

VILNIAUS UNIVERSITETAS  
VALSTYBINIS MOKSLINIŲ TYRIMŲ INSTITUTAS  
FIZINIŲ IR TECHNOLOGIJOS MOKSLŲ CENTRAS

TOMAS TOLENIS

**NANO-SKULPTŪRINIŲ PLONŲ SLUOKSNIŲ  
MODELIAVIMAS, FORMAVIMAS IR  
CHARAKTERIZAVIMAS**

Daktaro disertacijos santrauka  
Technologijos mokslai, Medžiagų inžinerija (08T)

Vilnius, 2017

Disertacija rengta 2012–2016 metais Fizinių ir technologijos mokslų centro Optinių dangų laboratorijoje

**Mokslinis vadovas** – Dr. Ramutis Drazdys (Nacionalinis Fizinių ir technologijos mokslų centras, technologijos mokslai, medžiagų inžinerija - 08T).

Disertacija ginama Vilniaus universiteto Medžiagų inžinerijos mokslo krypties taryboje:

Pirmininkas - prof. habil. dr. Valdas Sirutkaitis (Vilniaus universitetas, technologijos mokslai, medžiagų inžinerija–08T).

Nariai:

dr. Mindaugas Andrulevičius (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, medžiagų inžinerija - 08T);

prof. dr. Mikas Vengris (Vilniaus universitetas, fiziniai mokslai, fizika - 02P);

prof. habil. dr. Arūnas Krotkus (Fizinių ir technologijos mokslų centras, technologijos mokslai, medžiagų inžinerija - 08T);

dr. Anna Krasilnikova Sytchkova (ENEA, Naujų technologijų, energijos ir tvaraus ekonomikos vystimosi nacionalinė agentūra, Italija, technologijos mokslai, medžiagų inžinerija - 08T).

Disertacija bus ginama viešame Medžiagų inžinerijos mokslo krypties tarybos posėdyje 2017 m. birželio mėn. 9 d. 10:00 val. Fizinių ir technologijos mokslų centro Fizikos instituto Didžiojoje auditorijoje

Adresas: Savanorių pr. 231, Vilnius, LT-02300, Lietuva

Disertacijos santrauka išsiuntinėta 2017 m. gegužės 9 d.

Disertaciją galima peržiūrėti Vilniaus universiteto, Fizinių ir technologijos mokslų centro bibliotekose ir VU interneto svetainėje adresu:

[www.vu.lt/lt/naujienos/ivykiu-kalendorius](http://www.vu.lt/lt/naujienos/ivykiu-kalendorius)

# Turinys

Santrumpų sąrašas	4
Įvadas	5
<b>1 Rezultatai</b>	<b>12</b>
1.1 Nematinės struktūros skulptūriniai ploni sluoksniai . . . . .	12
1.1.1 Pasvirusių kolonų struktūros ploni sluoksniai . . . . .	13
1.1.2 Serijinis dvipusis nusodinimas . . . . .	16
1.2 Helikoidinės nano-skulptūrinės dangos . . . . .	23
1.3 Tolygaus sluoksnio garinimas sukant padėklą . . . . .	31
<b>2 Pagrindiniai rezultatai ir išvados</b>	<b>36</b>

# Santrumpų sąrašas

Santrumpa	Frazė
AJM	Atominių Jėgų Mikroskopas
TSGS	Tolygaus Sluoksniu Garinimas Sukant
DSK	Dengimas Slystančiu Kampu
LIPS	Lazeriu-Indukuotos-Pažaidos-Slenkstis
LK	Lydytas Kvarcas
FGN	Fizinis Garų Nusodinimas
JŠ	Jonų Šaltinis
SDN	Serijinis Dvipusis Nusodinimas
SEM	Skenuojantis Elektronų Mikroskopas
SD	Skulptūrinė Danga
JD	Jonapluoštis dulkinimas

# Įvadas

21-ame amžiuje medžiagų nano-inžinerija tapo viena iš pagrindinių mokslo krypčių. Moksliniai tyrimai leido plonus sluoksnius pritaikyti energiją kaupiančiuose saulės elementuose [1], biosensoriuose [2, 3], skaidrinančiose dangose [4] ir kt. Vienas iš pirmųjų pranešimų apie šiandienos nano-inžineriją buvo Ričardo Feinmano pavadinimu “Plenty of Room at the Bottom” (“Daug vietos apačioje”) 1959 metais. Jis aptarė kaip medžiagų nano-inžinerija gali smarkiai padidinti technologinį potencialą vis labiau mažinant formuojamų struktūrų dydžius. Keičiant ir kontroliuojant vidinę struktūrą nanometrų lygmenyje gaunamos naujos medžiagos savybės. Metamedžiagų formavimui nano-inžinerijos būdu naudojami du pagrindiniai būdai: *top-down* (iš viršaus žemyn) metodas, kurio metu procesas arba priemonė formuoja mažų dydžių modelį arba funkcionalumą, ir *bottom-up* (iš apačios į viršų) metodas, kurio metu individualūs atomai arba molekulės yra išdėstomos į darinius su norima struktūra arba funkcionalumu [5]. Paskutinis gali būti naudojamas fizinio garų nusodinimo (FGN) technologijose. Nusodinamų dalelių kontroliavimas leidžia formuoti norimą plono sluoksnio vidinę struktūrą. Viena iš metamedžiagų klasių yra skulptūrinės dangos (SD), kurios tradiciškai garinamos FGN metodais.

Nano-skulptūrinės dangos yra nano-vielų struktūra, paprastai auginama fiziniu garų nusodinimu. Vielų polinkis ir formos yra kontroliuojamos augimo proceso metu [6]. Šių dangų formavimas atliekamas Dengimo Slystančio Kampo (DSK) metodu. Proceso metu garų sautas yra nukreipiamas link padėklo smailiu kampu. Vidinė dangos struktūra yra keičiama dėl šešė-

liavimosi efekto. Nano-struktūrinės medžiagos su anizotropinėmis ir viena kryptimi kintančiomis savybėmis gali būti formuojamos kontroliuojamoje aplinkoje. Keičiant kampą tarp padėklo ir garų srauto gaunamas platus formų spektras. Nano-skulptūrinės dangos, suformuotos DSK metodu, gali būti skirstomos į du tipus. Pirmasis apima dvimates struktūras (nematiniai ploni sluoksniai). Tyrėjai sugebėjo suformuoti koloninės [7], ševroninės [8], C [9] ir kitų formų 2D nano-struktūras [10]. Antrasis tipas apima trimates struktūras: spiralines [11, 12], kvadratinės, trikampės [13, 14] ir kito tipo.

Skirtingų plonų sluoksnių savybių kontroliavimas reikalingas įvairiems taikymams. Standartinėse dangose lūžio rodiklis, sugerties koeficientas ir fizinės savybės gali būti kontroliuojamos. Vidinės struktūros valdymas atveria naujas galimybes sudėtingesnėms dangoms. Fazinių plokštelių [15], apskritiminės poliarizacijos filtrų [16], biologinių sensorių [2], skaidrinančių dangų [17] ir kt. formavimo tyrimai buvo pademonstruoti naudojant skulptūrinės dangos ir DSK metodą.

Skulptūrinės dangos plačiausiai taikomos lazerinėse sistemose. Po lazerio išradimo 1960 metais [18], lazeriu indukuota pažaida skaidriuose dielektrikuose buvo pastebėta ir pradėta tirti [19]. Tolimesni tyrimai buvo atliekami tiek mokslininkų tiek inžinierių, kurie įsitikino optinių dangų ir jų atsparumu lazerinei spinduliotei optinėse sistemose svarbumu. Iki pat šios dienos, kasmetinė “Laser damage” (“Lazerinis pažeidimas”) konferencija vyksta Boulderyje, JAV, kur mokslininkai iš viso pasaulio dalinasi savo naujausių tyrimų rezultatais. Medžiagų nano-inžinerija turi didžiulę įtaką didinant dangų atsparumą lazerinei spinduliotei. Yra žinoma, kad porėtos struktūros turi didesnę optinį atsparumą [20], tačiau tik skaidrinančios dangos buvo suformuotos naudojant porėtus sluoksnius [21, 22].

Impulso erdvinio pasiskirstymo kokybė yra vienas iš pagrindinių parametrų pažangiose lazerinėse sistemose. Kiekvienas nelygus paviršius iškreipia impulso formą. Skulptūrinių dangų taikymai vis labiau orientuojasi į lazerines sistemas, todėl labai svarbu gerinti jų kokybę. Optinių sistemų

inžinieriai turėtų daugiau galimybių pasirenkant optinius elementus ir jų medžiagas, jeigu vidiniai dangų įtempiai ir jų įtaka būtų valdomi optiniuose komponentuose. Vidinių įtempių tyrimai užgarintose plonose dangose reikalingi DSK technologijos panaudojimui optinių dangų gamyboje. Nekontrolijuojant šių įtempimų, atsiranda rizika dangų skilimui arba lupimuisi.

Anizotropinių plonų sluoksnių formavimo technologija leidžia išplėsti ir užtikrinti užgarintų plonų sluoksnių pritaikymo galimybes optinėse sistemose. Nano-skulptūrinių plonų sluoksnių modeliavimas, eksperimentinių parametrų tyrimai ir charakterizavimas yra būtini sėkmingam pažangių metamedžiagų diegimui optinėse sistemose.

### **Darbo tikslas**

Ištirti skulptūrinių dangų optines ir struktūrines savybes bei išplėsti pritaikymų galimybes optimizuojant porėtų anizotropinių dangų formavimą slystančio kampo dengimo metodu.

### **Moksliniai darbo uždaviniai**

- Ištirti koloninės nano-struktūros plonų sluoksnių vidinių įtempių įtaką nuo skirtingų dengimo parametrų.
- Ištirti ir optimizuoti spiralinių skulptūrinių dangų formavimo parametrus apskritiminės poliarizacijos selektyvumui pasiekti.
- Pritaikyti dengimo slystančiu kampu metodą mažo lūžio rodiklio medžiagų formavimui ir padidinti porėtų dangų atsparumą lazerinei spinduliutei.
- Suformuoti ir ištirti daugiasluoksnes skulptūrines dangas, keičiant sluoksnių porėtumą dangos augimo metu.
- Pritaikyti dengimo slystančiu kampu metodą tolygiam biologinio bandinio su tekstūruotu paviršiumi apgarinimui.

## Mokslinis naujumas ir praktinė reikšmė

Kelių pastarųjų dešimtmečių bėgyje nano-skulptūrinės dangos buvo plačiai tyrinėjamos. Nepaisant šių tyrimų, tik nedaugelis praktinių taikymų yra realizuoti komercinėse įmonėse. Pagrindinis šio darbo tikslas yra ištyrėti skulptūrinių dangų savybes ir išplėsti jų taikymo galimybes. Detalūs tyrimai leistų išsamiau išvystyti metamedžiagų formavimo technologijose. Todėl sekantys teiginiai yra naudingi medžiagų inžinieriams ir tyrėjams:

- Pirmą kartą buvo stebimi  $\text{TiO}_2$  medžiagos nano-skulptūrinių dangų anizotropiniai vidiniai įtempimai. Atlikti proceso parametrų įtakos formuojamoms dangoms tyrimai leidžia dengti fazines plokšteles su minimaliais vidiniais įtempiais ir tinkamomis spektrinėmis savybėmis. Atlikti tyrimai gali būti panaudoti fazinių plokštelių formavimui ant mažų dydžių padėklų arba kristalų.
- Slystančio kampo dengimo technologija buvo suforuotos skaidrinančios dangos didelių galių lazerinėms sistemoms. Pirmą kartą išsamūs tyrimai buvo atlikti matuojant porėtų  $\text{SiO}_2$  plonų sluoksnių lazerinį atsparumą. Lyginant standartines ir iš SD suformuotas panašių spektrinių savybių skaidrinančias dangas, buvo pademonstruoti DSK metodo pranašumai.
- Šiame darbe pademonstruota nauja metodika aukšto atspindžio veidrodžiams formuoti. Ji paremta vien  $\text{SiO}_2$  medžiagos garinimu, keičiant augančios dangos porėtumą. Silicio oksido pagrindu suformuotos dangos lazerinės pažaidos slenkstis nanosekundiniame režime buvo išmatuotas tris kartus didesnis nei standartinio veidrodžio. Slenksčio vertė siekė  $11 \text{ J/cm}^2$  matuojant tiek 1-on-1 tiek S-on-1 metodu. Didesnis atsparumas lazerinei spinduliuotei ir  $\text{SiO}_2$  medžiaga paremtų veidrodžių formavimo paprastumas atvėrė galimybes naujos kartos komponentų, tinkamų didelės galios lazerinėms sistemoms, atsiradimui.
- Monarcho drugelio sparnas bioreplikos suformavimui buvo padengtas



nikeliu naudojant dvikampę tolygaus sluoksnio užgarinimo sukant technologiją. Bioreplika pasižymėjo struktūrinėmis spalvomis, kurios dėl pigmentų sugerties nebuvo matomos realiame sparne. Taigi, dvikampė TSGS technologija leidžia replikuoti, studijuoti ir panaudoti paslėptas biologinių paviršių morfologijas.

