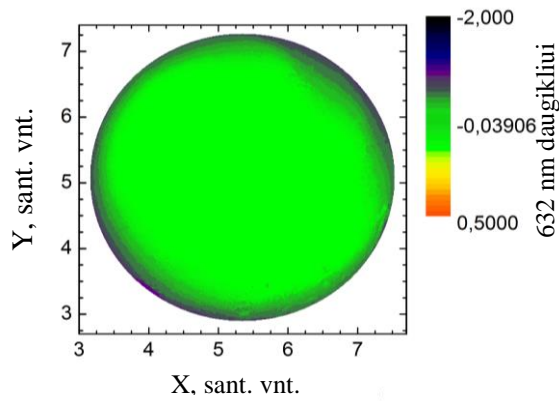
Didinant garinimo kampą, dangos įtempiai atitinkamai mažėja ir esant garinimo kampui 80° sumažėja iki minimalios vertės. Tokia tendencija gaunama todėl, kad proceso metu ant pakreipto kampu padėklo danga formuojasi porėta dėl atomų šešėliavimo efekto. Kuo didesnis garinimo kampas, tuo porėtesnis dangos sluoksnis užnešamas. Porėtos struktūros atomai turi daugiau laisvės relaksaciniams procesams, dėl to įtempiai daug mažesni nei tankiose dangose. Interferometru gauti bandinių paviršiaus aukščio pasiskirstymo vaizdai prieš garinimą bei po garinimo pateikti 30 – 33 paveiksluose. Vaizdai pateikti vienodose parametro skalėse, dėl paly –



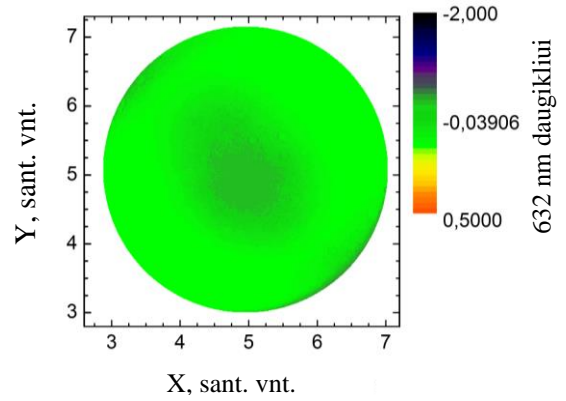
30 pav. Bandinio be dangos aukščio pasiskirstymas



31 pav. Bandinio, su Al_2O_3 suformuota danga esant 0° garinimo kampui, aukščio pasiskirstymas.



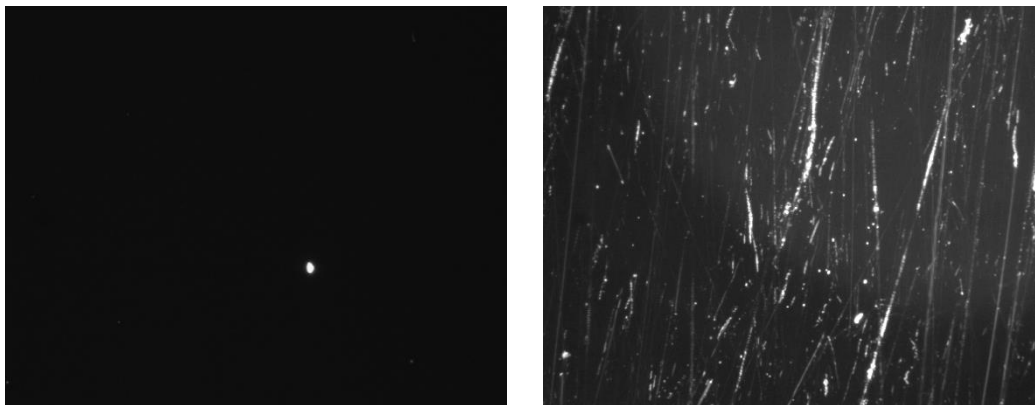
32 pav. Bandinio be dangos aukščio pasiskirstymas



33 pav. Bandinio, su Al_2O_3 suformuota danga esant 70° garinimo kampui, aukščio pasiskirstymas

ginimo patogumo. Matome, kad danga, kuri buvo suformuota esant 0° garinimo kampui (30 – 31 pav.) pasižymi dideliu kreivumu matuojant nuo padėklo centro link krašto. Kreivumas atsiranda dėl įtempių, o tanki danga, suformuota esant 0° garinimo kampui, pasižymi palyginus dideliais įtempiais nei danga, kuri suformuota ties 70° garinimo kampu (32 – 33 pav.).

