

VILNIAUS UNIVERSITETAS
FIZIKOS FAKULTETAS
LAZERINIŲ TYRIMŲ CENTRAS

Mantas Kulnickas

SILICIO OKSIDO SKULPTŪRINIŲ DANGŲ FIZIKINIŲ PARAMETRŲ
PRIKLAUSOMYBIŲ NUO APLINKOS SĄLYGŲ TYRIMAS

Magistrantūros studijų baigiamasis darbas

Lazerinės technologijos studijų programa

Studentas	Mantas Kulnickas
Leista ginti	2019.05.23
Darbo vadovas	dr. Tomas Tolenis
Konsultantė	dokt. Lina Grinevičiūtė
Recenzentas	dr. Paulius Gečys
Centro direktorius	doc. dr. Rytis Butkus

Vilnius 2019

1. Turinys

1. Turinys.....	2
2. Įvadas.....	3
3. Darbo tikslas.....	4
4. Darbo uždaviniai	4
Literatūros apžvalga	5
Optinių dangų fizinės savybės.....	5
Optinės savybės.....	5
Mechaniniai įtempiai.....	5
Plonasluoksnių dangų augimo evoliucija	6
Struktūrinių zonų modelis	7
Šešėliavimo efektas	10
Skulptūrinių dangų formavimo principai	11
Dvimatės ir trimatės skulptūrinių dangų struktūros	12
Skulptūrinių dangų formavimas elektronpluoščio garinimo būdu	14
5. Tyrimo metodika	17
Plonasluoksnių dangų formavimas elektronpluoščio garinimo būdu.....	17
Bandinių aplinkos sąlygų keitimas.....	18
Plonasluoksnių dangų lūžio rodiklių nustatymas	18
Plonasluoksnių dangų sukeltų įtempių matavimai	19
6. Rezultatai ir jų aptarimas.....	20
7. Pagrindiniai rezultatai ir išvados	34
8. Literatūros sąrašas	35
Santrauka	39
Summary.....	40

2. Įvadas

1960 metais T. H. Mainman pirmą kartą pasauliui pademonstravo veikiantį lazerį [1]. Nuo tos dienos iki šių laikų lazeriai tapo neatsiejama ne tik mokslinių tyrimų, tačiau ir pramonės dalis. Lazerinei spinduliuotei valdyti bei ja manipuluoti naudojami įvairūs elementai: metaliniai veidrodžiai, stikliniai elementai, kristalinės medžiagos ir kt. Tobulėjant lazeriams, o tuo pačiu populiarėjant jų taikymams vis įvairesnėse nišose, paraleliai pradėjo vystytis ir lazerinei spinduliuotei valdyti reikalingų elementų gamybos technologijos. Šiuo metu optinėse sistemose vieni dažniausiai sutinkamų optinių elementų – veidrodžiai, skaidrūs langeliai, filtrai, spektro dalikliai ir daugelis kitų elementų yra gaminami iš pakaitomis suformuotų skirtingo lūžio rodiklio dielektrinių medžiagų sluoksnių [2]. Tuo tarpu dažnai sutinkami poliarizaciniai elementai: tiesiniai poliarizatoriai ar fazinės plokštelės yra gaminamos iš kristalinių medžiagų.

Medžiagų įvairovė, jų išgavimas bei apdirbimas, sudėtingi gamybos technologiniai niuansai ir veikimo netobulumai vertė mokslininkus dairytis į naujas technologijas galinčias bent dalinai išspręsti šias problemas. Viena iš pasiūlytų – skulptūrinės plonasluoksnės dangos. Jų formavimas pagrįstas dangos dengimu aktyviai keičiant kampą tarp padėklo ir dengiamos medžiagos srauto viso proceso metu. Kintant dengimo kampui, dėl geometrinio šešėliavimo, kinta ir dangos porėtumas. Tokiu būdu, sluoksnis po sluoksnio sukuriama efektinio lūžio rodiklio moduliacija. Taigi, šiuo metodu iš vienos medžiagos galima suformuoti optinius elementus, kuriems iki šiol pagaminti reikėjo dviejų ar daugelio skirtingo lūžio rodiklio medžiagų. Pridedant papildomą sukimo laisvės laipsnį, pradėtos formuoti anizotropinės struktūros. Iki šių dienų, skulptūrinių dangų formavimo metodu, jau yra sukurti ir pademonstruoti fazės vėlinimo elementai [3], apskritiminės poliarizacijos filtrai [4], biologiniai jutikliai [5], Frenelio atspindžius mažinančios dangos [6] ir daugelis kitų. Ši technologija taip pat leidžia suformuoti aukštos optinės kokybės elementus su aukštu atsparumu optinei spinduliuotei [7].

Nepaisant daugelio skulptūrinių dangų privalumų, šios yra porėtos, taigi, galimai mažiau atsparios aplinkos sąlygoms. Kadangi ši technologija, lyginant su konvencinėmis plonasluoksnių dangų formavimo metodikomis, yra pakankamai nauja, nėra detalčiai ištirta aplinkos sąlygų įtaka jų veikimui. Taigi, šiame darbe ir bus tiriama aplinkos temperatūros ir drėgmės daroma įtaka plonasluoksnių interferencinių skulptūrinių dangų veikimui.

3. Darbo tikslas

Nustatyti aplinkos sąlygų: temperatūros ir drėgmės daromą įtaką plonasluoksnėms interferencinėms skulptūrinėms dangoms.

4. Darbo uždaviniai

1. Elektronpluoščio garinimo būdu skirtingais garinimo kampais padengti lydyto kvarco padėklus skulptūrinėmis vienasluoksnėmis izotropinėmis bei anizotropinėmis dangomis naudojant skirtingą deguonies dujų srautą.
2. Nustatyti, kokius įtempius optinio elemento paviršiuje sukėlė kiekviena iš tiriamų optinių dangų.
3. Nustatyti aplinkos drėgmės ir temperatūros daromą įtaką kiekvieno tiriamo optinio elemento paviršiaus įtempiams bei spektrinėms charakteristikoms.
4. Nustatyti praėjusios bangos fronto iškraipymų pokyčio priklausomybę anizotropinėms dangoms keičiant aplinkos sąlygas.

Literatūros apžvalga

Optinių dangų fizinės savybės

Optinės savybės

Medžiaga sklindanti elektromagnetinė banga sąveikauja su tos medžiagos molekulėmis, jonais, atomais ir verčia juos virpėti bangos svyravimo dažniu ω . Jei bangos dažnis yra toli nuo medžiagos rezonansinio dažnio, ši sklis be žymios sugerties. Tačiau jei dažnis yra artimas – stebėsime sugertį. Šiuos reiškinius aprašo medžiagos kompleksinis lūžio rodiklis \tilde{n} :

$$\tilde{n} = n + ik, \quad (1)$$

kur $k = \frac{4\pi\vartheta}{\lambda}$ ir yra ekstikcijos koeficientas atsakingas už sugertį medžiagoje. ϑ pastarojoje išraiškoje žymi sugerties koeficientą. Kompleksinis lūžio rodiklis \tilde{n} išreiškiamas per dielektrinę skvarbą $\tilde{\epsilon}$:

$$\tilde{n} = \sqrt{\tilde{\epsilon}}. \quad (2)$$

Tokiu atveju dielektrinė skvarba taipogi yra kompleksinis dydis:

$$\tilde{\epsilon} = \epsilon_1 + i\epsilon_2. \quad (3)$$

Pagal elektroninę dispersijos teoriją [8], dielektrinės skvarbos menama ϵ_2 ir realioji ϵ_1 dalys:

$$\epsilon_1(\omega) \equiv 1 + \chi + \frac{Ne^2}{\epsilon_0 m_0} \frac{\omega_0^2 - \omega^2}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + (\gamma\omega)^2}, \quad \epsilon_2(\omega) \equiv \frac{Ne^2}{\epsilon_0 m_0} \frac{\gamma\omega}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + (\gamma\omega)^2}, \quad (4)$$

kur ω_0 – medžiagos dalelių savasis svyravimų dažnis, γ – slopinimo koeficientas, ϵ_0 – dielektrinė konstanta, e ir m_0 – elektrono krūvis ir masė, χ – dielektrinis jautris, N – dipolių skaičius.

Optikoje itin plačiai naudojamos dielektrinės medžiagos pasižymi skaidrumo langu visoje regimojoje srityje, dalyje UV ir IR sričių. Tipiškai, pralaidumo zonos IR krašte, spinduliuotės sugertis pasireiškia dėl savųjų molekulių virpėjimo dažnių, o UV srityje – dėl elektronų rezonansinių dažnių. Pastaroji riba vadinama sugerties kraštu, o ši dažnį atitinkanti kvanto energija nusako medžiagos draustinės juostos plotį. Spinduliuotės sugerties dėsnį 1729 metais eksperimentiškai nustatė P. Bugeris, o 1760 metais teoriškai pagrindė J. Lambertas. Dėsnis aprašo pradinės monochromatinės šviesos intensyvumo I_0 sumažėjimą šiai praėjus pro storio x medžiagą:

$$I = I_0 e^{-\vartheta x}. \quad (5)$$

Taigi, spinduliuotė praėjusi x storio medžiagos sluoksnį susilpnėja e kartų.

Mechaniniai įtempiai

Pagrindiniai veiksniai, į kuriuos atsižvelgiama renkantis medžiagas, iš kurios bus gaminami dangos sluoksniai, yra jos pralaidumas pasirinktame spektriniame ruože bei technologinės galimybės ją nusodinti ant padėklo. Tačiau ne ką mažiau svarbu atkreipti dėmesį į padėklo ir medžiagos šiluminių

plėtimosi koeficientų suderinamumą. Jei šie stipriai skirsis, egzistuoja didelė tikimybė, kad dangą sutrūks arba nusilups. Tai itin aktualu tankioms dangoms, skirtoms veikti UV srityje. Pavyzdžiui, dangoms, kurios skirtos veikti UV diapazono srityje, dėl plataus draustinės juostos tarpo, dažnai naudojamos fluoridinės medžiagos. Vienos dažniausiai pasitaikančių – magnio fluorido (MgF_2) – šiluminis plėtimosi koeficientas γ yra $16,5 \cdot 10^{-6}/K$. Tuo tarpu padėkliukai dažniausiai gaminami iš lydyto kvarco, kurio γ yra $0,55 \cdot 10^{-6}/K$. Dėl tokio ženklaus koeficientų skirtumo, ant lydyto kvarco padėklo storesnės MgF_2 dangos užgarinti nepavyktų – ši sutrūktų. Dėl didelių fluoridinių dangų sukiamų mechaninių įtempių, šių medžiagų taikymai yra riboti [9,10].

Bendru atveju mechaniniai įtempiai skirstomi į vidinius, išorinius, fizikinius-cheminius bei temperatūrinius. Vidiniai priklauso nuo dangos cheminės sudėties, kristalinės struktūros bei dangos ir padėklo sąveikos. Šio tipo įtempiams didžiausią įtaką daro padėklo temperatūra, dengimo sparta bei aplinkos slėgis proceso metu. Išoriniai įtempiai atsiranda dėl tūrinių dangos pokyčių. Fizikiniai-cheminiai įtempiai atsiranda dėl aplinkos drėgmės poveikio [11,12]. Temperatūrinius įtempius σ_T sąlygoja dangos γ_d ir padėklo γ_p šiluminių plėtimosi koeficientų skirtumas. Esant temperatūrų skirtumui tarp aplinkos T_a ir padėklo T_p , temperatūriniai įtempiai bus lygūs:

$$\sigma_T = \left(\frac{E_d}{1-\nu_d} \right) (\gamma_d - \gamma_p) (T_a - T_p), \quad (6)$$

kur E_d – Jungo modulis, ν_d – Puasono santykis.

Bent dalinai išvengti mechaninių įtempių galima tinkamai suderinus padėklo ir dangos medžiagų šiluminio plėtimosi koeficientus. Pavyzdžiui, minėtąjį MgF_2 galima kokybiškai užgarinti ant CaF_2 padėklo, kurio šiluminio plėtimosi koeficientas yra $18,85 \cdot 10^{-6}/K$. Kitas būdas – naudoti pasluoksnius, kurie turėtų tarpinę γ koeficiento vertę tarp dangos ir padėklo. Įtempius taip pat sukelia ir dangos storis, tad gelbėtų ir dangos struktūros optimizavimas sumažinant dangos sluoksnių skaičių. Įtempiams sumažinti praktikoje dažnai naudojama atkaitinimo technika, kuri atliekama pasibaigus dengimo procesui. Žinoma, kad nustojus garinti medžiagą ant padėklo, dangoje vis dar vyksta difuzija – dangos dalelės užima stabiliausias padėtis. Taip pat dengimo proceso pabaigoje neretai naudojamas gradientinis aušinimas, kad neįvyktų staigus temperatūrinis šokas.

Plonasluoksnių dangų augimo evoliucija

Plonaskuosnių dangų augimo evoliucija susideda iš kelių pagrindinių etapų: garų kondensacijos ir nukleacijos, užuomazginių salelių formavimosi, jų plėtimosi, jungimosi ir tolimesnio sluoksnių augimo. Kiekvienas iš šių etapų turi įtakos galutinėms dangos savybėms [13,14].

Kondensacijos ir nukleacijos metu garų atomai pasiekia padėklo paviršių ir yra susaistomi metališkujų, kovalentinių arba joninių ryšių. Jei tarp padėklo ir atomo sudaromas ryšys nėra stiprus arba atomo turimos energijos pakanka, šis gali visiškai atitrūkti, imti judėti pastarojo paviršiumi arba tūryje. Pirmojo, atitrūkimo nuo padėklo paviršiaus, atvejo tikimybė, lyginant su paviršinės atomų difuzijos tikimybe, yra nedidelė. Kondensacijos spartai nusakyti buvo įvestas taip vadinamas sukibimo koeficientas [15]. Jis parodo link padėklo atskriejančių dalelių santykį su prikimbančių dalelių kiekiu. Ši sparta stipriai priklauso nuo medžiagos garinimo spartos, padėklo paviršiaus morfologijos, užterštumo bei temperatūros. Kuomet koeficiento vertė artėja į vienetą, padėklo paviršiuje atomai jungiasi į spiečius ir taip sudaro pradines mikrostruktūras – branduolius, atveriančius kelią tolimesniems dangos evoliucijos etapams.

Atomų prisijungimo spartai didėjant, užuomazginiai branduoliai plečiasi, jungiasi ir sudaro struktūras pagal vieną iš trijų modelių. Volmer – Weber modelis aprašo situaciją, kuomet atomai sudaro stiprius ryšius tarpusavyje ir silpnus su padėklu. Tokiu atveju salelių pavidalu formuojasi 3D erdvinės struktūros. Esant priešingai situacijai – kuomet atomai tvirtai susisieja su padėklu ir silpniau vienas su kitu – dominuoja dvimatis tolygus sluoksniu augimas. Tokia sluoksnių formavimosi evoliucija aprašoma Frank – van der Merwe modeliū. Neretai egzistuoja situacija, kuomet pradžioje atomai yra stipriai surišti su padėklu, tačiau užaugus keletui atominių sluoksnių, ima vis labiau stiprėti sąryšis tarp garų atomų. Toks sluoksnių augimas aprašomas Stranski – Krastanov modeliū. Taigi, kuris modelis dominuos, priklausys nuo paviršinių padėklo, užuomazginių branduolių bei atskriejančių garų atomų energijų [16]. Visais anksčiau aptartais dangos formavimosi etapais, jos morfologijai įtakos turi keturi principiniai veiksniai: geometrinis šešėliavimas, paviršinė bei turinė dangos atomų difuzija ir nuolatiniai energijų mainai tarp atomų tarpusavyje bei padėklo paviršiaus. Siekiant aprašyti šių veiksnių daromą įtaką dangos morfologijai, buvo sukurtas taip vadinamas struktūrinis dangos zonų modelis [17].

