

VILNIAUS UNIVERSITETAS
FIZIKOS FAKULTETAS
LAZERINIŲ TYRIMŲ CENTRAS

SUGERTIES NUOSTOLIŲ JONAPLUOŠČIO DULKINIMO TECHNOLOGIJA
SUFORMUOTOSE Ta₂O₅/SiO₂ OKSIDŲ DAUGIASLUOKSNĖSE OPTINĖSE DANGOSE
TYRIMAS UV SPEKTRINIAME RUOŽE

Magistro studijų baigiamasis darbas

Lazerinės technologijos studijų programa

Studentas

Raigardas Markevičius

Leista ginti

2026 – 05 – 22

Vadovas

dr. Simas Melnikas

Recenzentas

dr. Simonas Indrišiūnas

Lazerinių tyrimų centro direktorė

dr. Dalia Kaškelytė

Vilnius 2026

Turinys

Įvadas	3
1. Literatūros apžvalga	5
1.1 Daugiasluoksnės interferencinės dangos	5
1.2 Teorinės daugiasluoksnės optinės dangos modelis	8
1.3 Naudojamos medžiagos optinėse dangose	11
1.4 Optinių dangų atkaitinimas	14
1.5 Tantalo pentoksido (Ta_2O_5) ir silicio oksido (SiO_2) mišinių optinės dangos	16
2. Metodika	18
2.1 Jonapluoščio dulkinimo įrenginio aprašymas	18
2.2 LID metodikos aprašymas	20
2.3 LIDT metodikos aprašymas	22
2.4 Vienasluoksnės dangos charakterizavimas spektrometru.	25
2.5 AFM metodikos aprašymas	27
3. Eksperimento rezultatai	30
3.1 Tiriamųjų bandinių grupavimas	30
3.2 Vienasluoksnių $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ dangų spektrinė analizė	32
3.2.1 Spektriniai matavimai ir atkaitinimo įtaka	32
3.2.2 Bandinių spektrų modeliavimas	33
3.2.3 Modeliavimo metu gautos optinės konstantos	35
3.2.4 Ekstinkcijos koeficientų ir lūžio rodiklių priklausomybė nuo atkaitinimo	37
3.3 Sugerties analizė	40
3.4 Optinių koeficientų ir sugerties priklausomybė nuo IBS pirminio šaltinio	42
3.5 Optimaliausio Brego veidrodžio tyrimas	44
3.5.1 Spektriniai matavimai ir atkaitinimo įtaka	44
3.5.2 Sugerties matavimai ir atkaitinimo įtaka	46
3.5.3 LIDT tyrimas	47
3.5.4 AFM analizė	47
4. Pagrindiniai rezultatai ir išvados	48
Šaltinių sąrašas	50

Ivadas

Optinės interferencinės dangos yra daugiasluoksnės dielektrinės struktūros, kurių atspindžio ir pralaidumo spektrai susidaro dėl šviesos bangų interferencijos sluoksnių ribose. Lazerinėse sistemose tokių dangų taikymą dažnai riboja optiniai nuostoliai. Sklaida dažniausiai siejama su paviršiaus šiurkštumu, sluoksnių ribų netolygumais ir struktūriniais defektais, o sugertis rodo optinės spinduliuotės energijos vartimą šiluma. Sugerta energija šildo dangą, keičia optinį kelią ir gali mažinti lazerinės pažaidos slenkstį. [1, 2] Sugertis siejama su kompleksiniu lūžio rodikliu $\tilde{n} = n - ik$, o ekstinkcijos koeficientas k su sugerties koeficientu α siejamas ryšiu $\alpha = 4\pi k / \lambda$. [1, 3] Ultravioletiniame ruože net maža k vertė gali lemti pastebimą sugertį. Darbe pasirinktas 355 nm bangos ilgis atitinka *Nd:YAG* lazerio trečiąją harmoniką. Ties šiuo bangos ilgiu oksidinių dangų nuostoliai tampa jautrūs defektinėms būsenoms, deguonies vakansijoms ir nevisiškai oksiduotoms sritims. [3, 4] Didelio lūžio rodiklio medžiagų pasirinkimas 355 nm ruožui nėra paprastas. HfO_2 reikia tiksliai valdomo oksidacijos režimo. ZrO_2 gali kristalizuotis, todėl gali didėti sklaida. Al_2O_3 turi mažą sugertį, bet jo lūžio rodiklis per mažas efektyvioms didelio atspindžio Brego dangoms. [1, 3, 10, 13] Dėl to darbe nagrinėjami $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ mišiniai. Ta_2O_5 leidžia išlaikyti didesnę lūžio rodiklį, tačiau UV ruože yra jautrus deguonies kiekiui ir suboksidinėms būsenoms. SiO_2 turi mažesnę lūžio rodiklį, bet pasižymi mažesniais optiniais nuostoliais ir geru stabilumu. $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ mišinys yra kompromisas tarp lūžio rodiklio ir sugerties nuostolių. [4, 5] Dangos formuojamos jonaplauščio dulkinimo technologija, nes ja galima gauti tankias ir gerai atkuriamas optines dangas. Vis dėlto Ta_2O_5 turinčių dangų savybės išlieka jautrios oksidacijos laipsniui, mišinio sudėčiai ir atkaitinimui. [6] Atkaitinimas gali mažinti deguonies vakansijų koncentraciją, keisti sluoksnių tankį, liekamuosius įtempius ir optinę sugertį. Darbe pirmiausia tiriamos vienasluoksnės $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ dangos, o vėliau iš pasirinktų sąlygų suformuojama daugiasluoksnė Brego danga. Vertinamos optinės konstantos, LID metodu išmatuota sugertis, paviršiaus morfologija ir LIDT.