Garinimo kampu technologija suformuotų dangų pagrindinis trūkumas yra prastas atsparumas mechaniniam poveikiui, pavyzdžiui, valymui. Dėl savo porėtos struktūros dangos yra itin pažeidžiamos. 34 pav. pateiktos nuotraukos, kuriose pavaizduotas dangos, kuri užgarinta esant 70° garinimo kampui, paviršius prieš valymą ir po valymo vata su acetatu.



34 pav. Dangos, suformuoto ties 70° garinimo kampu, paviršiaus nuotraukos gautos tamsaus lauko optiniu mikroskopu: kairėje – prieš valymą su vata, dešinėje – po valymo su vata

Matome, kad danga po pavalymo labai susibraižo, dėl to labai sunku būtų eksploatuoti optinį elementą, kuris suformuotas tam tikru garinimo kampu. Jo nebūtų galima valyti, nes elementas iškart būtų sugadintas. Norint pagaminti valymui atsparią fazinę plokštelę, galima suformuoti apsauginį sluoksnį, kuris nekeistų fazinių charakteristikų.



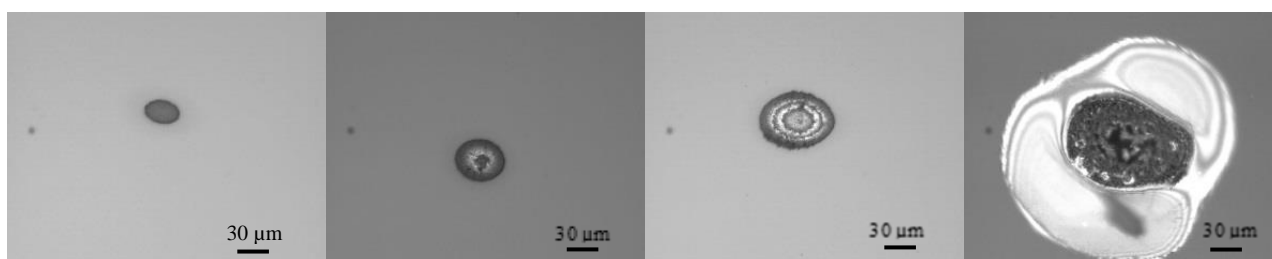
35 pav. Dangos, suformuoto ties 70° garinimo kampu ir 50 nm apsauginiu sluoksniu, paviršiaus nuotraukos gautos tamsaus lauko optiniu mikroskopu: kairėje – prieš valymą su vata, dešinėje – po valymo su vata

Ant 70° kampu užgarintos dangos buvo suformuotas apsauginis sluoksniu – 0° garinimo kampu užgarinta 50 nm storio tanki danga. 35 pav. pavaizduota tokio elemento paviršiaus nuotraukos prieš valymą ir po valymo vata su acetatu. Matome, kad šiuo atveju danga nepasižeidžia, o kadangi apsauginė danga tanki ir ne anizotropinė, ji tinka padengti fazinių plokštelių paviršius, nes nekeičia fazinių charakteristikų.

Atsirandant vis galingesnėms lazerinėms sistemoms optiniams elementams keliami vis didesni reikalavimai. Jie turi ne tik idealiai tenkinti reikiamas optines charakteristikas, tačiau ir pasižymėti dideliu atsparumu lazeriniams pažeidimams. Todėl šiame darbe taip pat buvo nustatinėjami Al_2O_3 sluoksnių, suformuotų ties 70° garinimo kampu, lazerio indukuoto pažaidos slenksčio LIDT vertės. Buvo tyrinėjami trys bandiniai, suformuoti skirtingais sukiojimo aplink bandinio paviršiaus normalę laikais τ , kurie buvo lygūs 3 s, 5 s ir 10 s, o dangų storiai lygūs $1 \mu\text{m}$.