Struktūrinių zonų modelis

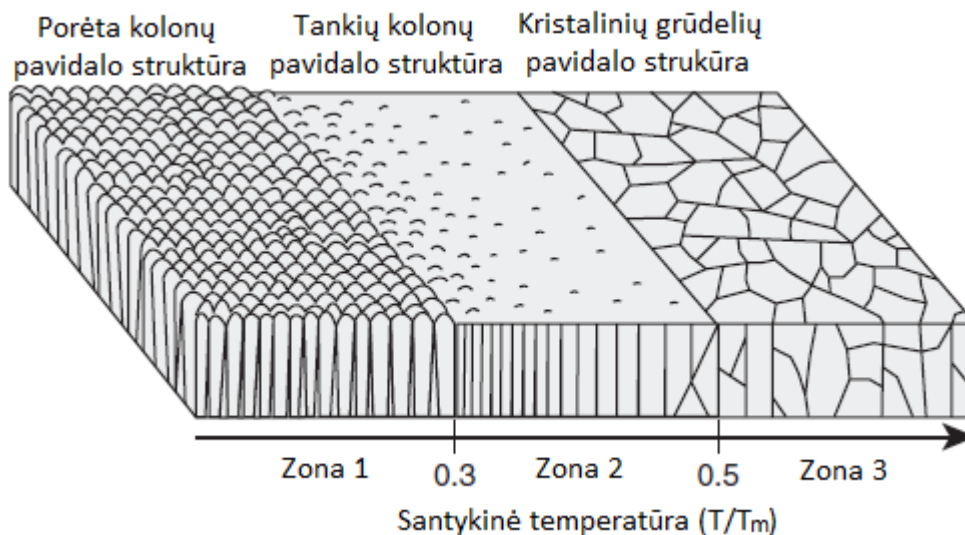
1969 metais B. A. Movchan ir A. V. Demchishin vieni pirmųjų sukūrė struktūrinių zonų modelį skirtą aprašyti storų (tarp 0,3 ir 2 mm) dangų morfologijai [18]. Atsižvelgdami į padėklo paviršiaus T ir garinamos medžiagos lydymosi T_m temperatūrų santykį dengimo proceso metu, jie suklasifikavo galimas dangos struktūras į tris grupes (žr. 1 pav.):

Pirma zona ($T/T_m < 0,3$) – danga sudaryta iš daugelio makrokolonų formos struktūrų, kurios tarpusavyje atskirtos tuštumų. Dėl menkos paviršinės ir tūrinės dangos atomų difuzijos, vidinė struktūra yra itin porėta. Aukštos skyros mikroskopijos metodais nustatyta, kad makrokolonos nėra homogeniškos [19]. Jas sudaro mažesnės mikro ir nanokolonos, kurios jungdamosi į vieną darinį suformuoja

makrostruktūras. Pavyzdžiui itin ploną, apie 15 nm storio, dangą sudaro 1 – 3 nm nanokolonų masyvas. Kita kolonų formavimosi savybė yra ta, jog augdamos, jog plečiasi. Gaunamos kupolo formos struktūros. Kupolas didėja storėjant dangai.

Antra zona ($0,3 < T/T_m < 0,5$) – dėl žymios paviršinės difuzijos, šios zonos dangos yra beveik tokios pačios struktūros, tačiau kur kas mažiau porėtos, lyginant su pirmai zonai priskiriamomis dangomis. Jų tūrinė struktūra yra glaudžiai gretimos makrokolonos. Skirtingai nei pirmos zonos atveju, kolonų viršūnės nėra kupolo formos.

Trečia zona ($T/T_m > 0,5$) – šioje zonoje, dėl palyginus aukšto temperatūrų santykio T/T_m , įsijungia tūrinės difuzijos mechanizmas. Dėl šios priežasties dangos yra labai tankios, o vidinė struktūra – tolygiai išsidėstę kristalitai. Šio tipo dangų paviršiaus šiurkštumas yra mažiausias iš visų trijų zonų.



1 pav. Vienas pirmųjų, struktūrinis trijų zonų dangų modelis [18].

Egzistuoja ir daugiau struktūrinių zonų modelių, kurie įtraukia daugiau veiksnių darančių įtaką dangos morfologijai. Vienas tokių, į modelį įtraukiančių slėgį bei asistuojančias dujas, 1973 metais buvo pasiūlytas amerikiečių mokslininko J. Thornton [20]. Lyginant su Movchan ir Demchishin modeliu, J. Thornton modelis yra papildytas zona T (žr. 2 pav.).

Pirma zona ($T/T_m < 0,3$) – kaip ir ankstesniame modelyje, šios zonos dangos yra itin porėtos. Tai sąlygojama geometrinio šešėliavimo efekto: aukštesnės paviršiaus sritys užstoja žemesnes. Šešėliavimo efektas yra tuo didesnis, kuo didesnis pasvirimo kampas tarp padėkliuko ir garinamos medžiagos srauto. Polinkio kampas gali būti sukurtas mechaniškai paverčiant padėklą arba šį reiškinį taip pat gali sukelti garinamos medžiagos atomų susidūrimai su asistuojančių dujų atomais. Taipogi, susidūrimų metu garinamos medžiagos atomai praranda dalį savo energijos, todėl sumažinama tūrinės bei paviršinės difuzijų tikimybė. Atlikti tyrimai parodė, kad deguonis, kuris dažnai naudojamas kaip asistuojančios

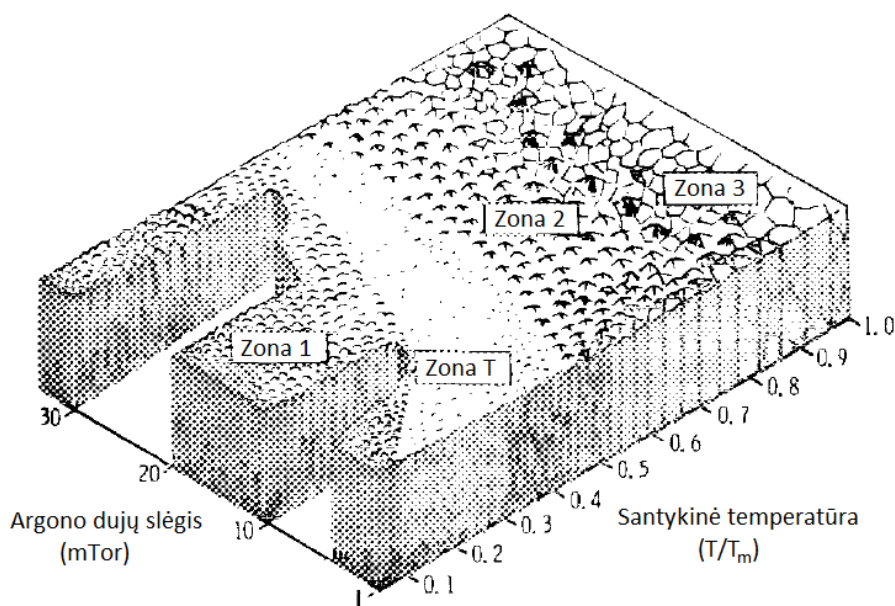
dujos, mažina atomų difuziją [21,22] ir dėl šios priežasties, naudojant tokias dujas, net esant aukštesniam temperatūrų T/T_m santykiui nei 0,3, galimas pirmos zonos dangų formavimasis.

Zona T ($T/T_m < 0,3$) – šios zonos dangos gaunamos, kuomet šešėliavimo efektas praktiškai nepasireiškia. Taip gali nutikti, kuomet nėra asistuojančių dujų, mechaninio padėklo pasvyrimo arba šio paviršius yra su itin mažu šiurkštumu. Dėl beveik nepasireiškiančio šešėliavimo efekto, T zonos dangos yra tankesnės nei pirmosios.

Antra zona ($0,3 < T/T_m < 0,5$) – net ir egzistuojant šešėliavimo reiškiniui, dėl sąlyginai aukštesnės temperatūros, paviršinė dangos atomų difuzija yra dominuojantis reiškinys. Šios zonos dangos yra tankios koloninės struktūros.

Trečia zona ($T/T_m > 0,5$) – šios zonos dangos, dėl didelio temperatūrų santykio T/T_m ir pasireiškusiųs tūrinės difuzijos, yra itin tankios. Dėl šios priežasties, padėkliuko paviršiaus morfologija beveik neturi jokios įtakos dangos struktūrai.

Aukščiau aptarti modeliai, nors ir yra ganėtinai paprasti, tačiau tiksliai apibūdina besiformuojančių dangų morfologiją priklausomai nuo pagrindinių proceso parametrų. Literatūroje pateikiami ir pažangesni modeliai, kurie aprašo sudėtingesnes struktūras. Vienas tokių yra 2010 metais pasiūlytas A. Anders [23]. Visų šių modelių sukūrimas leido detaliau prognozuoti būsimų dangų morfologiją keičiant tam tikrus proceso parametrus: temperatūrą, slėgį, asistuojančias dujas, jų tankį, padėkliuko kampą garinamos medžiagos atžvilgiu ir daugelį kitų. Kampo keitimas nėra vienareikšmis ir bus aptartas tolimesniame skyriuje.



2 pav. J. Thorton pasiūlytas struktūrinių dangos zonų modelis [20].

Šešėliavimo efektas

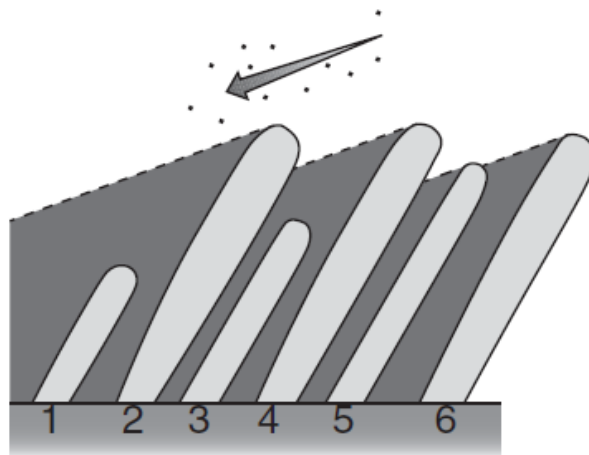
Dėl neidealiai tolygių padėkliukų paviršių, šie pasižymi tam tikru šiurkštumu – aukštesnių ir žemesnių paviršiaus vietų visuma. Pavertus padėkliuką tam tikru kampu α garinamos medžiagos atžvilgiu, žvelgiant iš šios perspektyvos, aukštesnės paviršiaus sritys užstoja žemesnes – sukuriamas geometrinio šešėliavimo efektas (žr. 3 pav.). Kuomet proceso temperatūra yra žema, besiformuojančioje dangoje difuzija beveik nevyksta, todėl, dėl geometrinio šešėliavimo, vis daugiau atomų prikimba prie aukštesnių paviršiaus vietų taip didindami bendrą paviršiaus šiurkštumą. Vidinė tokios dangos struktūra yra kampu β pasvirusių nanoskopinių kolonų masyvas. Kampas β apibrėžiamas kaip kampas tarp padėklo paviršiaus statmens ir kolonos centrinės ašies. Intuityviai atrodytų, kad kampas α turėtų būti lygus kampui β . Tačiau jau iš pirmųjų empirinių tyrimų, 1999 metais atliktų J. M. Nieuwenhuizen ir H. B. Haanstra [24], paaiškėjo, kad β visad yra mažesnis už α . Pastarieji mokslininkai, pasitelkę surinktus rezultatus, nustatė tokį tangentinį sąryšį:

$$\tan(\beta) = \frac{1}{2} \tan(\alpha). \quad (7)$$

Sąryšis (7) yra tinkamas tik palyginus nedideliems kampams. Garinimo kampui α esant daugiau nei 70° , pastaroji formulė nebėra tinkama kolonų posvyrio kampui β įvertinti. Tikslesniam kampų β ir α sąryšiui nustatyti, R. N. Tait su kolegomis eksperimentiškai tyrinėjo magnio fluorida (MgF_2) bei geležies (Fe) dangas [25]. Galiausiai jiems pavyko išvesti taip vadinamą kosinuso taisyklę (8):

$$\beta = \alpha - \arcsin\left(\frac{1 - \cos(\alpha)}{2}\right), \quad (8)$$

kuri kur kas tiksliau nusakė kampų β ir α sąryšiui esant dideliems α kampams, lyginant su tangentiniu sąryšiu (7).



3 pav. Šešių paviršiaus struktūrų geometrinio šešėliavimo iliustracija [26].

Kuomet proceso temperatūra yra pakankamai aukšta, dangose vyksta paviršinė bei tūrinė difuzija. Šios mastui didėjant, šešėliavimo efektas daro vis mažiau įtakos dangos morfologijai. Taigi, tiek

šešėliavimo efektas, tiek proceso temperatūros įtakota atomų difuzija, daro ženklia įtaką optinių dangų morfologijai [27]. Norėdami sukurti universalesnį modelį, įtraukiantį abu minėtus veiksnius, S. Lichter ir J. Chen modifikavo tangentinę formulę (7) į ją įvesdami koeficientą ρ – parametą, nusakantį paviršinės difuzijos mastą:

$$\beta = \frac{2}{3} \frac{\tan(\alpha)}{1 + \rho \tan(\alpha) \sin(\alpha)}. \quad (9)$$

Kuomet paviršinė difuzija yra menka ir ρ mažas, esant nedideliems garinimo kampams α , išraiška (9) tampa ekvivalenti išraiškai (7).

Skulptūrinių dangų formavimo principai

Panaudojant ankstesniame skyrelyje aptartą šešėliavimo efektą, pradėta naujo tipo – skulptūrinių optinių plonaskluosnių dangų vystymo era. Šio tipo dangos tokį pavadinimą įgavo dėl neįprastos savo vidinės struktūros, kuri, priklausomai nuo taikymo, gali būti labai įvairi: nuo dvimačių (koloninių [28], ševroninių [29], C formos [30] ir kitų [31]) iki trimačių (chiralinių [32, 33], keturkampių, trikampių [34, 35]). Įprastu konvenciniu plonasluoksnių optinių dangų dengimo metu, dangos struktūra yra formuojama garų atomų srautui link padėklo skriejant statmenai arba labai mažais kampais. Skulptūrinių dangų atveju, dengimo kampas gali būti keičiamas riboje tarp 0° ir 90° visu dangos formavimo metu, priklausomai kokią struktūrą siekiama suformuoti [36]. Kuomet padėklas yra paverstas tam tikru kampu garų atomų srauto atžvilgiu, dėl šešėliavimo efekto, aukštesnės padėklo sritys užstoja žemesnes. Tokiu atveju, naujai atskrieję atomai prikimba ne visame paviršiuje, o tik ant aukštesnių zonų. Suformuojamas kampu β garų šaltinio link pasvirusių kolonų pavidalo struktūros sluoksnis.

Vienas pagrindinių skulptūrinių dangų išskirtinumų yra galimybė moduluoti efektinį sluoksnių lūžio rodiklį nekeičiant dengiamos medžiagos, tačiau keičiant padėklo posvyrio kampą α . Kuo kampas mažesnis, tuo gaunama struktūra yra tankesnė, o taigi ir sluoksnio lūžio rodiklis didesnis. Ir atvirkščiai – didėjant kampui, sluoksnio lūžio rodiklis mažėja. Ši savybė pasireiškia dėl šešėliavimo masto – esant didesniam kampui α , sukuriamas geometrinis šešėlis yra didesnis. Taigi, suformuojamas labiau porėtas dangos sluoksnis, kurio efektinis lūžio rodiklis, susidedantis iš oro ir dangos lūžio rodiklių dedamųjų, yra žemesnis.