### **Ginamieji teiginiai**

- $\text{TiO}_2$  koloninės struktūros skulptūrinės dangos, užgarintos slystančiu kampu serijinio dvipusio nusodinimo metodu, pasižymi anizotropiniais vidiniais įtempiais po atkaitinimo.
- Skaidrinančios ir aukšto atspindžio dangos, suformuotos naudojant vien  $\text{SiO}_2$  medžiagą ir DSK metodą, pasižymi didesnėmis LIPS vertėmis nanosekundiniame režime lyginant su dangomis, suformuotomis JD technologija.
- Nikelio medžiagos garinimas dviejų-kampų-TSGS metodika leidžia replikuoti, studijuoti ir išnaudoti paslėptas biologinių bandinių morfologijas.

### **Aprobacija**

*ISI mokslinės publikacijos tiesiogiai susijusios su tezėmis:*

1. **T.Tolenis**, L. Grinevičiūtė, L. Mažulė ir kt., “Low-stress phase plates produced by serial bideposition of  $\text{TiO}_2$  thin films,” JNP, **10**(3), 2016.
2. **T.Tolenis**, L. Grinevičiūtė, R. Buzelis ir kt., “Sculptured anti-reflection coatings for high power lasers,” Optical Materials Express, **7**(4), 2017.
3. **T. Tolenis**, S.E. Swiontek, A. Lakhtakia, “Structural colors of nickel bioreplicas of butterfly wings,” Journal of Modern Optics, **64**(8), 2016.

*Kitos mokslinės publikacijos:*

1. **T. Tolenis** ir A. Melninkaitis “Interferencinė danga arba jos dalis iš sluoksnių pasižyminčių skirtingu porėtumu”, priduta į Lietuvos Respublikos Valstybinį Patentų Biurą.

2. **T. Tolenis**, L. Grinevičiūtė, R. Buzelis ir kt., “Glancing angle deposition for production of optical components in UV region”, SPIE proc., Nanostructured Thin Films IX, **9929**, 2016.
3. **T. Tolenis**, S.E. Swiontek, A. Lakhtakia, R. Drazdys, “Tungsten-oxide thin films of dense, columnar, and chiral morphologies,” SPIE proc., Nanostructured Thin Films VII, **9172**, 2014.
4. A. Balčytis, **T. Tolenis**, X. Wang, ir kt., “Percolation threshold gold films on columnar coatings: characterization for SERS applications”, Asian Journal of Physics, **25**(7), 2016.
5. K. Juškevičius, M. Audronis, A. Subačius, S. Kičas, **T. Tolenis** ir kt., “Fabrication of Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/SiO<sub>2</sub> mixed oxides by reactive magnetron co-sputtering,” Thin Solid Films, **589**, 2015.

*Mokslinės konferencijos:*

1. **T. Tolenis**, G. Batavičiūtė, R. Drazdys ir kt., “Complex optical and structural characterization of nano-sculptured Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> columnar films,” Optical Interference Coatings, Whistler, Kanada, 2013.
2. **T. Tolenis**, R. Drazdys, A. Selskis, “Anizotropinių optinių dangų formavimas garinant elektronų pluoštu,” LNFK, Vilnius, Lietuva, 2013.
3. **T. Tolenis**, R. Drazdys, R. Juškėnas, “Investigation of TiO<sub>2</sub> and Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> materials produced by Ion-Assisted PVD,” Physics of Ionized and Ion-Assisted PVD, Drezdenas, Vokietija, 2013.
4. **T. Tolenis**, S. E. Swiontek, A. Lakhtakia and R. Drazdys, “Sculptured thin films of tungsten oxide,” SPIE Optics and Photonics, San Diegas, JAV, 2014.
5. **T. Tolenis**, R. Drazdys, “Anizotropinės optinės dangos pasižyminčios fazės vėlinimu UV srityje,” LNFK, Vilnius, Lietuva, 2015.

6. **T. Tolenis**, L. Grinevičiūtė, R. Buzelis, R. Drazdys, “Optical Elements for UV Applications Produced by Serial Bi-Deposition,” Optical Interference Coatings, Tucson, JAV, 2016.
7. R. Drazdys, L. Staisiūnas, K. Leinartas, R. Buzelis, **T. Tolenis** etc., “Optical properties of HfO<sub>2</sub> thin films grown by Atomic Layer Deposition,” Optical Interference Coatings, Tucson, JAV, 2016.
8. **T. Tolenis**, L. Grinevičiūtė, M. Andrulevičius ir kt., “Glancing angle deposition for production of optical components in UV region,” SPIE Optics and Photonics, San Diego, JAV, 2016.

#### *Autoriaus atlikti darbai*

Autorius išvystė ir sėkmingai taikė visas eksperimentines procedūras nano-skulptūrinių dangų formavimui, matavimams ir charakterizavimui. Jis taip pat surinko ir programavo žingsninių variklių sistemą, kuri leido kontroliuoti padėklus nano-skulptūrinių plonų sluoksnių garinimo metu. Visi TiO<sub>2</sub>, Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CuI, WO<sub>3</sub>, Ni ir dalis SiO<sub>2</sub> eksperimentinių garinimų taip pat buvo atlikta autoriaus. Jis taip pat atliko spektrofotometrinius ir elipsometrinius nano-skulptūrinių dangų matavimus ir analizę.

#### *Kitų atlikti darbai*

Dr. Andrius Melninkaitis pasiūlė idėją suformuoti aukšto atspindžio veidrodžius manipuluojant SiO<sub>2</sub> medžiagos lūžio rodikliu. Jis taip pat atliko visus sertifikuotus LIPS matavimus

Dr. Algirdas Selskis atliko daugumą tezėse rodomų nano-skulptūrinių plonų sluoksnių SEM matavimų.

Lina Grinevičiūtė atliko daugumą tezėse demonstruojamų anksčiau paminėtų SiO<sub>2</sub> medžiagos eksperimentinių garinimų ir koloninių nano-skulptūrinių plonų sluoksnių charakterizavimų.

# Skyrius 1

## Rezultatai

Tezių rezultatai pateikti sekančiai: 1.1 Skyriuje aprašyti elementarių struktūrų (koloninių ir zigzaginių) morfologijos tyrimai; 1.2 Skyriuje yra aparti ir išanalizuoti spiralinių struktūrų ploni sluoksniai, taip pat pademonstruoti galimi jų taikymai; 1.3 Skyriuje aptariamas dengimo slystančiu kampu taikymas neplokščių biologinių paviršių apgarinimui.

### 1.1 Nematinės struktūros skulptūriniai ploni sluoksniai

Koloninės struktūros pasižymi paprasčiausia nematinių skulptūrinių plonų sluoksnių morfologija. Patraukliausia tokių sluoksnių savybė yra suformuotas dvigubas lūžio rodiklis. Lūžio rodiklių skirtumas dviems statmenoms poliarizacijoms padėklo plokštumoje leidžia kontroliuoti krintančios poliarizuotos šviesos fazę. Pagrindinis ir labiausiai ištirtas tokių struktūrų taikymas yra fazinių plokštelių formavimas.

Pastarųjų kelių dešimtmečių bėgyje buvo pagamintos ir ištirtos įvairios fazinės plokštelės. Keli pagrindiniai privalumai stebimi lyginant jas su standartinių plokštelių formavimo metodais:

- Galimybė anizotropiniais sluoksniais tolygiai padengti įvairius paviršius (stiklas, kristalai, plastikas etc.);
- Galimybė formuoti didelių gabaritų fazines plokšteles;

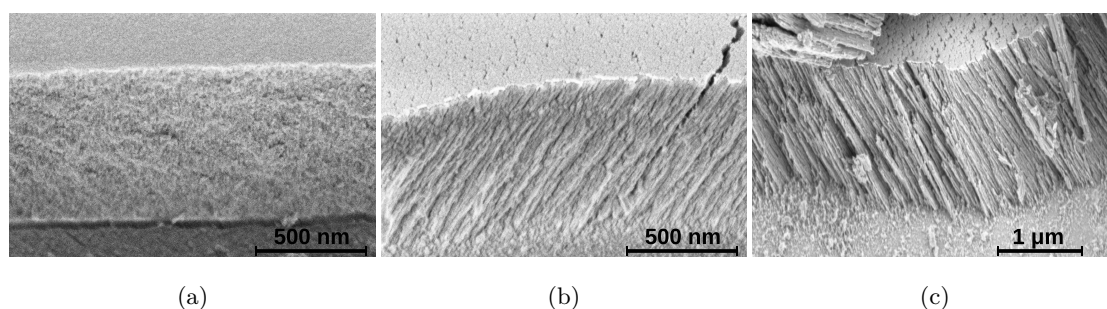
- Galimybė padengti platų spektrinį ruožą dėl šešėliavimosi efekto buvimo visoms medžiagoms, kurios gali būti garinamos;
- etc.

Detalūs dvigubo lūžio rodiklio koloninės struktūros plonų sluoksnių tyrimai gali prisidėti prie pažangių optinių komponentų atsiradimo. Skulptūrinių dangų pagrindu suformuotų fazinių plokštelių parametrų gerinimas duotų tiesioginę įtaką kuriant kompaktiškas ir novatoriškas lazerines sistemas.

### 1.1.1 Pasvirusių kolonų struktūros ploni sluoksniai

Lūžio rodiklių didesnis išsiskyrimas stebimas eksperimentiniuose rezultatuose, kuriuose naudojamos didesnio lūžio rodiklio medžiagos [23]. Taigi, pasvirusių kolonų ploni sluoksniai padengti naudojant skaidrias ir didelį lūžio rodiklį turinčias medžiagas,  $Ta_2O_5$  ir  $TiO_2$ . Oksidų dengimui buvo naudojamas elektronpluoščio garinimo įrenginys VERA1100 (Vokietija). Lydyto kvarco (LK) stiklai buvo naudojami kaip padėklai. Jie buvo tvirtinami prie žingsninių variklių ir įdėti į vakuuminę kamerą. Abiejų oksidų eksperimentinių bandinių serijos buvo formuojamos keičiant dengimo kampą  $\chi_v$ . Buvo naudojami šie dengimo kampai:  $0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $75^\circ$  ir  $85^\circ$ . Garinimo metu padėklai buvo laikomi stacionariai. Plono sluoksnio augimo greitis buvo lygus  $3 \text{ \AA/s}$ , kontroliuojant kvarciniu kristalu. Slėgis kameroje buvo palaikomas  $3 \times 10^{-5}$  mbar ir papildomai buvo leidžiamos deguonies dujos garinamų medžiagų oksidacijos užtikrimui.  $Ta_2O_5$  ir  $TiO_2$  garinimo metu buvo leidžiama 2 sccm ir 10 sccm deguonies fonas, atitinkamai. Taip pat buvo atliktas papildomas eksperimentas naudojant  $TiO_2$  medžiagą, dėl jos didesnio lūžio rodiklio nei  $Ta_2O_5$ . Šio eksperimento metu buvo lyginama pasvirusių kolonų ir zigzaginės struktūros savybės. Pastarosios formavimo metu, padėklas buvo laikomas  $75^\circ$  kampu ir sukinėjamas aplink savo ašį  $180^\circ$  kas 15 sekundžių, naudojant serijinio dvipusio nusodinimo metodą [23].