LIDT matavimui buvo naudojama „1-on-1“ metodika (aprašyta 1.3.4. skyriuje). Naudoto lazerio šviesos impulso trukmė – 3 ns. Gautos LIDT vertės lygios atitinkamai 48, 61 ir 60 sant.vnt. Pagrindo be dangos LIDT vertė lygi 100 sant. vnt.

Lazerio spinduliuotės sukeltų medžiagos pažeidimų morfologijos pateiktos 36 pav.

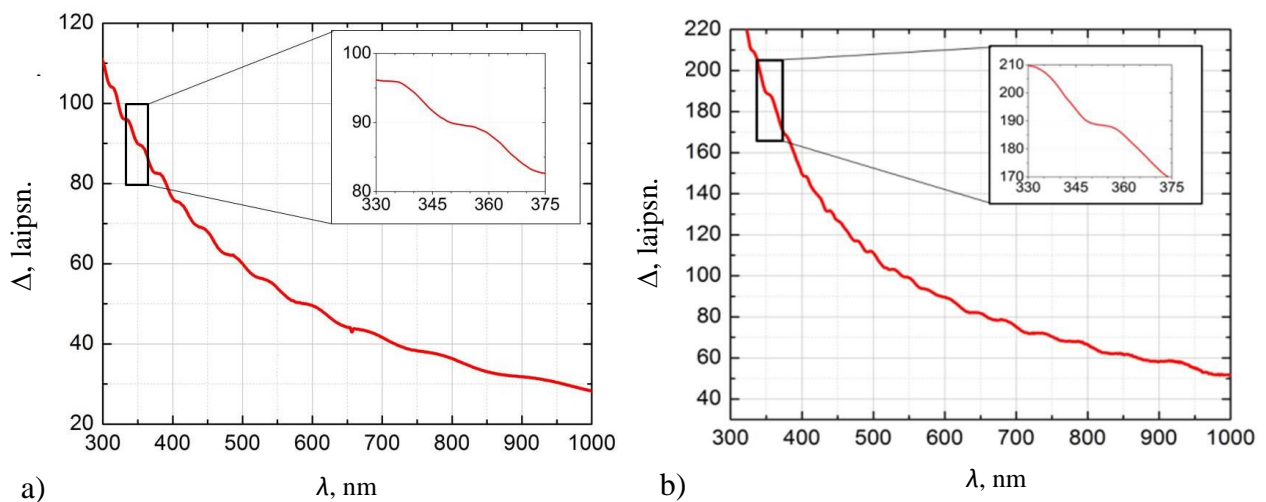


36 pav. Lazerio spinduliuotės sukeltų medžiagos pažeidimų morfologijos

Iš kairės į dešinę (36 pav.) išdėstytos nuotraukose parodyti pažeidimai, sukelti vis didesnio lazerio spinduliuotės intensyvumo. Iš gautų morfologijos vaizdų matome, jog pažeidimai atsiranda dėl pačios medžiagos, o ne smulių defektų, kurie dažnai apriboja LIDT. Tyrinėjant lazerinius

pažeidimus labai svarbu, kad dangos būtų be defektų, kurie gali atsirasti dėl nekokybiško pagrindo nuvalymo, garinamos medžiagos didelių atplaišų ar nusėdusių dulkių. Defektai neleidžia nustatyti dangos LIDT vertės, nes pažeidžia esant dar mažiems lazerio spinduliuotės intensyvumams. Su šia problema susiduria ir kitos mokslininkų grupės, kurios nustatė, kad Al_2O_3 medžiaga yra tinkama UV elementų gamybai ir yra pakankamai atspari lazeriniams pažeidimams[41].

