

Vilniaus universiteto
Fizikos fakulteto
Lazerinių tyrimų centras

Gabija Petrauskaitė
ANIZOTROPINIŲ PLONŲ SLUOKSNIŲ OPTINIŲ CHARAKTERISTIKŲ
PRIKLAUSOMYBIŲ NUO GARINIMO PARAMETRŲ TYRIMAS

Magistrantūros studijų baigiamasis darbas
Gyvybės ir cheminės fizikos studijų programa

Studentė

Gabija Petrauskaitė

Leista ginti

2021-05-19

Darbo vadovas

doc. dr. Tomas Tolenis

Centro direktorius

prof. Aidas Matijošius

Vilnius 2021

Turinys

Įvadas	3
1. Literatūros apžvalga	4
1.1. Skulptūrinės dangos	4
1.1.1. Šešėliavimo efektas	4
1.1.2. Sluoksnio struktūra	5
1.1.2.1. Anizotropiškumas, atsiradęs dėl šešėliavimosi	6
1.2. Anizotropiniai skulptūriniai ploni sluoksniai	8
1.2.1. Dvejopalauiškumas	8
1.2.2. Paprastas ir nepaprastas lūžio rodikliai	9
1.2.3. Fazės vėlinimas	10
1.3. Skulptūrinių plonų sluoksnių optinių savybių priklausomybė nuo garinimo parametrų	10
1.3.1. Garinimo kampas	10
1.3.2. Padėklo užlaikymas	12
1.3.3. Garinimo greitis	14
1.4. Poliarizatorius	15
2. Metodai	17
2.1. Fizinis garų nusodinimas kampu su periodiškais padėklo apsisukimais	17
2.2. Garinimo parametrai	19
2.3. Spektrofotometriniai matavimai, lūžio rodiklio modeliavimas ir fazės skirtumo skaičiavimas	19
2.4. Elipsometrinių matavimai	21
2.5. Interferometro matavimai	22
2.6. SEM nuotraukos	24
3. Rezultatai	25
3.1. Vienasluoksnės dangos su skirtingu padėklo išlaikymu	25
3.2. Vienasluoksnės dangos su skirtingais garinimo greičiais	29
3.3. Fazės vėlinimas vienasluoksnėse dangose	33
3.4. Vienasluoksnių dangų įtempiai	35
3.5. Poliarizatorius	36
Pagrindiniai rezultatai ir išvados	37
Literatūros sąrašas	38
Santrauka	40
Summary	41

Ivadas

Optinės medžiagos, kaip ir visos kitos medžiagos, turi nuo cheminės sudėties ir fizinės struktūros morfologijos priklausančias savybes. Vienas iš būdų keisti medžiagos struktūrą yra skulptūrinių plonų sluoksnių formavimas. Jų atsakas į šviesą skiriasi nuo tankių izotropinių medžiagų, dėl susidariusių sluoksnio struktūrų, optiškai pasižyminčių anizotropiškumu. Tai reiškia skirtingas optines savybes, priklausančias nuo sklindančios šviesos krypties. Šią savybę turintis optinis elementas geba dvigubai laužti šviesą ir ją poliarizuoti, praleidžiant tik vienos krypties poliarizaciją. Dvigubas šviesos laužimas, arba dvejetainiškumas, nusakomas kaip dviejų lūžio rodiklių skirtumas. Kuo didesnis šis skirtumas, tuo didesnis praėjusių bangų atsilikimas viena kitos atžvilgiu.

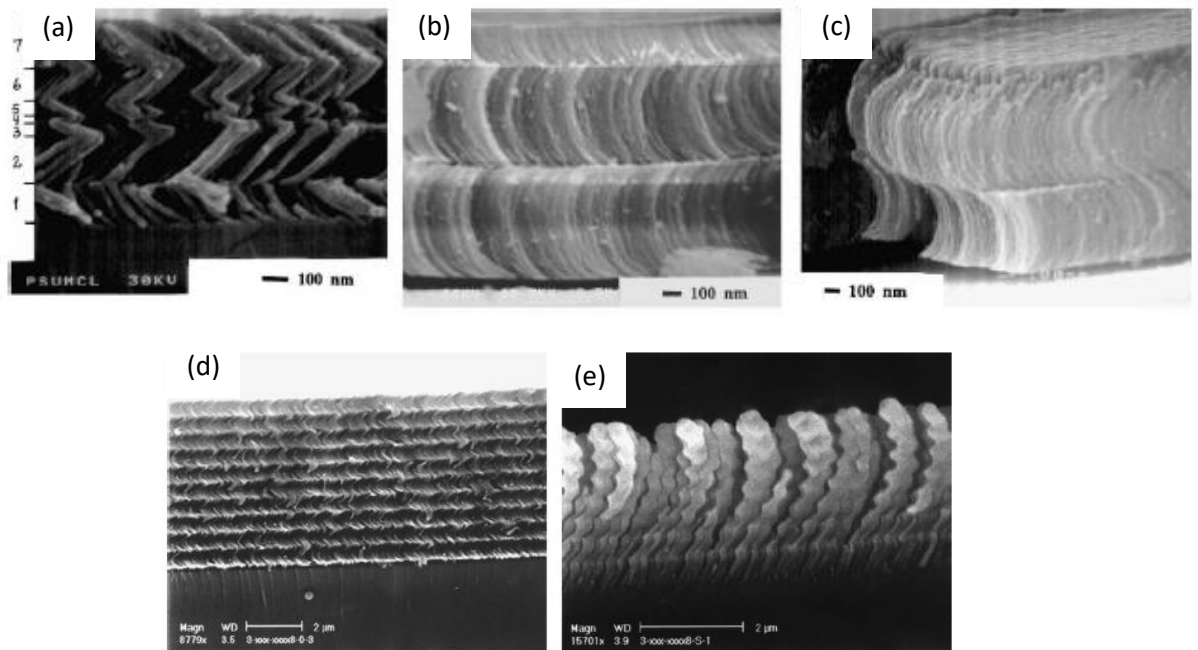
Silicio dioksidas yra viena geriausių medžiagų lazerinei spinduliutei dėl žemo šiluminio plėtimosi koeficiento [1]. Ji taip pat pasižymi aukštu pralaidumu ultravioletinėje zonoje, dideliu kietumu ir cheminiu stabilumu. SiO₂ garams nusėdant ant kampu pakreipto bandinio, susidaro porėti sluoksniai, kurių optinės savybės priklauso nuo garinimo parametrų [2]. Silicio dioksido sluoksnių dvejetainiškumo priklausomybė nuo garinimo parametrų nėra aiški, todėl jų ištyrimas padėtų atrasti naujų galimybių dvejetainiškai šviesą laužiančių optinių komponentų gamybai.

Šio darbo tikslas buvo ištirti silicio dioksido anizotropinių plonų sluoksnių lūžio rodiklio ir dvejetainiškumo priklausomybę nuo garinimo greičio ir padėklo išlaikymo. Šiam tikslui pasiekti skirtingais garinimo parametrais užgarintos vienasluoksnės dangos ir sumodeliuoti jų lūžio rodikliai. Iš šių duomenų apskaičiuotas dvejetainiškumas. Vėliau išmatuotas fazės vėlinimas elipsometru ir palygintas su sumodeliuotais fazės vėlinimais. Sluoksnio ilgaamžiškumas patikrintas įtempių matavimais. Paskutinis žingsnis buvo užgarinti daugiasluoksnį anizotropinį optinį elementą.

1. Literatūros apžvalga

1.1. Skulptūrinės dangos

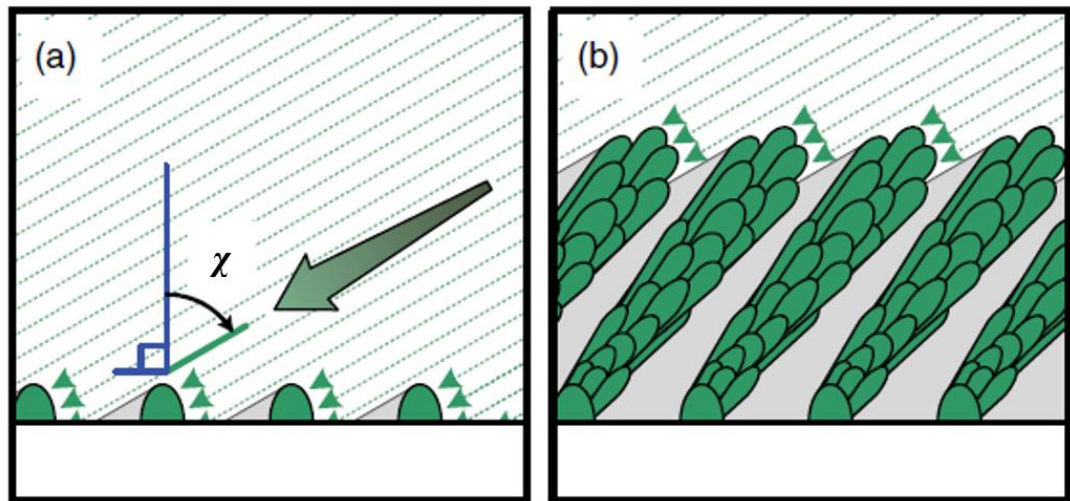
Skulptūriniai ploni sluoksniai yra nanostruktūrizuotos medžiagos, pasižyminčios anizotropija dėl sluoksnio porėtumo [3]. Tokie sluoksniai, auginami fizinio garų nusodinimo būdu, sudaro įvairių formų kolonas, ir, priklausomai nuo garų krypties, kolonos gali būti dviejų ar trijų dimensijų. Dviejų dimensijų formos apima kampų pasvirusias kolonas, ševronines (pasvirusios kolonos, sudarančios zigzaginę sluoksnio struktūrą) ir C bei S formos morfologijos. Trijų dimensijų formos sudarytos iš spiralinių kolonų (1.1 pav.).



1.1 pav. Dviejų dimensijų (a) ševroninė, (b) C-formos ir (c) S-formos struktūros. Trijų dimensijų spiralinė struktūra (d) ir (e) [3].

1.1.1. Šešėliavimo efektas

Kolonos auga pasvirusios dėl kampų į padėklą atskriejančių kaitinamos medžiagos garų. Prie kampų pakreipto padėklo prikibę medžiagos adatomai sukelia šešėliavimo efektą, o į šešėlio zoną medžiagos dalelės nepatenka – jos prikimba prie jau nusėdusių atomų ir formuoja dalelių klasterius bei kolonas (1.2 pav.). Proceso pradžioje auga daug siaurų kolonų, vėliau, dėl šešėliavimo, kolonos konkuruoja tarpusavyje ir augimą tęsia tik dominuojančios kolonos. Augdamos prisijungia vis daugiau dalelių ir didėjant sluoksnio storiui - plečiasi. Susidarę tarpai tarp kolonų sąlygoja sluoksnių porėtumą.



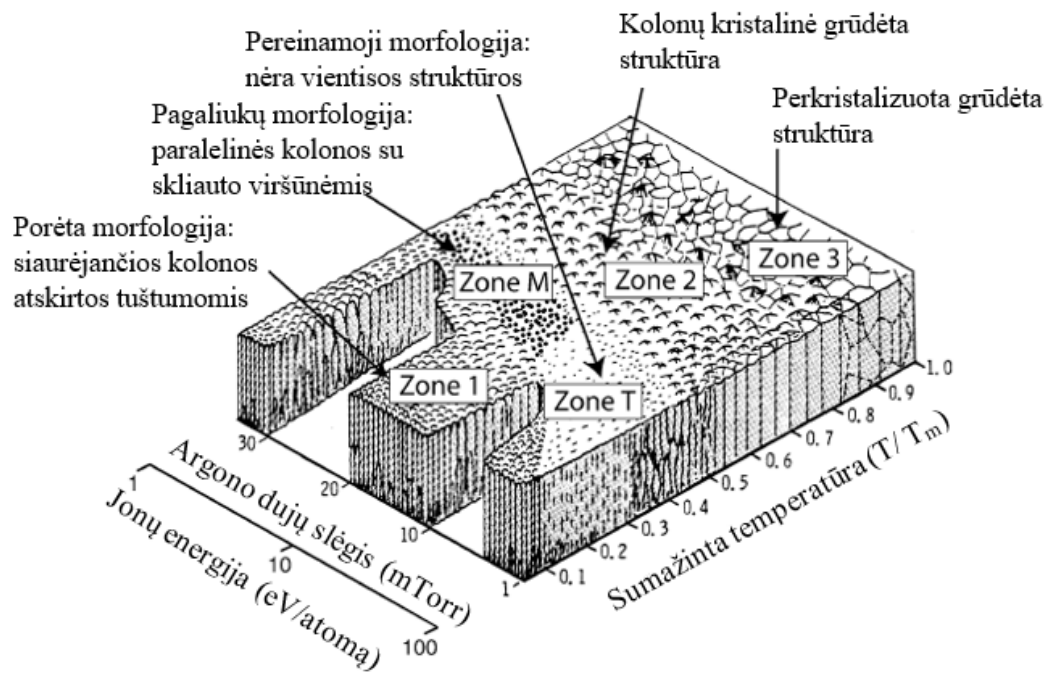
1.2 pav. Sluoksnio formavimas pasviruoju kampu. (a) Kampu χ atkeliaujantys garai nusėda ant padėklo ir sukuria geometrinį šešėlį. (b) Augančių kolonų metamas šešėlis didėja, į kurį garai nepatenka. Taip sukuriama tarpai tarp kolonų [4].

1.1.2. Sluoksnio struktūra

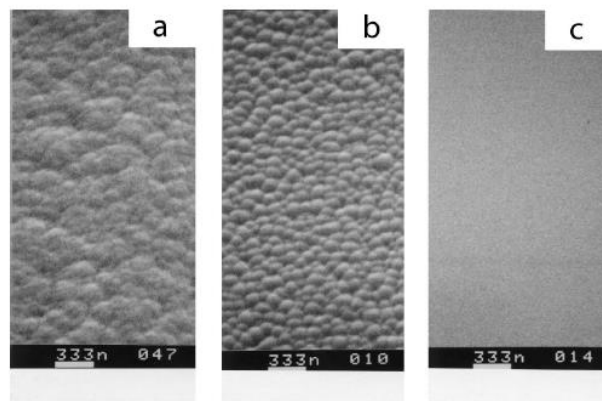
Dalelėms atskriejant į padėklą jo normalės kampu iš karto formuojasi 1-3 nm dydžio klasteriai, iš kurių tik didesnieji prisijungia vis daugiau atskriejančių adatomų. Klasteriai ne tiktais plečiasi, bet ant jų vėliau taip pat formuojasi nauji klasteriai. Besiformuojančios dominuojančios kolonos turi platų dalelių pagavimo plotą, kuris yra didesnis nei pačios kolonos, ar klasterio, perimetras ir dėl šios priežasties kolonų plėtimasis yra įmanomas. Tokių kolonų suformuotas paviršius primena žiedinį kopūstą ir priklauso pirmajai zoni struktūros zoni modelyje (1.3 pav., 1.4 pav. a).

Augančių kolonų varžymasis nėra būtina skulptūrinių plonų sluoksnių savybė. Jos gali augti nepriklausomai viena nuo kitos ir iš šono priminti pagaliukus, o iš viršaus kiekviena tokia kolona turėtų kupolo formą. Tai yra zona M (1.4 pav. b). Tarp M ir antrosios zonos yra zona T (1.4 pav. c), kuri yra vadinama pereinamąją zona tarp M ir antrosios zonos. Ji neturi aiškios ar tolygios struktūros.

Antroji ir trečioji zona nėra būdinga skulptūriniams ploniems sluoksniams dėl didelio adatomų mobilumo, panaikinančio šešėliavimo efektą ir dalelių grupavimąsi į klasterius.



1.3 pav. Skulptūrinio plono sluoksnio zonos išsidėsčiusios priklausomai nuo sumažintos padėklo temperatūros (T – padėklo temperatūra garinimo metu, T_m – medžiagos lydymosi taškas) ir padėklą bombarduojančių dujų slėgio [3].



1.4 pav. Volframo oksido sluoksnių paviršiaus SEM nuotraukos, paruoštos RF magnetroninio dulkinimo būdu, argono-deguonies dujų mišiniui esant (a) 40×10^{-3} Torr, (b) 25×10^{-3} Torr, ir (c) 5×10^{-3} Torr slėgiui. Paruošti sluoksniai yra $8 \mu\text{m}$ storio ir atitinka šias morfologines zonas: (a) pirmoji zona, (b) zona M, ir (c) Zona T [3].

1.1.2.1. Anizotropiškumas, atsiradęs dėl šešėliavimosi

Didėjant ant padėklo nusėdančios medžiagos kampui didėja sluoksnio anizotropiškumas dėl didėjančių tarpų tarp kolonų. Atominio lygio šešėliavimas priklauso nuo tokių faktorių kaip:

- Padėklo pakrypimo kampo;

- Adatomų mobilumo, priklausančio nuo temperatūros, cheminių sąveikų, prikibimo prie padėklo ir jo kampo;
- Bombardavimo, ypač, kai bombardavimas nėra kolinearus garų srautui.