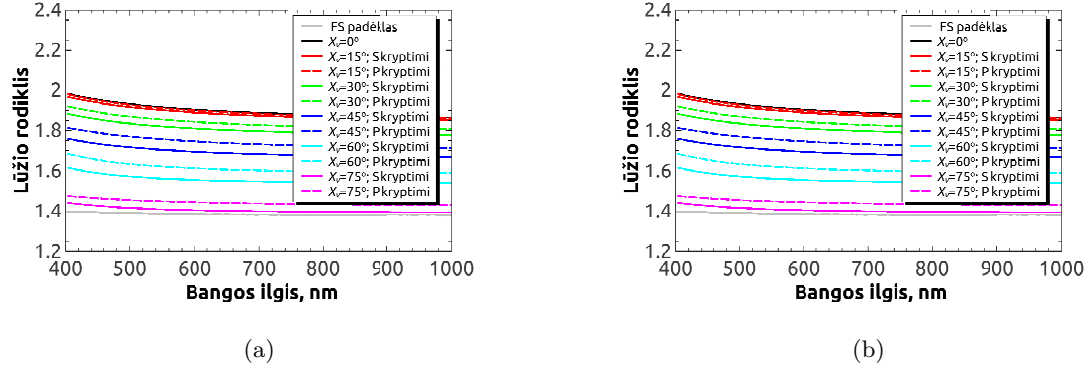
SEM analizė, pavaizduota Pav.1.1, buvo atlikta vidinės izotropinių ir anizotropinių sluoksnių struktūros tyrimams. Izotropinis  $Ta_2O_5$  sluoksnis, užgarintas  $0^\circ$  kampu, turi tankią struktūrą, nepasižyminčią jokiais išskirtiniais požymiais. Garinant tantalio oksidą  $60^\circ$  kampu, stebima koloninė struktūra. Garinant mažos energijos dalelėmis ir didesniu nei  $40^\circ$  kampu, vienas iš dominuojančių reiškinių yra šešėliavimosi efektas [24, 25]. Pasvirusios kolonos pasižymi mažesniais nei 20 nm pločių storiais, kurie yra gerokai mažesni nei regimosios šviesos bangos ilgis.  $TiO_2$  koloninė struktūra, gauta garinant  $75^\circ$  kampu, pavaizduota Pav. 1.1(c). Kolonų storiai varijuoja tarp 20 nm ir 50 nm. Abiejų medžiagų morfologinės struktūros dydžiai yra apie dešimt kartų mažesni nei regimosios šviesos bangos ilgis. Taigi, optiniai nuostoliai dėl šviesos sklaidos neturėtų pasireikšti.



1.1 pav.:  $Ta_2O_5$  plono sluoksnio, užgarinto (a)  $0^\circ$ , (b)  $60^\circ$  kampu ir (c)  $TiO_2$  plono sluoksnio, užgarinto  $70^\circ$  kampu, skerspjūvių SEM vaizdai.

Optinė bandinių analizė buvo atlikta naudojantis spektrofotometriniais pralaidumo matavimais ir modeliuojant lūžio rodiklius su “OptiLayer” programa. Pralaidumo matavimai buvo atlikti dviem statmenoms poliarizacijoms, S ir P. Ploniems sluoksniams, užgarintiems  $0^\circ$  kampu, pralaidumo matavimai skirtingoms poliarizacijoms nesiskyrė vienas nuo kito. Taigi, lūžio rodikliai grafikuose Pav. 1.2(a) ir (b) pavaizduoti tik vienai poliarizacijai. Dvigubas lūžio rodiklis dviem statmenoms poliarizacijoms buvo stebimas plonuose sluoksniuose, užgarintuose didesniais kampais (nuo  $15^\circ$  iki  $85^\circ$ ). Kaip pavaizduota Pav. 1.2(a), didžiausias skirtumas tarp  $Ta_2O_5$  lūžio rodiklių yra garinant  $60^\circ$  kampu. Šešėliavimosi efektas yra optimalus

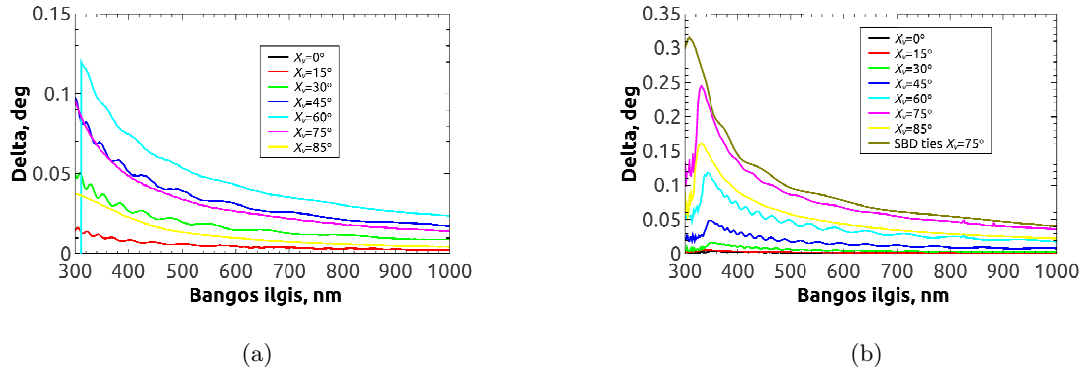
naudojant šį kampą. Panašūs rezultatai buvo stebimi ir kitų mokslinių grupių [25, 26, 27]. Lūžio rodiklių skirtumas, garinant  $60^\circ$  kampu, buvo 0.005 dviems statmenoms poliarizacijoms esant 532 nm bangos ilgiui. Didžiausias  $\text{TiO}_2$  koloninės struktūros plonų sluoksnių lūžio rodiklių skirtumas buvo sumodeliuotas sluoksniui, užgarintam  $75^\circ$  kampu. Skirtumas siekė 0.06 ir yra dešimčia kartų didesnis nei tantalo oksido sluoksniu.



1.2 pav.: (a)  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  ir (b)  $\text{TiO}_2$  koloninės struktūros plonų sluoksnių sumodeliuoti lūžio rodikliai S ir P poliarizacijoms.

Titano ir tantalo oksidų koloninės struktūros plonų sluoksnių fazės vėlinimo verčių nustatymui buvo naudojami elipsometriniai matavimai. Šie matavimai, pavaizduoti Pav. 1.3, nurodo fazės vėlinimo priklausomybę nuo garinimo kampo. Didžiausias fazės vėlinimas užfiksuotas dangoje, užgarintoje  $60^\circ$  kampu. Tai patvirtina ankstesnius spektrinius matavimus. Pusės apsisukimo fazinės plokštelės, tinkamos 532 nm bangos ilgiui, gamybai reikėtų  $3.6 \mu\text{m}$  storio plono sluoksniu su kolonine struktūra.  $\text{TiO}_2$  koloninės struktūros optimalus garinimo kampas buvo nustatytas  $75^\circ$ . Panašūs rezultatai buvo stebimi ir kitų mokslinių grupių [28, 29]. Šiame tyrime,  $0.08^\circ$  fazės vėlinimo vertė, esant vieno nanometro fiziniam sluoksniu storiui, pasiekama garinant  $75^\circ$  kampu. Papildomo bandinio, užgarinto SDN būdu, delta vertė dar didesnė. 532 nm bangos ilgiui, fazės vėlinimo vertė padidėjo iki  $0.09^\circ$ . Ši vertė yra du kartus didesnė nei didžiausias vėlinimas, pasiektas su  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  medžiaga. Tai leidžia formuoti fazines plokšteles naudojant du

kartus mažiau medžiagos tomis pačiomis garinimo sąlygomis.



1.3 pav.: (a)  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  ir (b)  $\text{TiO}_2$  medžiagos plonų sluoksnių, suformuotų DSK metodu skirtingais kampais, fazės vėlinimo dispersijos sunormuotos į vieną nanometrą.

Koloninės struktūros ploni sluoksniai buvo suformuoti kampu garinant aukšto lūžio rodiklio medžiagas:  $\text{TiO}_2$  ir  $\text{Ta}_2\text{O}_5$ . Fazės vėlinimo matavimai pralaidume nurodo, kad garinant  $70^\circ$  kampu, pasiekiami optimali anizotropija, kuri gali būti dar labiau padidinta formuojant zigzaginę struktūrą.

### 1.1.2 Serijinis dvipusis nusodinimas

Ankstesnio skyriaus rezultatai rodo serijinio dvipusio nusodinimo metodikos [23] pranašumą formuojant plonus sluoksnius su dvigubu lūžio rodikliu. Taigi, detalesni tyrimai buvo atlikti naudojant medžiagas, pralaidžias regimajame spektriniuose diapazonuose.

$\text{TiO}_2$  medžiaga turi didžiausią lūžio rodiklį regimajame diapazone. Todėl titano oksido anizotropiniai ploni sluoksniai, suformuoti naudojant SDN metodą, buvo toliau detaliam tyrimui. Elektronpluoščio garinimo įrenginys VERA1100 (VTD, Vokietija) buvo panaudotas nano-koloninės struktūros plonų sluoksnių formavimui.  $\text{TiO}_2$  medžiaga (Umicore, Belgija) buvo patalpinta į varini tiglį ir garinta naudojant sufokusuotą elektronų pluoštą. Garinimo greitis buvo palaikomas  $3 \text{ \AA/s}$  ir kontroliuojamas kvarciniu rezonatoriumi. Dangos buvo formuojamos ant lydyto kavarco ir silicio padėklų.

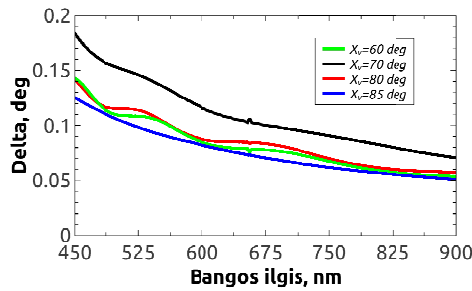


Atstumas tarp padėklų ir garinimo šaltinio buvo 30 cm. Serijinio dvipusio nusodinimo metu  $180^\circ$  apsisukimai aplink padėklo ašį buvo atliekami kas penkias sekundes.

Šeši eksperimentiniai bandiniai buvo suformuoti keičiant garinimo kampą  $\chi_v$  sekančiomis vertėmis:  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $70^\circ$ ,  $80^\circ$  ir  $85^\circ$ . Į kamerą buvo leidžiama deguonies dujų titano oksidacijai užtikrinti. Šiam tikslui pasiekti, kiekvieno eksperimento metu kamera būdavo atsiurbta iki  $1.5 \times 10^{-5}$  mbar ir leidžiamo deguonies kiekis būdavo kontroliuojamas taip, kad slėgis kameroje būdavo palaikomas  $4.0 \times 10^{-5}$  mbar. Bandiniai po nusodinimo proceso buvo atkaitinami aukštoje temperatūroje. Tokiu būdu buvo tiriami dangų parametrai medžiagai keičiant būseną iš amorfinės į kristalinę. Titano oksido atkaitinimas didesnėje temperatūroje nei  $500^\circ\text{C}$  yra pakankamas šiam medžiagos pokyčiui stebėti [30]. Taigi, visi eksperimentiniai bandiniai buvo atkaitinami  $600^\circ\text{C}$  temperatūroje dviems valandoms ir stebima kristalizacijos įtaka optinėms ir mechaninėms charakteristikoms.

Sėkmingam fazinių plokštelių formavimui, plonas sluoksnis turi pasižymėti fazės vėlinimu. Keturi bandiniai buvo atrinkti šiam tikslui po elipsometrinių visų bandinių matavimų. Jie pasižymėjo didelėmis delta vertėmis matuojamame spektre (Pav. 1.4). Nano-skulptūrinis plonas sluoksnis, užgarintas  $70^\circ$  kampu, pasižymėjo didžiausiu fazės vėlinimu ( $0.144^\circ$ ) vienam nanometrui 532 nm bangos ilgiui. Vertė yra didesnė nei bandinio, aprašyto Skyriuje 1.1.1, suformuoto SDN metodika. Tokio padidėjimo priežastis gali būti spartesnis sukinėjimas aplink padėklo ašį, kurio metu formuojamas didesnis skirtumas tarp lūžio rodiklių [23]. Bandiniai, užgarinti  $60^\circ$ ,  $80^\circ$  ir  $85^\circ$  laipsnių kampu pasižymėjo mažesnėmis vertėmis, lygiomis 0.108, 0.112 ir 0.096, atitinkamai. Rezultatai atitinka ankstesnius tyrimus, atliktus kitų mokslinių grupių [23].

Plonų sluoksnių pralaidumas turi būti kuo didesnis. Spektrofotometriniai užgarintų bandinių pralaidumo matavimai buvo atlikti prieš ir po atkaitinimo  $600^\circ\text{C}$  temperatūroje. Rezultatai pavaizduoti Pav. 1.5.



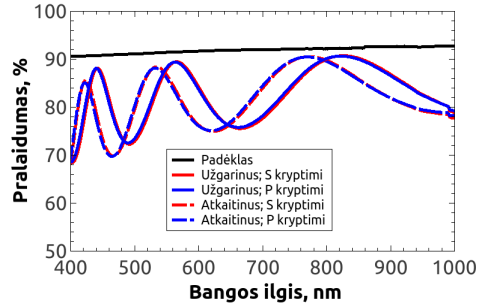
1.4 pav.: TiO<sub>2</sub> skulptūrinių plonų sluoksnių, užgarintų 60°, 70°, 80° ir 85° kampu fazės vėlinimo dispersijos sunormuotos į vieną nanometrą.