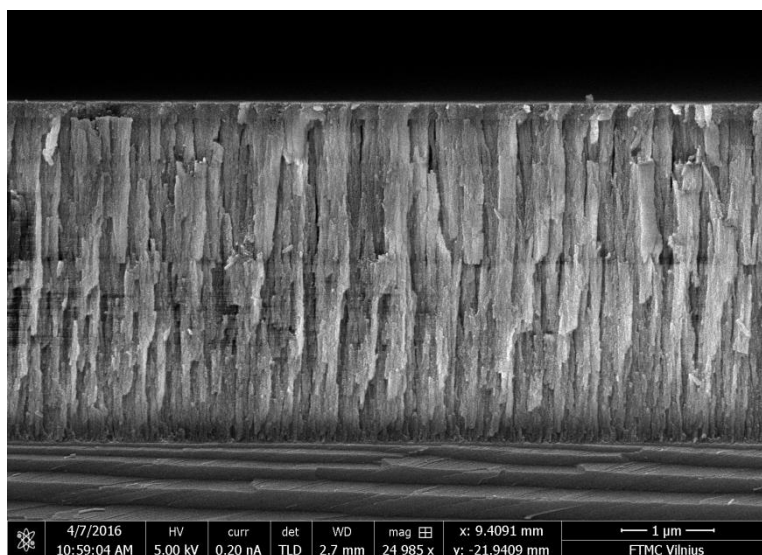
Remiantis gautais rezultatais buvo suformuotos $\lambda/2$ ir $\lambda/4$ fazinės plokštelės 355 nm bangai. Jų fazinės charakteristikos pateiktos 37 pav.



37 pav. Puse bangos ilgio (a) ir ketvirčio bangos ilgio (b) fazinių plokštelių charakteristikos

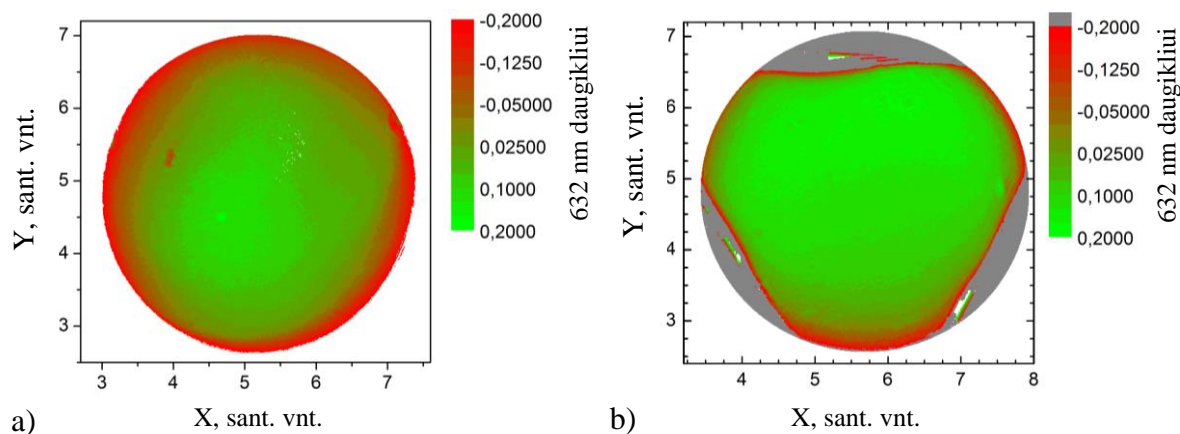
Al_2O_3 fazinės plokštelės buvo suformuotos nustatytais optimaliais parametrais. SBD proceso metu garinimo kampas buvo nustatytas 70 laipsnių, o sukiojimo aplink bandinio paviršiaus normalę laikais $\tau = 5$ s. Taip pat fazinės plokštelės buvo padengtos 50 nm storio apsauginiu sluoksniu. $\lambda/2$ ir $\lambda/4$ fazinių plokštelių pralaidumas 355 nm ilgio bangai atitinkamai lygus 86 % ir 83 %. Tokių elementų pralaidumas optinei spinduliuotei gali būti padidinamas suformuojant skaidrinančiąsias dangas, kad sumažėtų atspindžiai nuo elemento paviršių.

$\lambda/2$ fazinės plokštelės, suformuotos garinant elektronų pluoštu Al_2O_3 , skerspjuvio vaizdas, gautas SEM, pavaizduotas 37 pav. Bendras viso elemento dangos storis – 3,55 μm . Elemento paviršiuje taip pat suformuotas apsauginis, 50 nm storio sluoksnis, kuris apsaugo elementą nuo išorinių mechaninių pažeidimų. 38 pav. pavaizduotos fazinės plokštelės vidinė struktūra – statmenai padėklui išsidėsčiusios kolonos, kur kiekviena kolona turi ševroninę geometriją. Šiuo atveju ševroninės struktūros nematyti, nes SEM rezoliucija nėra pakankamai gera, kad išskirtų 1 nm ar mažesnių matmenų elementus. Kolonos plotis gaunamas apie 20 nm, o ševroninės struktūros elemento aukštis – 1,3 nm.