Išskiriami 7 garų nusodinimo atvejai, kuomet padėklas yra stacionarus arba besisukantis aplink savo ašį, o garų nusodinimo kampas išlieka vienodas.

1) Nusodinimas 0° kampu su stacionariu padėklu

Garams nusėdus ant padėklo 0° kampu, dažniausiai susidaro pirmosios zonos morfologija. Nusėdusios dalelės sudaro klasterius ir augančios kolonos konkuruoja tarpusavyje, sukurdamos izotropinį šešėliavimą. Kaitinant padėklą, sluoksnio morfologija smarkiai nekinta iki kol pasiekama maždaug $0,45 T/T_m$ vertė.

2) Nusodinimas pasvirusiu kampu su stacionariu padėklu

Morfologija priklauso M zonai su pasviromis kolonomis nukreiptomis į garų srautą. Susidaro anizotropinė struktūra dėl šešėliavimo efekto, atsirandančio dalelėms prikibant prie klasterių ir kolonų, pakrypusių link garų srauto. Garinant didesniu padėklo pakrypimo kampu kolonų metamas šešėlis pailgėja ir taip pat padidėja anizotropiškumas.

Pastebėta, kad nusodinant kampu kolonos iš viršaus yra elipsės formos.

3) Nusodinimas pasvirusiu kampu su lėtu padėklo sukimosi aplink savo ašį

Padėklo apsisukimo greičiui esant mažesniau palyginus su nusėdimo greičiu, morfologija išlieka panaši kaip esant stacionariam padėklui. Vienintelis skirtumas yra tas, kad kolonos nebėra tiesios, bet spiralės formos. Spiralės formą apibūdina nusodinimo greitis, apsisukimo greitis ir padėklo pasvirimo kampas.

4) Nusodinimas pasvirusiu kampu su greitu padėklo apsisukimu aplink savo ašį

Padėklui sukantis greitai aplink savo ašį, nebelieka pakankamai laiko susiformuoti klasteriams per vieną apsisukimą. Toks nusodinimas tampa panašus į atvejį, kuomet garai atkeliauja iš visų pusių vienodai padėklo pasvirimo kampu, todėl šešėliavimas tampa izotropinis. Morfologija panašesnė į pirmosios zonos, kuomet nusodinama 0° kampu, tačiau šiuo atveju kolonos labiau konkuruoja tarpusavyje.

5) Nusodinimas kampu su tarpiniu padėklo pasukimu aplink savo ašį

Garinant su tarpiniais padėklo pasisukimais svarbu rasti balansą tarp pasisukimo ir garavimo greičių, kurie neleistų atsirasti kolonų plėtimuisi, smarkiai veikiančiu optines savybes. Manoma, kad nusodinant 0° kampu, kolona turėtų spėti užaugti tiek pat, kokio dydžio yra klasteris (1-3 nm), prieš padėklui pasisukant nemažą dalį pilno apsisukimo.

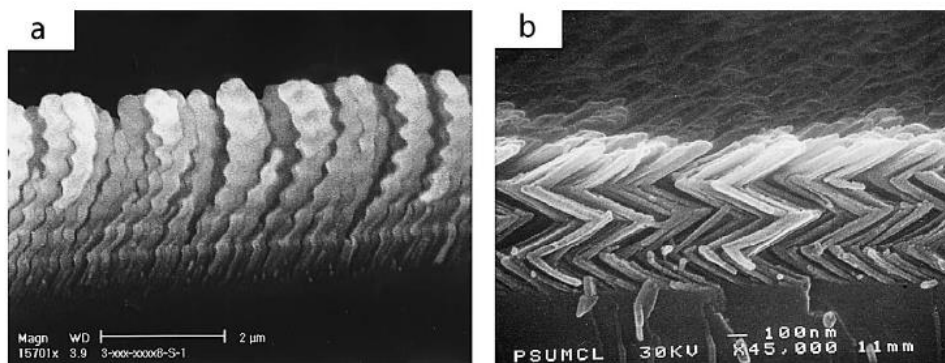
Tokių sluoksnių morfologija pavaizduota 1.5 pav. (a) magnio fluorida SEM nuotraukose.

6) Nusodinimas kampu su tarpiniu padėklo pasukimu aplink savo ašį bei žemos energijos jonų bombardavimu

Nors tokie tyrimai dar neatlikti, žemos energijos jonų bombardavimas padėtų sumažinti ar panaikinti kolonų plėtimąsi. Kolonų plėtimąsi sąlygoja netvirtai prikibusios dalelės prie kolonų kraštų, kurias būtų galima atplėšti bombarduojant žemos energijos jonais ir taip kontroliuoti kolonų plėtimąsi.

7) Nusodinimas kampu su dažniais 180° padėklo apsisukimais aplink savo ašį

Garams atlekiant į padėklą iš dviejų priešingų krypčių, šešėliavimas išlieka anizotropinis. Sluoksnių masės tankis daug didesnis nei skulptūrinių sluoksnių su vienos krypties garų srautu, nes pasukus padėklą 180° kampu, garavimas toliau vyksta prieš tai šešėliuotos zonos kryptimi. Nusėdusios kolonos turi elipsinę formą statmena garų srauto kryptimi dėl anizotropinio šešėliavimo abejomis garų srauto kryptimis.



1.5 pav. Magnio fluorida skulptūrinių plonų sluoksnių SEM nuotraukos. (a) Superspiralės formos, pagamintos garinimo būdu, padėklui esant 85° kampu su 20° apsisukimais aplink savo ašį; (b) ševroninės morfologijos danga, pagaminta garinimo būdu, padėklui esant 85° kampu su 180° apsisukimais aplink savo ašį [3].

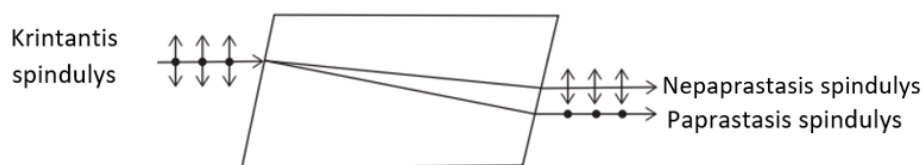
1.2. Anizotropiniai skulptūriniai ploni sluoksniai

1.2.1. Dvejopalaūžiškumas

Į kristalą patekęs nepoliarizuotos šviesos spindulys yra laužiamas į du spindulius skirtingais kampais (1.6 pav.) [5]. Šis fenomenas yra žinomas kaip dvejopalaūžiškumas arba dvigubas šviesos laužimas, pasireiškiantis tik optiškai anizotropinėse medžiagose.

Šviesos sklaidimo greitis kristale priklauso nuo šviesos krypties ir poliarizacijos tarp trijų viena kitai statmenų ašių, dar žinomų kaip principinės dielektrinės ašys [6]. Lūžio rodiklis n priklauso nuo šviesos sklaidimo krypties kristale, kuris gali būti susietas su trimis principinėmis dielektrinėmis ašimis ir būti užrašomas kaip trys principiniai lūžio rodikliai n_1 , n_2 ir n_3 .

Skirtingos kristalų gardelės ir jų klasifikacija nurodyta 1.1 lentelėje. Kubinę gardelę turintys kristalai turi visus tris lūžio rodiklius vienodus $n_1 = n_2 = n_3 = n$. Šviesa tokiame kristale sklinda visomis pusėmis vienodu greičiu, o toks kristalas yra vadinamas izotropiniu. Trigoninėje, tetragoninėje ir heksagoninėje sistemoje du iš trijų lūžio rodiklių yra lygūs ir tai galima užrašyti kaip $n_1 \neq n_2 = n_3$. Tokios gardelės klasifikuojamos kaip vienašiai kristalai, pasižymintys dvejopalaužiškumu. Visi trys lūžio rodikliai skiriasi triklininiuose, monoklininiuose ir ortorombiniuose kristaluose $n_1 \neq n_2 \neq n_3$. Tokie kristalai vadinami dviašiais, nes jie turi dvi ašis, kuriomis sklindančios šviesos greitis nepriklauso nuo poliarizacijos.



1.6 pav. Nepoliarizuotos šviesos dvigubas spindulių laužimas kristale [6].

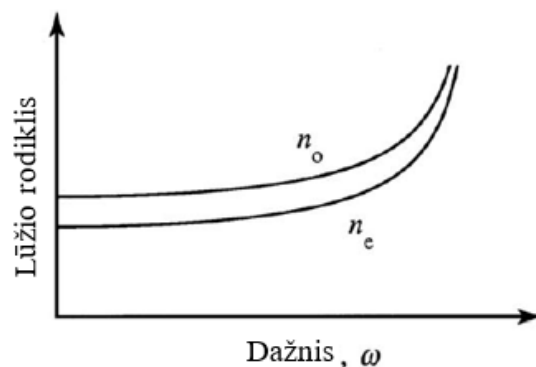
1.1 lentelė. Kristalo gardelių optinė klasifikacija [5].

Kristalo gardelė	Principiniai lūžio rodikliai	Optinė klasifikacija
Triklininė, monoklininė, ortorombinė	$n_1 \neq n_2 \neq n_3$	Dviašis
Trigoninė, tetragoninė, heksagoninė	$n_1 \neq n_2 = n_3$	Vienašis
Kubinė	$n_1 = n_2 = n_3$	Izotropinis

Dvejopalaužiškumu pasižymi ir ploni sluoksniai, sudaryti iš kampu nusodintos medžiagos. Šią savybę nulemia suformuotų kolonų struktūros forma ir jų pasvirimas.

1.2.2. Paprastasis ir nepaprastasis lūžio rodikliai

Iš anizotropinio kristalo išėjusios bangos yra vadinamos paprastąja ir nepaprastąja, jos atitinkamai paveiktos paprastojo n_o ir nepaprastojo n_e lūžio rodiklių [5]. Kristalai yra skirstomi į neigiamus ir teigiamus, priklausomai nuo šių lūžio rodiklių. Neigiamuose vienašiuose kristaluose nepaprastasis lūžio rodiklis yra didesnis nei paprastasis (1.7 pav.), o teigiamuose – priešingai. Abu lūžio rodikliai yra vienodo dydžio, tai yra kritęs spindulys nepatiria dvejopalaužiškumo, kuomet spindulys krinta paraleliai kristalo optinei ašiai. Priklausomai nuo esamų optinių ašių skaičiaus tokie kristalai skirstomi į vienašius ir dviašius.



1.7 pav. Neigiamo kristalo lūžio rodiklių dispersijos. Priešingu, teigiamo vienašio kristalo, atveju, nepaprastasis lūžio rodiklis n_e yra didesnis už paprastąjį n_o [7].

1.2.3. Fazės vėlinimas

Iš esmės bet koks optinis komponentas kažkiek užvėlina sklindančios bangos fazę. Fazės vėlinimą galima kontroliuoti keliais būdais ir vienas jų – dvejetainis. Paprastoji ir nepaprastoji banga sklinda pro medžiagą skirtingu greičiu, todėl jų fazės niekada nesutaps. Fazės užlaikymas apibūdina šių bangų fazės nesutapimą, kurį galima apskaičiuoti formule:

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} |n_o - n_e| d, \quad (1)$$

kur λ – bangos ilgis ir d – dangos storis.

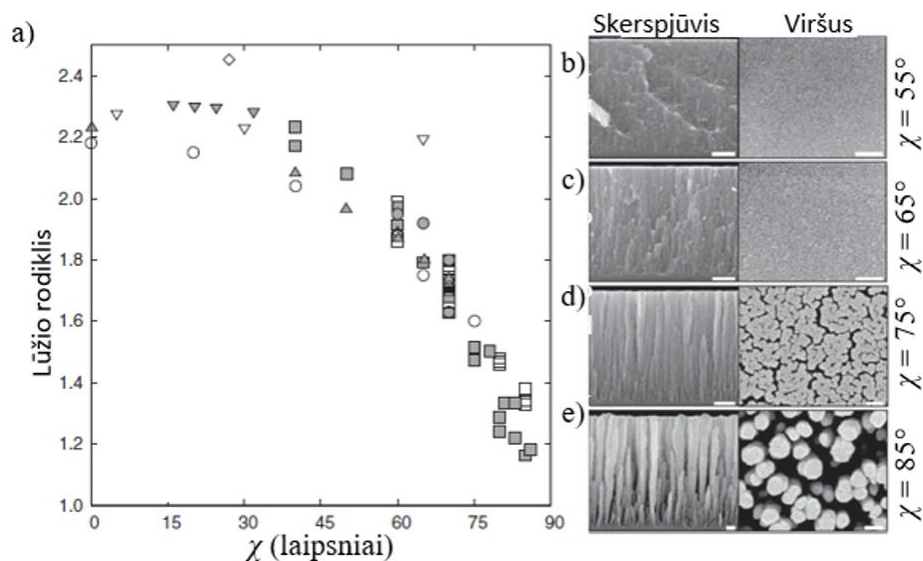
1.3. Skulptūrinių plonų sluoksnių optinių savybių priklausomybė nuo garinimo parametrų

Plonų sluoksnių optinės savybės yra jautrios įvairiems garinimo parametrų, kaip, pavyzdžiui, bandinio temperatūra, į kamerą prileidžiamų dujų slėgis ar garinimo greitis [4]. Jų variavimas leidžia keisti dangų savybes iki tam tikrų ribų. Tuo tarpu dangų, nusodintų pasviruoju kampu savybės papildomai priklauso nuo sluoksnio mikrostruktūros, priklausančios nuo garinimo kampo ir garų nusėdimo greičio.

1.3.1. Garinimo kampas

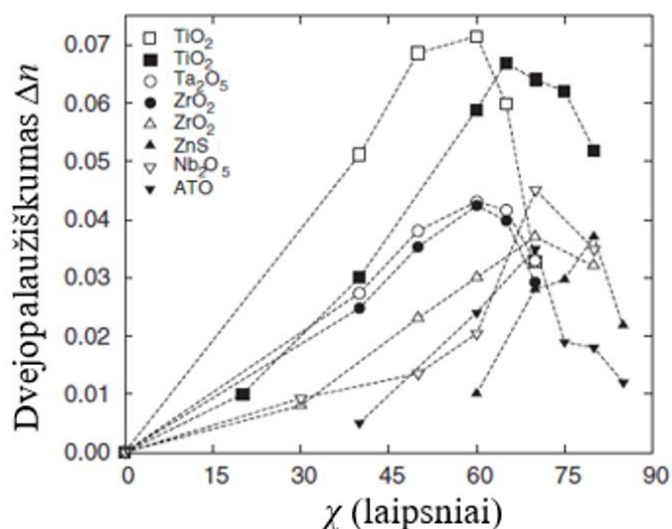
Padėklo pasvirimo kampas χ garų srauto atžvilgiu leidžia paruošti dangas, kurių lūžio rodiklis yra tarp beveik oro ir naudojamos tankios medžiagos verčių. Kampu užgarinto titano dioksido išmatuotos lūžio rodiklio vertės siekia nuo 1,2 iki 2,3 (1.8 pav.). SEM nuotraukos taip pat iliustruoja didėjančią sluoksnio porėtumą didėjant kampui χ . Amorfiniuose titano dioksido sluoksniuose lūžio

rodiklis yra 2,2 – 2,4, priklausomai nuo garinimo naudojamo metodo. Neatsižvelgiant į kiekvienos medžiagos ypatumus, panaši lūžio rodiklio tendencija pastebėta įvairiose medžiagose.



1.8 pav. (a) Titano dioksido lūžio rodiklio priklausomybė nuo padėklo pakrypimo kampo χ . (b-e) Skirtingais kampais suformuotų dangų SEM nuotraukos, vaizduojančios struktūros skerspjūvį ir paviršių [4].

Dvejopalauiškumu Δn pasižymintiose dangose santykis su χ nėra toks monotoniškas. Kelių medžiagų dvejopalauiškumo priklausomybė nuo padėklo pasvirimo kampo pateikta 1.9 pav. Iš pradžių sluoksnių dvejopalauiškumas lygus 0, kai $\chi \sim 0$. Tuomet Δn palaipsniui didėja ir, priklausomai nuo medžiagos, pasiekia aukščiausią dvejopalauiškumo tašką, po kurio mažėja, kai χ artėja prie 90° . Daugiausiai medžiagų didžiausias Δn pasiekiamas ties $70^\circ \pm 10^\circ$, bet tiksliam kampo χ nustatymui reikia atlikti kalibravimą, nes dvejopalauiškumas priklauso nuo garinamos medžiagos ir kameros sąlygų garinimo metu. Pavyzdžiui, 1.9 pav. matyti dviejų TiO_2 kreivių maksimumo pozicija skiriasi per maždaug 10° , o tai reiškia dangų jautrumą proceso parametrams. Panaši situacija ir su ZrO_2 medžiaga.