Elektronpluoščio garinimo būdu dengiamos medžiagos atomų energija įprastai neviršija 1 eV, todėl dažnu atveju, siekiant sukurti tankesnę dangos struktūrą, konvencinio garinimo metu naudojami asistuojantys, įprastai deguonies arba argono, dujų jonai. Jų energija tipiškai svyruoja tarp 30 eV ir 200 eV. Jonai, susidurdami su dangos atomais, pastariesiems perduoda dalį savo kinetinės energijos, kurios dėka dangos paviršiuje bei tūryje gali vykti difuzija. Formuojant skulptūrines dangas, siekiant

nesudarkyti formuojamos struktūros, difuzijos stengiamasi vengti. Dėl šios priežasties asistuojantys jonai ir papildomas padėklų kaitinimas praktikoje taikomi gana retai. Visgi, S. Mukherjee ir D. Gall atliko eksperimentus ir parodė [37], kad esant dideliame garinimo kampui α , o tuo pačiu ir žymiam šešėliavimo efektui, padėklų kaitinimas gali atverti papildomų skulptūrinių dangų inžinerijos galimybių. Net ir suteikiant papildomos energijos dangos atomams šiuos kaitinant, šešėliavimo efektas išlieka dominuojančiu efektu skulptūrinių dangų formavime, tad, pagal skulptūrinių zonų modelį, tokios dangos priskiriamos pirmajai zonai.

Ne ką mažiau svarbus veiksnys, norint suformuoti skulptūrinės dangas, yra slėgis garinimo kameroje, kuris turėtų būti ne didesnis nei 10^{-4} mbar. Esant tokiam vakuumo lygiui, garinamos medžiagos atomai praktiškai be jokių susidūrimų pasiekia taikinį – padėklo paviršių. Tokiu būdu ne tik tiksliai formuojama norima struktūra, tačiau ir dengimo greitis gali būti itin didelis. Ši sąlyga tampa svarbi, kuomet skulptūrinės dangos realizuojamos komerciškai.

Skulptūrinių dangų formavime naudojamas ne tik dengimas kampu, tačiau įvedamas dar vienas judėjimo laisvės laipsnis – laikiklio su padėklais sukimas. Mechanškai sukant padėkliukus iš anksto įvardintu periodu, formuojami spiralinės, zigzaginės ir kitokio tipo dangų sluoksniai. Taigi, skulptūrinių dangų struktūros gali būti ne tik dvimatės, tačiau ir trimatės.

Dvimatės ir trimatės skulptūrinių dangų struktūros

Per pastaruosius keletą dešimtmečių sukurtas nemažas kiekis įvairių skulptūrinių dangų struktūrų, kurios, pagal savo sandarą, skirstomos į dvimates ir trimates [38]. Jei struktūra yra simetrinė jos centrinės ašies atžvilgiu, tai ji laikoma dvimate. Pati paprasčiausia dvimatė struktūra yra koloninė (žr. 4 (a) pav.), kuri pirmą kartą aprašyta dar 1886 metais Vokietijoje [39]. Jos susiformavimas grindžiamas šešėliavimo reiškiniu. Augant kolonai, ši palaipsniui plečiasi. Deja, dėl atsitiktinių nukleacijos ir šešėliavimo efektų, labai sudėtinga nusakyti, kurios kolonos išaugs ir kurios bus uždominuotos [40]. Taigi, negalime kontroliuoti koloninio dangos sluoksnio mikrostruktūros, tačiau formavimo metu, keisdami proceso parametrus, galime daryti įtaką visai sluoksnio makrostruktūrai. Kita koloninių struktūrų savybė – eliptiškumas. Esant pasviram padėklui ir egzistuojant šešėliavimui, besiformuojanti kolona auga garinamos medžiagos link. Struktūra negali plisti išilgai dengiamos medžiagos garų kryptčiai padėklo paviršiuje, kadangi iš vienos pusės yra ribojama paties, o iš kitos pusės – gretimoms kolonoms šešėlio. Tačiau struktūra gali plisti padėklo paviršiuje statmena kryptimi, kuri nėra ribojama šešėlio. Taip plintančios struktūros pasidaro eliptinės. Esant itin dideliems garinimo kampams, viena kolona gali pradėti užstoti kitą. Tokiu atveju formuojasi pusbėglio ar kitokios formos kolonos. 1989 metais, panaudodami pasvirusių kolonų struktūrą, T. Motohiro ir Y. Taga Motohiro pirmieji sukūrė tokio tipo fazinę plokštelę

[41]. Deja, ji pasižymėjo ženkliai nehomogeniškumu išilgai 24 cm apertūros. Šiai problemai išspręsti, ant jau esamos dangos, užgarintas dar vienas sluoksnis, kuomet padėkliukas pasuktas 180° kampu. Tokiu būdu suformuota zigzaginė struktūra.

Ševroninė, arba kitaip – zigzaginė – yra antra pagal paprastumą dvimatė struktūra. Ji suformuojama periodiškai keičiant padėklo posūkio kampą φ 180° kampu (žr. 4 (b) pav.). Eksperimentiškai pastebėta [42], kad didėjant tokios struktūros sluoksnių skaičiui, didėja ir kampas β tarp struktūros ir padėklo, o didžiausias pokytis stebimas tarp pirmo ir antro sluoksnio ($\beta_2 > \beta_1$). Taip nutinka, kadangi pasukus struktūrą 180° kampu naujai atskriejančių garų atomų atžvilgiu, pasikeičia pagrindo tekstūra ant kurios šie nusėda. Taigi, kartu pasikeičia ir šešėliavimo sąlygos. Tokiu atveju galime įvesti efektinį garinimo kampą α' , kuris lygus:

$$\alpha' = \alpha + \beta - 90^\circ, \quad (10)$$

kur α – kampas tarp padėklo ir garinamos medžiagos atomų srauto. Panaudojus tangentinę formulę (7), galime įvesti tangentinį struktūros, užgarintos ant pasvirusios koloninės struktūros, efektinį posvyrio kampą β' :

$$\beta' = \arctan\left(\frac{\tan(\alpha')}{2}\right). \quad (11)$$

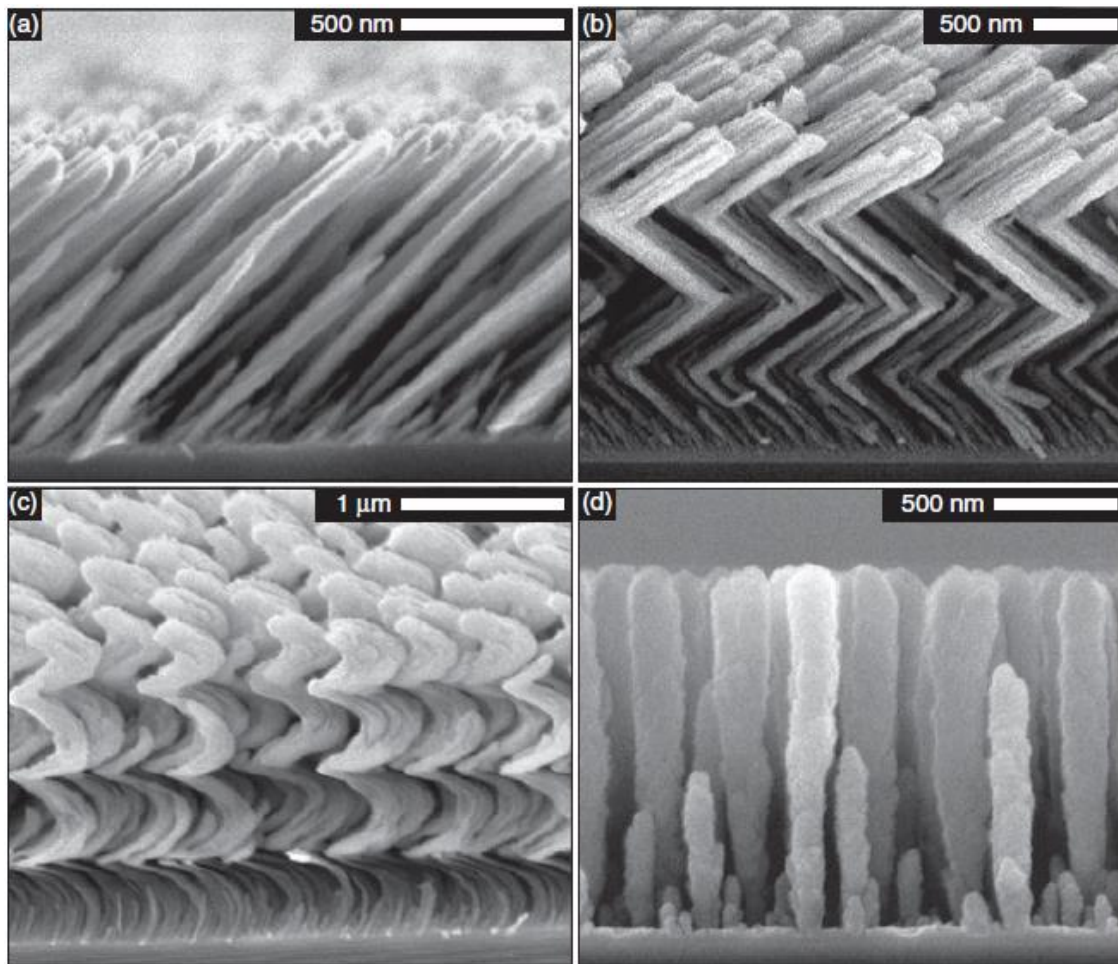
Esant preciziniams taikymams, kampą β reikia išlaikyti pastovų visiems sluoksniams. Tai galima padaryti įvedus papildomą garinimo kampo α kompensavimą kampu α_m :

$$\alpha_m = \arctan(2 \tan(2\beta - 90^\circ)) - \beta + 90^\circ. \quad (12)$$

Kitos tipinės dvimatės struktūros gali būti S ir C formos pavidalo, tačiau jų taikymai yra palyginti retesni nei koloninių ar zigzaginių.

Kuomet dangos struktūra nėra simetriška centrinės ašies atžvilgiu, ji laikoma trimate. Tai įprastai keturkampės, trikampės ar spiralinės formos struktūros. Pastarąsias pirmasis užaugino K. Robbie su kolegomis dar 1995 metais panaudojant magnio fluoridą [43]. Šios struktūros suformuojamos, kuomet kampas φ keičiamas tolygiai greičiu ω (žr. 4 (c) pav.). Padėklo sukimo greitis nusako, koks bus spiralės periodas P – užaugintos struktūros storis per vieną pilną apsisukimą ir spiralės morfologija [44]. Tuo tarpu pačios struktūros diametras w priklausys nuo garinimo kampo α ir nuo medžiagos savybių. Periodo P ir diametro w santykis nusako spiralinės struktūros morfologiją. Kuomet padėklų sukimo greitis ω yra nedidelis ir $P > w$, suformuojama tolygi spiralinė struktūra, tačiau padidinus greitį tiek, kad $P < w$, formuojasi ne spiralė, o kolona (žr. 4 (d) pav.). Tipinis spiralinės struktūros diametras yra 10 – 50 nm. Tokiu atveju, struktūrizuota spiralė formosis, kuomet $P > 100$ nm ir spiralinės struktūros visai nestebėsime, kuomet $P < 10$ nm. Praktiniu požiūriu, spiralinės struktūros yra naudojamos manipuluojant apskritiminės poliarizacijos pluoštais. Jei struktūra atitinka dešininį sraigatą, tuomet ji atspindės dešininę

apskritiminę poliarizaciją, o kairinę praleis ir analogiškai atvirkščiai, jei struktūra bus kairinis sraigtas [45].

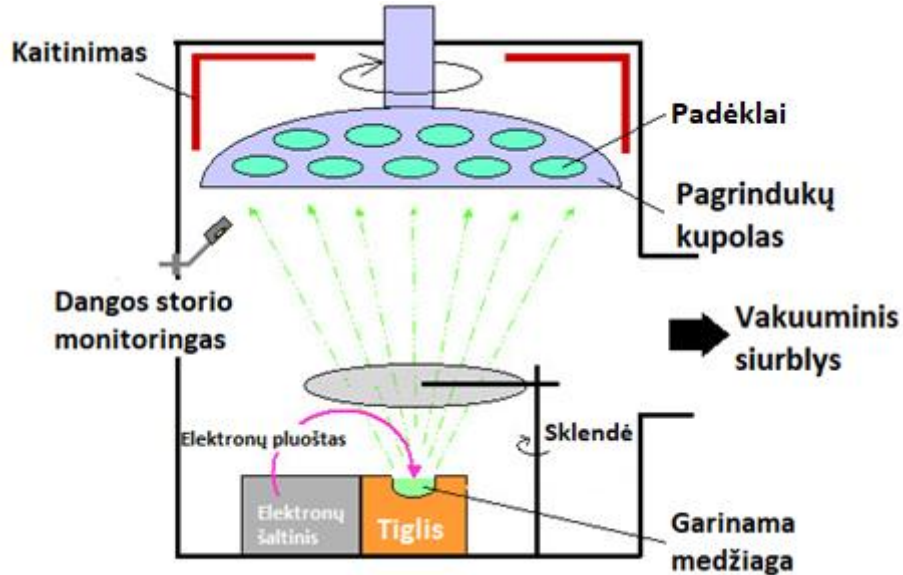


4 pav. Dažniausiai sutinkamų skulptūrinių dangų pavyzdžiai. (a) – 80 laipsnių kampu užgarinta danga be sukimo, (b) – zigzaginė (ševroninė), (c) – spiralinė struktūros, (d) – kampu užgarinta danga su greitu padėklų sukimu [46].

Skulptūrinių dangų formavimas elektronpluoščio garinimo būdu

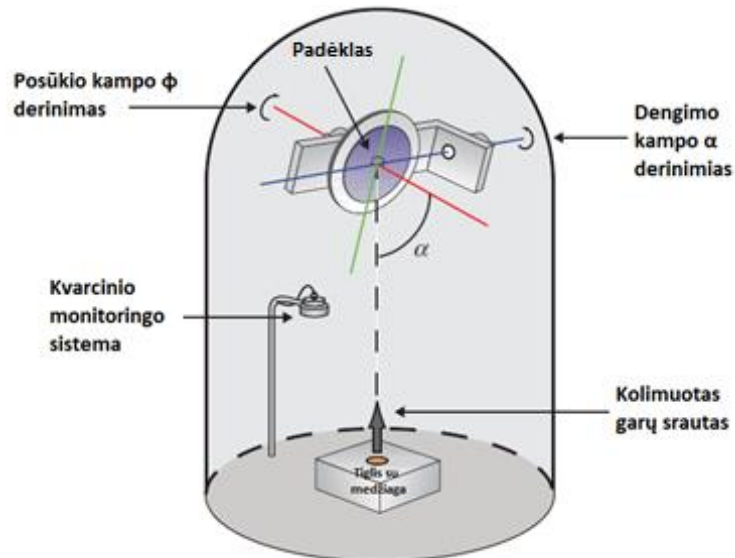
Elektronpluoščio garinimo technologijos principinė schema pateikta 5 paveikslėlyje. Procesas pagrįstas medžiagos, patalpintos į vandeniui šaldomą tiglą, kaitinimu volframinio katodo sukuriamu elektronų pluoštu taip ją garinant ir nusodinant ant kameros viršuje esančių padėklų. Pastarieji, sluoksnių tolygumui užtikrinti, garinimo metu yra sukami. Tokiu būdu įprastai garinamos medžiagos, kurių lydymosi temperatūra yra aukštesnė nei 1500 °C (tipiškai oksidai). Medžiagoms, kurių lydymosi temperatūra yra žemesnė nei 1500 °C, lydėti naudojamas varžinis garinimo būdas. Jo principas yra medžiagos, patalpintos į tiglą, išlydymas pastarojo temperatūrą pakeliant per jį leidžiama elektros srove [15]. Tokiu būdu įprastai garinami metalai. Siekiant, kad garinamosios dalelės pasiektų taikinį, jų

laisvojo lėkio kelias turi būti pakankamai ilgas. Tai pasiekti įprastinėje aplinkoje būtų neįmanoma, todėl kameroje siurbliais sudaromas aukštas, apie $5 \cdot 10^{-5}$ mbar siekiantis vakuumas. Teisingas dangų sluoksnio storis užtikrinamas, įprastai, spektrinėmis arba kvarcinio monitoringo sistemomis. Pastarojo monitoringo principas yra sekti, kaip stipriai pasikeitė kvarcinio detektoriaus rezonansinis dažnis garavimo proceso metu ir pagal tai apskaičiuoti kokio storio medžiagos sluoksnis jau yra nusodintas ant padėklų.