38 pav. Al_2O_3 $\lambda/2$ fazinės plokštelės 355 nm bangai skerspjūvio SEM nuotrauka

Suformuota $\lambda/2$ fazinės plokštelės danga pasižymi labai nedideliais (~ 7 MPa) įtempiais.



39 pav. Vaizdai gauti interferometru: pagrindo be dangos aukščio pasiskirstymas prieš dangos formavimą (a), suformuotos $\lambda/2$ fazinės plokštelės aukščio pasiskirstymas (b)

39 pav. matome, bandinio prieš garinimą ir po garinimo aukščio pasiskirstymus. Matome, kad bandinys deformuojamas labai nežymiai, dėl ko naudojant parinktus optimalius garinimo parametrus galima formuoti kokybiškas fazines plokšteles netgi ultravioletinei spinduliutei.

IŠVADOS

1. Elektronų pluoštu suformuotų TiO_2 nano-struktūrinių dangų vidiniai įtempiai mažėja didinant garinimo kampą SBD proceso metu ir siekia 6 MPa dangose, garintose esant 80 laipsnių kampui.
2. Elektronų pluoštu užgarintas TiO_2 nano-struktūrinis plonas dangas atkaitinus 600°C optinio pralaidumo pokytis mažėja didėjant garinimo kampui. Didesniu nei 30 laipsnių garinimo kampu suformuoti sluoksniai po atkaitinimo pasižymėjo anizotropiniais itempimais, kurie mažiausiai kinta 80 laipsnių kampu užgarintoje dangoje.
3. Elektronų pluoštu suformuotų Al_2O_3 nano-struktūrinių dangų vidiniai itempimai mažėja SBD proceso metu didinant garinimo kampą ir siekia 4 MPa dangose, suformuotose esant 80 laipsnių kampui.
4. Garinant elektronų pluoštu 70 laipsnių kampu ir kas 5 s apsukant bandinį 180 laipsnių aplink paviršiaus normalę buvo suformuotos $\lambda/2$ ir $\lambda/4$ fazinės plokštelės 355 nm bangai. Jos pasižymi mažais ~ 7 MPa įtempiais ir atitinkamai 83 % ir 86 % optiniu pralaidumu.