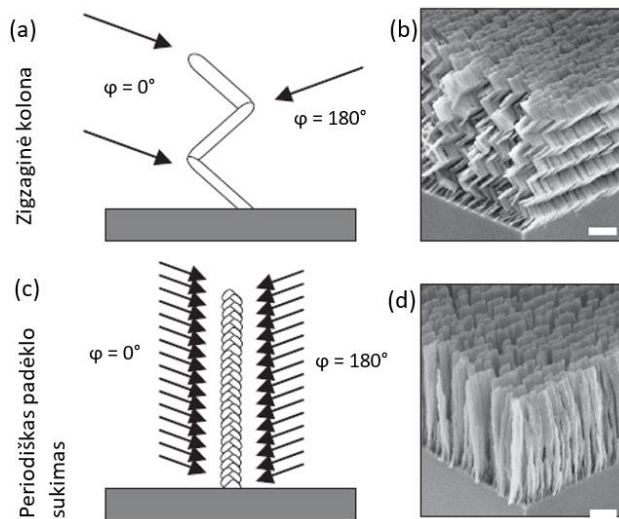


1.9 pav. Kelių medžiagų išmatuoto dvejopalaūžiškumo Δn kompleksinė priklausomybė nuo garinimo kampo χ [4].

1.3.2. Padėklo užlaikymas

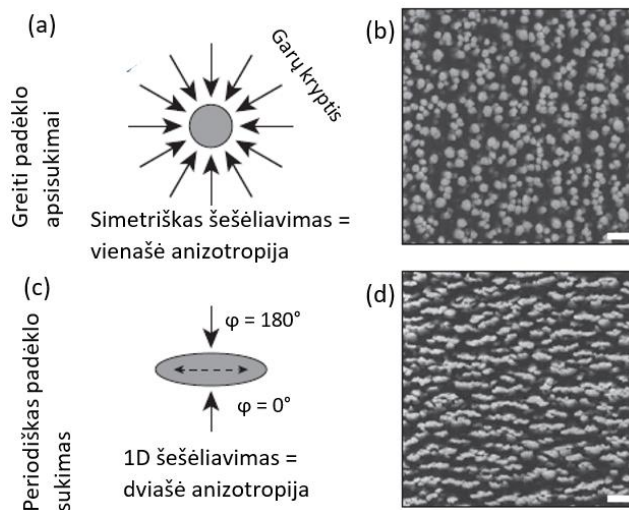
Medžiagų dvejopalaūžiškumo vertės 1.9 pav. siekia 0,04 – 0,07 ir tai jau yra didesnės vertės nei daugelio natūralių medžiagų. Nepaisant to, šias vertes galima dar labiau padidinti užginant kolonas, pasižyminčias dar didesniu anizotropiškumu. Hodgkinson ir kt. [8] išvystyta technika padėklas pasukamas aplink savo ašį periodiškais 180 ° apsisukimais po kiekvieno sluoksnio augimo intervalo. Užaugusi kolona yra zigzago formos (1.10 pav. a-b). Sumažinus augimo intervalą tiek, kad kolona tarp apsisukimų paauga mažiau nei yra jos storis, tada nusėdusios dalelės nespėja suformuoti zigzaginės struktūros ir susidaro vertikaliai orientuota kolona (1.10 pav. c-d).

Net ir su greitais padėklo apsisukimais užaugintos vertikalios kolonos skiriasi nuo tų, kurios užaugintos su nuolatinio padėklo sukimusi aplink savo ašį. Nuolatinio padėklo sukimo proceso metu garų srautas atkeliauja iš visų pusių vienodai, sukurdamas simetrinį šešėliavimą, apskritimo formos kolonos skerspjūvį ir vienašę anizotropiją (1.11 pav. a-b). Periodiško apsisukimo atveju šešėliavimas yra vienoje plokštumoje, kolonų skerspjūvis – elipsės formos, o danga pasižymi dviaše optine anizotropija (1.11 pav. c-d).

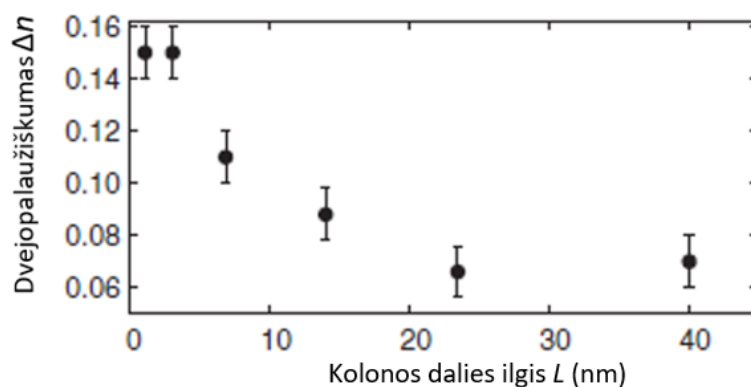


1.10 pav. (a) Įprastai zigzaginės kolonos forma sudaroma iš padėklo apsisukimo savo ašimi tarp 0° ir 180° , dėl to (b) susidaro kolonos, nusodintos priešingomis kryptimis. (c) Dažno periodiško padėklo sukimo atveju nusėdusios kolonos sudaro (d) vertikalios orientacijos kolonas.

Mastelių juostos žymi $1\mu\text{m}$ [4].



1.11 pav. (a) Greiti padėklo apsisukimai sąlygoja vienodą 2D šešėliavimą, (b) vertikaliai orientuotas kolonas ir apskritimo formos kolonų skerspjūvius. (c) periodiški padėklo apsisukimai sąlygoja asimetrinį šešėliavimą ir (d) vertikaliai orientuotas kolonas su ištemptais, elipsės formos, kolonų skerspjūviais. Mastelių juostos žymi $1\mu\text{m}$ [4].



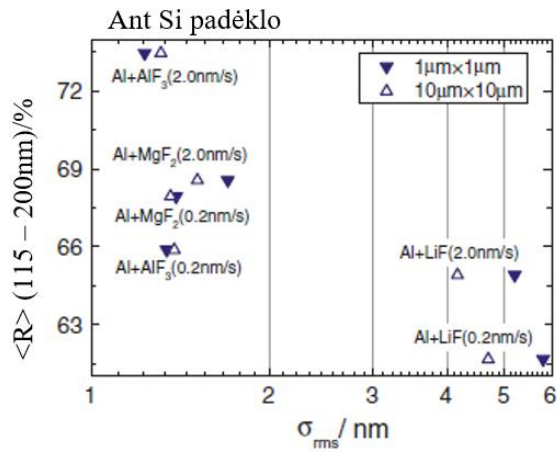
1.12 pav. Δn priklausomybė nuo L TiO_2 dangoje (užgarinta 70° kampu) [4].

Kolonos augimo periodas tarp padėklo apsisukimų taip pat turi įtakos sluoksnio dvejetainiškumui [9]. Atlikti tyrimai su TiO_2 dangomis parodė augimo periodu užaugusios kolonos Δn priklausomybę nuo aukščio L (1.12 pav.). Kai $L > 20$ nm, periodišką padėklo apsisukimą turi mažai įtakos dvejetainiškumui ir primena pasviro kolonos, užgarintos su nuolatiniu padėklo sukimu, rezultatus. Kai $L < 20$ nm, Δn padidėja ir kai $L < 5$ nm dvejetainiškumas padidėja dvigubai. Naudojant tokį nusodinimo būdą, geriausia, kad susidariusios kolonos aukštis tarp padėklo pasisukimų būtų kelių nanometrų.

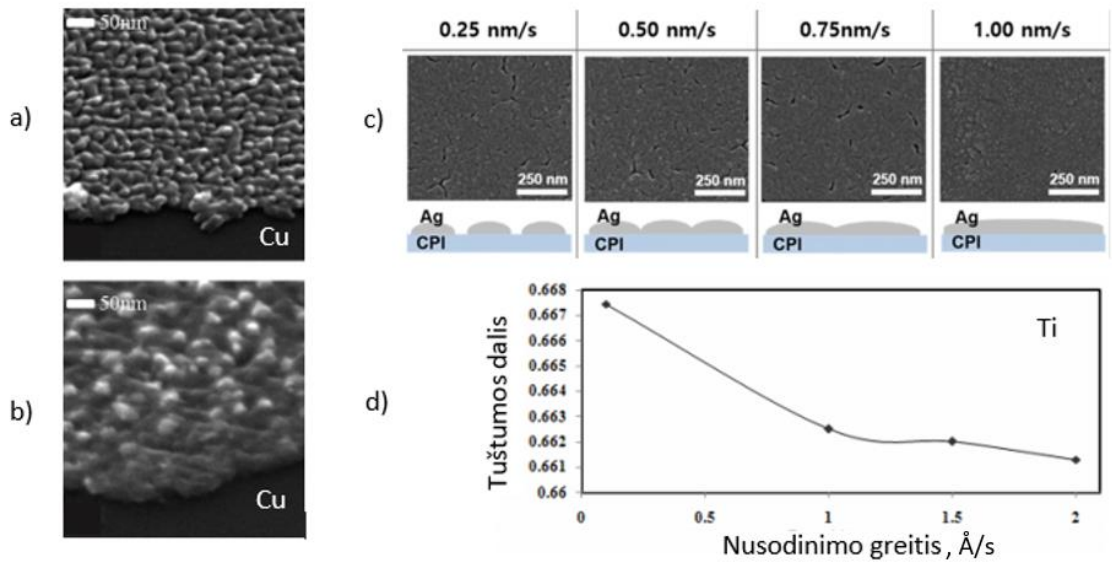
1.3.3. Garinimo greitis

Garinimo greitis turi įtakos UV zonos atspindžio pagerinimui. Didžiausias vidutinis atspindys vakuume UV išmatuotas aliuminio veidrodžiui su AlF_3 apsauginiu sluoksniu, nusodintu dideliu greičiu (1.13 pav.) [10]. Mažiausias vidutinis atspindys išmatuotas Al veidrodžiui turint lėtai nusodintą LiF sluoksnį. Visiems tirtiems fluoridams, didesnis nusodinimo greitis turėjo teigiamos įtakos atspindžio gerinimui vakuuminio UV spektriniame ruože.

Vienas svarbesnių faktorių yra nusėdimo greičio įtaka sluoksnio porėtumui. Atlikti tyrimai su Cu[11], Ag[12], ir Ti[13] parodė sluoksnio porėtumo sumažėjimą, garams nusėdant didesniu greičiu (1.14 pav.). Esant lėtesniam garavimo greičiui didesnis porėtumas taip pat lemia skirtingas susidariusias struktūras, priklausomai nuo medžiagos ir garinimo metodo. Didėjant greičiui susidaro platesnės paviršiaus struktūros, jų forma nebėra aiški iki kol pasiekiamas vientisas izotropiškas sluoksnis. Iš visų trijų medžiagų tik Cu buvo nusodinama kampu. Sluoksnio struktūros pokytis akivaizdus garinant skirtingais greičiais, tačiau net ir nusodinant 6 nm/s , sluoksnio struktūra neturi vientisumo ir nėra izotropiška. Didelis garavimo greitis padėklui nukreiptam kampu į garų srautą sumažina porėtumą ir padidina lūžio rodiklį, bet kolonos vis tiek turėtų išlikti.



1.13 pav. Aliuminio veidrodžių su skirtingais fluorido sluoksniais ir nusodinimo greičiais vidutinis atspindys $\langle R \rangle$ vakuomo UV spektriniame ruože, priklausomai nuo paviršiaus šiurkštumo σ_{rms} [10].



1.14 pav. Cu sluoksnio SEM nuotrauka, nusodinto (a) 1 nm/s ir (b) 6 nm/s [11]. (b) Skirtingais greičiais nusodinto Ag sluoksnio paviršiaus SEM nuotraukos ir skerspjūviai [12]. (d) Ti sluoksnio porėtumo priklausomybė nuo nusodinimo greičio [13]. Iš visų tirtų medžiagų matyti sluoksnio tankėjimas esant didesniems garų srauto greičiams.

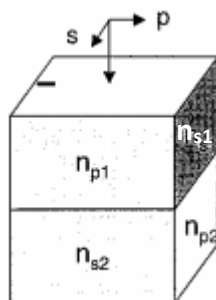
1.4. Poliarizatorius

Poliarizatoriai yra optiniai elementai, praleidžiantys viena kryptimi poliarizuotą šviesą ir atspindintys jai statmeną poliarizaciją. Atspindėta ir praėjusi poliarizacija vadinama s- ir p-polarizacijomis, atitinkamai turinčios statmeną ir paralelinę elektrinę lauką kritusio ir atsispindėjusio, arba praėjusio, spindulio plokštumoje. Šie elementai yra naudojami dvejomis pozicijomis: kai šviesa

į paviršių krinta Briusterio kampu, kuomet visa p-poliarizuota šviesa yra praleidžiama be atspindžių, arba šviesai krintant statmenai į poliarizatoriaus paviršių.

Plonų anizotropinių sluoksnių poliarizatorius yra plokščias optinis elementas, veikiantis statmenai į paviršių sklindančią šviesą. Tokia danga susideda iš ketvirčio bangos ilgio optinio storio sluoksnių pasižyminčių anizotropija [14]. Nusodinant kampu su periodiškais padėklo apsisukimais išgaunamas statmenai į paviršių kritusios šviesos tiesinis poliarizavimas.

1.15 paveiksle pavaizduota tokio poliarizatoriaus anizotropinių sluoksnių pora ir į juos sklindanti išorinė šviesa, turinti dvi poliarizacijas. Dėl lūžio rodiklių dviejuose sluoksniuose p-poliarizacija praeis pro dangą, o s- bus atspindėta. Lūžio rodikliai n_{s1} , n_{p1} , n_{s2} ir n_{p2} priklauso nuo kolonų formos ir sluoksnio porėtumo, o nusodinamos medžiagos pasirenkamos taip, kad $n_{s1} > n_{p1} = n_{s2} > n_{p2}$. Tada p-poliarizacija keliauja bendru rodikliu $n_{p1} = n_{s2}$ ir yra praleidžiama, o s-poliarizacija – atspindima, nes sklinda pro daug sluoksnių, pakaitomis susidedančių iš aukšto ir žemo lūžio rodiklių. Kiekvienoje žemo-aukšto lūžio rodiklių terpių sandūroje dalis šviesos yra atspindima, todėl didesnis tokių sandūrų skaičius nulemia didesnę s-poliarizuotos šviesos atspindį.



1.15 pav. Dviejų anizotropinių sluoksnių lūžio rodikliai, sudarančių vieną porą poliarizatoriaus dangoje. Jei $n_{s1} > n_{p1} = n_{s2} > n_{p2}$, tuomet p-poliarizuota šviesa praeis, o s- bus atspindėta [6].

Plonų sluoksnių anizotropiniai poliarizatoriai yra tinkamiausi naudoti lazerinėse sistemose, nes jie yra gaminami konkrečiam bangos ilgiui, kadangi jų veikimas yra paremtas interferencija. Taip pat dėl didelio lazeriu indukuotos pažaidos slenksčio, siekiančio $48,5 \text{ J/cm}^2$ [15]. Gebėjimas poliarizuoti šviesą, sklindančią į paviršių statmenai, o ne kampu, yra tinkama savybė naudoti mažose, kompaktiškose lazerinėse sistemose. Vienas didžiausių tokių poliarizatorių minusų yra sudėtingumas pagaminti kokybišką anizotropinę dangą.