5 pav. Elektronpluoščio garinimo technologijos principinė schema.

Elektronpluoščio garinimo technologija, ją šiek tiek modifikavus nuo įprastos konfigūracijos, gali būti pritaikyta skulptūrinių dangų formavimui. Reikalinga modifikacija – ašinio kampo φ ir dengimo kampo α derinimas. Tipiškai tam panaudojami du žingsniniai varikliukai (žr. 6 pav). Tokia garinimo



6 pav. Principinė skulptūrinių dangų dengimui reikalingos įrangos komponentų schema [47].
metodika leidžia suformuoti tiksliai pageidaujamas struktūras.

Elektronpluoščio garinimo kameroje tiglio su medžiaga yra sąlyginai toli nuo padėklų ant kurių nusodinama medžiaga. Žvelgiant iš padėklo perspektyvos, šaltinis yra taškinis objektas. Tokiu atveju, padėklui esant tiksliai virš tiglio su medžiaga, ši garuodama sukuria kolimuotą garų srautą. Kuomet atstumas tarp padėklo ir garų šaltinio yra palyginamo dydžio arba kameros slėgis yra sąlyginai didelis ($>10^{-3}$ mbar), garų srautas bus nebekolimuotas. Taip nutiktų dėl garuojančių dalelių susidūrimo su deguonies molekulėmis, kurios pakeistų garų dalelių trajektoriją. Dėl šios priežasties garuojančios dalelės padėklo paviršių pasiektų įvairiais kampais, todėl struktūros augimo kampas β būtų sunkiai kontroliuojamas. Pastaruoju atveju formuojama struktūra skirtusi nuo pageidaujamos, taigi ir užgarinta danga neatliktų iš anksto numatytos funkcijos bei būtų nehomogeniška. Šiems nepageidaujamiems veiksniams eliminuoti, naudojami fiziniai bei elektrostatiniai kolimuojantys įrenginiai. Paprasčiausias fizinis įrenginys – apertūra. Nors ji ir padeda pasiekti geresnę dangos tolygumą per padėklo plotą, tačiau gerokai sumažina dengimo greitį. Taip pat nemaža dalis garuojančios medžiagos nusėda ant pačios apertūros, todėl ši turi būti valoma arba periodiškai keičiama. Jei garuojančios dalelės yra jonai ir turi krūvį, jų srautą galima valdyti elektrostatiu pagrindu veikiančiais įtaisais.

5. Tyrimo metodika

Plonasluoksnių dangų formavimas elektronpluoščio garinimo būdu

Tyrimo metu atlikta trijų bandinių grupių (žr. 1 lentelė) analizė. Bandiniai vieni nuo kitų skyrėsi užgarinta danga. Visos dangos suformuotos ant 1 mm storio 25,4 mm skersmens diametro padėklų naudojantis Sidrabe įmonės sukonstruotu elektronpluoščio garinimo įrenginiu.

Pirmoji grupė sudaryta iš vienasluoksnių izotropinių skulptūrinių dangų užgarintų 0° , 50° , 60° , 70° ir 80° kampais naudojant nuolatinį padėklų sukimą aplink jų ašį. Suformuotos dangos susideda iš tiesių kolonų masyvų (žr. 4 (d) pav.). Siekiant išsiaiškinti kokią įtaką tyrimo rezultatams turės skirtingo dydžio deguonies dujų srautas, 0° ir 70° kampais suformuotos struktūros su dvejomis skirtingomis srauto vertėmis. Srautas išreiškiamas standartiniais kubiniais centimetrais per minutę (sccm). Standartiniai kubiniai centimetrai apibrėžia dujų tūrį esant standartinėms sąlygoms: 273,15 K temperatūrai ir 100 kPa slėgiui. Tikėtasi, jog esant didesniai dujų srautui formuojama struktūra pasižymės didesniu porėtumu (žemesniu efektiniu lūžio rodikliu), tačiau iš 9 paveikslėlyje pateiktų duomenų, pastebėta, jog taip yra ne visada.

Antra bandinių dalis yra anizotropinės vienasluoksnės dangos. Jos formuotos keturiais skirtingais kampais: 50° , 60° , 70° ir 80° . Garinimo metu, sluoksnių storio tolygumui per padėklo plotą išlaikyti, naudotas periodinis 180° sukimas kas 6 sekundes. Suformuotos struktūros yra panašios į zigzagines (žr. 4 (b) pav.), tačiau dėl trumpo vėlinimo laiko (6 sek.), zigzagiškumas yra menkai išreikštas: laiptelio aukštis yra vos apie 2 nm. Užgarintos dangos pasižymi dvejojpalaužiškumu, kadangi suformuota struktūra, kaip aptarta dvimačių ir trimačių skulptūrinių dangų struktūrų skyrelyje, yra eliptinės formos statmenai šešėliavimo kryptims. Taigi, spinduliuotei pasiekus tokią anizotropinę dangą, ja sklis dvi bangos: greitesnioji šešėliavimo kryptimi, o statmena kryptimi – lėtesnioji.

Trečia bandinių grupė yra anizotropinės daugiasluoksnės dangos. Šiame darbe tyrinėti du plonasluoksniai 26 ir 46 sluoksnių poliarizatoriai veikiantys 0° kampu UV spektrinėje srityje. Jie suformuoti pakaitomis periodiškai garinant elementus 0° , 66° ir 70° kampais.

1 lentelė. Bandinių žemėlapis.

Bandinių grupė	Garinimo kampas, $^\circ$	Sluoksnių skaičius	Dangos storis, nm	O ₂ dujų srautas, sccm
Pirma	0	1	335	77
	70		272	77
	0		312	22

	50		290	13
	60		385	
	70		280	
	80		246	
Antra	50		295	2
	60		290	
	70		297	
	80		312	
Trečia	Įvairus	26	2302	-
		46	3302	-

Bandinių aplinkos sąlygų keitimas

Visi bandiniai buvo cikliškai veikti skirtinga aplinkos drėgme ir temperatūra. Tai atlikta dvejais etapais naudojantis firmos Espec SH-262 klimatine kamera. Pirmo etapo metu tirta aplinkos drėgmės, o antrojo – aplinkos temperatūros įtaka.

Pirmasis etapas susideda iš keturių ciklų – keturių matavimų esant skirtingo dydžio santykinei aplinkos drėgmei (Rh): 25%, 50%, 75%, 100%. Kiekvieno ciklo metu bandiniai patalpinti į klimatinę kamerą, nustatyta 22°C temperatūra bei pageidaujama santykinė drėgmė. Drėgmei kameroje pasiekus reikiamą, bandiniai joje laikyti 45 minutes. Praėjus šiam laikui, elementai po vieną išimti iš kameros ir ne ilgiau kaip per 1 minutę atlikti spektrofotometriniai bei interferometriniai matavimai.

Antrasis etapas susideda iš penkių ciklų – penkių matavimų esant skirtingoms temperatūroms: 50°C, 100°C, 150°C, -25°C, 50°C. Ciklai taip pat atlikti ir pastarąja temperatūrų tvarka. Kiekvieno ciklo metu bandiniai patalpinti į klimatinę kamerą, nustatyta 40% santykinė aplinkos drėgmė bei pageidaujama temperatūra. Tam, kad bandiniai nepatirtų ženklaus temperatūrinio šoko, ši keista 5°C/min greičiu. Temperatūrai kameroje pasiekus reikiamą, bandiniai joje laikyti 20 minučių. Praėjus šiam laikui, 5°C/min greičiu temperatūra gražinta į kambario temperatūrą. Po kiekvieno ciklo atlikti spektrofotometriniai bei interferometriniai matavimai.

Plonasluoksnių dangų lūžio rodiklių nustatymas

Vienas pagrindinių dydžių nusakančių optinės dangos savybes yra jos lūžio rodiklis. Šiame darbe pastarasis modeliuotas naudojantis spektrofotometriniais pralaidumo matavimais pasitelkiant OptiLayer programinį paketą. Kadangi tiek garinta medžiaga, tiek naudoti padėklai yra iš silicio oksido, egzistuoja labai nežymus efektinių lūžio rodiklių skirtumas. Tokio skirtumo nepakanka, kad būtų galima kokybiškai

skaitmeniškai atlikti užgarintos dangos lūžio rodiklio dispersijos modeliavimą. Problemai išspręsti, ant padėklo prieš SiO₂ dangos garinimą, magnetroninio dulkinimo būdu padengta ~250 nm storio Al₂O₃ danga, kurios lūžio rodiklis yra apie 1.76 ties 800 nm, kai tuo tarpu SiO₂ – 1.45 ties tuo pačiu bangos ilgiu. Naudojantis šia metodika, taip pat įvertinti užgarintų dangų storiai.

Plonasluoksnių dangų sukeltų įtempių matavimai

Plonasluoksnių dangų sukeltų įtempių nustatymui, Verifire (Zygo) interferometru išmatuotos elemento plokštiškumo vertės kiekviename eksperimento etape. Įtempių vertė apskaičiuota naudojantis Stoney formule [51]:

$$\sigma = \frac{E_s}{6(1-\nu_s)} \frac{d_s^2}{d_f} \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{R_0} \right), \quad (15)$$

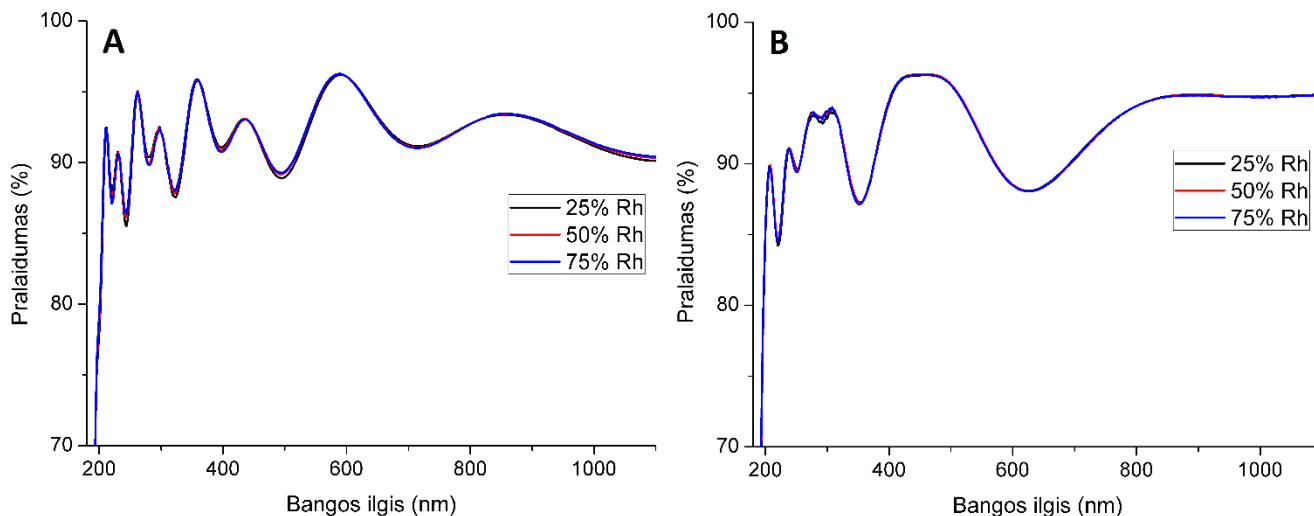
kur E_s – Jungo modulis (silicio oksidui lygus $7,17 \cdot 10^{10}$ Pa), ν_s – Puasono santykis (silicio oksidui 0,17), d_s ir d_f – padėklo ir dangos storiai, R ir R_0 – elemento kreivumo radiusas prieš ir po vykdomo proceso. Pastarasis parametras gali būti apskaičiuotas iš geometrinės formulės:

$$R = \frac{L^2}{8h}, \quad (16)$$

kur L – optinio elemento diametras, o h – paviršiaus išgaubtumo vertė sužinoma iš interferometrinių matavimų. Jų pagalba taip pat įvertinti praėjusios bangos fronto iškraipymai, kurie yra svarbūs optinius elementus naudojant pralaidume.

6. Rezultatai ir jų aptarimas

Atliktus pirmąjį eksperimentų etapą, pastebėta, jog žemesnio lygio santykinė aplinkos drėgmė (25% – 75%) nesukėlė pastebimų pralaidumo (žr. 7 pav.) ar įtempių pokyčių nei vieno bandinio atveju, todėl rezultatų aptarime iš šio etapo bus aptariami tik 100% santykinės aplinkos drėgmės matavimai.



7 pav. 0° (A) kampu ir 70° (B) kampu užgarintų vienasluoksnių izotropinių dangų pralaidumo priklausomybės nuo naudotos aplinkos drėgmės lygio.

Atlikus abu eksperimento etapus, iš spektrofotometrinių pralaidumo matavimų skaitmeniškai sumodeliuoti vienasluoksnių izotropinių ir anizotropinių dangų lūžių rodikliai (žr. 8-16 pav.). Iš rezultatų matyti, jog aplinkos drėgmė, matuotoju metodu, neturi arba turi tik labai nežymią įtaką skulptūrinių dangų optinėms charakteristikoms. Nustatyta, jog didinant temperatūrą, visais tirtais atvejais bandinių lūžio rodikliai didėjo. Taip pat pastebėta, jog kaitinant porėtesnius (mažesnio lūžio rodiklio) izotropinius bandinius, šių lūžio rodiklio didėjimas santykinai yra didesnis. Pavyzdžiui, lyginant 0° kampu suformuotų izotropinių dangų lūžio rodiklių augimą ties 800 nm, juos pakaitinus iki 150°C , porėtesnės struktūros (žr. 8 (A) pav.) lūžio rodiklis išaugo 4.2%, kai tuo tarpu tankesnės (žr. 8 (B) pav.) tik 0.61%. Atsižvelgiant į 0° ir 70° kampais garintus bandinius su skirtingu O_2 dujų srautu, porėtesnių struktūrų, pakaitintų iki maksimalios tirtos temperatūros, lūžio rodiklis vidutiniškai 2.26% išaugo labiau nei tuo pačiu kampu garintų tankesnių struktūrų. Šis bangos ilgis pasirinktas, kadangi jo aplinkoje visų bandinių lūžio rodikliai yra mažai dispersiški. Didžiausias lūžio rodiklio padidėjimas, bandinį pakaitinus iki 150°C , stebėtas 80° kampu suformuotoje dangoje ir siekė 12.71%. Ši danga yra labiausiai porėta iš visų tirtų bandinių.

Atlikus vienasluoksnių bandinių šaldymus iki -50°C temperatūros pastebėta, jog tokia neigiama temperatūra neturi žymios įtakos lūžio rodiklių pokyčiams. 9 (B), 11 ir 15 paveikslėliuose stebėtus lūžio

rodiklių augimus siečiau su pralaidumo matavimų laiku: bandiniai buvo pamatuoti per maždaug 1-2 minutes nuo jų išėmimo iš klimatinės kameros, tad galimai dangos porose buvo likusi didesnė koncentracija vandens garų nei kitų bandinių atveju.

Po savaitės nuo eksperimentų, permatuoti izotropinių bandinių pralaidumai ir iš naujo sumodeliuoti jų lūžio rodikliai. Pastebėta, jog lūžio rodikliai daugumoje atvejų dar labiau išaugo. Šį rezultatą siečiau su po savaitės padidėjusia santykinę aplinkos drėgme. Pirmųjų eksperimentų metu santykinė aplinkos drėgmė lauke buvo ~30%, o tuo tarpu matavimų metu po savaitės – ~72%. Kadangi patalpose drėgmės lygis nėra aktyviai kontroliuojamas, tad jose drėgmė taip pat padidėjo.