LITERATŪROS SĄRAŠAS

- [1] A. Lakhtakia ir R. Messier, *Sculptured thin films: nanoengineered morphology and optics*. Bellingham, Wash: SPIE Press, 2005.
- [2] J. Dudonis, *Plonų dangų fizika ir nanotechnologijos*, 1-asis leid. Šiaulių universiteto leidykla, 2012.
- [3] P. M. Martin, Sud., *Handbook of deposition technologies for films and coatings: science, applications and technology*, 3. ed. Amsterdam: Elsevier, 2010.
- [4] Y. Zhao, D. Ye, G.-C. Wang, ir T.-M. Lu, „Designing nanostructures by glancing angle deposition“, 2003, p. 59–73.
- [5] C. Charles, N. Martin, ir M. Devel, „Optical properties of nanostructured WO₃ thin films by GLancing Angle Deposition: Comparison between experiment and simulation“, *Surf. Coat. Technol.*, p. 136–140, rugpj. 2015.
- [6] D. Schmidt, „Generalized Ellipsometry on Sculptured Thin Films made by Glancing Angle Deposition“, *Theses Diss. Electr. Comput. Eng.*, gruodž. 2010.
- [7] K. Robbie, „First thin film realization of a helicoidal bianisotropic medium“, *J. Vac. Sci. Technol. Vac. Surf. Films*, nr. 6, p. 2991, lapkr. 1995.
- [8] K. Robbie ir M. J. Brett, „Sculptured thin films and glancing angle deposition: Growth mechanics and applications“, *J. Vac. Sci. Technol. A*, nr. 3, p. 1460–1465, geg. 1997.
- [9] M. M. Hawkeye, A. C. van Popta, J. C. Sit, ir M. J. Brett, „Chiral and nanostructured optical materials“, 2004, p. 707–715.
- [10] C. M. Zhou ir D. Gall, „Surface patterning by nanosphere lithography for layer growth with ordered pores“, *Thin Solid Films*, nr. 2–4, p. 433–437, gruodž. 2007.
- [11] H.-H. Jeong, A. G. Mark, J. G. Gibbs, T. Reindl, U. Waizmann, J. Weis, ir P. Fischer, „Shape control in wafer-based aperiodic 3D nanostructures“, *Nanotechnology*, nr. 23, birž. 2014.
- [12] A. Barranco, A. Borrás, A. R. Gonzalez-Elipe, ir A. Palmero, „Perspectives on oblique angle deposition of thin films: From fundamentals to devices“, *Prog. Mater. Sci.*, p. 59–153, kovo 2016.
- [13] I. Hodgkinson, Q. hong Wu, B. Knight, A. Lakhtakia, ir K. Robbie, „Vacuum deposition of chiral sculptured thin films with high optical activity“, *Appl. Opt.*, nr. 4, p. 642, vas. 2000.
- [14] I. Hodgkinson ir Q. hong Wu, „Serial bideposition of anisotropic thin films with enhanced linear birefringence“, *Appl. Opt.*, nr. 16, p. 3621, birž. 1999.
- [15] M. M. Hawkeye, M. T. Taschuk, ir M. J. Brett, *Glancing angle deposition of thin films: engineering the nanoscale*. Chichester, West Sussex, United Kingdom: John Wiley & Sons Inc, 2014.
- [16] K. Robbie, G. Beydaghyan, T. Brown, C. Dean, J. Adams, ir C. Buzea, „Ultrahigh vacuum glancing angle deposition system for thin films with controlled three-dimensional nanoscale structure“, *Rev. Sci. Instrum.*, nr. 4, p. 1089, 2004.
- [17] J. Singh, Sud., *Optical properties of condensed matter and applications*. Chichester, England ; Hoboken, NJ: John Wiley, 2006.
- [18] „Encyclopedia of Laser Physics and Technology - Sellmeier formula, refractive index, Sellmeier equation, dispersion formula“. [Interaktyvus] https://www.rp-photonics.com/sellmeier_formula.html. [Žiūrėta: 21-bal-2016].
- [19] D. S. Kliger, J. W. Lewis, ir C. E. Randall, *Polarized light in optics and spectroscopy*. Boston: Academic Press, 1990.
- [20] „Classification of Polarization“. [Interaktyvus]. <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/phyopt/polclas.html>. [Žiūrėta: 23-bal-2016].
- [21] V. A. Šalna, *Optika*. (Enciklopedija, Vilnius, 2004).
- [22] F. J. McClung ir R. W. Hellwarth, „Giant Optical Pulsations from Ruby“, *Appl. Opt.*, nr. S1, p. 103, saus. 1962.
- [23] „Encyclopedia of Laser Physics and Technology - laser-induced damage, optical intensity, fluence, specification of laser damage threshold, measurements, ISO 21254“. [Interaktyvus] https://www.rp-photonics.com/laser_induced_damage.html. [Žiūrėta: 28-bal-2016].
- [24] D. Ristau, *Laser-induced damage in optical materials*. 2015.
- [25] „ISO 21254-1:2011(en), Lasers and laser-related equipment — Test methods for laser-induced damage threshold“. [Interaktyvus]. <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:21254:-1:ed-1:v1:en>. [Žiūrėta: 28-bal-2016].
- [26] X. Zhang, F. Wu, L. Qi, X. Zhang, ir D. Hao, „Phase Retardation and Birefringence of the Crystalline Quartz Plate in the Ultraviolet and Visible Spectrum“, *ArXiv14112811 Phys.*, lapkr. 2014.
- [27] „Half-Wave Liquid Crystal Variable Retarders / Wave Plates“. [Interaktyvus]: https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=6179. [Žiūrėta: 28-bal-2016].
- [28] G. G. Wells ir C. V. Brown, „Multistable liquid crystal waveplate“, *Appl. Phys. Lett.*, nr. 22, p. 223506, 2007.
- [29] G. G. Wells ir C. V. Brown, „Rotatable liquid crystal waveplate“, *J. Mater. Sci. Mater. Electron.*, nr. S1, p. 175–180, saus. 2009.
- [30] A. V. Samoylov, V. S. Samoylov, A. P. Vidmachenko, ir A. V. Perekhod, „Achromatic and super-achromatic zero-order waveplates“, *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.*, nr. 1–3, p. 319–325, rugs. 2004.