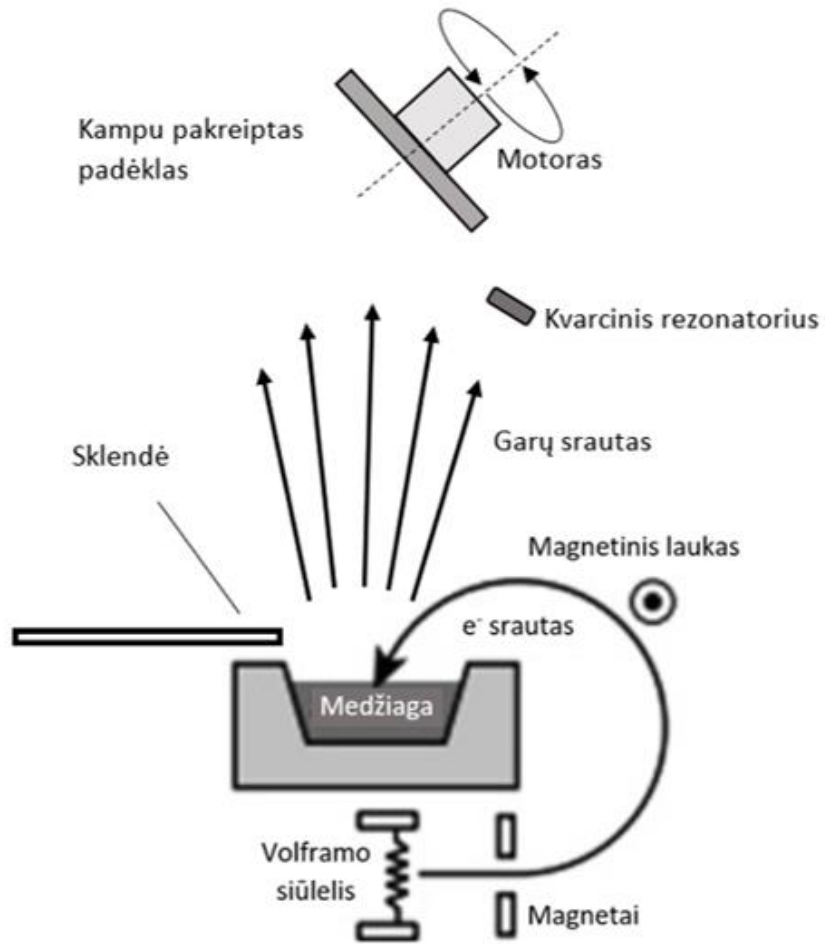
2. Metodai

2.1. Fizinis garų nusodinimas kampu su periodiškais padėklo apsisukimais

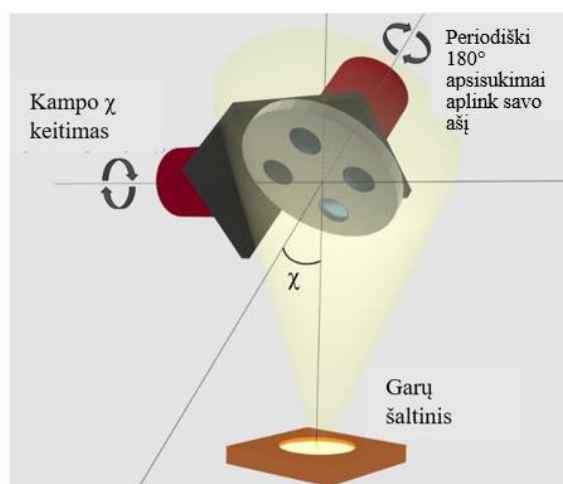
Bandiniai buvo pagaminti fiziniu garų nusodinimo būdu, naudojant elektronų pluošto garinimo technologiją aukšto vakuumo kameroje („Sidrabe”, Latvija). Prieš pradėdant garinimo procesą iš kameros išsiurbiamas oras rotaciniu siurbliu iki kol susidaro žemas, 8×10^{-2} mbar slėgio, vakuumas. Toliau siurbimas tęsiamas turbomolekuliniu siurbliu ir pasiekiamas $1,5 - 2 \times 10^{-5}$ mbar slėgio vakuumas. Elektronų pluoštui sugeneruoti kaitinamas volframo siūlelis iš kurio išlėkęs elektronų srautas yra kontroliuojamas dviejų magnetų, padedančių nukreipti pluoštą ir sufokusuoti į garinamą medžiagą [16] (2.1 pav.). Pasiekus medžiagos paviršių, elektronų kinetinė energija virsta šilumine, dėl kurios kietos būsenos medžiaga pereina į garų būseną ir nusėda plonu sluoksniu ant padėklo paviršiaus. Kameroje taip pat įmontuotas kvarcinis rezonatorius garavimo greičio matavimui ir sklendė, blokuojanti garų srautą, kol medžiaga yra kaitinama.

Anizotropinės dangos pagamintos pasitelkus garinimo kampu metodiką, panaudojus du motorus (2.2 pav.). Vienas motoras leido pasukti padėklą su bandiniais kampu χ garų srauto atžvilgiu, o kitas - periodiškai suko bandinius aplink laikiklio ašį. Padėklo pasukimas kampu sąlygojo pasvirusių kolonų formavimąsi ir porėto sluoksnio susidarymą, o periodiškai 180° apsisukimai – zigzaginę (ševroninę) sluoksnio morfologiją. Šis garinimo būdas leido suformuoti dviašes anizotropines dangas su optinėmis savybėmis, priklausančiomis nuo šviesos skidimo krypties.

Darbe aprašytuose garinimuose naudota silicio dioksido medžiaga, kuri nusodinta ant 25,4 mm diametro lydyto kvarco padėklų bei kvadratinių 10 mm pločio silicio pagrindų, jiems pasvirus kampu $\chi = 70^\circ$.



2.1 pav. Elektronų pluošto metodo principinė schema proceso metu. Įkaitinto volframo siūlelio skleidžiami elektronai magnetų pagalba nukreipiami ir sufokusuojami į medžiagą. Įkaitinti garai nusėda ant kampu pakreipto padėklo su bandiniais [16].



2.2 pav. Garinimo kampu schema. χ žymi kampą tarp padėklo normalės ir garų srauto. Zigzaginė struktūra gaunama padėklui su bandiniais periodiškai apsisukant 180° kampu aplink savo ašį [17].

2.2. Garinimo parametrai

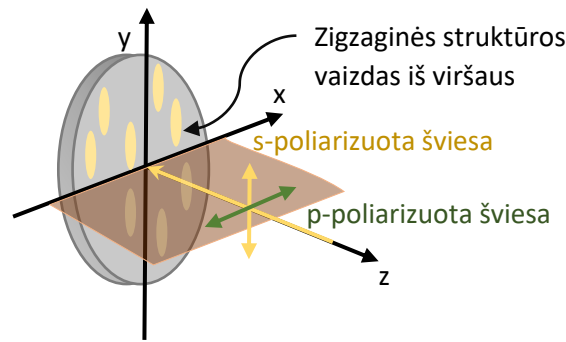
Darbe ištirta optinių savybių priklausomybė nuo garų nusėdimo greičio bei padėklo užlaikymo. Pirmiausia buvo ištirtas pastarasis parametras ir pasirinktas lėtas, 3 Å/s, garų nusodinimo greitis, dėl norimos suformuoti zigzaginės sluoksnio struktūros jautrumo. Išlaikant tokį greitį užgarintos 5 vienasluoksnės dangos su 3 s, 6 s, 12 s, 18 s ir 60 s padėklo užlaikymu. Praėjus atitinkamam laikui, padėklas apsisukdavo aplink savo ašį 180° kampu ir kolonos pradėdavo augti priešinga kryptimi.

Suradus didžiausią lūžio rodiklių išsiskyrimą tarp kolonų šešėliavimo ir jai statmena kryptimi, vėliau tirtas tinkamiausias garų nusėdimo greitis. Kartu su 3 Å/s garavimo greičiu, papildomai užgarintos 3 vienasluoksnės dangos 2 Å/s, 5 Å/s bei 8 Å/s nusodinimo greičiais.

Radus tinkamiausius parametrus užgarintas 26 sluoksnių poliarizatorius, sudarytas iš anizotropinių 70° bei 66° ir izotropinių 0° kampu užgarintų sluoksnių. Poliarizatoriaus teorinis dizainas buvo sumodeliuotas „Optilayer“ programine įranga, iš anksčiau sumodeliuotų lūžio rodiklių.

2.3. Spektrofotometriniai matavimai, lūžio rodiklio modeliavimas ir fazės skirtumo skaičiavimas

Visi bandiniai išmatuoti spektrofotometru („Photon RT“, Baltarusija) tiesinėmis s- ir p-polarizacijomis. Pralaidumo matavimo metu abi polarizacijos į bandinį krinta statmenai. Vienasluoksnių bandinių atveju s-polarizacija sklinda zigzaginės struktūros šešėliavimo plokštuma (greitąja ašimi), o p-polarizacija statmena šešėliavimui kryptimi (lėtąja ašimi) (2.3 pav.). Poliarizatoriaus spektro matavimo metu 70° kampu užgarinto sluoksnio kolonos buvo tos pačios orientacijos, kaip ir vienasluoksnių dangų, o 66° kampu užgarinto sluoksnio kolonos buvo išsidėsčiusios statmenai. P-polarizuota šviesa sklido 66° greitąja ašimi ir 70° lėtąja ašimi. Kadangi šie du lūžio rodikliai sutampa, didžioji dalis p-polarizuotos šviesos praėjo pro poliarizatorių. Tuo tarpu s-polarizuota šviesa sklido 66° ir 70° kampais užgarintų sluoksnių atitinkamai lėtąja ir greitąja ašimis. Dėl šių lūžio rodiklių išsiskyrimo, dalis s-polarizacijos buvo atspindima. Bandinių spektrai užregistruoti nuo 220 nm iki 980 nm, praėjus 15 minučių nuo išėmimo iš vakuuminės kameros ir po kelių dienų visi bandiniai pamatuoti kartu.



2.3 pav. Spektrofotometrinio matavimo metu tiesiškai poliarizuotos šviesos s ir p komponentės, į bandinį krintančios statmenai. Vienasluoksnėse dangose s-polarizuota šviesa sklinda greitąja ašimi, o p-polarizuota šviesa – lėtąja ašimi.

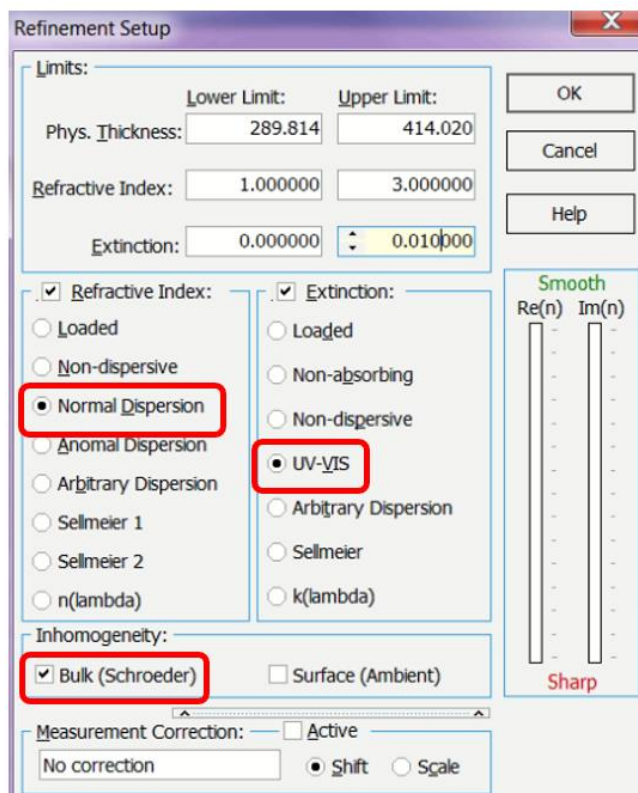
Visų bandinių lūžio rodikliai buvo sumodeliuoti „Optilayer” programa iš spektrofotometrinių matavimų, užregistruotų praėjus kelioms dienoms. Lūžio rodikliai sumodeliuoti abejoms poliarizacijoms. Vienasluoksnių dangų lūžio rodiklio skaičiavimui programoje naudojamas Cauchy modelis, o ekstinkcijos koeficientui – eksponentinis modelis [18]:

$$n(\lambda) = A_0 + \frac{A_1}{\lambda^2} + \frac{A_2}{\lambda^4}, \quad (2)$$

$$k(\lambda) = B_0 \exp[B_0 \lambda^{-1} + B_2 \lambda], \quad (3)$$

kur koeficientai A_0, A_1, A_2 ir B_0, B_1, B_2 yra paskaičiuojami taip, kad teorinė kreivė kuo tiksliau atitiktų užregistruotą eksperimentinį spektrą.

Modeliuojant vienasluoksnės dangas programoje nustatomos sąlygos: normali lūžio rodiklio dispersija, ekstinkcijos koeficientas nelygus nuliui tik UV-VIS zonoje ir sluoksnio nehomogeniškumas (2.4 pav.). Taip pat galima apriboti žemiausias ir aukščiausias fizinio storio, lūžio rodiklio bei ekstinkcijos koeficiento vertes, tačiau to daryti neprireikė, nes netaikant apribojimų visi parametrai panašiai atitikdavo seniau modeliuotas vertes 70° kampui, o sumodeliuotas fizinis storis nedaug skyrėsi nuo kvarcinio rezonatoriaus užregistruoto storio.



2.4 pav. „Optilayer“ programinės įrangos vienasluoksnių dangų modeliavimo parinktys. Raudonai pažymėti pasirinkimai, taikyti visoms vienasluoksniams dangams: normali lūžio rodiklio dispersija (Cauchy modelis), ekstinkcija UV-VIS zonoje ir sluoksnio nehomogeniškumas.

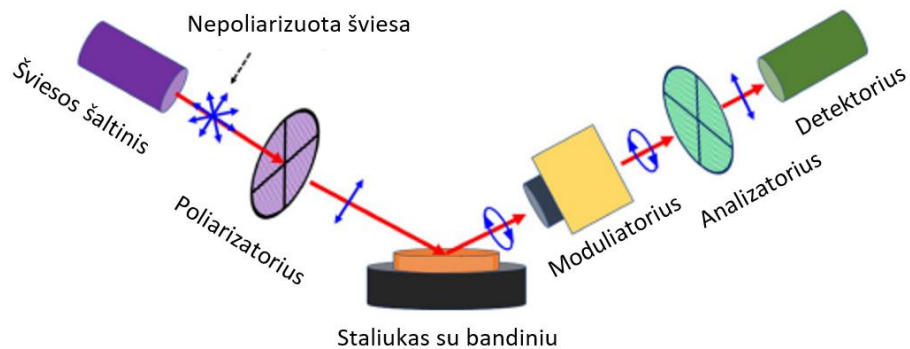
2.4. Elipsometriniai matavimai

Elipsometrija naudojama dielektrinių plonų sluoksnių savybių nustatymui [19]. Šiais matavimais galima nusakyti plonų sluoksnių optines savybes, tokias kaip kompleksinį lūžio rodiklį, susidedantį iš realiosios ir menamosios dalies. Išmatuoti parametrai taip pat priklauso ir nuo bandinio storio, todėl tokie matavimai taip pat gali tiksliai nusakyti dangos fizinį storį.

Tokie matavimai atliekami į bandinį šviečiant tiesiškai poliarizuotą šviesą (2.5 pav.), kuri susideda iš dviejų elektromagnetinių bangų komponentių r_p ir r_s , esančių statmenai viena kitos atžvilgiu [4]. Atsispindėjusi nuo bandinio šviesa pakeičia poliarizaciją iš tiesinės į elipsinę dėl fazės užvėlinimo, išreiškiamu kaip fazių skirtumu Δ , ir r_p bei r_s amplitudžių (R_p ir R_s) santykiu Ψ . Visa tai galima užrašyti į kompleksinę lygtį:

$$\frac{R_p}{R_s} = \tan\Psi e^{i\Delta}. \quad (4)$$

Elipsometru išmatuotas vienasluoksnių dangų fazės vėlinimas.

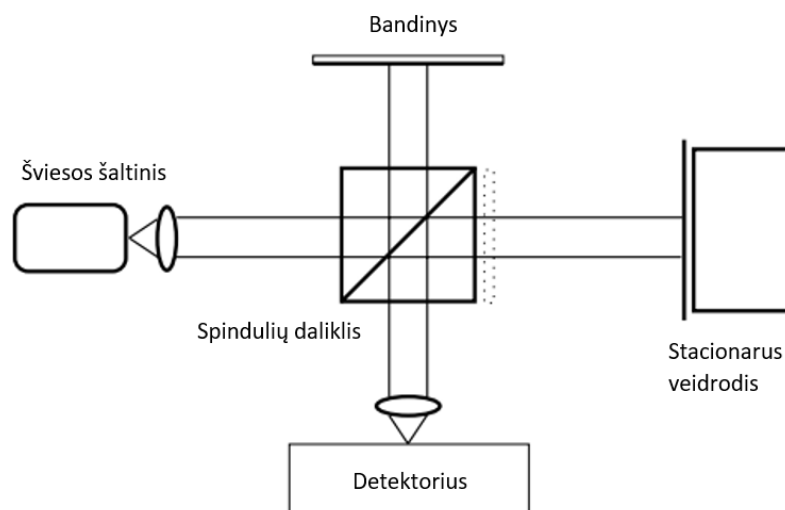


2.5pav. Elipsometro matavimo schema [20].

2.5. Interferometro matavimai

Beveik visos plonos dangos, nepriklausomai nuo nusodinimo būdo, patiria du pagrindinius įtempius: šilumos ir vidinius [21]. Šilumos įtempiai atsiranda dėl skirtingų šiluminio plėtimosi koeficientų tarp padėklo ir sluoksnio. Šiuose eksperimentuose jų išvengiama, kadangi padėklas ir danga sudaryti iš tos pačios medžiagos. Tuo tarpu vidiniai įtempiai atsiranda sluoksnio formavimo metu. Plonų sluoksnių įtempiai gali sugadinti dangas, sukeliant sluoksnio trūkinėjimą, lupimąsi ar padėklo išsilenkimą.

Įtempių matavimams pasitelktas Maikelsono interferometras („Zygo Verifire“, JAV). Paprastas Maikelsono interferometras sudarytas iš vieno stacionaraus ir vieno reguliujamos pozicijos veidrodžio, spindulių daliklio, šviesos šaltinio ir detektoriaus (2.6 pav.) [22]. Spindulių daliklis dalį šviesos, atkeliavusios iš šviesos šaltinio, atspindi, o kitą dalį praleidžia. Atspindėjusi šviesos dalis pasiekia stacionarų veidrodį, nuo kurio šviesa atsispindi ir grįžta link spindulių daliklio. Praėjusi šviesa keliauja iki bandinio, nuo jo atsispindi ir taip pat grįžta prie spindulių daliklio. Grįžę šviesos spinduliai interferuoja ir patenka į detektorius. Jų intensyvumas keičiasi priklausomai nuo interferavusių bangų amplitudės ir fazės.