Izotropinio TiO<sub>2</sub> plono sluoksnio pralaidumas pavaizduotas Pav. 1.5(a). Ryškus interferencijos vaizdas matomas dėl didelio medžiagos lūžio rodiklio. Ši interferencija ženkliai sumažėja garinant medžiagą didesniu nei 30° kampu. Šešėliavimosi plokštumoje plono sluoksnio lūžio rodikliai sumažėja nuo 2.08 iki 1.99, kaip pavaizduota Pav. 1.6(a), kai garinimo kampas keičiamas nuo 0° į 30°, atitinkamai. Garinant 80° kampu, lūžio rodiklis yra artimas padėklo ir lygus 1.52. Interferencija garinant šiuo kampu yra minimali ir nekinta daugiau nei 5% spektriniame ruože nuo 500 nm iki 1000 nm. Toliau didinant kampą, iki 85°, padėklo–dangos bendras pralaidumas dar labiau padidėja dėl dar mažesnio sluoksnio lūžio rodiklio.

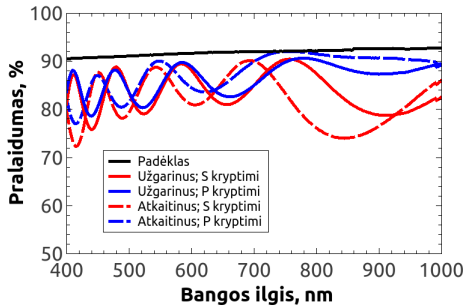
Atkaitinimas ore 600 °C temperatūroje įtakojo visų šešių bandinių pralaidumą. Kaip matome iš grafikų paveiksle 1.6, lūžio rodikliai, garinant kampais nuo 0° iki 60°, po atkaitinimo nepakito. Skirtumai tarp lūžio rodiklių padidėjo garinant 70° ir 80° kampais. Pralaidumo pokyčiai galėjo būti sąlygoti nuostolių padidėjimo. Tankiausio plono sluoksnio, užgarinto 0° kampu, pralaidumas sumažėjo 5% spektriniame ruože nuo 500 nm iki 600 nm. Tuo pačiu metu, spektras pasislinko apie 3% į trumpesnių bangų pusę. Šio pokyčio priežastis gali būti sluoksnio kristalizacija, kuri vyksta titano oksidą kaitinant 500 °C temperatūroje [30]. Dėl kintančios kristalinių orientacijos ir padidėjusio paviršiaus šiurkštumo kristalinė medžiaga sklaido krintančią spinduliuotę. Atkaitintų bandinių sklaida gali būti viena iš



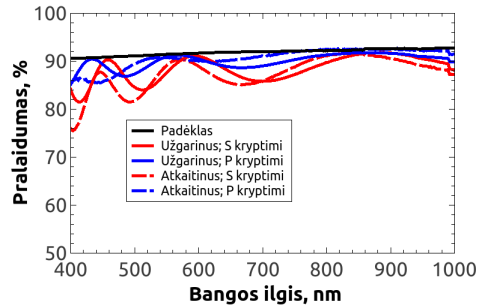
(a)  $\chi_v=0^\circ$



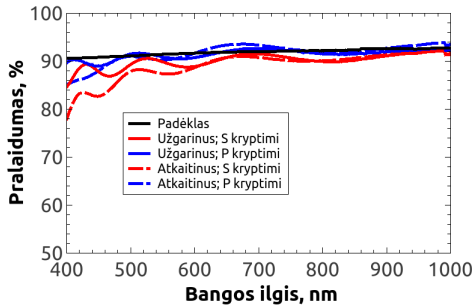
(b)  $\chi_v=30^\circ$



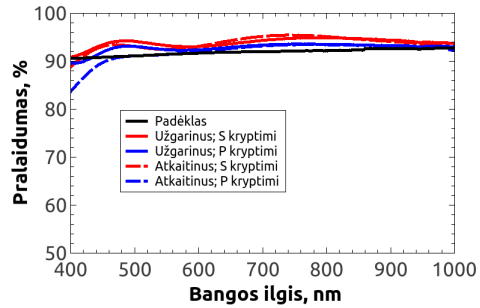
(c)  $\chi_v=60^\circ$



(d)  $\chi_v=70^\circ$

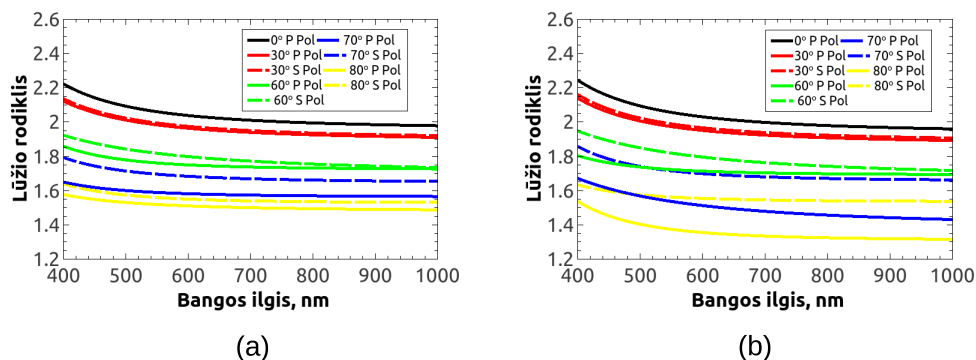


(e)  $\chi_v=80^\circ$



(f)  $\chi_v=85^\circ$

1.5 pav.: Bandinių, užgarintų skirtingais kampais, pralaidumo matavimai. Ištisine juoda linija pavaizduoti padėklo pralaidumai, ištisine raudona ir mėlyna linijos vaizduoja užgarintų bandinių matavimus S ir P poliarizacijomis, atitinkamai. Brūkšniuota raudona ir mėlyna linijos vaizduoja atkaitintų bandinių pralaidumą S ir P poliarizacijomis, atitinkamai.

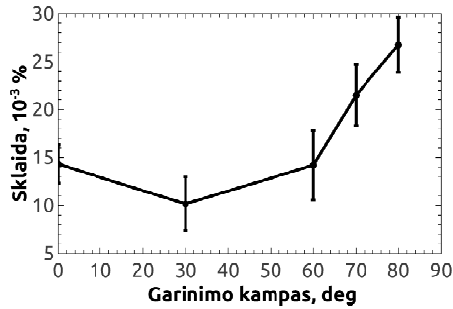


1.6 pav.: (a) Užgarintų ir (b) atkaitintų TiO<sub>2</sub> nano-struktūrinių plonų sluoksnių sumodeliuoti lūžio rodikliai.

sumažėjusio pralaidumo priežasčių. Garinant didėjančiais kampais (60°, 70°, 80° ir 85°) atkaitinimo įtaka mažėja, bet ji vis dar didesnė plokštumoje, statmenoje šešėliavimuisi. Šešėliavimosi kryptimi danga yra porėtesnė, todėl užgarintos medžiagos kristalizacija mažiau įtakoja jos optines savybes. Analizuojant pralaidumo matavimus, išsiskiria du kandidatai fazinių plokštelių formavimui: anizotropiniai ploni sluoksniai, užgarinti 80° ir 85° kampais. Jų pralaidumas yra lygus (91%) ar net didesnis (93%) už nedengto padėklo pralaidumą esant 532 nm bangos ilgiui. Šių bandinių pralaidumo vertės po atkaitinimo 600 °C temperatūroje mažai keičiasi.

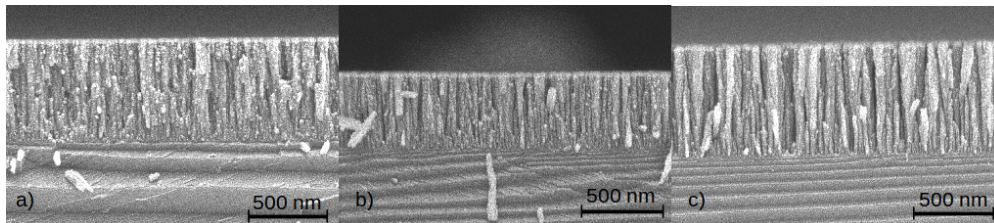
Prieš atkaitinimą, visuminė integruota sklaida buvo pamatuota visiems eksperimentiniams bandiniams. Pav. 1.7 pavaizduotas šio parametro kitimas nuo garinimo kampo. Šis kitimas buvo įtakotas dangų porėtumo ir paviršiaus šiurkštumo, būdingo garinant smaliu kampu. Nepaisant to, visų bandinių sklaida nebuvo didesnė, nei 0.03%.

Bandinių, užgarintų 60°, 70° ir 80° kampais, struktūros analizė buvo atlikta nagrinėjant SEM matavimų nuotraukas, pavaizduotas 1.8 paveiksle. Lyginant perlaužtų bandinių vaizdus paveiksluose nuo 1.8(a) iki 1.8(c), matomas nano-struktūros didėjantis porėtumas. Garinant 60° kampu, vidutinis kolonų plotis siekia 23 nm, garinant 70° ir 80° kampais pločiai didėja iki 31 nm ir 59 nm, atitinkamai. Paveiksle 1.8(c) stebimas kolonų platėjimas



1.7 pav.: Išmatuota visuminė integruota sklaida dangose, užgarintose skirtingais kampais.

nuo 23 nm arti padėklo iki 84 nm arti sluoksnio paviršiaus. Šis didėjimas galimai yra dėl kolonų tarpusavio varžymosi augimo metu [31]. Kolonų pločio didėjimas didinant garinimo kampą atsiranda dėl ryškėjančio šešėliavimosi efekto [32]. Kolonos ploname sluoksnyje, užgarintame  $60^\circ$  kampu, yra arti viena kitos, todėl sluoksnis yra santykinai tankus. Garinimo kampo didinimas iki  $80^\circ$  įtakoja kolonų augimą labiau jas atskiriant tuštumomis. Dėl plėtimosi reiškinio kolonos augimo pradžioje yra siauros ir po 50 nm storio pradeda plėstis.

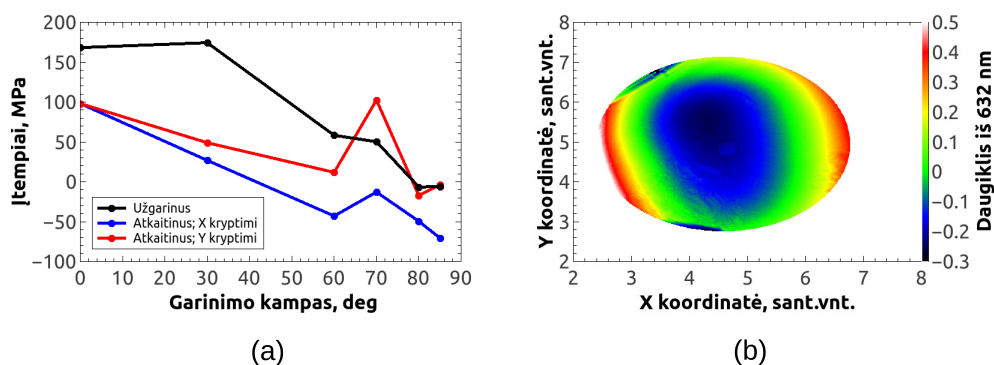


1.8 pav.:  $\text{TiO}_2$  nano-struktūrinių plonų sluoksnių suformuotų serijinio dvi-pusio nusodinimo metodu garinant (a)  $60^\circ$ , (b)  $70^\circ$  ir (c)  $80^\circ$  kampais SEM vaizdai.

Pradiniuose eksperimentinių bandinių įtempių matavimuose anizotropija nebuvo stebima. Tokie patys rezultatai buvo matomi stebint bandinius po užgarinimo prieš juos atkaitinant. Dangų, užgarintų  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $60^\circ$  ir  $70^\circ$  kampais, profilometro matavimuose kreivumo radiusai mažėjo (gniuždan-tieji įtempiai), o garinant didesniais kampais šiek tiek didėjo (tempiamie-

ji įtempiai). Įtempiai garinant įvairiais kampais pavaizduoti Pav. 1.9(a). Gniuždantieji įtempiai atsiranda dėl medžiagos ir padėklo plėtimosi koeficientų nesutapimo, defektų dangoje, gardelės nesutapimų ir t.t. Tankesnėse dangose stebimi didesni įtempiai.

Anizotropiniai įtempiai buvo pastebėti keliuose eksperimentiniuose bandiniuose po atkaitinimo 600 °C temperatūroje. Bandinių, užgarintų 30°, 60°, 70°, 80° ir 85° kampais, interferometrinėse diagramose buvo stebimi anizotropiniai įtempiai. Vienas iš tokių matavimų pavaizduotas Pav. 1.9(b). Matuojant bandinį, užgarintą 0° kampu, toks reiškinys nebuvo stebimas. Įtempių anizotropija buvo matuojama dviem kryptimis: Y–mažiausio kreivumo kryptimi ir X–statmena kryptimi. Apskaičiuotų anizotropinių įtempių vertės pavaizduotos paveiksle 1.9(a). Iš eksperimentinių stebėjimų matome, kad didžiausiu įtempių anizotropiškumu pasižymėjo danga, užgarinta 70° kampu. Tuo atveju įtempiai skiriasi 80 MPa. Gerokai mažesnis skirtumas, 30 MPa, X ir Y kryptimis buvo stebimas dangoje, užgarintoje 80° kampu. Dar mažesni skirtumai buvo išmatuoti dangose, užgarintose 0° ir 30° kampais, tačiau šios dangos nepasižymi optiniu anizotropiškumu ir netinka fazinių plokštelių formavimui.