Tam, jog būtų galima įvertinti, ar bandinių kaitinimas sukėlė negrįžtamus lūžio rodiklio pokyčius, pasitelkta Maxwell Garnett formulė [48] (17), kuri suriša aukštesniojo ϵ_H ir žemesniojo ϵ_L lūžio rodiklio medžiagų bei jų mišinio efektingą ϵ_{eff} dielektrines konstantas:

$$\frac{\epsilon_{eff} - \epsilon_H}{\epsilon_{eff} + 2\epsilon_H} = (1 - f_H) \frac{\epsilon_L - \epsilon_H}{\epsilon_L + 2\epsilon_H}, \quad (17)$$

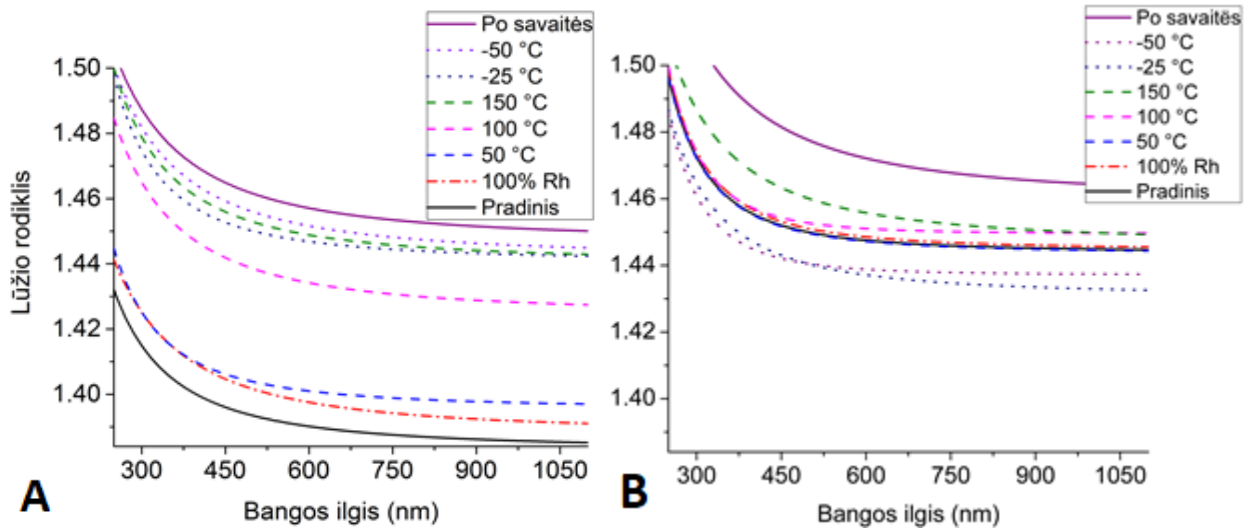
kur f_H – aukštesniojo lūžio rodiklio medžiagos tūrinė dalis mišinyje. Mišinys sudarytas iš garintos medžiagos – silicio oksido bei didžiausią tankį bei lūžio rodiklį aplinkoje turinčių dalelių – vandens garų. Kitų dalelių įtaka neįskaitoma. Laikant, jog pradžioje visų bandinių tarpai yra užpildyti tik oru ($n_{oro} = 1.0002$), apskaičiuota silicio oksido tūrinė f_H dalis dangoje. Tuomet laikyta, jog visas šias tuštumas užpildo grynas vanduo ($n_{H_2O} = 1.329$, $n_{SiO_2} = 1.4533$ ties 800 nm) ir apskaičiuotas galimas efektingo lūžio rodiklio pokytis Δn_{eff} . Gautas rezultatas palygintas su sumodeliuotu lūžio rodiklio padidėjimu Δn_{real} ties 800 nm visiems izotropiniams bandiniams (žr. 2 lentelė). Apskaičiuotas efektingo lūžio rodiklio

2 lentelė. Teoriškai apskaičiuotas efektingo lūžio rodiklio pokytis.

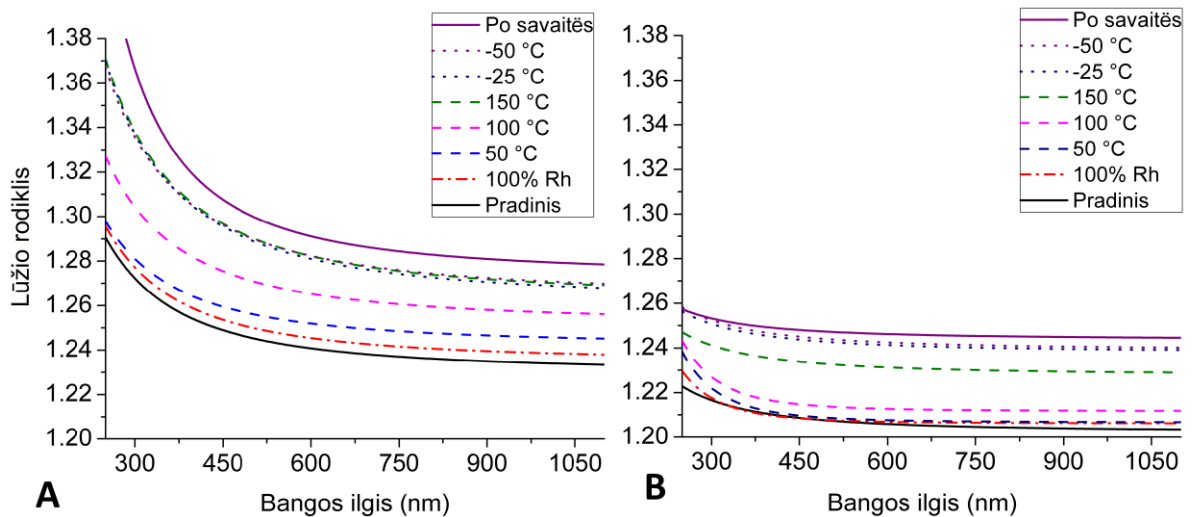
Bandinys	$n_{bandinio}$ ties 800 nm	f_H	Δn_{eff}	Δn_{real}
0°, 77 sccm O ₂	1.387	0.85	0.0185	0.0580
70°, 77 sccm O ₂	1.236	0.52	0.0397	0.0378
0°, 22 sccm O ₂	1.445	0.985	0.0016	0.0060
50°, 13 sccm O ₂	1.337	0.75	0.0311	0.0734
60°, 13 sccm O ₂	1.269	0.59	0.051	0.0423
70°, 13 sccm O ₂	1.204	0.45	0.0384	0.0255
80°, 13 sccm O ₂	1.123	0.28	0.0895	0.1428

pokytis yra mažesnis arba ganėtinai artimas realiam sumodeliuotam pokyčiui atsiradusiam elementus pakaitinus iki 150°C, tad galima teigti, jog aplinkos drėgmės pokytis negalėjo sukelti tokio žymaus lūžio rodiklio pokyčio, koks buvo nustatytas iš matavimų atliktų po savaitės nuo tyrimo datos. Tokiu atveju,

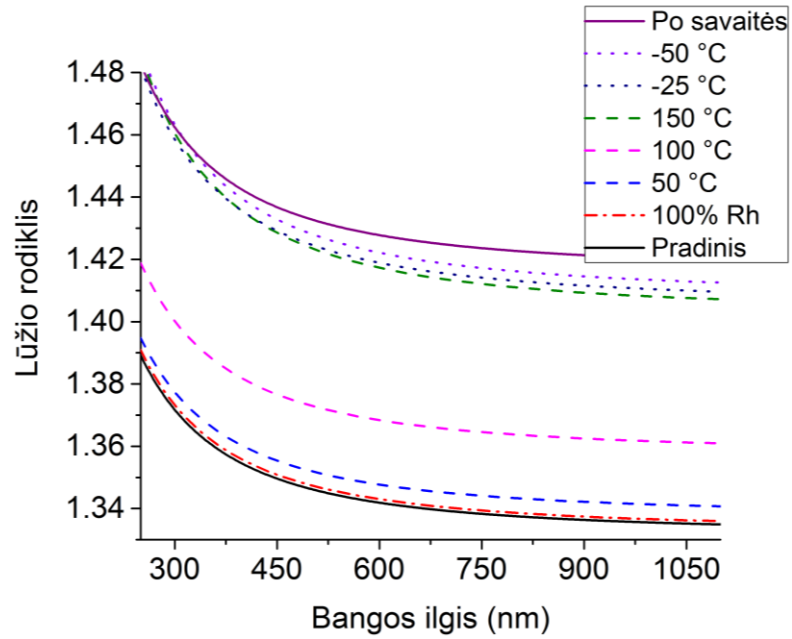
naudojantis teoriniu modeliu, galima teigti, kad elementų kaitinimas sukelia negrįžtamus lūžio rodiklių pokyčius.



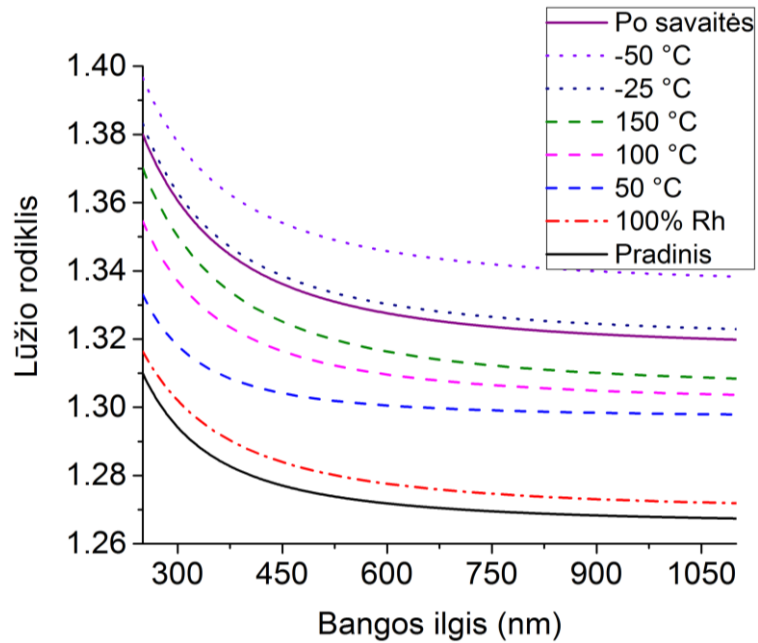
8 pav. 0° kampų suformuotų izotropinių dangų lūžio rodiklių dispersijos kitimas keičiant aplinkos sąlygas. Dangos suformuotos esant esant 77 sccm O_2 srautui (A) ir esant 22 sccm O_2 srautui (B).



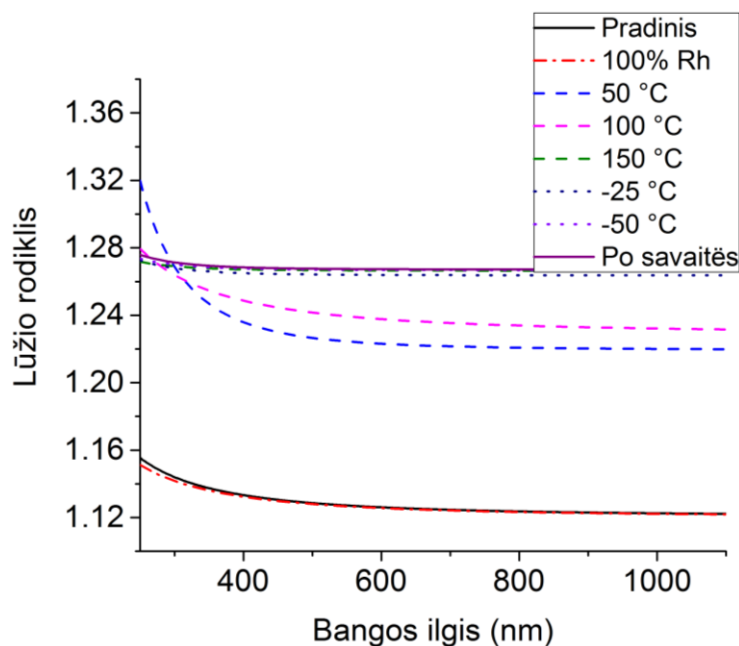
9 pav. 70° kampų suformuotos izotropinių dangų lūžio rodiklių dispersijos kitimas keičiant aplinkos sąlygas. Dangos suformuotos esant esant 77 sccm O_2 srautui (A) ir esant 13 sccm O_2 srautui (B).



10 pav. 50° kampu, esant 13 sccm O₂ srautui, suformuotos izotropinės dangos lūžio rodiklių dispersijos kitimas keičiant aplinkos sąlygas.

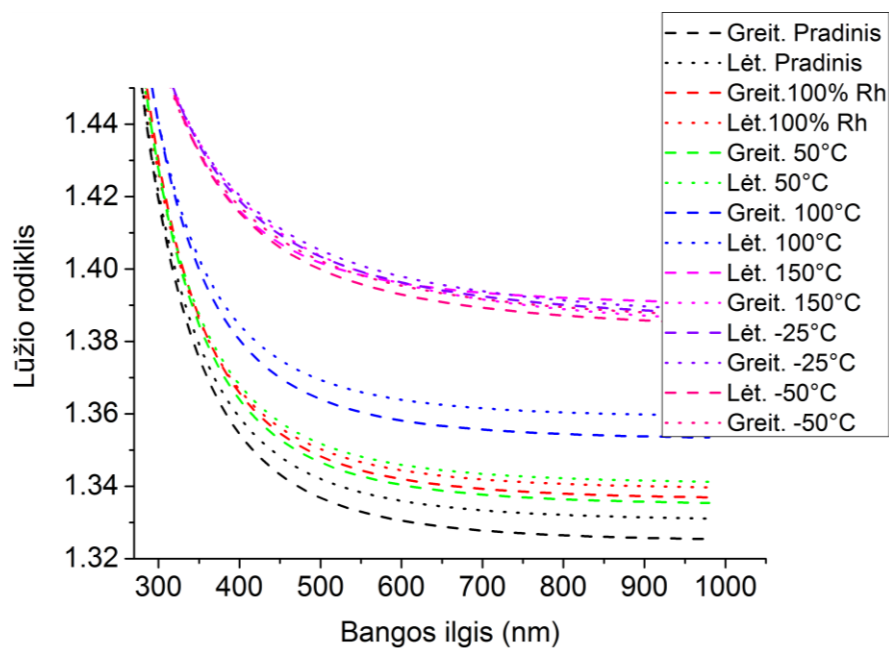


11 pav. 60° kampu, esant 13 sccm O₂ srautui, suformuotos izotropinės dangos lūžio rodiklių dispersijos kitimas keičiant aplinkos sąlygas.