2.6 pav. Maikelsono interferometro schema su bandiniu. Matavimo metu atstumai tarp spindulių daliklio ir bandinio bei spindulių daliklio ir stacionaraus veidrodžio yra vienodi [22].

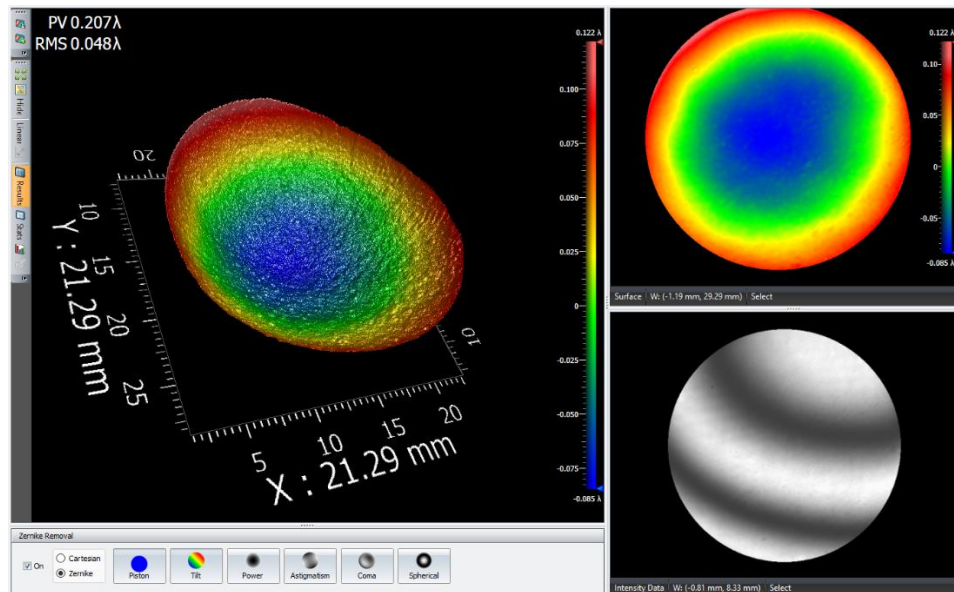
Prieš pradėdant matuoti lydyto kvarco padėklus pirmiausia jie yra paruošiami, nepriklausomai nuo to, ar ant jų yra silicio dioksido danga ar ne. Ant nematuojamos padėklo pusės yra užklijuojama neskaidri juostelė, kuri neleidžia atsirasti atspindžiams nuo antrosios, nematuojamos, pusės. Tuomet bandinys įdedamas į laikiklį, ir suspaudžiamas metalinėmis kojėlėmis. Svarbu bandinio laikiklyje neperveržti prieš suspaudžiant kojėlėmis, dėl tikimybės sukurti papildomus įtempius. Į bandinį šviečiamas 633 nm bangos ilgio He-Ne lazeris, o susidariusių interferencinių juostų plotis reguliuojamas rankenėlėmis, laikančiomis bandinį. Integruota interferometro „Zygo“ programa leidžia stebėti susidariusias interferencines juostas realiu laiku, nusibrėžti tiriamą bandinio plotą, daryti bandinio paviršiaus nuotraukas ir jas analizuoti.

Bandinių nuotraukos interferometru padaromos prieš ir po garinimo. Iš prieš garinimą matuotų stiklų atrenkami turintys vienodą išsigaubimą visomis kryptimis nuo centro (turintys dubenėlio formą) (2.7 pav.) tam, kad užgarinus dangą susidarę įtempiai veiktų vienodai. Užgarinus vienasluoksnes dangas vėl padarytos nuotraukos. Iš visų nuotraukų paimta maksimalaus išsigaubimo vertė ir paskaičiuoti įtempiai σ , naudojantis Stoney formule:

$$\sigma = \frac{1}{6} \left[\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_1} \right] \frac{E}{(1-\nu)} \frac{t_s^2}{t_f}, \quad (5)$$

kur E yra Jungo modulis, ν – Puasono santykis, t_s – pagrindo storis, t_f – dangos storis, o R_1 ir R_2 yra bandinio kreivumas prieš ir po garinimo, išreiškiami formule, apimančia matuojamo padėklo diametrą L ir maksimalią išsigaubimo vertę B :

$$R_{1,2} = \frac{L^2}{8B}. \quad (6)$$



2.7 pav. Interferometro programa padaryta garinimui tinkamo padėklo paviršiaus nuotrauka.

2.6. SEM nuotraukos

Skenuojantis elektronų mikroskopas naudojamas paviršiaus struktūros nuotraukoms gauti. Aukštos energijos elektronai yra paleidžiami į bandinio paviršių, su kuriuo sąveikauja ir vėliau patenka į detektorių. Dėl naudojamų elektronų tiriamas paviršius turi būti elektronams laidus, todėl prieš darant SEM nuotraukas, vienasluoksnės dangos buvo padengiamos plonu metaliniu sluoksniu. Šios nuotraukos suteikia informacijos apie sluoksnio topografiją, morfologiją bei sandarą.

3. Rezultatai

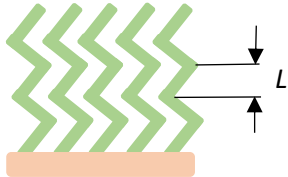
3.1. Vienasluoksnės dangos su skirtingu padėklo išlaikymu

Visų pirma užgarintos 400 nm fizinio storio vienasluoksnės dangos su 3 s, 6 s, 12 s, 18 s ir 60 s padėklo išlaikymu ir 3 Å/s garų nusėdimo greičiu, padėklo normaliai pasvirus 70 ° kampu garų srauto atžvilgiu. Augimo periodu tarp padėklo apsisukimų užaugusios kolonos dalies ilgis L pateiktas 3.1 lentelėje.

Bandiniai išmatuoti spektrofotometru s- ir p-poliarizuota šviesa (3.1 pav.). Iš kiekvieno spektro maksimumo verčių padėties, pateiktos skirtingoms poliarizacijoms, matyti jų nesutapimas, dėl nežymiai išsiskiriančių storių ir lūžio rodiklių. Spektrai panaudoti tikslesniems dangų storiams ir lūžio rodiklių modeliavimams (3.2 pav.).

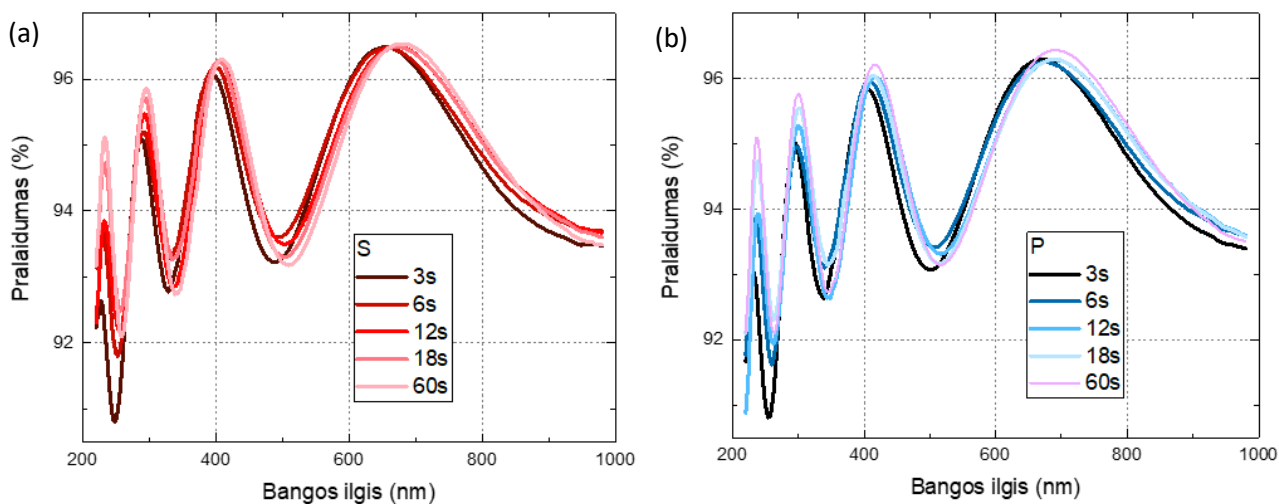
Iš sumodeliuotų storių matyti, kad kvarciniu rezonatoriumi užregistruotas 400 nm storis *in situ* ne visiems sluoksniams atitiko realybę, nors vakuuminės kameros sąlygos išlaikytos vienodos (3.2 pav. a). Pastebėta, kad su didesniu padėklo išlaikymu taip pat auga sluoksnio storis. Tikėtina, kad ši tendencija pastebima dėl padėklo sukimosi metu besikeičiančios garų srauto krypties. Garinimas buvo tęsiamas padėklo sukimosi metu, todėl į šešėliavimo zonos sukurtus tarpelius tarp kolonų galėjo prikristi medžiagos garų ir mažiau prikibti prie kolonų viršūnėlių. Žinant, kad padėklas apsisuka 180 ° per 2,25 s, galima apskaičiuoti padėklo sukimosi metu užgaravusį storį viso sluoksnio garinimo proceso metu (3.1 lentelė).

3.1 lentelė. Kolonos dalies ilgis L skirtingo padėklo išlaikymo zigzaginiėje struktūroje ir padėklo sukimosi metu užgaravęs storis.

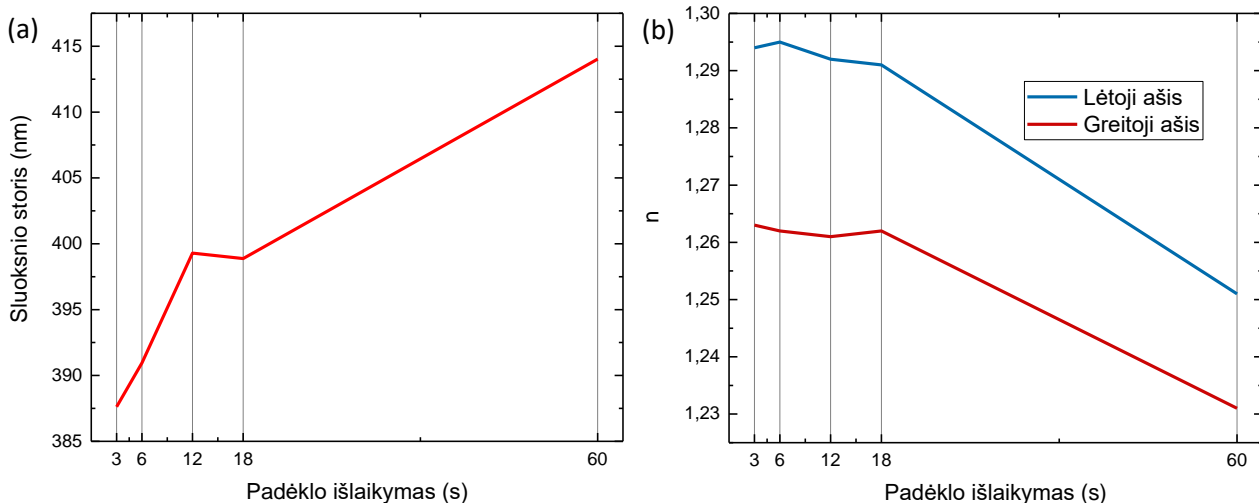
Padėklo išlaikymas, s	Kolonos dalies ilgis L , nm	Padėklo sukimosi metu užgaravęs storis, nm	Zigzaginė struktūra
3	0,9	171	
6	1,8	109	
12	3,6	63	
18	5,4	44	
60	18	14	

Greitosios ir lėtosios ašies lūžio rodikliai ties 500 nm bangos ilgiu visoms dangoms, išskyrus 60 s, yra labai panašūs (3.2 pav. b). Lūžio rodikliai 3 – 18 s padėklo išlaikymo sluoksniams yra apie 1,26 ir 1,29, skiriasi tik kiekvieno sluoksnio tūkstantoji dalis, kurią sunku tiksliai nusakyti dėl spektrinių matavimų ir sumodeliuoto storio paklaidų. Didesnis lūžio rodiklio skirtumas pastebėtas

dangos, užgarintos su 60 s išlaikymu. Greitosios ašies lūžio rodiklis yra 1,23, o lėtosios – 1,25. Mažesni lūžio rodikliai reikštų tai, kad tarp ilgesnių kolonų, suformuotų su 60 s išlaikymu, susidaro daugiau oro tarpų. Kita priežastis galėtų būti mažesnis aplinkos poveikis, dėl kurio porėti sluoksniai adsorbuoja ore esančias daleles, sąlygojančias spektro pasislinkimą bangos ilgių ašies atžvilgiu.



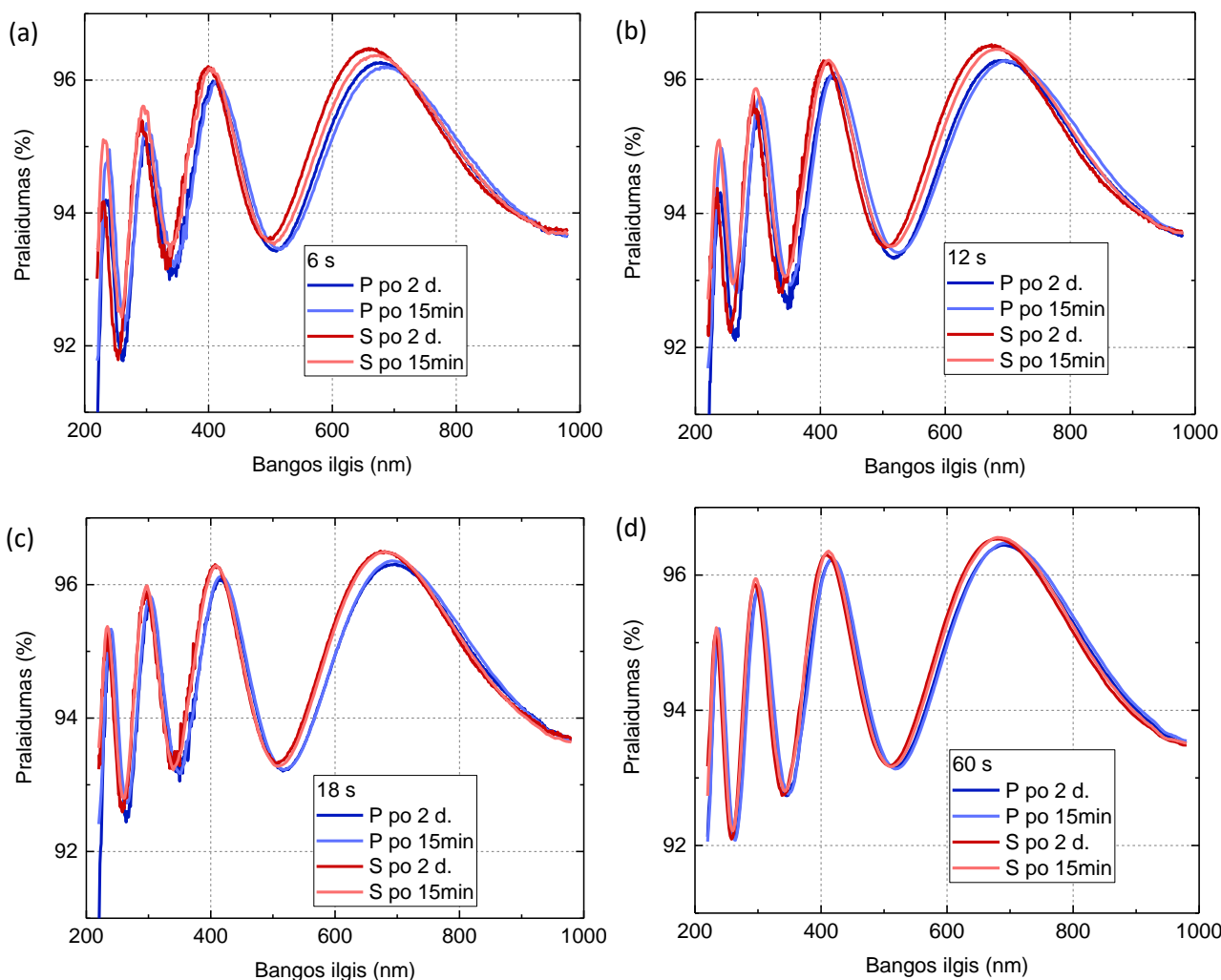
3.1 pav. Vienasluksnių dangų, užgarintų su skirtingais padėklo išlaikymais pralaidumo spektrai a) s- ir b) p-polarizacijai.



3.2 pav. Sumodeliuoti skirtingo padėklo išlaikymo a) užgarinti storiai ir b) lūžio rodikliai greitąja (s-polarizacija) ir lėtąja (p-polarizacija) ašimis ties 500 nm bangos ilgiu.