1.9 pav.: Išmatuoti plonų sluoksnių įtempiai: (a) dviem skirtingomis kryptimis ir (b) plono sluoksnio, užgarinto 70° kampu ir atkaitinto 600 °C temperatūroje, paviršiaus 3D vaizdas.

Eksperimentinių bandinių optinių ir struktūrinių savybių lyginimas tar-

pusavyje rodo, kad tinkamiausias koloninių struktūrų garinimo kampas yra  $80^\circ$ . Šie rezultatai yra artimi kitų mokslinių grupių išvadoms [33], rodančioms, kad tinkamiausias kampas yra  $82^\circ$ .

## 1.2 Helikoidinės nano-skulptūrinės dangos

Helikoidinės skulptūrinės dangos susideda iš koloninės struktūros susuktos aplink ašį, statmeną padėklui. Tokia struktūra formuojama sukant smailiu kampu pakreiptą padėklą apie jo normalės ašį. Kontroliuojant padėklo sukimosi greitį galima formuoti stačias kolonas. Tokiu atveju apskritiminės poliarizacijos selektyvumas, būdingas spiralinėms struktūroms, nėra stebimas. Šiame skyriuje aptariami rezultatai apima stačių kolonų analizę ir jų taikymą skaidrinančių dangų gamyboje.

Galimybė keisti tos pačios medžiagos lūžio rodiklį pritraukia vis daugiau dėmesio, nes tokiu būdu galima formuoti įvairias sudėtingas dangas: Rugate filtrus [34], skaidrinančias dangas [17] ir kt. Keičiant garinimo kampą, dangos tankis taip pat kinta dėl šešėliavimosi reiškinio. Naudojant skulptūrinių dangų formavimo metodiką, sluoksnio lūžio rodiklį galima keisti su praktiškai visomis medžiagomis. Maišant medžiagas gaunami visi lūžio rodikliai tarp abiejų sudedamųjų medžiagų [35]. Taigi, porėtumas silicio oksido dangose leidžia keisti dangos lūžio rodiklį tarp oro ir paties  $\text{SiO}_2$ .

Trys serijos eksperimentinių bandinių buvo suformuotos garinant ir analizuojant  $\text{SiO}_2$  nano-skulptūrinius sluoksnius skaidrinančių dangų gamybai. Pirma serija bandinių susideda iš 300 nm storio vienasluoksnių dangų, užgairintų  $0^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $40^\circ$ ,  $50^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $70^\circ$ ,  $80^\circ$  ir  $85^\circ$  kampais. Šie sluoksniai buvo naudojami lūžio rodiklių nustatymui. Padėklai buvo nuolat sukami aplink jų normalės ašį 2 aps/s greičiu tam, kad būtų išvengta dvigubo lūžio rodiklių formavimosi. Sekančios serijos metu buvo formuojami papildomi bandiniai  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $50^\circ$ ,  $70^\circ$  ir  $85^\circ$  kampu SEM, LIDT ir įtempimų analizei.

Trečios eksperimentų serijos metu naudojant iš vienasluoksnių dangų

sumodeliuotus lūžio rodiklius, trijų tipų skaidrinančios dangos buvo sumodeliuotos ir užgarintos.

- Pirmo tipo daugiasluoksnė danga buvo modeliuojama atspindžio sumažinimui ( $<0.5\%$ ) trimis bangos ilgiams, 1064 nm, 532 nm ir 355 nm. Tokios skaidrinančios dangos dažnai yra naudojamos kristalams padengti trečios harmonikos generavimui naudojant dvi pirmąsias. Optimizuojant dangos atspindį buvo gauti du dizainai su skirtingais storiais. Abu jie buvo realizuoti naudojantis DSK metodu ir garinant tik SiO<sub>2</sub> medžiaga. Bandiniai buvo pavadinti GLAD1 ir GLAD2 ir skyrėsi tik sudedamųjų sluoksnių storiais. Papildoma danga, pavadinta IBS1, buvo suformuota dulkinant Al ir Si taikinius ir leidžiant deguonies dujas į kamerą. Aliuminis buvo pasirinktas dėl savo didelio lūžio rodiklio ir pralaidumo UV spektrinėje srityje. GLAD1 bandinys susidėjo iš trijų porų sluoksnių su aukštu ir žemu lūžio rodikliais bei 18 nm ir 27 nm, 47 nm ir 55 nm, 23 nm ir 148 nm storiais, užgarintais 0° ir 85° kampais, atitinkamai. GLAD2 bandinys taip pat susidėjo iš trijų porų sluoksnių su aukštu ir žemu lūžio rodikliais bei 17 nm ir 24 nm, 56 nm ir 48 nm, 27 nm ir 145 nm storiais, užgarintais 30° ir 85° kampais, atitinkamai. GLAD1 ir GLAD2 dangų garinimo metu padėklai buvo sukami 0.5 Hz dažniu aplink normalės ašį. Kiekvieno sluoksnio garinimo greitis buvo palaikomas 3 Å/s ir kontroliuojamas kvarciniu rezonatoriumi. IBS1 bandinys susidėjo iš keturių Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ir SiO<sub>2</sub>, aukšto ir žemo lūžio rodiklio sluoksnių, porų susidedančių iš 102 nm ir 63 nm, 26 nm ir 158 nm, 170 nm ir 40 nm, 38 nm ir 86 nm storių sluoksnių, atitinkamai. Visos skaidrinančios dangos buvo padengtos ant vienos iš padėklo pusių.
- Sekančio tipo daugiasluoksnė danga buvo modeliuota atspindžiui nuo 350 nm iki 1800 nm sumažinti. Naudojant tą pačią DSK metodiką, keturi sluoksniai buvo užgarinti gradientiškai mažinant lūžio rodiklį. Dangos sluoksnių storiai ir garinimo kampai buvo 95 nm ir 40°, 98 nm

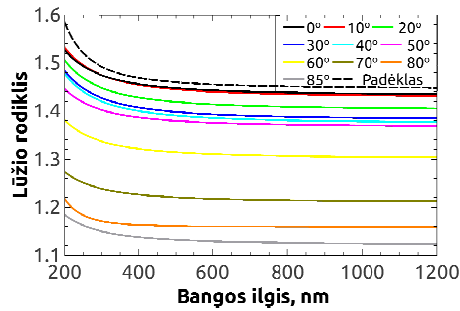


ir  $60^\circ$ , 100 nm ir  $70^\circ$  ir 112 nm ir  $80^\circ$ , stebint nuo padėklo.

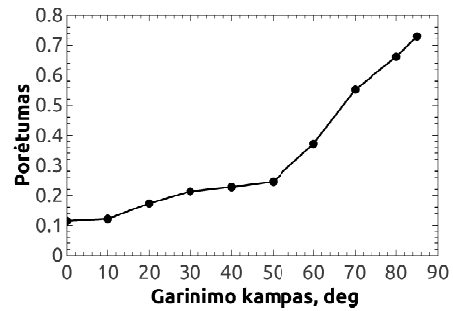
- Trečio tipo skaidrinančios dangos buvo modeliuotos atspindžiui sumažinti spektriniame diapazone nuo 400 nm iki 800 nm kritimo kampui kintant nuo  $0^\circ$  iki  $45^\circ$ . Naudojant tą pačią DSK metodiką, keturių sluoksnių danga buvo suformuota sekančiais fiziniais storiais ir garinimo kampais: 75 nm ir  $40^\circ$ , 27 nm ir  $85^\circ$ , 30 nm ir  $0^\circ$  ir 140 nm ir  $85^\circ$ , atitinkamai.

Lūžio rodikliai buvo sumodeliuoti naudojant 300 nm vienasluoksnių dangų spektrofotometrinius matavimus. Artimos padėklui sluoksnio savybės yra gaunamos garinant  $0^\circ$  kampu, kadangi dangos augimo metu nevyksta šešėliavimosi reiškinys. Kaip pavaizduota 1.10(a) paveiksle, lūžio rodiklis mažėja keičiant garinimo kampą nuo  $0^\circ$  iki  $85^\circ$ . Mažėjimas stebimas dėl mažos dalelių energijos ir mobilumo proceso metu. Šešėliavimosi reiškinys dominuoja kai atomai krenta į padėklą didėjančiu kampu. Lūžio rodiklis sumažėja nuo 1.45 iki 1.13 532 nm bangai. Toks dangos elgesys buvo pastebėtas ir kitų mokslinių grupių [36].

Sumodeliuoti lūžio rodikliai buvo panaudoti eksperimentinių plonų sluoksnių porėtumo nustatymui. Kaip matome iš 1.10(b) paveikslo, dėl šešėliavimosi reiškinio stebimas didėjantis dangų, suformuotų DSK metodu, porėtumas. Oro, eksperimentinių bandinių ir JD technologija suformuoto silicio oksido dielektrinės konstantos buvo naudojamos sluoksnių tūrinės frakcijos nustatymui taikant Brugemano modelį [37]. Nustatyta, kad danga, užgarinta nulinio laipsnių kampu, susideda iš 11% tuštumos. Garinimo metu asistuojantis šaltinis nebuvo naudojamas, todėl porėtumas buvo sąlygotas mažos adatomų energijos. Didinant kampą dešimčia laipsnių porėtumas išlieka toks pat, bet padidinus kampą iki  $50^\circ$  jis išauga iki 24%. Porėtumo didėjimas yra spartesnis didinant kampą nuo  $60^\circ$  iki  $85^\circ$ , kuomet jis siekia 73%. Kreivės polinkio kampo didėjimas yra galimai sąlygotas vis labiau dominuojančio šešėliavimosi reiškinio garinant didėjančiais kampais.



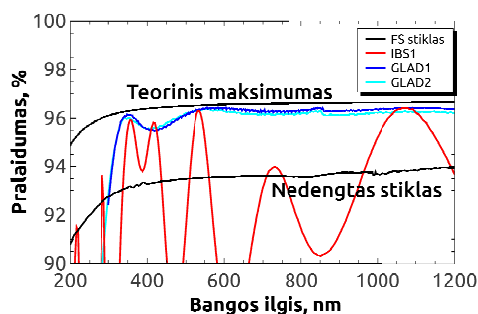
(a)



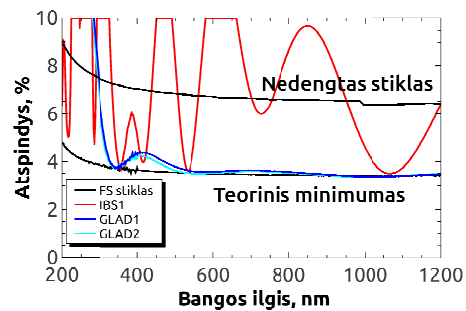
(b)

1.10 pav.: SiO<sub>2</sub> plonų sluoksnių, užgarintų DSK metodu skirtingais kampais, (a) sumodeliuotos lūžio rodiklio dispersijos ir (b) apskaičiuotos porėtumo vertės.

Suformuotų skaidrinančių dangų atspindys ir pralaidumas buvo išmatuoti spektrofotometru. Matavimų grafikai pateikti 1.11 paveiksle. Kaip matyti iš matavimų kreivių, daugiasluoksnės dangos, užgarintos JD technologija, atspindys nesiekia 0.3% ties 355 nm, 532 nm ir 1064 nm bangos ilgiais. GLAD1 ir GLAD2 bandinių atspindys buvo panašus ir neviršijo 0.2% ties tais pačiais bangos ilgiais. Skirtumai tarp modeliuoto padėklo pralaidumo ir skaidrinančių dangų neviršijo 0.4%. Rezultatai yra tinkami skaidrinančių dangų formavimui ir gali būti pagerinti tiksliau kontroliuojant sluoksnių parametrus.



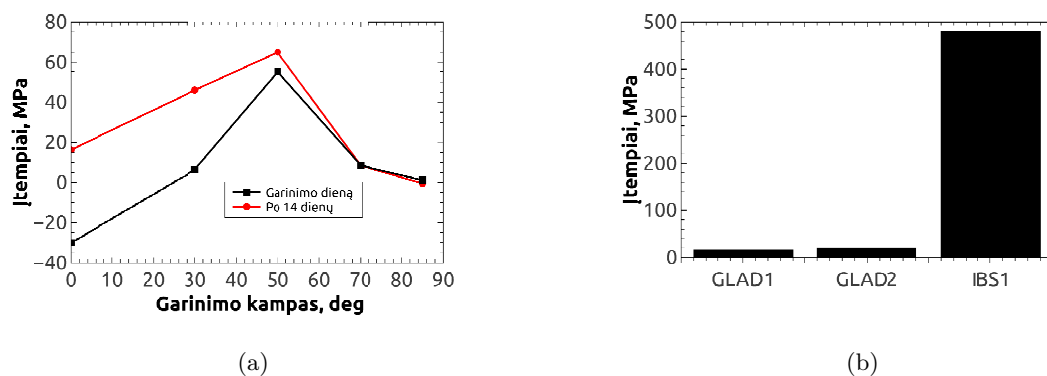
(a)



(b)

1.11 pav.: IBS1 (raudona kreivė), GLAD1 (mėlyna kreivė), GLAD2 (žydra kreivė) ir lydyto kvarco padėklo (juoda kreivė) (a) pralaidumo ir (b) atspindžio matavimai.