Darbo tikslas yra įvertinti jonaplauščio dulkinimo technologija suformuotų $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ mišinių vienasluoksnių dangų ir jų pagrindu sudarytos daugiasluoksnės optinės dangos taikymo galimybes 355 nm lazerinės spinduliuotės optinėms sistemoms.

Darbo uždaviniai

1. Suformuoti $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ mišinių vienasluoksnės dangas keičiant taikinio padėtį ir deguonies srautą.
2. Iš $R(\lambda)$ ir $T(\lambda)$ spektrų bei jų modelių nustatyti dangų $n(\lambda)$ ir $k(\lambda)$ priklausomybes.
3. Įvertinti atkaitinimo įtaką $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ dangų optinėms konstantoms ir spektriniam atsakui.

4. Ištirti LID metodika išmatuotų 355 nm spinduliuotės sugerties nuostolių priklausomybę nuo mišinio sudėties, deguonies srauto bei atkaitinimo temperatūros bei palyginti su modeliavimo pagal spektrofotometrinius matavimus nustatytomis sugerties nuostolių vertėmis.
5. Suformuoti daugiasluoksnę $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ optinę dangą ir įvertinti jos spektrines, sugerties, morfologines bei lazerinio atsparumo savybes.

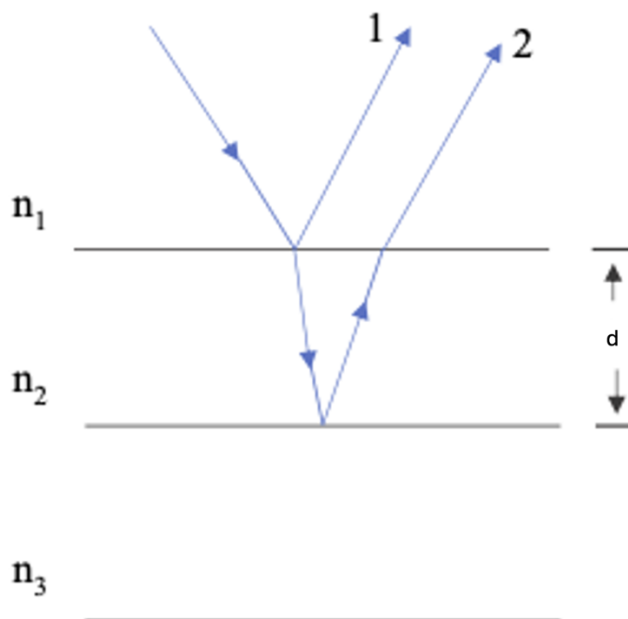
1. Literatūros apžvalga

1.1 Daugiasluoksnės interferencinės dangos

Daugiasluoksnė interferencinė danga yra plonų dielektrinių sluoksnių struktūra. Jos optinį atsaką lemia sluoksnių lūžio rodikliai ir optiniai storiai. Kiekvienoje riboje tarp skirtingų lūžio rodiklių terpių dalis elektromagnetinės bangos atsispindi, o kita dalis sklinda gilyn į dangą. Atsispindėjusios dalinės bangos interferuoja, todėl galutinis atspindžio ir pralaidumo spektras priklauso nuo visos dangos sandaros, o ne nuo vieno sluoksnio savybių. [1, 7] Sluoksnio optinis storis aprašomas lūžio rodiklio ir fizinio storio sandauga nd . Net nedidelis sluoksnio lūžio rodiklio n arba fizinio storio d pokytis keičia bangos fazę ir visos dangos spektrinį atsaką. [1, 7] Tuo pagrįstas didelio atspindžio veidrodžių, antirefleksinių dangų, spektrinių filtrų ir spindulio daliklių (*ang. Beam splitter*) veikimas. [7, 8] Interferencijos pavyzdys aiškiausiai matomas vienasluoksnės dangos paveikslėlyje **1 pav.