Aplinkos poveikis vienasluksnėms dangoms buvo pastebėtas iš spektrofotometrinių matavimų, atliktų po 15 minučių ir 2 dienų nuo bandinių išėmimo iš vakuuminės garinimo kameros (3.3 pav.) Spektro maksimumų verčių pasislinkimas į trumpesniųjų bangų pusę matomas dangose, užgarintose su 6 s ir 12 s išlaikymu (3.3 pav. a ir b). UV-VIS sugertis taip pat padidėjo, tai matoma nuo 220 nm iki 350 nm bangos ilgiuose. Taip yra dėl iš aplinkos adsorbuotų dujų ir vandens

molekulių. Tuo tarpu skirtingu laiku atliktuose matavimuose su 18 s ir 60 s padėklo išlaikymu skirtumai yra nepastebimi. Pralaidumo skirtumas tarp dviejų poliarizacijų taip pat mažesnis su ilgesniais padėklo išlaikymais. Tai reikštų mažesnę lūžio rodiklių išsiskyrimą, galimai dėl ilgėjančios kolonos dalies L .

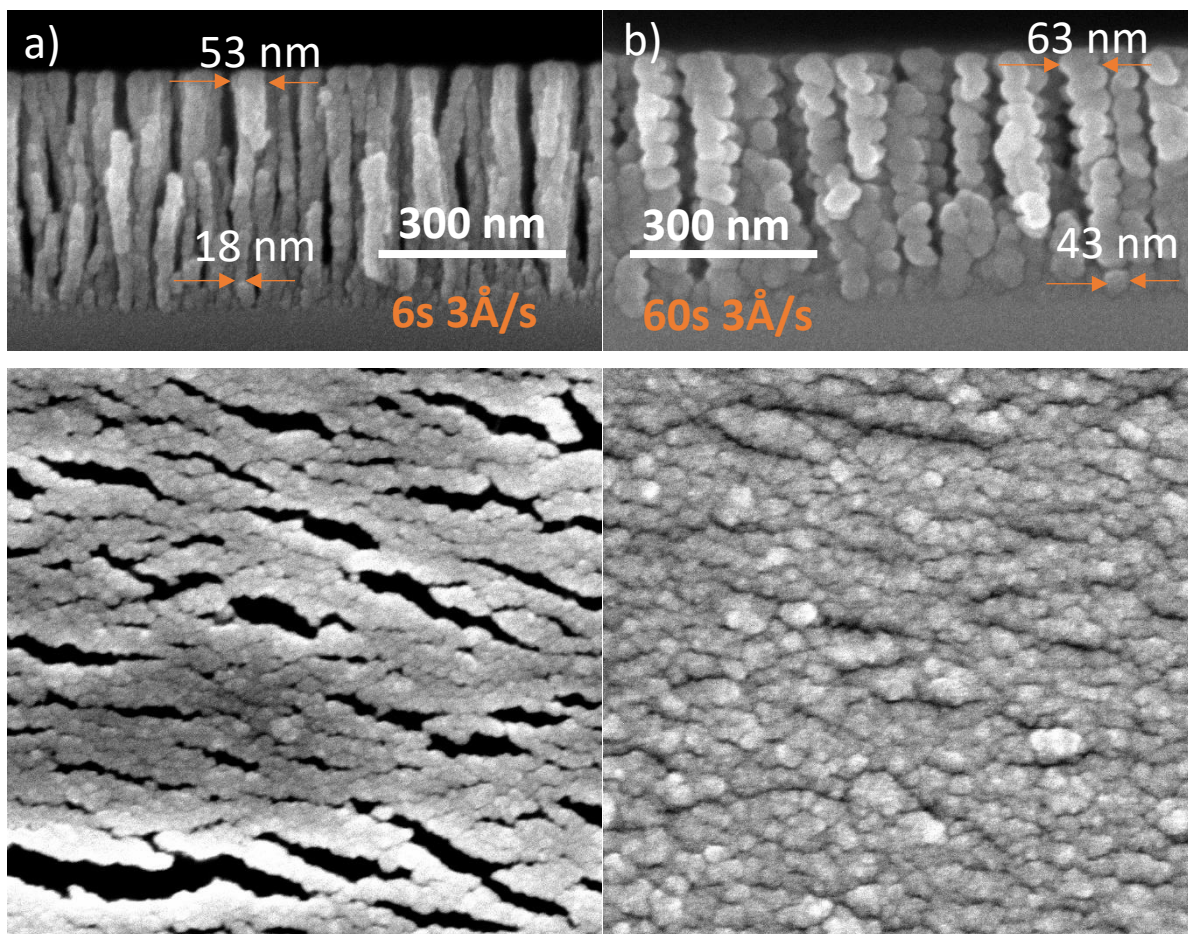


3.3 pav. Vienasluksnių dangų spektrofotometriniai matavimai atlikti po 15 min nuo išėmimo iš vakuuminės kameros ir praėjus 2 dienoms. Garinant su trumpesniu padėklo išlaikymu pastebimas didesnis pokytis maksimumo verčių padėtyse. Padėklo išlaikymas a) 6 s, b) 12 s, c) 18 s, ir d) 60 s.

Atliktos 6 s ir 60 s padėklo išlaikymu užgarintų sluoksnių skerspjūvio ir paviršiaus SEM nuotraukos (3.4 pav.). Dėl ilgesnės kolonos dalies L , 60 s išlaikymu užgarintos kolonos prie padėklo yra apie 2,5 karto platesnės, nei kad 6 s padėklo išlaikymu užgarintos dangos. Augdamos ilgesnio L kolonos taip pat mažiau plečiasi didėjant visos dangos storiui, bet visgi kolonų viršūnėlės 10 nm didesnio diametro, nei kad lėtesnio padėklo išlaikymo. Iš paviršiaus nuotraukų matyti gerokai padidėjęs sluoksnio paviršiaus tankis. 6 s ir 60 s porėtumas atitinkamai yra 25,6 % ir 14,3 %. 6 s išlaikymu užgarintos dangos porėtumas panašus į literatūroje randamus rezultatus, kai silicio

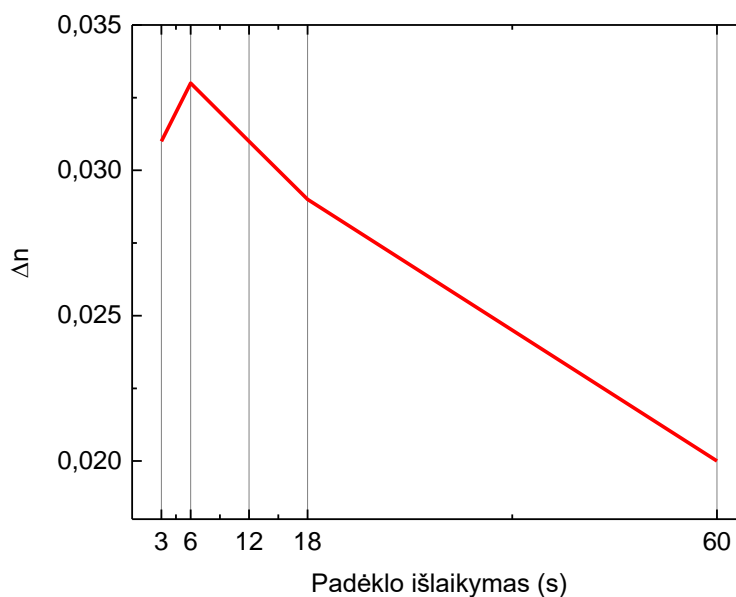
dioksidas yra nusodinamas jam esant pasviruoju kampu be apsisukimų. Jų porėtumai yra 26,9 – 31,5 % [23, 24, 25]. Tikėtina, kad 60 s padėklo išlaikymu užgarinta danga yra tankesnė dėl ilgesnės kolonos dalies *L*. Paviršiuje matomos elipsės formos, susidariusios dėl zigzaginės struktūros yra ilgesnės, nei trumpesnių padėklo išlaikymų.

Skerspjūvio storis buvo 1 nm didesnis 6 s išlaikymo dangai ir 7 nm mažesnis 60 s dangai nuo sumodeliuotų jų storių. Šie storio netikslumai lūžio rodiklio modeliavimams neturėjo daryti didelės įtakos.



3.4 pav. Bandinių, užgarintų su a) 6 s ir b) 60 s padėklo išlaikymu skerspjūvio ir paviršiaus SEM nuotraukos, kuriose matyti didesniu išlaikymu užgarinto sluoksnio stambesnės zigzaginės kolonos ir sumažėjęs paviršiaus porėtumas. Skerspjūvių storiai a) 392 nm ir b) 407 nm.

Iš sumodeliuotų lūžio rodiklių greitąja ir lėtąja ašimis apskaičiuotas didžiausią lūžio rodiklių skirtumą turintis sluoksnis – pasižymintis didžiausia anizotropija (3.5 pav.). Palyginus mažą 60 s išlaikymo lūžio rodiklių skirtumą galima paaiškinti panašiu lėtosios ir greitosios ašies porėtumu. 3 – 18 s padėklo išlaikymai turi panašų, tik per tūkstantąją dalį besiskiriantį, lūžio rodiklių skirtumą, bet toliau tęsti eksperimentus pasirinkta su didžiausiu išsiskyrimu pasižyminčiu padėklo išlaikymu – 6 s.



3.5 pav. Lūžio rodiklių skirtumai ties 500 nm bangos ilgiu, skirtingais padėklo išlaikymais užgarintų dangų.

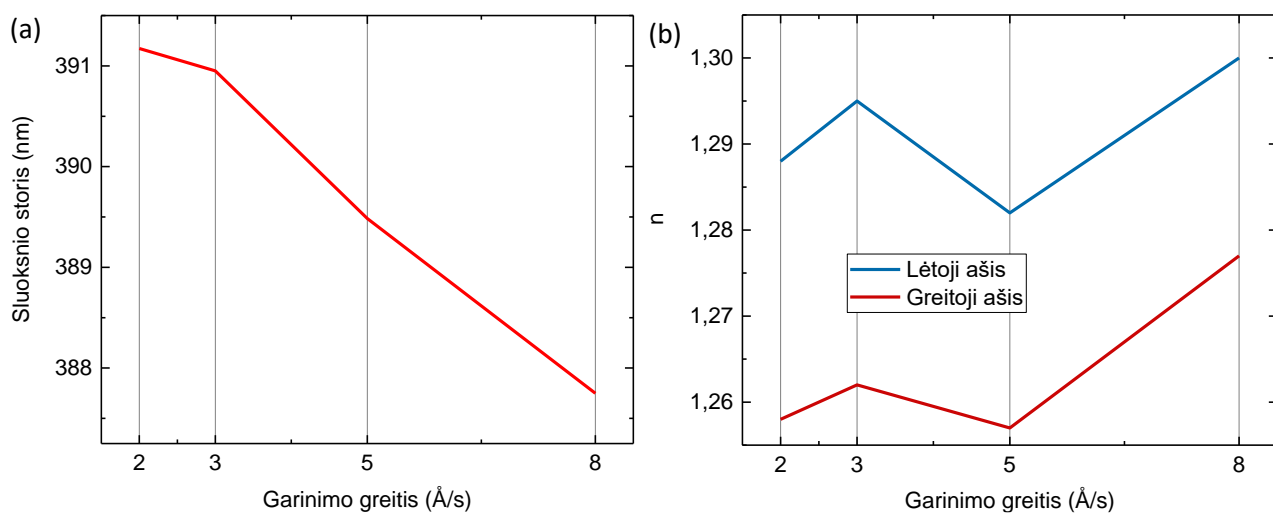
3.2. Vienasluoksnės dangos su skirtingais garinimo greičiais

Užgarintos vienasluoksnės 400 nm dangos su 6 s padėklo išlaikymu ir skirtingais garinimo greičiais: 2 Å/s, 5 Å/s ir 8 Å/s. Paskaičiuoti skirtingų garinimo greičių kolonų ilgiai pateikti 3.2 lentelėje. Pamatavus jų pralaidumą spektrofotometru s- ir p-polarizuota šviesa (3.8 pav.), sumodeliuoti užgaravę storiai, lūžio rodikliai (3.6 pav.) bei paskaičiuoti jų skirtumai (3.9 pav.).

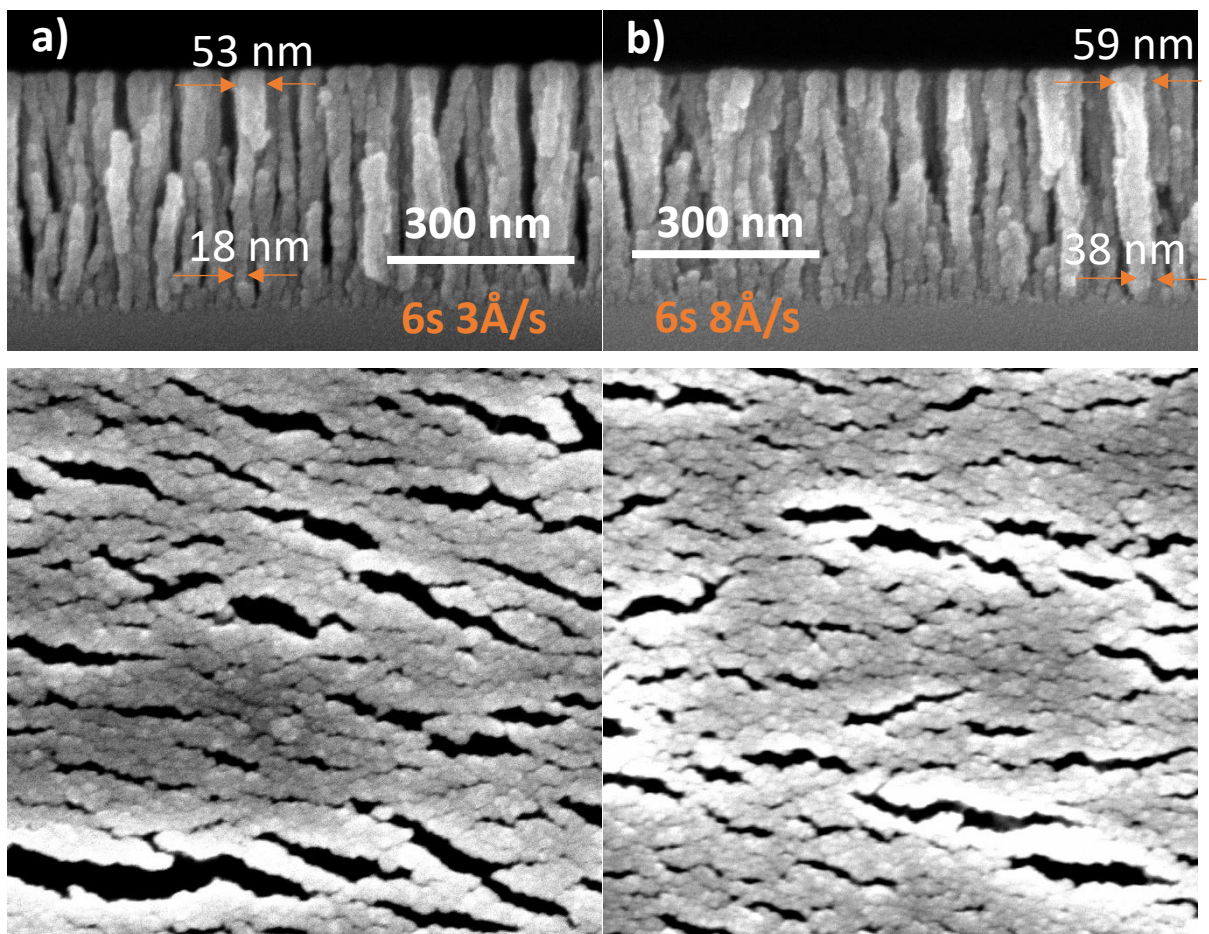
Mažėjanti storio priklausomybė didėjančiam garavimo greičiui vėlgi gali būti iš dalies paaiškinta garinamos medžiagos dalelių prikirtimu į tarpus, susidariusius dėl šešėliavimo. Greito, 8 Å/s garavimo metu, į vieną padėklo pasisukimą atkeliauja daugiau medžiagos garų nei kad garinant 2 Å/s greičiu. Pastaruoju atveju per padėklo pasisukimą mažiau dalelių spėja prikristi į tarpus iki kol padėklas baigia apsisukimą ir vėl yra stacionarus. Šiuo atveju proceso trukmė smarkiai skiriasi priklausomai nuo garavimo greičio, todėl garinant 2 Å/s greičiu padėklas pasisuka 242 kartus, o garinant 8 Å/s greičiu tik 61 kartą. Padėklo sukimosi metu užgaravęs storis per visą sluoksnio formavimo procesą pateiktas 3.2 lentelėje. Dideliu greičiu nusodintos dalelės formuojasi į stambesnius klasterius ir formuoja platesnes kolonas, ką galima matyti ir iš 3.7 pav. sluoksnių skerspjuvio ir paviršiaus SEM nuotraukų.