- [31] T. Motohiro ir Y. Taga, „*Thin film retardation plate by oblique deposition*“, Appl. Opt., nr. 13, p. 2466, liep. 1989.
- [32] „*10 Animals With The Most Incredible Superpowers*“, TheRichest. [Interaktyvus]: <http://www.therichest.com/rich-list/most-shocking/10-animals-with-amazing-superpowers/>. [Žiūrėta: 13-geg-2016].
- [33] N. W. Roberts, T.-H. Chiou, N. J. Marshall, ir T. W. Cronin, „*A biological quarter-wave retarder with excellent achromaticity in the visible wavelength region*“, Nat. Photonics, nr. 11, p. 641–644, lapkr. 2009.
- [34] Y.-J. Jen, M.-J. Lin, S.-K. Yu, ir C.-C. Chen, „*Extended broadband achromatic reflective-type waveplate*“, Opt. Lett., nr. 20, p. 4296, spal. 2012.
- [35] I. Hodgkinson, Q. Hong Wu, M. Arnold, L. De Silva, ir R. Blaikie, „*Bideposited thin-film retardation plates for use at deep UV wavelengths*“, Curr. Appl. Phys., nr. 2–4, p. 106–107, bal. 2004.
- [36] Y.-J. Jen, M.-J. Lin, ir A. Lakhtakia, „*Bio-inspired achromatic waveplates*“, SPIE Newsroom, gruodž. 2011.
- [37] R. M. A.-G. Azzam ir N. M. Bashara, *Ellipsometry and polarized light*, 4. impression, paperback ed. Amsterdam: Elsevier, 1999.
- [38] M. R. Ardigo, M. Ahmed, ir A. Besnard, „*Stoney Formula: Investigation of Curvature Measurements by Optical Profilometer*“, Adv. Mater. Res. 996, p. 361–366, rugpj. 2014.
- [39] S. M. Pursel, M. W. Horn, ir A. Lakhtakia, „*Blue-shifting of circular Bragg phenomenon by annealing of chiral sculptured thin films*“, Opt. Express, nr. 17, p. 8001, 2006.
- [40] M. Suzuki, T. Ito, ir Y. Taga, „*Morphological Stability of TiO₂ Thin Films with Isolated Columns*“, Jpn. J. Appl. Phys., nr. Part 2, No. 4B, p. L398–L400, bal. 2001.
- [41] J. B. Oliver, T. J. Kessler, C. Smith, B. Taylor, V. Gruschow, J. Hettrick, ir B. Charles, „*Electron-beam-deposited distributed polarization rotator for high-power laser applications*“, Opt. Express, spal. 2014.

Grinevičiūtė, Lina. *Nano-struktūrinių plonų sluoksnių garinimas, charakterizavimas ir taikymas fazinių plokštelių formavimui*: Magistro baigiamasis projektas / vadovas prof. dr. Giedrius Laukaitis. Kauno technologijos universitetas, Matematikos ir gamtos mokslų fakultetas.

Mokslo kryptis ir sritis: Fiziniai mokslai, Fizika – 02P

Reikšminiai žodžiai: Nano-struktūrinės dangos, optinė anizotropija, dangų įtempiai

Kaunas, 2016 -45 p.

SANTRAUKA

Fazinės plokštelės – optiniai elementai, kurie reikalingi daugumoje sistemų, kur naudojama poliarizuota šviesa. Jos skirtos šviesos kontroliavimui – poliarizacijos keitimui, šviesos intensyvumo valdymui, pluošto erdvinio pasiskirstymo keitimui, poliarizacijos identifikavimui ir kt. Tokie elementai gali būti gaminami iš natūralia optine anizotropija pasižyminčių kristalų, polimerų, skystųjų kristalų ir kitų anizotropinių sluoksnių. Dauguma šių elementų yra neilgaamžiai, trapūs, jautrūs aplinkos poveikiams ar sudėtingai pagaminami. Visų šių trūkumų neturi „Serial bi-deposition“ metodu suformuotos fazinės plokštelės.