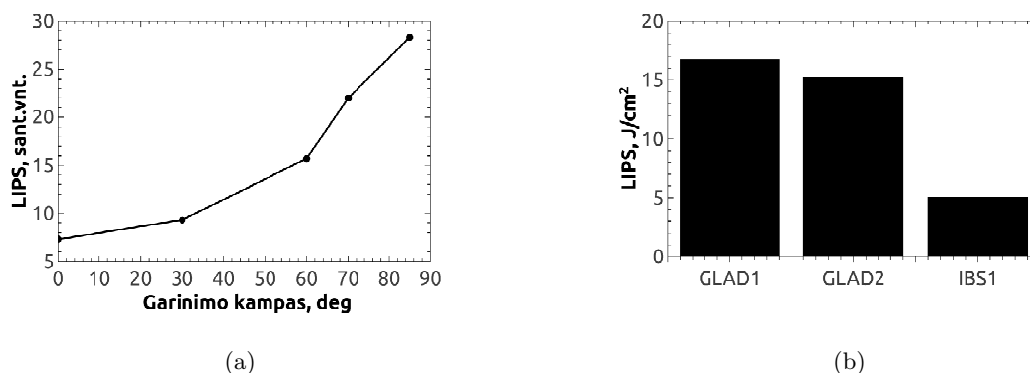
Fizo interferometru gauti įtempių matavimai pateikti 1.12(a) paveiksle. Grafike atvaizduotas įtempių kitimas nano-skulptūrinėse dangose, užgarintose skirtingais kampais.  $-30$  MPa gniužtantieji įtempiai buvo stebimi dangoje, užgarintoje  $0^\circ$  kampu. Didinant garinimo kampą, vidiniai įtempiai pereina į tempiančiuosius ir pasiekia maksimalią  $50$  MPa vertę garinant  $50^\circ$  kampu. Toliau didinant garinimo kampą įtempių vertės mažėja ir yra nykstamai mažos garinant  $85^\circ$  kampu. Buvo pastebėta, kad po dviejų savaitių įtempių vertės pakito. Tankesnėms dangoms įtempiai ženkliau perėjo į tempiančiuosius. Dangoms, užgarintoms  $70^\circ$  ir  $85^\circ$  kampais pokyčiai buvo minimalūs. Garinant slystančiu kampu kolonų tarpusavio varžymasis yra minimalus. Tai leidžia dangai augti su mažais įtempiais. Kaip matyti iš 1.12(b) paveikslo, DSK metodu užgarintų dangų suminiai įtempiai yra penkis kartus mažesni nei daugiasluoksnės dangos, suformuotos JD technologija. Dulkavimo technologija padengtos dangos yra tankios ir pasižymi dideliais įtempiais, kurie gali būti eliminuoti įvairiomis *ex situ* metodikomis [38]. GLAD1 ir GLAD2 bandiniai susideda iš porėtų sluoksnių, todėl suformuotos skaidrinančios dangos pasižymi mažais įtempiais.



1.12 pav.: (a) Vienasluoksnių, užgarintų skirtingais kampais, ir (b) daugiasluoksnių skaidrinančių dangų išmatuotos įtempių vertės.

Lazeriu indukuotos pažaidos slenkščio matavimai pavaizduoti Pav. 1.13. Pirmame grafike matomas LIDT vertės kitimas keičiant garinimo kampą nuo  $0^\circ$  iki  $85^\circ$ . Didėjantis pažaidos slenkstis yra galimai susijęs su didėjančiu

plonų sluoksnių, suformuotų DSK metodu, porėtumu. Lazerinės spinduliuotės sąveika su plonu sluoksniu nanosekundiniame režime sąlygoja šiluminius efektus medžiagoje. Termiškai kaitinamos medžiagos plečiasi ir dėl to vyksta dielektriko pažeidimas. Tuštumos porėtuose sluoksniuose leidžia dangai labiau plėstis, todėl jų optinis atsparumas yra didesnis. Kitu atveju, tokie netiesiniai efektai kaip daugiafotoninė sugertis taip pat gali sukelti lazerinį pažeidimą. Medžiagos su didesniu draustinės juostos tarpu yra atsparesnės lazerinei spinduliuotei. Nano-skulptūriniai ploni sluoksniai yra sudaryti iš SiO<sub>2</sub> medžiagos ir oro, kurio draustinės juostos tarpas dar didesnis. Didėjantis porėtumas sluoksniuose taip pat didina bendrą juostos tarpą dėl vis didėjančios tuštumų tūrinės frakcijos. Dėl šios priežasties LIDT vertės taip pat didėja. Skirtumas tarp lazerinio pažeidimo verčių pavaizduotas 1.13(a) paveiksle, kuriame matome, kad vertės dangoms, užgarintoms 0° ir 85° kampais, skiriasi keturis kartus. Skaidrinančių dangų lazerinio pažeidimo matavimai pateikti Pav. 1.13(b). Abi GLAD1 ir GLAD2 dangos pasižymėjo panašiu optiniu atsparumu ir LIDT vertės buvo lygios 16.8 J/cm<sup>2</sup> ir 15.3 J/cm<sup>2</sup>, atitinkamai. JD technologija užgarintos dangos lazerinio pažeidimo vertė buvo lygi 5.1 J/cm<sup>2</sup>.

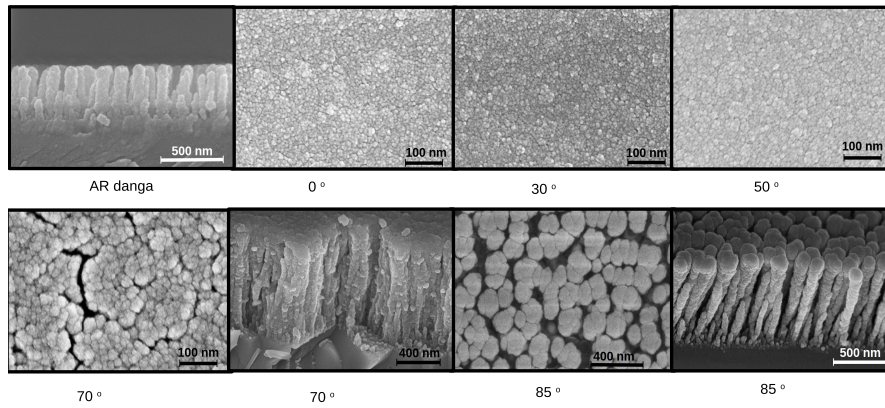


1.13 pav.: (a) Vienasluoksnių dangų, užgarintų skirtingais kampais ir (b) daugiasluoksnių skaidrinančių dangų LIDT matavimų vertės.

Vidinės nano-skulptūrinių dangų struktūros analizei buvo naudotos SEM nuotraukos. Pav. 1.14 matomos koloninės struktūros augimas iš viršaus, ku-

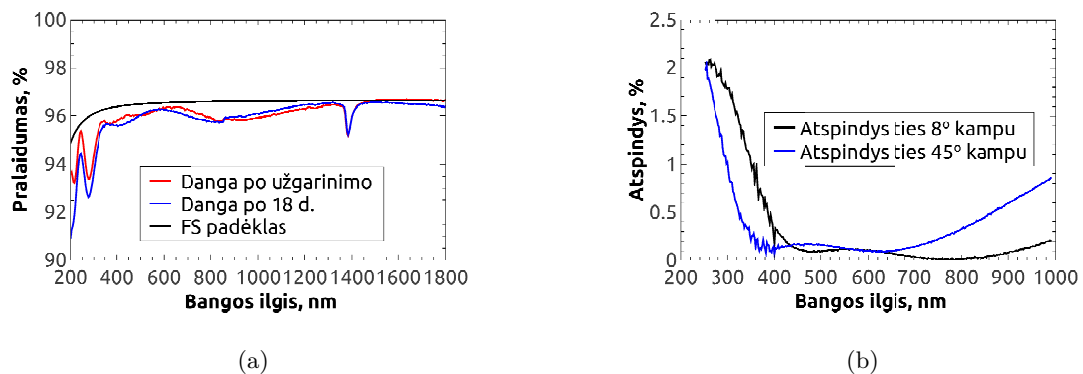
ris būdingas augant sluoksniui garinant kampu. Iš GLAD1 dangos skersp-  
jūvio nuotraukos matomas jos porėtumas. Deja, atskirus sluoksnius sunku  
išskirti dėl jų mažo storio (nuo 18 nm iki 47 nm). Nuotraukose taip pat ma-  
tomas kolonų tarpusavio varžymasis augimo metu, kuris būdingas garinant  
mažomis energijomis. Tai, kartu su šešėliavimosi efektu, dominuoja naudo-  
jant DSK metodiką. Garinant  $0^\circ$  kampu, kolonų viršūnių skerspjūviai siekia  
8 nm. Jie didėja iki 9.5 nm garinant  $30^\circ$  kampu, 14 nm garinant  $50^\circ$ , 27  
nm garinant  $70^\circ$  ir 109 nm garinant  $85^\circ$  kampu. Kolonų diametrai padidėja  
daugiau nei dešimt kartų kai garinimo kampas didinamas nuo  $30^\circ$  iki  $85^\circ$ .  
Didesni tarpai tarp kolonų taip pat atsiranda dėl jų plėtimosi ir didėjančio  
šešėliavimosi efekto. Tokie stebėjimai paaiškina staigų porėtumo didėjimą  
ir lūžio rodiklio mažėjimą, kai garinimo kampas pakinta nuo  $70^\circ$  iki  $85^\circ$ .  
 $70^\circ$  kampu užgarintos dangos skerspūvio analizė rodo, kad charakteringi  
kolonų dydžiai nekinta augant dangai. Skirtingi rezultatai matyti plonuo-  
se sluoksniuose, užgarintuose  $85^\circ$  kampu. Augimo pradžioje, diametrai yra  
maži ir lygūs 43 nm. Augimo metu diametrai išauga iki 83 nm sluoksnio  
viduryje, kurio storis 1  $\mu\text{m}$ . Ties jo viršumi, kolonų plotis siekia 114 nm ir  
yra tris kartus didesnis nei augimo pradžioje.  $\text{SiO}_2$  medžiagos, garinamos  
 $87^\circ$  kampu, sluoksnio augimas taip pat buvo tirtas Vick ir bendraautorių  
[39]. Atidžiai apžiūrėjus jų SEM vaizdus, matyti, kad individualios kolonos  
išsiplečia iki 120 nm po 420 nm storio augimo. Šiame tyrime taip pat ma-  
tomi didėjantys kolonų pločiai. Skaidrinančių dangų sluoksniai yra mažesni  
nei 150 nm, todėl sluoksniai buvo laikomi tolygūs.

Du papildomi skaidrinančių dangų dizainai buvo suformuoti: AR@ 300-  
1850 AOI=0 ir AR@ 400-800 AOI=0-45. Abiejų formavimas standartinėmis  
technologijomis ir medžiagomis yra sudėtingas. Pirmosios skaidrinančios  
dangos spektras pavaizduotas Pav. 1.15(a). Dangos atspindys neviršija  
0.8% visame reikalaujamame spektre, išskyrus ties 1450 nm banga. Tai  
vyksta dėl vandens iš aplinkos sugerties, kurios sunku išvengti porėtose dan-  
gose. Antrosios dangos atspindys neviršija 0.5% reikalaujamame spektre,



1.14 pav.: GLAD1 dangos ir plonų sluoksnių, užgarintų (nuo kairės į dešinę)  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $50^\circ$ ,  $70^\circ$ ,  $70^\circ$  (skerspjūvis),  $85^\circ$  ir  $85^\circ$  (skerspjūvis) kampais, SEM nuotraukos.

kaip matyti iš 1.15(b) paveikslo.



1.15 pav.:  $\text{SiO}_2$  medžiagos pagrindu suformuotų (a) plačiajuostės ir (b) plačiakampės skaidrinančių dangų spektrai.

Nano-skulptūrinių dangų pagrindu suformuotų skaidrinančių dangų pranašumai apima mažus įtempius, geresnes optines charakteristikas ir didelį optinį atsparumą. Ateityje, tokio tipo dangos gali būti naudojamas kristalų, šviesolaidžių ir kitų optinių komponentų padengimui, kurių lazerinis atsparumas yra kritiškai svarbus.