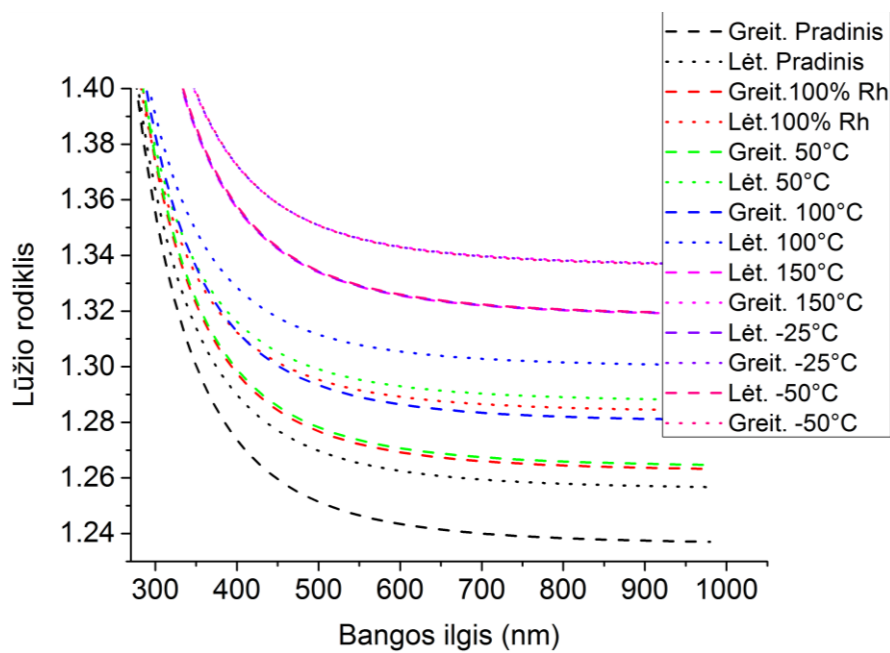


12 pav. 80° kampu, esant 13 sccm O₂ srautui, suformuotos izotropinės dangos lūžio rodiklių dispersijos kitimas keičiant aplinkos sąlygas.

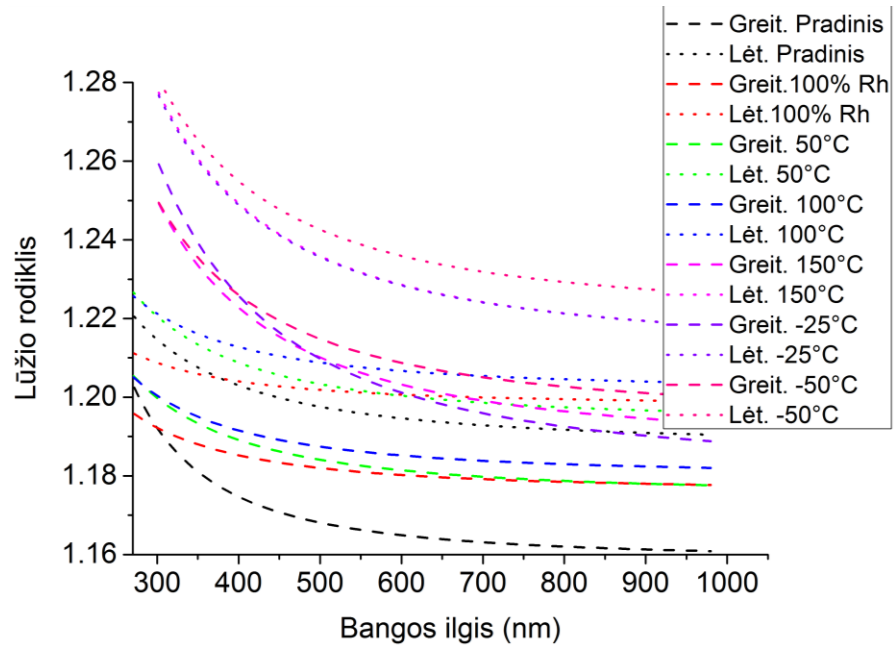
Toliau atlikti spektrofotometriniai matavimai su anizotropinėmis vienasluoksniomis dangomis dengtais bandiniais. Kaip ir izotropinių dangų atveju, pastebėta, jog elementų kaitinimas sukėlė tiek greitosios, tiek lėtosios komponentų lūžio rodiklių padidėjimą. Taip pat nustatyta, jog kaitinant elementus, greitosios ir lėtosios ašies lūžio rodiklių skirtumas mažėja. Taip yra todėl, jog mažiau tankia greitosios ašies kryptimi lūžio rodiklis auga sparčiau nei tankesnės – lėtosios ašies kryptimi. Pavyzdžiui, pakaitinus elementus iki 150°C, greitosios ašies lūžio rodiklis išaugo daugiau nei lėtosios per 0.21% 50° kampu užgarintos dangos atveju, 0.23% 60° kampu ir 0.47% - 70° garinimo kampų atvejais. Tuo tarpu 80° kampu užgarintos dangos atveju, lūžio rodiklių skirtumo mažėjimas nebuvo stebėtas, tačiau kadangi naudotas itin didelis dangos formavimo kampas, galimai dėl ne itin homogeniškos dangos struktūros, kompiuterinis lūžio rodiklio modeliavimas nėra tikslus.



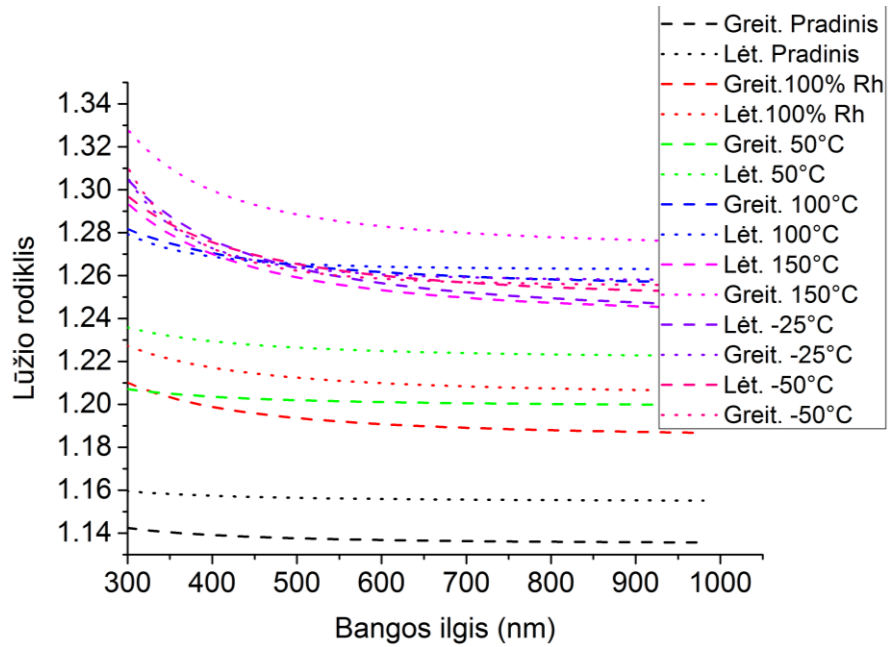
13 pav. 50° kampu suformuotos anizotropinės dangos lūžio rodiklių dispersijos kitimas keičiant aplinkos sąlygas.



14 pav. 60° kampu suformuotos anizotropinės dangos lūžio rodiklių dispersijos kitimas keičiant aplinkos sąlygas.

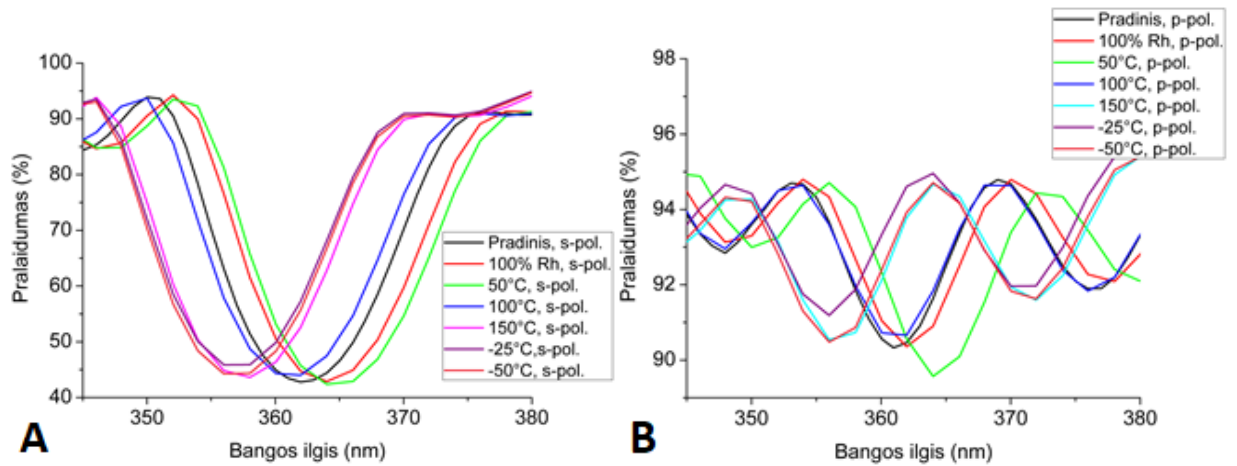


15 pav. 70° kampu suformuotos anizotropinės dangos lūžio rodiklių dispersijos kitimas keičiant aplinkos sąlygas.



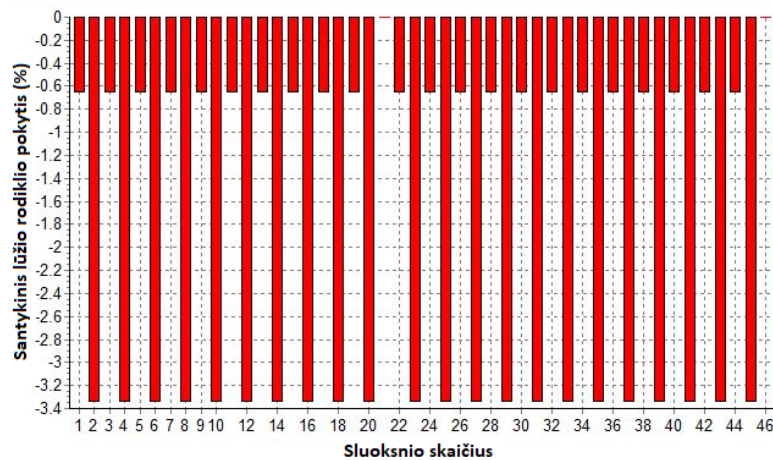
16 pav. 80° kampu suformuotos anizotropinės dangos lūžio rodiklių dispersijos kitimas keičiant aplinkos sąlygas.

Trečiojoje bandymų dalyje atlikti aplinkos sąlygų keitimo eksperimentai su dvejetainiais daugiasluksniais anizotropiniais elementais, kurie veikia kaip poliarizatoriai nulinio laipsnių kampu UV srityje. Spektrofotometriniai matavimai pateikti 17-18 paveikslėliuose.



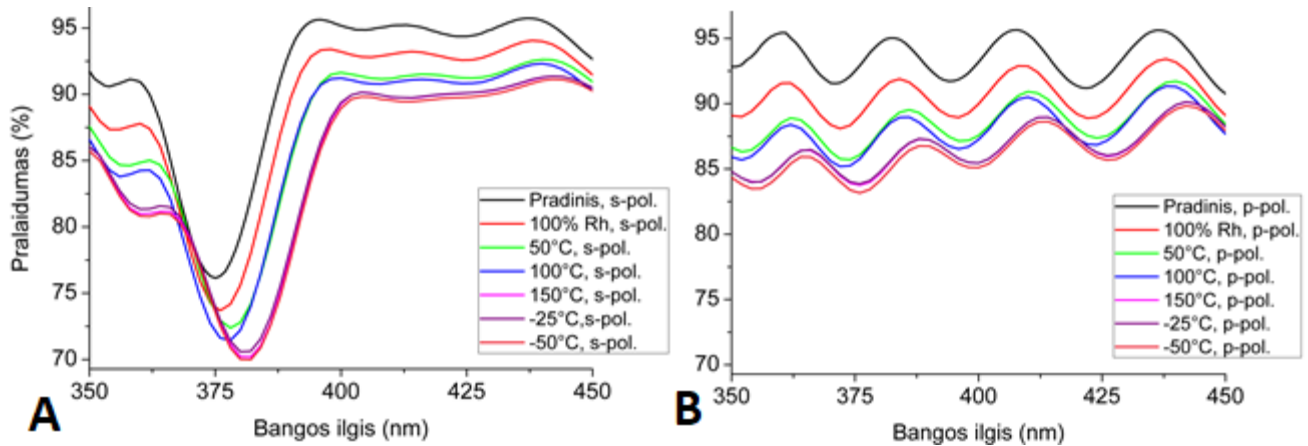
17 pav. 46 anizotropiniais sluoksniais padengto optinio elemento s (A) ir p (B) poliarizacijų pralaidumo kitimas kintant aplinkos sąlygoms.

Pastebėta, jog elementą su 46 anizotropiniais sluoksniais palaikius 100% santykinėje aplinkos drėgmėje, šio pralaidumo spektras slenkasi į ilgesnių bangos ilgių pusę. Ta pati tendencija stebima ir atlikus matavimus po 50°C kaitinimo. Veikiausiai 50°C temperatūra yra per žema sukelti struktūriniais pokyčiams dangoje, o spektro slinkimasis gali būti aiškinamas suintensyvinata vandens garų difuzija į gilesnius dangos sluoksnius ir jų užsilaikymą iki matavimo spektrofotometru. Tuo tarpu kaitinant elementą 100-150°C temperatūra, stebimas iki 4 nm dydžio spektrinis poslinkis į trumpabangę spektro sritį. Taip pat pastebima, jog šaldymas iki -50°C nesukėlė žymesnių pralaidumo spektro poslinkio pokyčių, tačiau įnešė ~3% santykinį pralaidumo sumažėjimą ties centriniu bangos ilgiu (juo laikytas bangos ilgis, ties kuriuo s poliarizacijos bangos pralaidumas yra mažiausias). Atlikus teorinį modeliavimą paaiškėjo, jog bandinį pakaitinus iki 150°C, sumažėjo sluoksnių lūžio rodikliai (žr. 18 pav.).



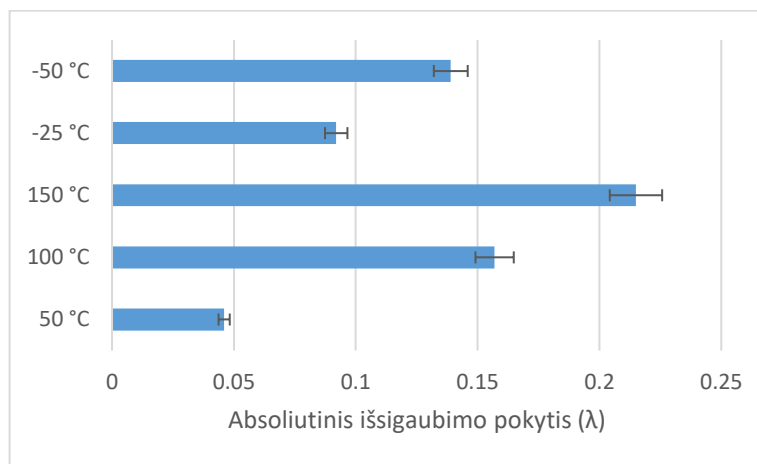
18 pav. 46 anizotropiniais sluoksniais padengto optinio elemento santykinio lūžio rodiklio pokyčio priklausomybė nuo sluoksnio skaičiaus jį pakaitinus iki 150°C.

Tuo tarpu atlikus spektrofometrinius pralaidumo matavimus su 26 anizotropinius sluoksnius turinčiu poliarizatoriumi, stebima vienasluoksniams skulptūrinėms dangoms būdinga tendencija: elemento kaitinimas iki 150°C sukelia spektrinį poslinkį į ilgabangę spektro sritį. Toks charakteristikos kitimo pobūdis fiksuotas vienasluoksnių bandinių atveju. Taip pat pastebėta, jog kiekviena atlikta aplinkos sąlygų keitimo operacija įnešė žymų pralaidumo sumažėjimą UV srityje, kurioje šis poliarizatorius sukurtas veikti. Kaitinimas iki 150°C 250-400 nm spektro ruože vidutiniškai įnešė 8.48% p poliarizacijos ir 7.21% s poliarizacijų santykį pralaidumo sumažėjimą.



19 pav. 26 anizotropiniais sluoksniais padengto optinio s (A) ir p (B) poliarizacijų pralaidumo kitimas kintant aplinkos sąlygoms.