Garinimo kampu suformuotos anizotropinės dangos tyrinėjamos daugiau nei 20 metų, tačiau vis dar nėra padaryta pakankamai tyrimų, kuriais remiantis galima formuoti fazines plokšteles ant plonų mikrometrinių dydžių padėklų. Šio darbo metu buvo tyrinėjamos dvi medžiagos, tinkamos gaminti optiniams elementams, skirtiems regimajam ir ultravioletiniam šviesos diapazonui. Regimajam šviesos ruožui buvo pasirinkta TiO_2 medžiaga, kuri pasižymi aukštu optiniu pralaidumu ir vienu iš didžiausių lūžio rodiklių šiame ruože, o ultravioletinės šviesos spektrui pasirinktas Al_2O_3 . Eksperimentų metu buvo nustatytos šių medžiagų garinimo tendencijos bei optimalūs procesų parametrai fazinių plokštelių garinimui. Plonų nano-struktūrinių dangų fazinės charakteristikos buvo tyrinėjamos elipsometru. Buvo pastebėta, kad intensyvus fazės vėlinimas pasireiškia dangose, garintose didesniais nei 30 laipsnių kampais ir pasiekia maksimalią vertę, kai garinimo kampas lygus 70 laipsnių. Abiems medžiagoms buvo nustatyta, kad formuojant nano-struktūrinės dangas elektronų pluoštu, jų įtempiai mažėja didinant garinimo kampą ir pasiekia minimalias, mažesnes nei 10 MPa, reikšmes garinant ties 80 laipsnių kampu.

Remiantis tyrimo rezultatais gali būti formuojamos kokybiškos fazinės plokštelės, skirtos regimajam ir ultravioletiniam šviesos ruožui, kurios pasižymi aukštu optiniu pralaidumu bei mažais įtempiais.

Grinevičiūtė Lina. *Evaporation and characterization of nano-structured thin-films for the applications of waveplates*: Master's thesis in applied physics / supervisor prof. dr. Giedrius Laukaitis. Faculty of Mathematics and Natural Sciences, Kaunas University of Technology.

Research area and field: Physical sciences, Physics – 02P

Key words: Sculptured thin films, serial bi-deposition, optical anisotropy, tensions

Kaunas, 2016. -45 p.

SUMMARY

Phase plates – optical elements which are widely used in most of the systems which consist of polarized light. They intended to control the light – change the polarization state, control the intensity of the light, change the spatial distribution of the pulse etc. Anisotropic crystals, polymers, liquid crystals and other layers with anisotropic properties can be used in production of such elements. Most of these elements are difficult to produce, they are fragile with low resistance to environmental conditions. Phase plates produced by “Serial bi-deposition” method do not consist any of these drawbacks.

Thin anisotropic films made by glancing angle deposition are being investigated for more than 20 years but there is still a lack of investigations for production of phase plates on thin substrates and micro optics. In present work we report the investigations of two materials – TiO_2 and Al_2O_3 as appropriate for evaporation of optical elements. TiO_2 has the highest refractive index among materials suitable for visible light spectrum and Al_2O_3 is transparent material in ultraviolet light with high refractive index.

For high quality production of phase plates, a thin film has to exhibit phase delay and low inner stress. The tendencies of the coating properties and the optimal parameters for phase plates production were investigated. Nano-structured thin films were measured with spectroscopic ellipsometry. The intensive phase delay was established for layers deposited at higher than 30 degrees evaporation angles. For both materials phase delay reaches the maximum value at 70 degree deposition angle. Nano-sculptured thin films made of TiO_2 and Al_2O_3 by electron beam evaporation technique show that the inner stress depends on the evaporation angle. Increasing the angle of deposition the tensions are changing from positive to small valued negative and reach the minimal value, less than 10 MPa, when evaporated at 80 degree.

According to the results of this work, high quality wave plates can be evaporated by “Serial bi-deposition” technique. Optical elements with high optical transparency and small tensions can be produced for visible and ultraviolet light applications.