### 1.3 Tolygaus sluoksnio garinimas sukant padėklą

Praėjusiuose skyriuose buvo aptarta medžiagų inžinerija garinant jas slystančiu kampu. Stačios kolonos, suformuotos sparčiai sukant padėklą apie jo normalės ašį, taip pat gali būti panaudotos neplokščių paviršių tolygiam padengimui. Šiame skyriuje aptartas DSK metodo panaudojimas periodinių struktūrų padengimui ir analizei.

TSGS metodo tyrimui buvo parinkti du drugeliai: Monarchas (*Danaus plexippus*) ir Atlantis (*Speyeria atlantis*). Abiejų bandinių nuotraukos pavaizduotos 1.16 paveiksle. Monarchas buvo pasirinktas kaip vienas iš labiausiai paplitusių drugelių Šiaurės Amerikoje. Atlantis buvo pasirinktas dėl savo žėrinčių taškų ant galinio sparno.



1.16 pav.: Monarcho (*Danaus plexippus*) ir Atlančio (*Speyeria atlantis*) drugelių nuotraukos.

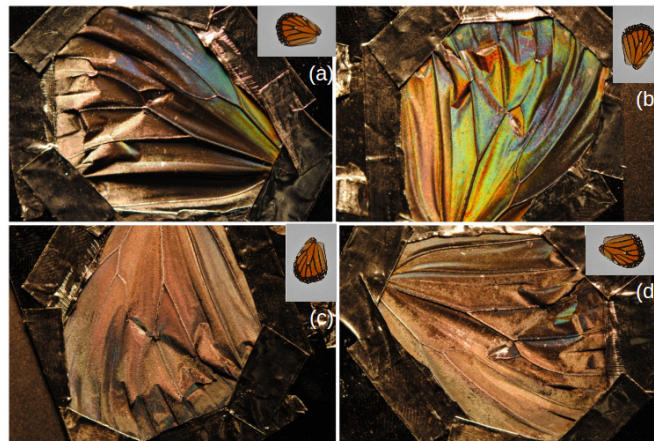
Tinkamiausių proceso parametrų atrinkimui buvo pasirinkti penki eksperimentiniai bandiniai. Naudotų sparnų, nikelio garinimo kampų ir storių santrauka pavaizduota 1.1 lentelėje. Monarcho galiniai sparnai buvo padengti standartine ir modifikuota TSGS metodika ir pavadinti B1 ir B2, atitinkamai. Galinis Atlančio ir priekinis Monarcho sparnai buvo padengti modifikuotu metodu žėrinčių paviršių analizei. Penktasis bandinys taip pat buvo Monarcho galinis sparnas, kuris buvo padengtas modifikuota TSGS metodika su papildomu nikelio sluoksniu.

Padengto B1 bandinio nuotrauka pavaizduota Pav. 1.17. Nuotraukos buvo darytos apšviečiant bandinį intensyvia šviesa ir sukant jį. Spalvų įvai-

1.1 lentelė: Naudotų sparnų, nikelio garinimo kampų ir storių TSGS proceso metu santrauka.

ID	Kampas $\chi_v(deg)$	Storis (nm)	Bandinys
B1	7 ir 20	218 ir 170	Monarcho galinis sparnas
B2	20 ir 20	220 ir 216	Monarcho galinis sparnas
B3	7 ir 20	250 ir 187	Atlančio galinis sparnas
B4	8 ir 20	246 ir 223	Monarcho priekinis sparnas
B5	7 ir 20 ir 90	225 ir 190 ir 25	Monarcho galinis sparnas

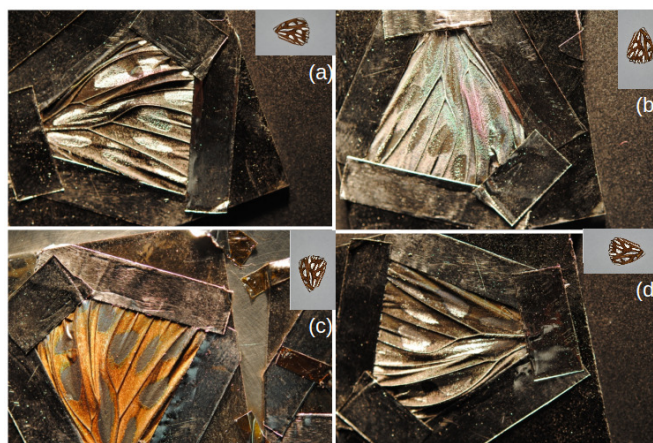
rovė stebima pasukant bandinį  $90^\circ$  kampu. Stebint kitais kampais matomas tik metalinis atspindys. Spalvų paletė gali būti matoma dėl kelių priežasčių: interferencijos, difrakcijos, sugerties ir kt. Difrakcija yra labiausiai tikėtina priežastis, kadangi spalvos matomos tik viena kryptimi. Šios hipotezės patvirtinimui buvo atlikti papildomi tyrimai.



1.17 pav.: B1 bandinio nuotraukos, sukant po 90 laipsnių: a)  $0^\circ$ , b)  $90^\circ$ , c)  $270^\circ$  and d)  $180^\circ$

B3 bandinio nuotrauka pavaizduota Pav. 1.18. Žerintys taškai stebimi sukant bandinį bet kuriuo kampu. Žerėjimas yra sąlygotas šviesos sklaidos nuo paviršiaus struktūros. Modifikuota TSGS metodika tolygiai padengė šį biopaviršių.

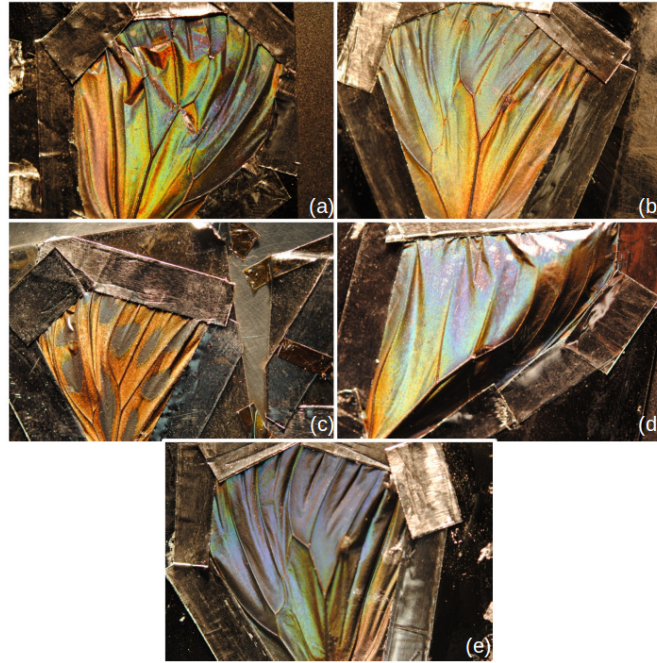




1.18 pav.: B3 bandinio nuotraukos, sukant po 90 laipsnių: a) 0°, b) 90°, c) 270° and d) 180°

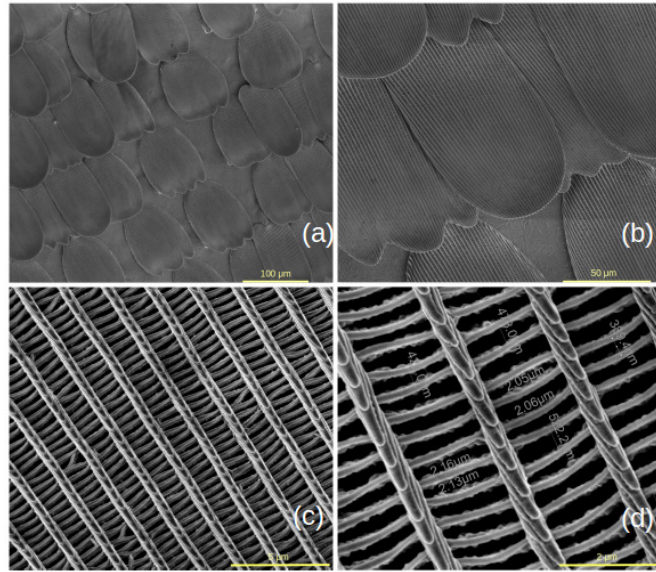
Visi bandiniai yra pavaizduoti Pav. 1.19 standartinės, modifikuotos TSGS metodikų ir skirtingų sparnų palyginimui. Lyginant (a), (b) ir (e) nuotraukas, matyti, kad ryškiausios spalvos matyti dengiant modifikuota TSGS metodika. Blyškesnės spalvos gaunamos naudojant standartinę ir trijų sluoksnių metodą. Skirtingų bandinių spalvas lyginti yra sudėtinga, nes tai priklauso nuo apšvietos šaltinio ir stebėtojo. Nepaisant to, modifikuota CEFR metodika taip pat gaunamos tvirtesnės dangos biologinių bandinių paviršių padengimui. Spalvos ant Monarcho galinio sparno matomos garinant pirmąjį sluoksnį tiek 20 tiek 7 laipsnių kampais. Ta pati modifikuota metodika buvo panaudota Monarcho priekinio ir Atlančio galinio sparnų padengimui. Spalvos matomos abiem atvejais ir tai rodo TSGS metodikos universalumą.

SEM analizė buvo atlikta geresniam paviršiaus struktūros ir stebimų spalvų supratimui. Kaip matome iš Pav. 1.20, galinio sparno struktūra susideda iš žvynų. Žvynai yra 70  $\mu\text{m}$  pločio ir susideda iš struktūros panašios į kopėčias. Ši struktūra yra drugelio skeletas. Atstumas tarp išilginių ašių buvo stebimas su didesniu didinimu ir siekė 2  $\mu\text{m}$ , kaip matyti 1.20(d) paveiksle. Atstumai tarp skersinių ašių siekė 500 nm. Ši vertė yra regimajame spektriniame ruože. Difrakcija gali būti stebima padengus tokią struktūrą atspindinčiu metaliniu sluoksniu.

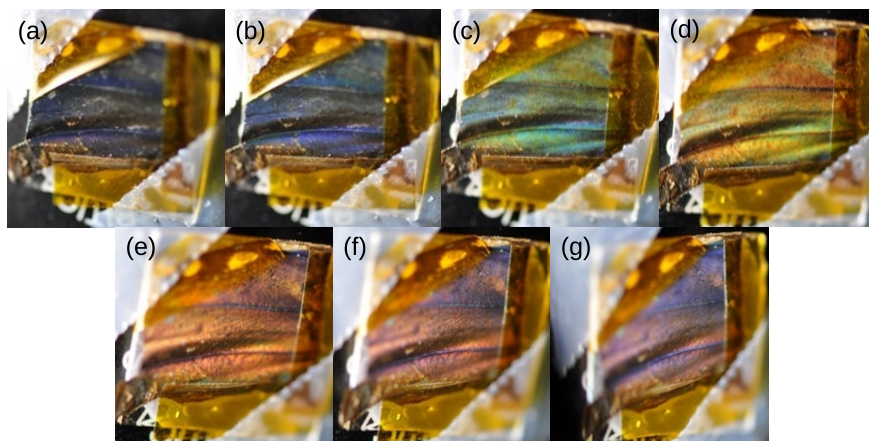


1.19 pav.: Padengtų bandinių a) B1, b) B2, c) B3, d) B4 ir e) B5 nuotraukos.

Fotokamera užfiksuotos nuotraukos pavaizduotos Pav. 1.21. Keičiant garinimo kampą nuo  $20^\circ$  iki  $-40^\circ$ , stebimos spalvos taip pat keičiasi: juoda stebint  $20^\circ$ , mėlyna stebint  $10^\circ$ , mėlyna ir žalia  $0^\circ$ , žalia ir raudona  $-10^\circ$ , vario stebint  $-20^\circ$ , vario ir mėlyna stebint  $-30^\circ$  ir mėlyna stebint  $-40^\circ$  kampais. Kiekvienoje nuotraukoje matomos ne pavienės spalvos, bet jų paletės. Padengtas biologinis paviršius nėra visiškai plokščias, todėl apšvietimo ir stebėjimo kampai kinta per paviršių. Atstumai tarp skersinių skeleto ašių taip pat varijuoja. Jie gali kisti apie 20% bandinyje. Dominuojančių spalvų kitimas atitinka difrakcijos reiškinių.



1.20 pav.: Nikeliu padengtos bioreplikos SEM nuotraukos rodančios (a) žvynuotą Monarcho galinio sparno struktūrą, (b) individualaus žvyno struktūrą, (c) skeletą ir (d) jo struktūros matavimus.