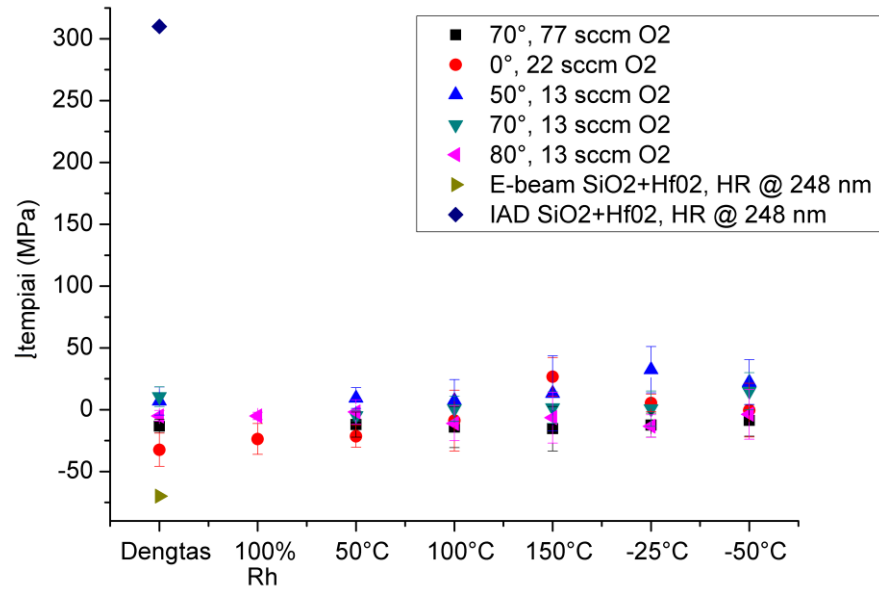
Antrojoje tyrimo dalyje siekta nustatyti užgarintų dangų įtempių dydžius bei jų pokyčius keičiant aplinkos sąlygas. Šiam tikslui pasiekti atlikti interferometriniai matavimai optinio elemento išsigaubimo pokyčiui įvertinti. Pokytis fiksuotas bangos ilgio vienetais λ . Naudotame interferometre įmontuotas 632.8 nm bangos ilgį spinduliuojantis helio-neono lazeris. Pasinaudojant minėtąja išsigaubimo verte, pagal Stoney formulę, apskaičiuoti įtempiai, kurie išreikšti megapaskaliais. Paklaidų įvertinimui, greta dengtų elementų į klimatinę kamerą buvo įdėti ir 4 nedengti padėklai, jog būtų galima įvertinti pačių padėklų išsigaubimo mastą. Rezultatai pateikti 20 paveikslėlyje. Nustatyta, jog didžiausią padėklo išsigaubimo pokytį, iš naudotų aplinkos veiksnių, sukelia kaitinimas 150°C temperatūra.



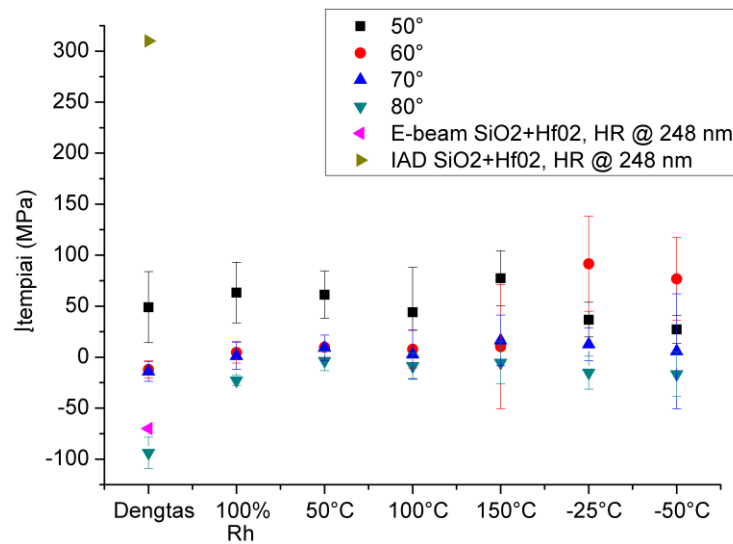
20 pav. Vidutinė keturių nedengtų padėklų absoliutinio išsigaubimo priklausomybė nuo keičiamų aplinkos sąlygų. $\lambda = 632.8$ nm. Matavimo paklaida 10%.

Atlikti izotropinių dangų matavimai, kurių rezultatai pateikti 21 paveikslėlyje. Į paklaidas įtrauktos 5% matavimo paklaidos bei paklaidos atsiradusios dėl galimo pačio padėklo išsikraipymo. Teigiamos vertės žymi spaudžiančiuosius (angl. compressive), o neigiamos – tempiamuosius (angl. tensile) įtempius. Eksperimento metu išmatuotus izotropinių dangų įtempius lyginant su panašaus storio, elektronpluoščio garinimo būdu (E-Beam) iš SiO₂ ir HfO₂ medžiagų, 300°C temperatūroje suformuotais aukšto atspindžio (HR) elementais [49], veikiančiais ties 248 nm, įvertinta, jog izotropinių skulptūrinių dangų įtempiai yra vidutiniškai keletą kartų mažesni. Lyginant įtempius su tos pačios HR dangos [49], suformuotos elektronpluoščio garinimo būdu su asistuojančių jonų šaltiniu (IAD), įtempiais, skirtumas padidėja iki kelių dešimčių kartų. Toks skirtumas atsiranda dėl skulptūrinių dangų garinimo metu dominuojančio šešėliavimo efekto ir užtikrinamos žemos temperatūros, kuri siekia ~50-60°C, kai tuo tarpu įprastų dangų garinimui naudojama ~200 – 300°C temperatūra. Atlikus aplinkos pokyčių eksperimentus, nustatyta, jog drėgmės bei temperatūros kitimas -50°C – 150°C riboje neturi žymesnės įtakos izotropinių skulptūrinių dangų įtempiams.

Atlikti anizotropinių dangų įtempių matavimai parodė, jog ir šios dangos, lyginant su pateikiamomis literatūroje [49], pasižymi itin mažais įtempiais, kurie beveik nekinta keičiant šiame darbe tyrinėtą aplinkos sąlygas. Iš visų anizotropine vienasluoksne danga dengtų elementų matavimų išsiskiria bandinys su 80° kampu užgarinta anizotropine danga. Pastarasis pasižymėjo ženkliau tempiančiųjų įtempių dydžiu. Šių išskirtinių įtempių dydį siečiau su dangos sukeltais nevienodo masto įtempiais

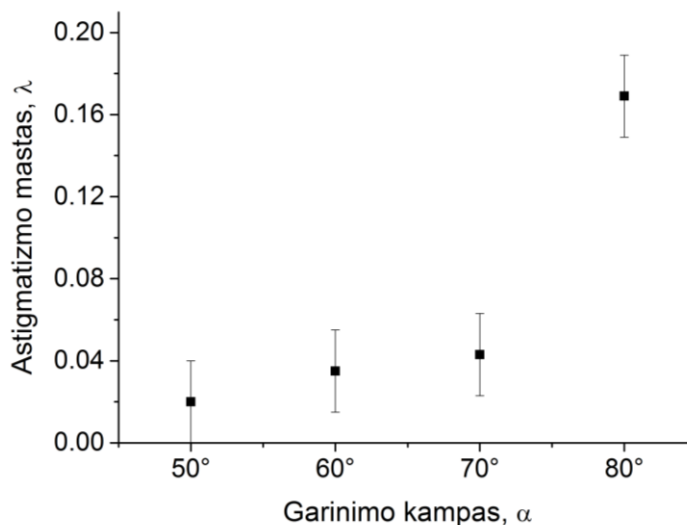


21 pav. Izotropinių dangų įtempių priklausomybė nuo aplinkos sąlygų.



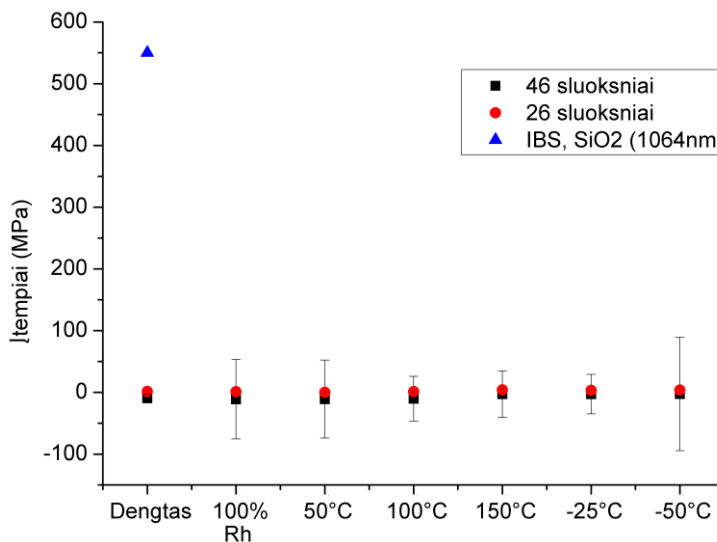
22 pav. Anizotropinių vienasluoksnių dangų įtempių priklausomybė nuo aplinkos sąlygų.

išilgai greitosios ir lėtosios ašimis. Tokie įtempiai interferometriniuose matavimuose stebimi kaip astigmatinė interferogramos aberacija, o jos mastas parodo anizotropinių įtempių dydį. Išmatuotas astigmatizmo mastas, priklausomai nuo kampo, kuriuo garinta danga, pateikiamas 23 paveikslėlyje. Verta paminėti, jog prieš dengiant dangas, atrinkti padėklai, kurių matavimų interferogramos nepasižymėjo arba pasižymėjo labai menku ($< 0.02 \lambda$) astigmatizmu.



23 pav. Interferogramos astigmatizmo masto priklausomybė nuo dangos garinimo kampo. $\lambda = 632.8 \text{ nm}$.

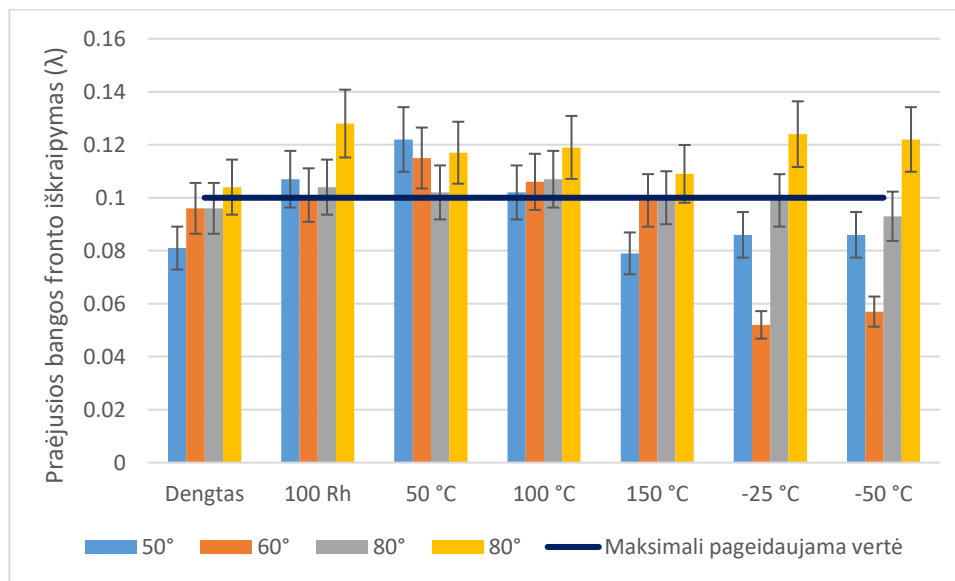
Atlikti daugiasluoksnių anizotropinių skulptūrinių dangų interferometriniai matavimai leido tiksliau įvertinti skulptūrinių dangų įtempių mastą, kuris, kaip galima matyti iš 24 paveikslėlio, artimas nuliui. Tuo tarpu palyginamo storio (1064 nm) danga suformuota jonapluoščio dulkinimo technologija (IBS) sukelia kelių šimtų megapaskalių eilės įtempius [50]. Daugiasluoksnių skulptūrinių dangų įtempių nekeitimą, keičiant aplinkos sąlygas, galima paaiškinti tuo, jog dangai esant pakankamai storai (kelių mikrometrų storio), kintant aplinkos sąlygoms, padėklo išsigaubimas beveik nekinta, kadangi danga veikia kaip savotiškas stabilizatorius.



24 pav. Anizotropinių daugiasluoksnių dangų įtempių priklausomybė nuo aplinkos sąlygų.

Naudojant optinius elementus pralaidume, svarbiu parametru tampa praėjusios bangos fronto iškraipymas. Šiame darbe atlikti matavimai optiniams elementams su vienasluoksnėmis (žr. 23 pav.) ir daugiasluoksnėmis (žr. 24 pav.) anizotropinėmis dangomis. Nustatyta, jog drėgmės padidėjimas ir kaitinimas iki 50°C (veikiausiai vandens garų difuzijos suaktyvinimas) sukelia didžiausius bangos fronto iškraipymus. Tuo tarpu mažiausi, vidutiniškai 55.6 nm, bangos fronto iškraipymai pasireiškė esant neigiamoms temperatūroms. Keičiant aplinkos sąlygas, bandinys su 80° kampu užgarinta danga, demonstravo vidutiniškai didžiausią bangos fronto iškraipymą. To galima tikėtis, kadangi ši danga yra porėčiausia iš visų ir turi daugiausiai lokalių tūrinių lūžio rodiklio fliktuacijų, kurie didina bangos fronto iškraipymą.

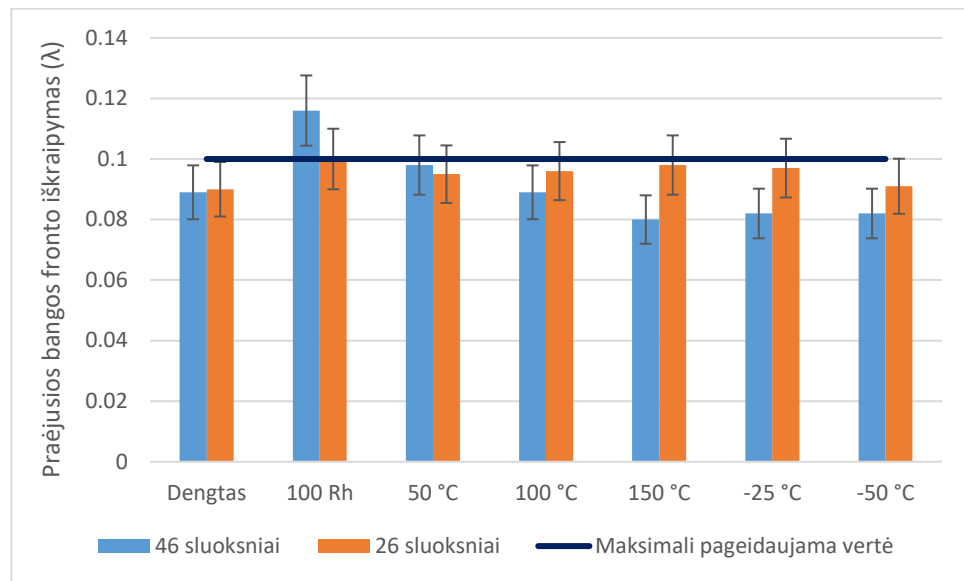
Šiuo metu rinkoje yra nusistovėjęs taip vadinamas $\lambda/10$ arba mažesnis, ties 632.8 nm bangos ilgiu, prasklidusios bangos fronto iškraipymo reikalavimas pralaidume veikiantiems optiniams elementams. Jo dydis yra būtent toks, kadangi gaminant elementus užtikrinančius tokio lygio optinę kokybę, pasiekiamas optimalus gamybos kaštų kainos ir veikimo kokybės santykis. Spindulys, keletą kartų prasklidęs tokį optinį elementą, vis dar išlieka difrakciškai ribotas. Ši riba yra pažymėta 23 ir 24 paveikslėliuose.