3.2 lentelė. Kolonos dalies ilgis L skirtingu greičiu užgarintoje zigzaginėje struktūroje ir padėklo sukimosi metu užgaravęs storis.

Garinimo greitis, $\text{\AA}/\text{s}$	Kolonos dalies ilgis L , nm	Padėklo sukimosi metu užgaravęs storis, nm	Zigzaginė struktūra
2	1,2	164	
3	1,8	109	
5	3,0	65	
8	4,8	41	



3.6 pav. Sumodeliuoti skirtingais greičiais užgarintų sluoksnių a) storiai ir b) lūžio rodikliai greitąja (s-polarizacija) ir lėtąja (p-polarizacija) ašimis ties 500 nm.

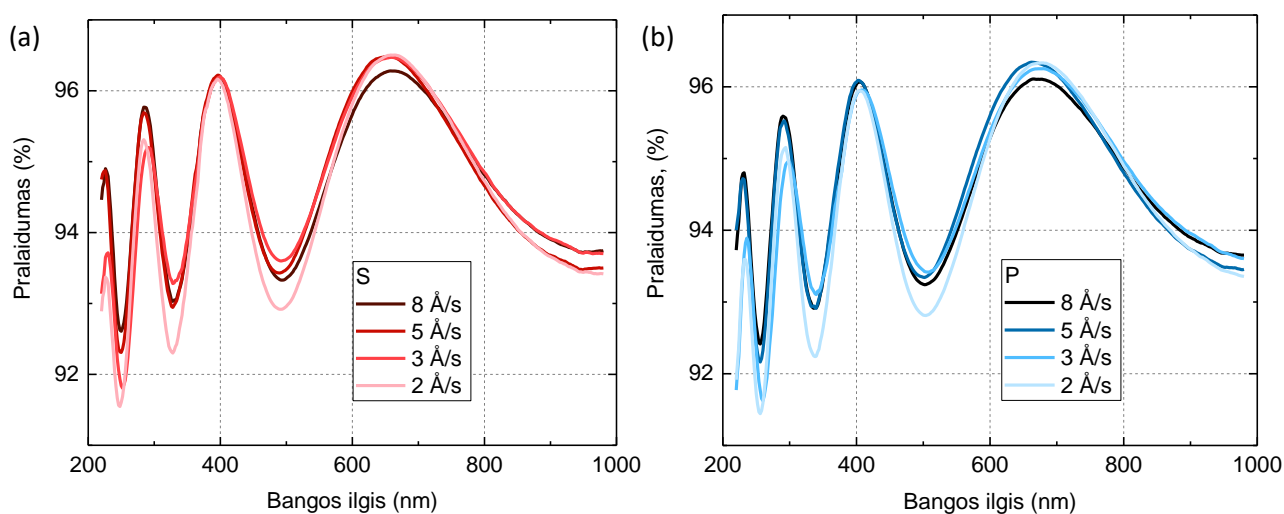


3.7 pav. Bandinių, užgarintų a) 3 Å/s ir b) 8 Å/s greičiu skerspjūvio ir paviršiaus SEM nuotraukos, kuriose matyti didesniu greičiu užgarinto sluoksnio stambesnės susiformavusios kolonos ir sumažėjęs paviršiaus porėtumas. Skerspjūvio storis b) 381 nm.

SEM nuotraukose matyti, kad sluoksnio formavimo pradžioje dideliu greičiu ant padėklo nusėdusios dalelės formuoja beveik du kartus storesnes kolonas, sąlygojančias mažesnę porėtumą. Augant sluoksniui kolonos ne taip sparčiai plečiasi palyginus su 3 Å/s greičiu užgarintomis kolonomis, tačiau, užgarinus 400 nm nominalų storį, kolonos viršūnės diametras buvo 6 nm didesnis ir siekė 59 nm. Tikėtina, kad zigzaginės kolonos formuojasi platesnės dėl padėklo sukimosi metu nusėdusio didesnio kiekio dalelių, kurios patenka į kolonų tarpus. Lėto ir greito garų nusodinimo metu suformuotų sluoksnių porėtumas atitinkamai 25,6 % ir 19,1 %. 7 nm mažesnis skerspjūvio storis, nei 8 Å/s greičiu užgarintos dangos sumodeliuotas storis neturėjo daryti didelės įtakos lūžio rodiklių modeliavimams.

Skirtumai tarp bandinių sumodeliuotų lūžio rodiklių šiek tiek ryškesni, nei anksčiau darytuose eksperimentuose (3.6 pav.). Labiausiai išsiskiria 8 Å/s užgarintos dangos greitosios ašies lūžio rodiklis. Šios krypties lūžio rodiklis turėtų būti mažas, nes joje matuojama šešėliavimo zona, sudaryta iš didelių oro tarpų tarp kolonų. Dėl didelio rodiklio šia kryptimi, prilyginamo kitų bandinių lėtosios ašies lūžio rodikliui, ir SEM nuotraukų, galima teigti, kad susidaro daug mažesni oro tarpai nei kitų bandinių atveju.

Iš spektrofotometrinių matavimų matyti didesnis pralaidumas UV zonoje garinant didesniu greičiu nei lėtesniu (3.8 pav.). Šis nedidelis skirtumas tarp bandinių spektrų yra dėl lūžio rodiklių išsiskyrimų.

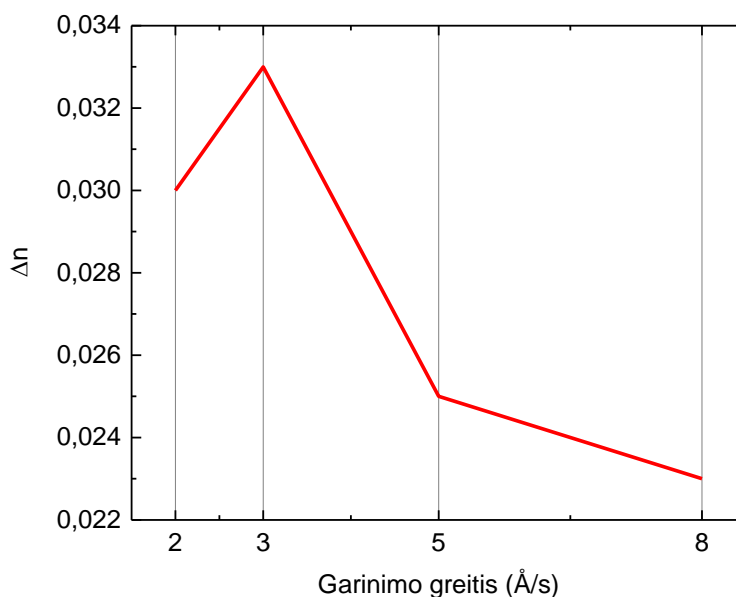


3.8 pav. Skirtingais greičiais užgarintų vienasluoksnių spektrai, išmatuoti praėjus 1 dienai nuo išėmimo iš vakuuminės kameros (a) s- ir (b) p-polarizuota šviesa.

Sluoksnių anizotropiškumas įvertintas lūžio rodiklių skirtumu (3.9 pav.). Tinkamiausi garinimo greičiai dideliame dvejetainiškumui gauti yra 2 Å/s ir 3 Å/s nors ir pastarasis turi nežymų tūkstantosios dalies pranašumą. 5 Å/s ir 8 Å/s dalelių nusėdimo greičiu paruoštų bandinių Δn yra mažesnis, dėl susidariusio panašaus sluoksnio tankumo greitą ir lėtą ašimis. Rastas geriausias anizotropiškumo rezultatas su eksperimentų pradžioje pasirinktu 3 Å/s garinimo greičiu, reikštų susidariusios kolonos dalies ilgio L priklausomybę nuo garinimo greičio. Tikėtina, kad garinant kitais greičiais, kol dar išlaikomas sluoksnio porėtumas, ir kitais padėklo išlaikymais, kurių metu susidaro maždaug 2 nm ilgio viena kolonos dalis, galima rasti panašų dvejetainiškumą.

Visose 8 vienasluoksnių dangose dvejetainiškumas yra didesnis, nei kristalinio kvarco, kurio $\Delta n = 0,009$ [26]. Kitų literatūroje randamų kampų užgarintų silicio dioksido dangų $\Delta n = 0,025$ padėklui esant 70° kampui, nors straipsnyje didžiausias dvejetainiškumas siekiantis 0,042 rastas padėklui esant 86° kampui, tačiau neužsiminta apie tokios dangos vientisumą [27]. Kitų oksidų

sluoksnių, sudarytų iš zigzaginės kolonos struktūros, dvejetainiškumas siekia 0,11 ZrO₂ ir 0,15 Ta₂O₅, užgarintų 70 ° kampu, ir 0,15 TiO₂, užgarinto 65 ° kampu [28].



3.9 pav. Lūžio rodiklių skirtumai ties 500 nm bangos ilgiu dvejomis kryptimis dangų, užgarintų skirtingais greičiais.

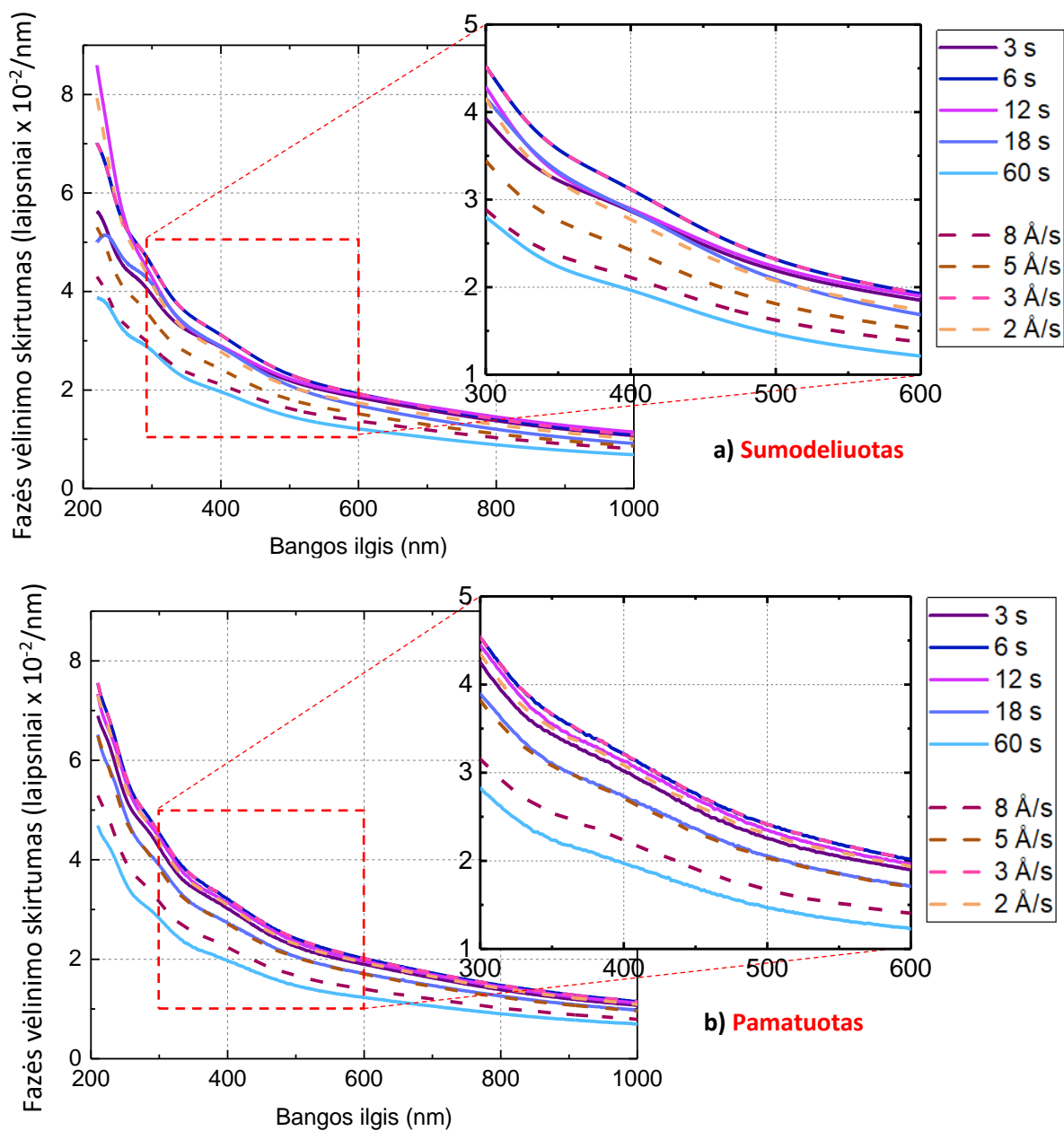
3.3. Fazės vėlinimas vienasluoksnėse dangose

Fazės vėlinimas buvo išmatuotas elipsometru ir taip pat sumodeliuotas iš spektrofotometrinių duomenų (3.10 pav. a ir b). Lyginant išmatuoto ir sumodeliuoto fazės vėlinimo skirtumus, matyti netikslumai „Optilayer“ programa sumodeliuotose fazėse. Skirtingų bandinių fazės vėlinimo skirtumai keliose vietose kerta kitus grafikus, kas reikštų sumodeliuotų lūžio rodiklių ar sluoksnių storių netikslumus.

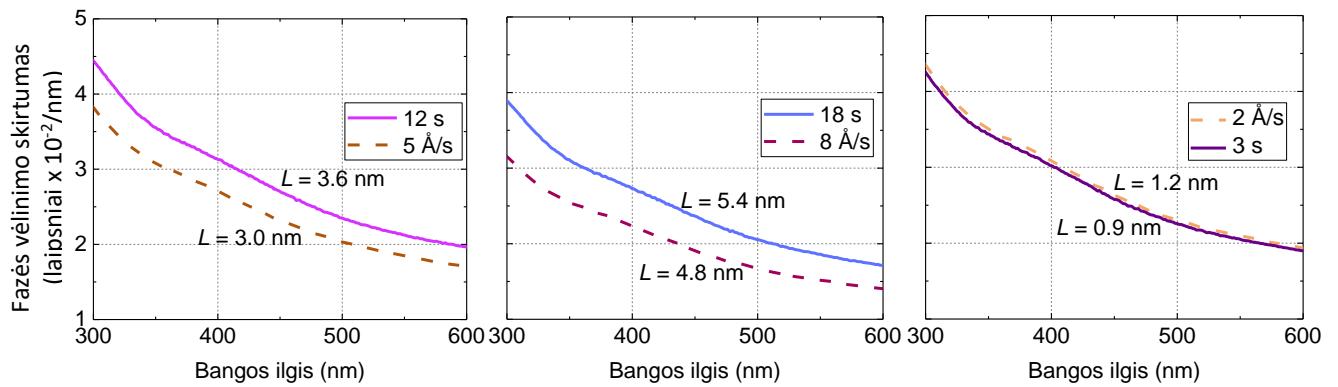
3.11 pav. palyginti skirtingų garinimo parametrų, bet panašaus susidariusios kolonos dalies ilgio L , fazės vėlinimo skirtumai išmatuoti elipsometru. Vieno sluoksnio, užgarinto 5 Å/s greičiu, ir kito sluoksnio, užgarinto su 12 s padėklo išlaikymu, turinčių atitinkamai $L = 3,0$ nm ir $L = 3,6$ nm, matyti, kad fazės vėlinimas mažesnis garinant didesniu greičiu, nei kad turint ilgesnį padėklo išlaikymą. Tas pats matoma ir lyginant 8 Å/s ir 18 s grafikus. Kitokie rezultatai tik tarp 2 Å/s greičiu ir 3 s išlaikymo kreivių, kurių metu atitinkamai susidarė 1,2 nm ir 0,9 nm kolonos ilgio dalis. Tikėtina, kad šie du fazės vėlinimai yra tokie artimi dėl labai mažo kolonos dalies ilgio skirtumo ir panašaus porėtumo.

Išdidintose zonose tarp 300 nm ir 600 nm (3.10 pav. a) aiškiau matyti, kad sumodeliuotas ir išmatuotas didžiausias fazės vėlinimas sluoksniui, užgarintam su 3 Å/s greičiu ir 6 s padėklo

išlaikymu, siekiantis 0,024 laipsnius/nm. Tai reikštų, kad 1.12 pav. pavaizduotas didėjantis Δn trumpėjant L , ne visai tiesa, nes didžiausias fazės vėlinimas, kai $L \sim 2$ nm.



3.10 pav. Fazės vėlinimo skirtumas apskaičiuotas iš (a) sumodeliuotų fazės vėlinimų „Optilayer“ programa ir (b) išmatuotų elipsometru.