1.21 pav.: Nikeliu padengtos bioreplikos spalvos, gautos fotografuojant kamera skirtingais kampais  $\psi$ : (a)  $20^\circ$ , (b)  $10^\circ$ , (c)  $0^\circ$ , (d)  $-10^\circ$ , (e)  $-20^\circ$ , (f)  $-30^\circ$ , ir (g)  $-40^\circ$ .

## Skyrius 2

# Pagrindiniai rezultatai ir išvados

1)  $\text{TiO}_2$  koloninės struktūros skulptūrinės dangos, užgarintos slystančiu kampu serijinio dvipusio nusodinimo metodu, pasižymi anizotropiniais vidiniais įtempiais po atkaitinimo  $600^\circ\text{C}$  temperatūroje. Geriausiomis optimėmis savybėmis fazinių plokštelių formavimui pasižymėjo  $80^\circ$  kampu užgarintos dangos. Ploni sluoksniai turėjo tinkamus optinius parametrus ir mažus įtempius prieš ir po atkaitinimo.

2) DSK metodas su asistuojančiu jonų šaltiniu suteikė papildomą parametą ploniems sluoksniams su nano-tvarkia struktūra kontroliuoti. Nuolatinis bombardavimas Ar jonais leido suformuoti nano-skulptūrines dangas iš kristalinės  $\text{CuI}$  medžiagos.

3) Nano-skulptūrinių plonų sluoksnių apskritiminės poliarizacijos selektyvumas ir kontroliavimas buvo pademonstruotas keičiant padėklo sukimo greitį ir medžiagos garinimo spartą DSK proceso metu.

4) Daugiasluoksnės silicio oksido pagrindu suformuotos skaidrinančios ir didelio atspindžio dangos buvo išvystytos tiriant ir optimizuojant DSK metodą. Silicio dangos pasižymėjo didesniu atsparumu lazerinei spinduliutei lyginant su dangomis, suformuotomis JD technologija. Indukuotas porėtumas nano-skulptūrinėse skaidrinančiose ir didelio atspindžio dangose leido atlaikyti tris kartus didesnius lazerinės spinduliuotės srautus ties  $355\text{ nm}$  banga nanosekundiniame režime lyginant su panašių spektrinių savybių dangomis, suformuotomis JD technologija.

5) Detalus dengimo slystančiu kampu tyrimas leido išvystyti tolygias dangas ant neplokščių paviršių. DSK metodas buvo panaudotas nikelio padengimui ant Monarcho drugelio galinio sparno ir šios morfologijos paviršiaus replikavimui dviejų-kampų-TSGS proceso metu. Ant 500 nm storio nikelio padengtos replikos buvo matomos struktūrinės spalvos, stebimos dėl sparno karkaso periodinės struktūros. Šios struktūrinės spalvos natūraliai yra nematomos, nes yra visiškai paslėptos Monarcho drugelio sparno pigmentinių dažų. Taigi, dviejų-kampų-TSGS technologija suteikia galimybę replikuoti, studijuoti ir išnaudoti paslėptas biologinių paviršių morfologijas.

# Literatūra

- [1] M. Suzuki, K. Nishiura, S. Masunaka, N. Muroi, and K. Namura. Application of high refractive index and/or chromogenic layers to control solar and thermal radiations. *Proc. SPIE*, 9929:99290G–99290G–4, 2016.
- [2] I. Abdulhalim, A. Karabchevsky, C. Patzig, B. Rauschenbach, B. Fuhrmann, E. Eltzov, R. Marks, J. Xu, F. Zhang, and A. Lakhtakia. Surface-enhanced fluorescence from metal sculptured thin films with application to biosensing in water. *Applied Physics Letters*, 94(6), 2009.
- [3] S. E. Swiontek, M. Faryad, and A. Lakhtakia. Surface plasmonic polaritonic sensor using a dielectric columnar thin film. *Journal of Nanophotonics*, 8(1):083986, 2014.
- [4] F. Schütz, K. Scheurell, G. Scholz, and E. Kemnitz. Effects of chloride additives on the mechanical stability and environmental durability of porous MgF<sub>2</sub> thin films. *Proc. SPIE*, 9929:992914–992914–7, 2016.
- [5] M. M. Hawkeye, M. T. Taschuk, and M. J. Brett. *Introduction: Glancing Angle Deposition Technology*. John Wiley & Sons, Ltd, 2014.
- [6] A. Lakhtakia and J. B. Geddes. *Thin-Film Metamaterials Called Sculptured Thin Films*, pages 59–71. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2010.
- [7] A. Barranco, A. Borrás, A. R. Gonzalez-Elipé, and A. Palmero. Perspectives on oblique angle deposition of thin films: From fundamentals to devices. *Progress in Materials Science*, 76:59 – 153, 2016.

- [8] O. R. Monteiro, A. Vizir, and I. G. Brown. Multilayer thin-films with chevron-like microstructure. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 31(22):3188, 1998.
- [9] R. Messier, T. Gehrke, C. Frankel, V. C. Venugopal, W. Otaño, and A. Lakhtakia. Engineered sculptured nematic thin films. *Journal of Vacuum Science & Technology A*, 15(4):2148–2152, 1997.
- [10] M. O. Jensen and M.J. Brett. Porosity engineering in glancing angle deposition thin films. *Applied Physics A*, 80(4):763–768, 2005.
- [11] V. C. Venugopal. Three-dimensional periodic chiral sculptured thin films. *Journal of Nanophotonics*, 7(1):073502–073502, 2013.
- [12] P. D. McAtee and A. Lakhtakia. Reflection and transmission of obliquely incident light by chiral sculptured thin films fabricated using asymmetric serial-bideposition (asbd) technique. *Proc. SPIE*, 9929:99290Q–99290Q–11, 2016.
- [13] S. R. Kennedy, M. J. Brett, O. Toader, and S. John. Fabrication of tetragonal square spiral photonic crystals. *Nano Letters*, 2(1):59–62, 2002.
- [14] S. R. Kennedy, M. J. Brett, H. Miguez, O. Toader, and S. John. Optical properties of a three-dimensional silicon square spiral photonic crystal. *Photonics and Nanostructures - Fundamentals and Applications*, 1(1):37 – 42, 2003.
- [15] M. Suzuki, T. Itoh, and Y. Taga. Recent progress of obliquely deposited thin films for industrial applications. *Proc. SPIE*, 3790:94–105, 1999.
- [16] A. Lakhtakia, V. C. Venugopal, and M. W. McCall. Spectral holes in bragg reflection from chiral sculptured thin films: circular polarization filters. *Optics Communications*, 177(1–6):57 – 68, 2000.
- [17] J.-Q. Xi, M. F. Schubert, J. K. Kim, E. F. Schubert, M. Chen, S.-Y. Lin, W. Liu, and J. A. Smart. Optical thin-film materials with low

- refractive index for broadband elimination of Fresnel reflection. *Nature Photonics*, 1(3):176–179, 2007.
- [18] T. H. Maiman. Stimulated Optical Radiation in Ruby. *Nature*, 187(4736):493–494, 1960.
- [19] P. Maker, R. Terhune, and C. Savage. Optical third harmonic generation. *Third International Symposium on Quantum Electronics*, pages 1559–1576.
- [20] I. M. Thomas. High laser damage threshold porous silica antireflective coating. *Appl. Opt.*, 25(9):1481–1483, 1986.
- [21] K. M. A. Sobahan, Y. J. Park, J. J.o Kim, and C. K. Hwangbo. Nanostructured porous SiO<sub>2</sub> films for antireflection coatings. *Optics Communications*, 284(3):873 – 876, 2011.
- [22] D. S. Hobbs and B. D. MacLeod. Design, fabrication, and measured performance of anti-reflecting surface textures in infrared transmitting materials. *Proc. SPIE*, 5786:349–364, 2005.
- [23] I. Hodgkinson and Q. H. Wu. Serial bideposition of anisotropic thin films with enhanced linear birefringence. *Appl. Opt.*, 38(16):3621–3625, 1999.
- [24] X. Xiao, G. Dong, C. Xu, H. He, H. Qi, Z. Fan, and J. Shao. Structure and optical properties of nb<sub>2</sub>o<sub>5</sub> sculptured thin films by glancing angle deposition. *Applied Surface Science*, 255(5, Part 1):2192 – 2195, 2008.
- [25] X. Xiao, G. Dong, H. He, H. Qi, Z. Fan, and J. Shao. Optical properties and microstructure of ta<sub>2</sub>o<sub>5</sub> thin films prepared by oblique angle deposition. *Chin. Opt. Lett.*, 7(10):967–970, 2009.
- [26] H. Qi, X. Xiao, H. He, K. Yi, and Z. Fan. Optical properties and microstructure of ta<sub>2</sub>o<sub>5</sub> biaxial film. *Appl. Opt.*, 48(1):127–133, 2009.



- [27] C.-F. Lin and Y.-J. Jen. Use of ta2o5 biaxial thin film as a high-efficiency polarization converter. *Journal of Nanophotonics*, 6(1):061507–1–061507–9, 2012.
- [28] S.-H. Woo and C. K. Hwangbo. Optical anisotropy of microstructure-controlled tio<sub>2</sub> films fabricated by glancing-angle deposition (glad). *Journal of the Korean Physical Society*, 48(6):1199–1204, 2006.
- [29] S. Wang, G. Xia, H. He, K. Yi, J. Shao, and Z. Fan. Structural and optical properties of nanostructured tio<sub>2</sub> thin films fabricated by glancing angle deposition. *Journal of Alloys and Compounds*, 431(1–2):287 – 291, 2007.
- [30] S. M. Pursel, M. W. Horn, and A. Lakhtakia. Blue-shifting of circular bragg phenomenon by annealing of chiral sculptured thin films. *Opt. Express*, 14(17):8001–8012, 2006.
- [31] H. van Kranenburg and C. Lodder. Tailoring growth and local composition by oblique-incidence deposition: a review and new experimental data. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 11(7):295 – 354, 1994.
- [32] X. Xiao, G. Dong, C. Xu, H. He, H. Qi, Z.u Fan, and J. Shao. Structure and optical properties of Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> sculptured thin films by glancing angle deposition. *Applied Surface Science*, 255(5):2192–2195, 2008.
- [33] M. Suzuki, T. Ito, and Y. Taga. Morphological stability of TiO<sub>2</sub> thin films with isolated columns. *Japanese Journal of Applied Physics*, 40(4B):L398, 2001.
- [34] K. Robbie, A. J. P. Hnatiw, M. J. Brett, R. I. MacDonald, and J. N. McMullin. Inhomogeneous thin film optical filters fabricated using glancing angle deposition. *Electronics Letters*, 33(14):1213–1214, 1997.
- [35] A. Melninkaitis, T. Tolenis, L. Mažulė, J. Mirauskas, V. Sirutkaitis, B. Mangote, X. Fu, M. Zerrad, L. Gallais, M. Commandré, S. Kičas,

- and R. Drazdys. Characterization of zirconia– and niobia–silica mixture coatings produced by ion-beam sputtering. *Appl. Opt.*, 50(9):C188–C196, 2011.
- [36] W.-J. Kong, Z.-C. Shen, S.-H. Wang, J.-D. Shao, Z.-X. Fan, and C.-J. Lu. Graded index broadband antireflection coating prepared by glancing angle deposition for a high-power laser system. *Chinese Physics B*, 19(4):044210, 2010.
- [37] D. A. G. Bruggeman. Berechnung verschiedener physikalischer konstanten von heterogenen substanzen. i. dielektrizitätskonstanten und leitfähigkeiten der mischkörper ausisotropen substanzen. *Ann. Phys.*, 416:636–664, 1935.
- [38] S. Kičas, U. Gimževskis, and S. Melnikas. Post deposition annealing of ibs mixture coatings for compensation of film induced stress. *Opt. Mater. Express*, 6(7):2236–2243, 2016.
- [39] D. Vick, T. Smy, and M. J. Brett. Growth behavior of evaporated porous thin films. *Journal of Materials Research*, 17(11):2904–2911, 2002.

## Apie autorių

Tomas Tolenis baigė “Saulės” gimnaziją Plungėje ir įstojo į Vilniaus universitetą 2006 metais. Baigęs fizikos bakalauro studijas 2010 metais ir medžiagų technologijų magistro studijas 2012 metais, pradėjo doktorantūros studijas Fizinių ir technologijos mokslų centre.

## Publikacijų sąrašas:

1. **T.Tolenis**, L. Grinevičiūtė, L. Mažulė ir kt., “Low-stress phase plates produced by serial bideposition of  $\text{TiO}_2$  thin films,” JNP, **10**(3), 2016.
2. **T.Tolenis**, L. Grinevičiūtė, R. Buzelis ir kt., “Antireflection coatings for high power laser systems based on sculptured thin films,” Optics Express, **7**(4), 2017.
3. **T. Tolenis**, S.E. Swiontek, A. Lakhtakia, “Structural colors of nickel bioreplicas of butterfly wings,” Journal of Modern Optics, **64**(8), 2016.