23 pav. Pro elementą su anizotropine vienasluoksne danga praėjusios bangos fronto iškraipymai.

$\lambda = 632.8$ nm. Matavimo paklaidos 10%.

Analogišką rezultatų tendenciją demonstruoja ir daugiasluoksnės anizotropinės dangos – pro jas praėjusios bangos frontas labiausiai iškraipomas esant padidėjusiai santykinai aplinkos drėgmei.



24 pav. Pro elementą su anizotropine daugiasluoksne danga praėjusios bangos fronto iškraipymai. $\lambda = 632.8$ nm. Matavimo paklaidos 10%.

7. Pagrindiniai rezultatai ir išvados

1. Kaitinant optinį elementą su vienasluoksne skulptūrine danga 50 – 150°C riboje, šios SiO₂ dangos lūžio rodiklis didėja didėjant temperatūrai, o stebėtas padidėjimas buvo 2,26% žymesnis labiau porėtoms struktūroms.
2. Kaitinant tirtas vienasluoksnes skulptūrinės SiO₂ dangas iki 150°C, atsiranda negrįžtami jų lūžio rodiklio pokyčiai.
3. SiO₂ skulptūrinių dangų šaldymas iki -50°C neturi žymios įtakos jų lūžio rodiklių vertėms, o tirtų neigiamų temperatūrų atveju praėjusios bangos fronto iškraipymas buvo mažiausias – vidutiniškai tik 55.6 nm, todėl skulptūrinės dangos gali pasitarnauti taikymuose atšiauriomis sąlygomis esant žemai drėgmei.
4. Tirtų anizotropinių vienasluoksnių dangų greitosios ir lėtosios ašių lūžio rodiklių skirtumas mažėja elementus kaitinant iki 150°C, kadangi greitosios ašies lūžio rodiklis didėjo vidutiniškai 0.3% sparčiau nei lėtosios.
5. Lyginant su vertėmis pateiktomis literatūroje, tirtų SiO₂ skulptūrinių dangų sukelti įtempiai yra vidutiniškai keletą kartų mažesni nei įprastu elektronpluoščio garinimo būdu suformuotų bei keliasdešimt kartų mažesni nei suformuotų jonapluoščio dulkinimo technologija. Įtempių dydis paklaidų ribose beveik nekinta keičiant temperatūrą -50 – 150 °C bei santykinę aplinkos drėgmę 0 – 100% intervale.
6. Vienasluoksniės anizotropinės SiO₂ skulptūrinės dangos sukelia skirtingus įtempius šėšėliavimo ir jai statmena kryptimis, o įtempių anizotropija didėja didinant dangų garinimo kampą.

8. Literatūros sąrašas

- [1] T. H. Maiman, Stimulated optical radiation in ruby, *Nature* 187, 493–494 (1960).
- [2] E. Lorenzo, C.J. Oton, N.E. Capuj, M. Ghulinyan, D. Navarro-Urrios, Z. Gaburro, L. Pavesi, Porous silicon-based rugate filters, *Applied Optics* 44, 5415-5421 (2005).
- [3] M. Suzuki, T. Itoh, Y. Taga, Recent progress of obliquely deposited thin films for industrial applications, *SPIE Conference Proceedings* 3790, 94–105 (1999).
- [4] A. Lakhtakia, V. C. Venugopal, M. W. McCall, Spectral holes in bragg reflection from chiral sculptured thin films: circular polarization filters, *Optics Communications* 177, 57– 68 (2000).
- [5] I. Abdulhalim, A. Karabchevsky, C. Patzig, Surface-enhanced fluorescence from metal sculptured thin films with application to biosensing in water, *Applied Physics Letters* 94, 6 (2009).
- [6] J.-Q. Xi, M. F. Schubert, J. K. Kim, Optical thin-film materials with low refractive index for broadband elimination of Fresnel reflection, *Nature Photonics* 1, 176–179 (2007).
- [7] I. M. Thomas, High laser damage threshold porous silica antireflective coating. *Applied Optics* 25, 1481–1483 (1986).
- [8] M. Fox, *Optical properties of solids*, Oxford University Press, Oxford (2001).
- [9] G.-H. Liu, Q. Xiao, Y. Jin, W. L. Zhang, H. He, Z. Fan, Mechanical stress in 355 nm LaF₃/MgF₂ high reflectors with various layer-pair number and methods for reduction, *Vacuum* 84, 778-781 (2010).
- [10] L. Ming-Chung, L. Cheng-Chung, K. Masaaki, N. Kazuhide, T. Yuuichi, Microstructure related properties at 193 nm of MgF₂ and GdF₃ films deposited by resistive heating boat, *Optical Interference Coatings*, WF3 (2004).
- [11] H. Yu, H. Qi, Y. Cui, Y. Shen, J. Shao, Z. Fan, Influence of substrate temperature on properties of MgF₂ coatings, *Applied Surface Science* 253, 6113-6117 (2007).
- [12] J. Wang, R. L. Maier, Correlation between mechanical stress and optical property of SiO₂/Ta₂O₅ multilayer UV narrow band filter deposited by plasma ion-assisted deposition, *SPIE Conference Proceedings* 5870, 58700E-58709 (2005).
- [13] M. Ohring, *Materials Science of Thin Films*, 2nd edition, Academic Press, San Diego, United States of America (2002).
- [14] K. L. Chopra, *Thin Film Phenomena*, McGraw-Hill, New York, United States of America (1969).

- [15] D. M. Mattox, Handbook of physical vapor deposition (PVD) processing, 2nd edition, Westwood, New Jersey, United States of America (2010).
- [16] J. A. Venables, G. D. Spiller, M. Hanbuck, Nucleation and growth of thin films, Reports on Progress in Physics 47, 399–459 (1984).
- [17] B. A. Movchan, A. V. Demchishin, Fizika metallov i metallovedenie, Physics of Metals and Metallography 28, 653 (1969).
- [18] B. A. Movchan, A.V. Demchishin, Study of the structure and properties of thick vacuum condensates of nickel, titanium, tungsten, aluminum oxide and zirconium oxide, Fizika Metallov i Metallovedenie 28, 83 (1969).
- [19] R. Messier, A. P. Giri, R. A. Roy, Revised structure zone model for thin film physical structure, Journal of Vacuum Science and Technology A 2, 500–503 (1984).
- [20] J. A. Thornton, Journal of Vacuum Science & Technology 11, 666 (1974).
- [21] J. A. Venables, G. L. Price, Epitaxial Growth, part B, Academic, New York (1975).
- [22] H. J. Leamy, A. G. Dirks, Microstructure and magnetism in amorphous rare earth–transitionmetal thin films. I. Microstructure Journal of Applied Physics 49, 3430 (1978).
- [23] A. Anders, A structure zone diagram including plasma-based deposition and ion etching, Thin Solid Films 518, 4087–4090 (2010).
- [24] J. M. Nieuwenhuizen, H. B. Haanstra, Microfractography of thin films. Philips technical review 27, 30 (1999).
- [25] R. N. Tait, T. Smy, M. J. Brett, Modelling and characterization of columnar growth in evaporated films, Thin Solid Films 226, 196–201 (1993).
- [26] M. M. Hawkeye, M. T. Taschuk, M. J. Brett, Glancing Angle Deposition of Thin Films, John Wiley & Sons, Chichester, United Kingdom (2014).
- [27] H. van Kranenburg, C. Lodder, Tailoring growth and local composition by oblique-incidence deposition: a review and new experimental data, Materials Science and Engineering: Reports 11, 295–354 (1994).
- [28] A. Barranco, A. Borrás, A. R. Gonzalez-Elipe, A. Palmero. Perspectives on oblique angle deposition of thin films: From fundamentals to devices, Progress in Materials Science 76, 59–153 (2016).
- [29] O. R. Monteiro, A. Vizir, I. G. Brown. Multilayer thin-films with chevron-like microstructure, Journal of Physics D: Applied Physics 31, 3188 (1998).

- [30] R. Messier, T. Gehrke, C. Frankel, Engineered sculptured nematic thin films, *Journal of Vacuum Science & Technology A* 15, 2148–2152 (1997).
- [31] M. O. Jensen, M. J. Brett, Porosity engineering in glancing angle deposition thin films, *Applied Physics A* 80, 763–768 (2005).
- [32] V. C. Venugopal, Three-dimensional periodic chiral sculptured thin films, *Journal of Nanophotonics* 7, 073502–073502 (2013).
- [33] P. D. McAtee, A. Lakhtakia, Reflection and transmission of obliquely incident light by chiral sculptured thin films fabricated using asymmetric serial-bideposition (asbd) technique, *SPIE Conference Proceedings* 9929, 99290Q–99290Q–11 (2016).
- [34] S. R. Kennedy, M. J. Brett, O. Toader, S. John. Fabrication of tetragonal square spiral photonic crystals, *Nano Letters* 2, 59–62 (2002).
- [35] S. R. Kennedy, M. J. Brett, H. Miguez, O. Toader, S. John, Optical properties of a three-dimensional silicon square spiral photonic crystal, *Photonics and Nanostructures - Fundamentals and Applications* 1, 37–42 (2003).
- [36] A. Lakhtakia, J. B. Geddes, *Thin-Film Metamaterials Called Sculptured Thin Films*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Germany (2010).
- [37] S. Mukherjee, D. Gall, Anomalous scaling during glancing angle deposition, *Applied Physics Letters* 95, 173106 (2009).
- [38] A. Lakhtakia, R. Messier, *Sculptured Thin Films: Nanoengineered Morphology and Optics*, The Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, Washington, United States of America (2005).
- [39] A. Kundt, Ueber doppelbrechung des lichtes in metallschichten, welche durch zerstäuben einer kathode hergestellt sind, *Annalen der Physik* 263, 59–71 (1886).
- [40] M. M. Hawkeye, M. J. Brett. Glancing angle deposition: Fabrication, properties, and applications of micro-and nanostructured thin films, *Journal of Vacuum Science & Technology A* 25, 1317–1335 (2007).
- [41] T. Motohiro, Y. Taga, Thin film retardation plate by oblique deposition, *Applied Optics* 28, 2466–2482 (1989).
- [42] K. D. Harris, D. Vick, T. Smy, M. J. Brett, Column angle variations in porous chevron thin films, *Journal of Vacuum Science and Technology A* 20, 2062–2067 (2002).
- [43] K. Robbie, M. J. Brett, A. Lakhtakia, First thin film realization of a helicoidal bianisotropic medium, *Journal of Vacuum Science & Technology A* 13, 2991–2993 (1995).

- [44] P. C. P Hrudey, Luminescent chiral thin films fabricated using glancing angle deposition, PhD thesis, University of Alberta, United States of America (2006).
- [45] M. Faryad, A. Lakhtakia, The circular bragg phenomenon, *Advances in Optics and Photonics* 6, 225–292 (2014).
- [46] B. Dick, M. J. Brett, T. Smy, Controlled growth of periodic pillars by glancing angle deposition, *Journal of Vacuum Science and Technology B* 21, 23–28 (2003).
- [47] M. A. Summers, Periodic thin films by glancing angle deposition, PhD thesis, University of Alberta, United States of America (2009).
- [48] J. C. Maxwell Garnett, Colours in metal glasses and in metallic films, *Philosophical Transactions of the Royal Society A* 203, 385–420 (1904).
- [49] R. Thielsch, A. Gatto, N. Kaiser, Mechanical stress and thermal elastic properties of oxide coatings for use in the deep-ultraviolet spectral region, *Applied Optics* 41, 16 (2002).
- [50] S. Kičas, U. Gimževskis, S. Melnikas, Post deposition annealing of IBS mixture coatings for compensation of film induced stress, *Optical Society of America* 6, 7 (2016).
- [51] G.G. Stoney, The tension of metallic films deposited by electrolysis, *Proceedings of the Royal Society A* 82, 172 (1909).

Santrauka

SILICIO OKSIDO SKULPTŪRINIŲ DANGŲ FIZIKINIŲ PARAMETRŲ PRIKLAUSOMYBIŲ NUO APLINKOS SĄLYGŲ TYRIMAS

Lazerinei spinduliuotei valdyti bei ja manipuluoti naudojami įvairūs elementai: veidrodžiai, fazinės plokštelės, pluošto dalikliai, filtrai ir daugelis kitų. Tobulėjant lazeriams, bei didėjant jų spinduliuotės galiai, ypač UV srityje, atsirado poreikis sukurti aukštesnio optinio atsparumo elementus. Viena iš galimų technologijų yra skulptūrinėmis dangomis dengti optiniai elementai. Iki šių dienų jau yra pademonstruotos aukšto optinio atsparumo, SiO₂ pagrindu suformuotos, fazinės plokštelės, veidrodžiai, poliarizatoriai. Deja, iki šiol nebuvo detaliau tyrinėta, aplinkos sąlygų: temperatūros ir drėgmės daroma įtaka plonasluoksnėms interferencinėms skulptūrinėms dangoms.

Darbo metu, keičiant santykinę aplinkos drėgmę 25 – 100% riboje bei temperatūrą -50 – 150°C intervale, tyrinėti izotropinių ir anizotropinių vienasluoksnių bei anizotropinių daugiasluoksnių dangų, suformuotų skirtingais garinimo kampais, fizikinių savybių pokyčiai. Nustatyta, jog kaitinant optinį elementą su vienasluoksne skulptūrine danga 50 – 150°C riboje, šios dangos lūžio rodiklis didėja didėjant temperatūrai, o padidėjimas santykinai yra žymesnis labiau porėtoms struktūroms. Lūžio rodiklio pokytis buvo negrįžtamas. Įvertinta, jog skulptūrinės dangos gali pasitarnauti taikymuose atšiauriomis sąlygomis esant žemai drėgmei. Išsiaiškinta, kad anizotropinių vienasluoksnių dangų greitosios ir lėtosios komponentų ašių lūžio rodiklių skirtumas mažėja elementus kaitinant iki 150°C, nes greitosios ašies lūžio rodiklis didėja sparčiau nei lėtosios. Tirtų SiO₂ skulptūrinė dangų sukelti įtempiai yra itin žemi ir gali būti nepaisomi tyrinėtų aplinkos sąlygų atveju. Pastebėta, jog vienasluoksnės anizotropinės dangos sukelia skirtingus įtempius šėšėliavimo ir jai statmena kryptimis.

Summary

INVESTIGATION OF RELATIONS BETWEEN SILICA SCULPTURED THIN FILMS PHYSICAL PROPERTIES AND ENVIRONMENTAL CONDITIONS

In order to manipulate laser radiation various optical elements are used: mirrors, waveplates, beam splitters, filter, etc. Due to increased interest in laser industry, more and more focus is spent on increasing laser output power. Consequently, optical elements with higher optical resistivity need to be manufactured. One of potential technology is sculptural thin films. Until now there were several optical elements manufactured with latter technology including mirrors, waveplates and polarizers. Unfortunately, there were no detailed research on how environmental conditions, especially relative humidity and temperature influence performance of such optical elements.

During this research work single layer isotropic and anisotropic as well as multilayer anisotropic coatings were treated with changing environmental conditions: relative humidity in the range of 25 – 100% and temperature in the -50 - 150°C interval. It was noticed that heating of a single layer at 50 – 150°C temperature, resulted in increase of coating refractive index and the increase was relatively higher for coatings having higher porosity. Such refractive index change was permanent. Also, it was shown that sculptural coatings are suitable for frosty (down to -50°C) environmental conditions if relative humidity is low. Furthermore, experimental results showed that fast axis refractive index of anisotropic coatings increased relatively more compared to slow axis refractive index when optical element was heated to 150°C. Interferometric results revealed that stress induced by sculptural coatings is negligible compared to other types of thin film coatings. However, anisotropic stress was noticed in perpendicular directions when examining single layer anisotropic coatings.