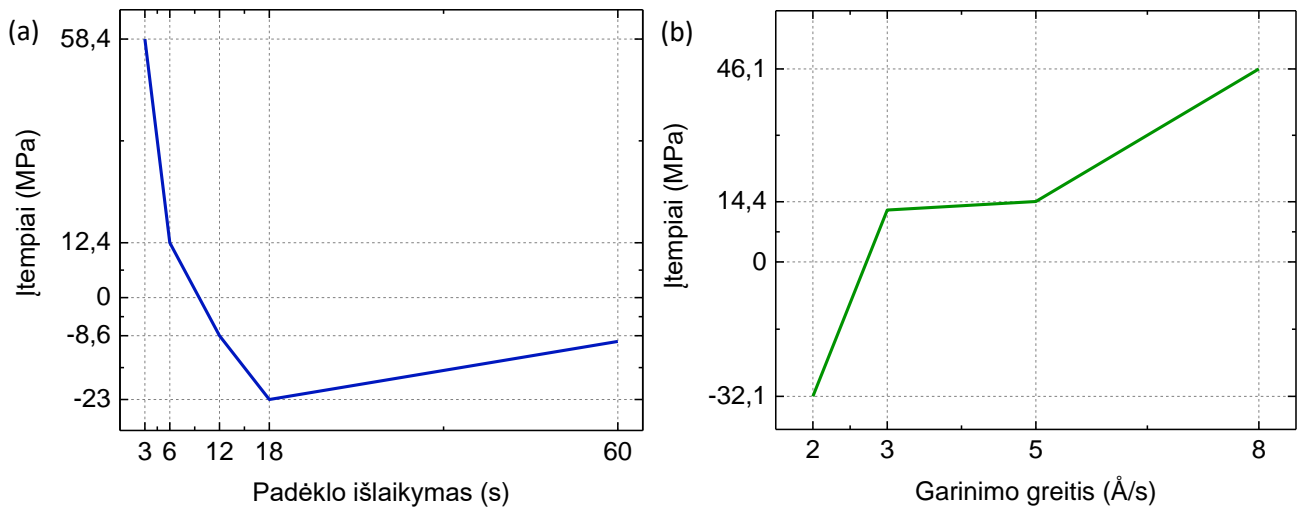


3.11 pav. Skirtingų garinimo parametrų metu susidariusių panašaus kolonos dalies ilgio L fazės vėlinimo skirtumo palyginimas iš elipsometru išmatuotų duomenų.

3.4. Vienasluoksnių dangų įtempiai

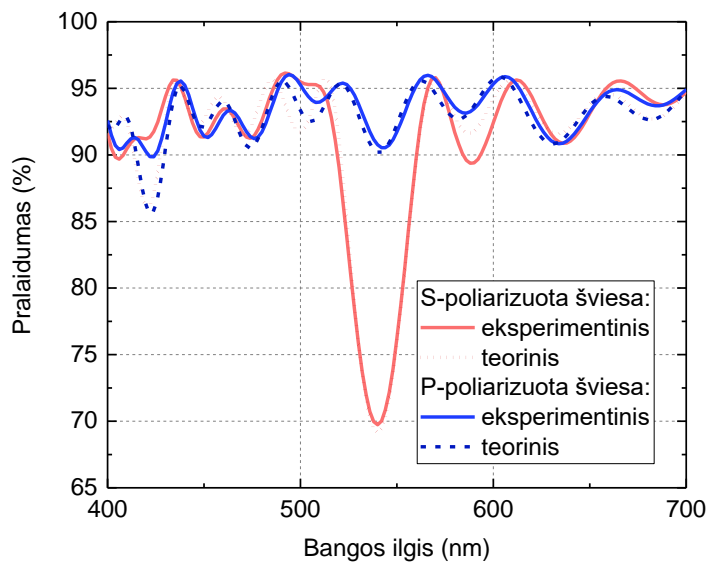
Interferometru pamatuotų bandinių įtempiai paskaičiuoti naudojantis Stoney formule (5) (3.12 pav.). Gniuždomieji įtempiai turi neigiamas vertes, o tempiamieji – teigiamas. Visi įtempiai yra pakankamai maži dėl porėtos sluoksnio morfologijos. Literatūroje randama, kad padėklui esant 70° kampui, įtempiai yra artimi nuliui, tuo tarpu nusodinant $0 - 60^\circ$ kampais, kurių metu susidaro tankesnės dangos, itempiai gniuždomieji, siekiantys 450 MPa [25]. Nusodinant didesniais padėklo pasvirimo kampais mažėja ne tik silicio dioksido dangos tankis, bet ir įtempiai.

Pastebėta, kad didėjant garų nusodinimo greičiui, įtempiai keičiasi iš gniuždomųjų į tempiamuosius, su mažiausiais įtempiais apskaičiuotiems dangoms, nusodintoms 3 \AA/s ir 5 \AA/s . Šiuo atveju tankesnė anizotropinė danga, užgarinta 8 \AA/s greičiu patiria didžiausius tempiamuosius įtempius. Retesnės dangos, užgarintos mažesniais greičiais, patiria mažesnius tempiamuosius įtempius, pereinančius į gniuždomuosius, mažėjant nusodinimo greičiui. Ilgėjant padėklo išlaikymo laikui tempiamieji įtempiai pereina į gniuždomuosius, o mažiausi įtempiai apskaičiuoti 6 s ir 12 s padėklo išlaikymų sluoksniams. $3 - 18 \text{ s}$ lūžio rodikliai labai panašūs, kas turėtų reikšti panašius sluoksnių tankius, todėl įtempių perėjimas iš tempiamųjų į gniuždomuosius galėtų priklausyti nuo ilgėjančios kolonos dalies ilgio L ir iš aplinkos adsorbuotų dujų bei vandens garų.



3.12 pav. Paskaičiuoti įtempiai a) skirtingu padėklo išlaikymo ir b) skirtingu greičiu užgarintų dangų.

3.5. Poliarizatorius



3.13 pav. Užgarinto poliarizatoriaus sumodeliuotas ir išmatuotas spektras s- ir p-polarizuotai šviesai.

Užgarinto poliarizatoriaus spektrofotometrinių matavimų pralaidumo grafikai palyginti 3.13 pav. 26 sluoksnių poliarizatorius, sudarytas iš 24 dvejetainių anizotropinių sluoksnių, iš dalies atskiria poliarizacijas ties 540 nm bangos ilgiu. S- ir p-polarizuotos šviesos pralaidumo kreivės išsiskiria tik 20 %, tačiau teoriškai įmanoma pasiekti apie 90 % išsiskyrimą didinant sluoksnių skaičių [15]. Eksperimentinio ir teorinio modelio kreivių nesutapimai yra dėl užgarintų ir sumodeliuotų sluoksnių storių ir lūžio rodiklių neatitikimų.

Pagrindiniai rezultatai ir išvados

1. Iš atliktų silicio dioksido vienasluoksnių anizotropinių dangų, užgarintų padėklui esant $\chi = 70^\circ$ kampų, lūžio rodiklių modeliavimų rasta nuo zigzaginės kolonos dalies ilgio priklausantis dvejetainis dvejopalauiškumas. Pastebėta, kad didžiausiu dvejetainiškumu pasižymi sluoksnis, turintis zigzagines kolonas, kurių vienos dalies ilgis yra apie 2 nm.
2. Šiuose eksperimentuose didžiausiu lūžio rodiklių išsiskyrimu $\Delta n = 0,033$ ties 500 nm bangos ilgiu, didžiausiu fazės užvėlinimu $\Delta = 0,024^\circ/\text{nm}$ ir nedideliu, 12,4 MPa tempiamuoju įtempiu pasižymėjo sluoksnis, užgarintas 3 Å/s greičiu su 6 s padėklo išlaikymu, kurio metu susidarė apie 1,8 nm ilgio viena kolonos dalis.
3. Nepriklausomai nuo tirtų garų nusodinimo parametrų, anizotropiniai silicio dioksido sluoksniai pasižymi mažais įtempiais, lyginant su izotropiniais sluoksniais. Didžiausi apskaičiuoti tempiamieji įtempiai yra 58,4 MPa, o gniuždomieji – 32,1 MPa.
4. Naudojant anizotropinius 66° , 70° ir izotropinį 0° sluoksnius suformuotas poliarizatorius 540 nm bangos ilgio šviesai, turintis 20 % pralaidumo išsiskyrimą tarp s- ir p-poliarizuota šviesa išmatuotų spektrų.

Literatūros sąrašas

- [1] L. Zhao, J. Cheng, M. Cheng, X. Yuan, W. Liao, Q. Liu, H. Yang, H. Wang, Formation mechanism of a smooth, defect-free surface of fused silica optics using rapid CO₂ laser polishing, *International Journal of Extreme Manufacturing*, **1**(3), 035001 (2019).
- [2] R. B. Tokas, S. Jena, P. Sarkar, S. Thakur, N. K. Sahoo, Glancing angle deposition of SiO₂ thin film microstructures: Investigations of optical and morphological properties, *AIP Conference Proceedings*, **1591**(1), 1045 (2014).
- [3] A. Lakhtakia, R. Messier, *Sculptured Thin Films. Nanoengineered Morphology and Optics* (SPIE press, Washington, 2005).
- [4] M. Hawkeye, M. J. Brett, M. Taschuk, *Glancing Angle Deposition of Thin Films* (Wiley, Chichester, 2014).
- [5] A. Bain, *Crystal Optics: Properties and Applications* (Wiley-VCH, Birmingham, 2019).
- [6] I. J. Hodgkinson, M. McCall, Q. H. Wu, *Birefringent Thin Films and Polarizing Elements*, 2nd ed. (Imperial College Press, London, 2015).
- [7] R. Boyd, *Nonlinear Optics*, 3rd ed. (Academic Press, London, 2008).
- [8] I. J. Hodgkinson, Q. H. Wu, M. J. Brett, K. Robbie, Vacuum deposition of biaxial films with surface-aligned principal axes and large birefringence Δn : *Optical Interference Coatings*, vol. 9 (Optical Society of America, Washington, 1998) pp. 104-106.
- [9] I. J. Hodgkinson, Q. H. Wu, Serial bideposition of anisotropic thin films with enhanced linear birefringence, *Applied Optics*, **38**(16), 3621-3625 (1999).
- [10] O. Stenzel, *Optical coatings*, vol. 54 (Springer, Jena, 2014).
- [11] S. P. Stagon, H. Huang, J. K. Baldwin, A. Misra, Anomaly of film porosity dependence on deposition rate, *Applied Physics Letters*, **100**(6), 061601 (2012).
- [12] S. H. Lim, H. K. Kim, Deposition rate effect on optical and electrical properties of thermally evaporated WO_{3-x}/Ag/WO_{3-x} multilayer electrode for transparent and flexible thin film heaters, *Scientific Reports*, **10**, 8357 (2020).
- [13] H. Kangarlou, M. Motallebi, Deposition-rate dependence of optical properties of titanium nanolayers, *Ukrainian Journal of Physical Optics*, **13**(1), 4-11 (2012).
- [14] I. J. Hodgkinson, Q. H. Wu, Birefringent thin-film polarizers for use at normal incidence and with planar technologies, *Applied Physics Letters*, **74**(13), 1794-1796 (1999).
- [15] L. Grineviciute, L. Ramalis, R. Buzelis, T. Tolenis, Highly resistant all-silica polarizing coatings for normal incidence applications, *Optics Letters*, **46**(4), 916-919 (2021).
- [16] J. Zhang, K. Hoshino, *Fundamentals of nano/microfabrication and scale effect: Molecular Sensors and Nanodevices*, 2nd ed. (Academic press, 2019) pp. 43-111.

- [17] L. Grinevičiūtė, M. Andrulevičius, A. Melninkaitis, R. Buzelis, A. Selskis, A. Lazauskas, T. Tolenis, Highly resistant zero-order waveplates based on all-silica multilayer coatings, *Physica Status Solidi A*, **214**(12), 1700764 (2017).
- [18] T. Amotchkina, M. Trubetskov, A. Tikhonravov, I. B. Angelov, V. Pervak, Reliable optical characterization of e-beam evaporated TiO₂ films deposited at different substrate temperatures, *Applied Optics*, **53**(4), A8 (2013).
- [19] D. Gonçalves, E. A. Irene, Fundamentals and applications of spectroscopic ellipsometry, *Química Nova*, **25**(5), 794–800 (2002).
- [20] M. Mazumder, R. Ahmed, M. Hasan, M. S. Lee, S. J. Lee, Spectroscopic ellipsometry of asphalt binder: study of optical constants at visible wavelength, *International Journal of Civil Engineering*, **18**(2), 251–259 (2020).
- [21] C. L. Tien, C. C. Lee, C. C. Jaing, The measurement of thin film stress using phase shifting interferometry, *Journal of Modern Optics*, **47**(5), 839–849 (2000).
- [22] P. Hlubina, D. Ciprian, J. Luňáček, Spectral interferometric technique to measure the relative phase change on reflection from a thin-film structure, *Applied Physics B*, **101**(4), 869–873 (2010).
- [23] V. Tkachenko, A. Marino, E. Otón, N. Bennis, J. Otón, Morphology of SiO₂ films as a key factor in alignment of liquid crystals with negative dielectric anisotropy, *Beilstein Journal of Nanotechnology*, **7**, 1743-1748 (2016).
- [24] S. Yang, Y. Zhang, Spectroscopic ellipsometry investigations of porous SiO₂ films prepared by glancing angle deposition, *Surface and Interface Analysis*, **45**(11-12), 1690–1694 (2013).
- [25] F. V. Grigoriev, V. B. Sulimov, A. V. Tikhonravov, Atomistic simulation of stresses in growing silicon dioxide films, *Coatings*, **10**(3), 220 (2020).
- [26] Crystran.co.uk., *Quartz Crystal (SiO₂) Optical Material*, [online] Available at: <<https://www.crystran.co.uk/optical-materials/quartz-crystal-sio2>> [Accessed 17 May 2021].
- [27] F.V. Grigoriev, V.B. Sulimov, A.V. Tikhonravov, Combined modeling of the optical anisotropy of porous thin films, *Coatings*, **10**(6), 517 (2020).
- [28] I. J. Hodgkinson, Q. H. Wu, Serial bideposition of anisotropic thin films with enhanced linear birefringence, *Applied Optics*, **38**(16), 3621 (1999).
- [29] N. Tajima, H. Murotani, S. Matsumoto, H. Honda, Stress control in optical thin films by sputtering and electron beam evaporation, *Applied Optics*, **56**(4), C131 (2016).

Santrauka

ANIZOTROPINIŲ PLONŲ SLUOKSNIŲ OPTINIŲ CHARAKTERISTIKŲ PRIKLAUSOMYBIŲ NUO GARINIMO PARAMETRŲ TYRIMAS

Gabija Petrauskaitė

Pasviruoju kampu užgarinti anizotropiniai ploni sluoksniai turi didesnę dvejetainiškumo vertę nei kristalilnės medžiagos. Tai atveria naujų galimybių gaminti efektyvius ir kokybiškus elementus optikai.

Šio darbo tikslas buvo ištirti silicio dioksido anizotropinių plonų sluoksnių lūžio rodiklio ir dvejetainiškumo priklausomybę nuo garinimo greičio ir padėklo išlaikymo. Tyrimo metu atlikti silicio dioksido anizotropinių sluoksnių lūžio rodiklių modeliavimai ir nustatyta dvejetainiškumo priklausomybė nuo garavimo greičio bei suformuotos skulptūrinės kolonos. Didesniu dvejetainiškumu pasižymėjo sluoksniai, turėję didelį porėtumą su kelių nanometrų ilgio zigzaginės kolonos dalimi. Iš atliktų matavimų nustatytas sluoksnio struktūros jautrumas garinant dideliais greičiais, kaip pavyzdžiui 8 Å/s. Didžiausias dvejetainiškumas bei fazės vėlinimas nustatytas silicio dioksido sluoksniui, garintam 3 Å/s su 6 s išlaikymu, kurio metu susiformavo 1,8 nm ilgio zigzaginės kolonos dalis. Sluoksnis taip pat pasižymėjo vienu iš mažiausių išmatuotų paviršiaus įtempių.

Pademonstruotas silicio dioksido anizotropinių plonų sluoksnių panaudojimas suformuojant daugiasluksnį poliarizatorių 540 nm bangos ilgiui.

Summary

INVESTIGATION OF THE DEPENDENCES OF THE OPTICAL CHARACTERISTICS OF ANISOTROPIC THIN FILMS ON EVAPORATION PARAMETERS

Gabija Petrauskaitė

Anisotropic thin films deposited using the glancing angle method have a larger birefringence than crystal materials. This property provides new possibilities in producing effective high quality optical elements.

The aim of these experiments was to examine refractive index and birefringence dependency on deposition rate and substrate hold time. During this research refractive indices of silicon dioxide anisotropic thin films were modelled and birefringence dependence on evaporation rate and zigzag column structure segment length was determined. Higher birefringence was found in highly porous layers with zigzag segment of only a few nanometres length. It was found that layer's structure is sensitive to high deposition rates, such as 8 Å/s. The best birefringence and phase delay was determined for layer deposited at 3 Å/s with 6 s substrate delay during the deposition which resulted in 1.8 nm length zigzag column segments. The layer also had one of the lowest surface stress values.

The use of anisotropic layers was demonstrated by making a multilayer polariser for 540 nm wavelength.