** Į ploną sluoksnį krintanti banga iš dalies atsispindi nuo viršutinio dangos paviršiaus, o kita jos dalis patenka į sluoksnį, atsispindi nuo apatinės ribos ir grįžta atgal. Tarp dviejų iš dangos sklindančių bangų susidaro fazių skirtumas. Jį lemia optinis kelias sluoksnyje ir fazės šuoliai ribose. Esant beveik statmenam šviesos kritimui, fazių skirtumas užrašomas taip (1):

$$\Delta\phi = \frac{4\pi nd}{\lambda} \quad (1)$$

Čia $\Delta\phi$ yra fazių skirtumas, n yra sluoksnio lūžio rodiklis, d yra fizinis sluoksnio storis, o λ yra bangos ilgis vakuume. Kai fazių skirtumas atitinka konstruktyviosios interferencijos sąlygą, atspindys stiprėja. Destruktyviosios interferencijai atveju atspindys mažėja. Dėl šios priežasties net vienasluoksnė danga gali keisti optinio elemento spektrinį atsaką. [1, 7]

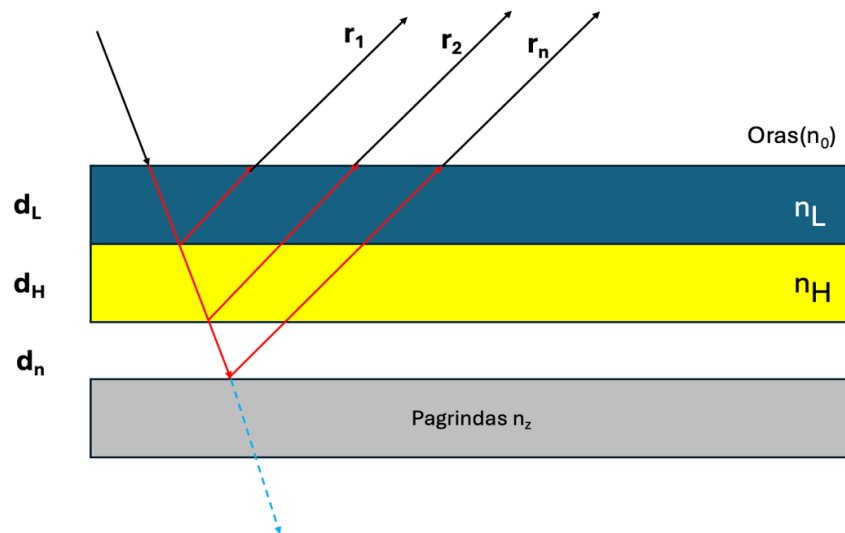


1 pav. Interferencijos principas vienasluoksneje dangoje. Čia n_1 , n_2 ir n_3 yra skirtingų terpių lūžio rodikliai, d yra dangos storis, 1 žymi nuo viršutinės ribos atsispindėjusį pluoštą, 2 žymi nuo apatinės ribos atsispindėjusį pluoštą.

Pereinant prie daugiasluoksnių dangų, dalinių atspindžių skaičius padidėja. Tokios dangos dažniausiai sudaromos periodiškai formuojant didelio ir mažo lūžio rodiklio sluoksnius **2 pav.** Lūžio rodiklių skirtumas tarp gretimų sluoksnių lemia atspindžio stiprumą kiekvienoje riboje. Didesnis lūžio rodiklių skirtumas padidina vienos sluoksnių poros atspindį. Tada aukštas daugiasluoksnių dangų atspindys gali būti pasiekiamas naudojant mažesnę periodų skaičių. [1, 7, 8] Didelio atspindžio dielektrinėse dangose dažnai naudojama ketvirčio bangos optinio storio sąlyga (2):

$$n_i d_i = \frac{\lambda_0}{4} \quad (2)$$

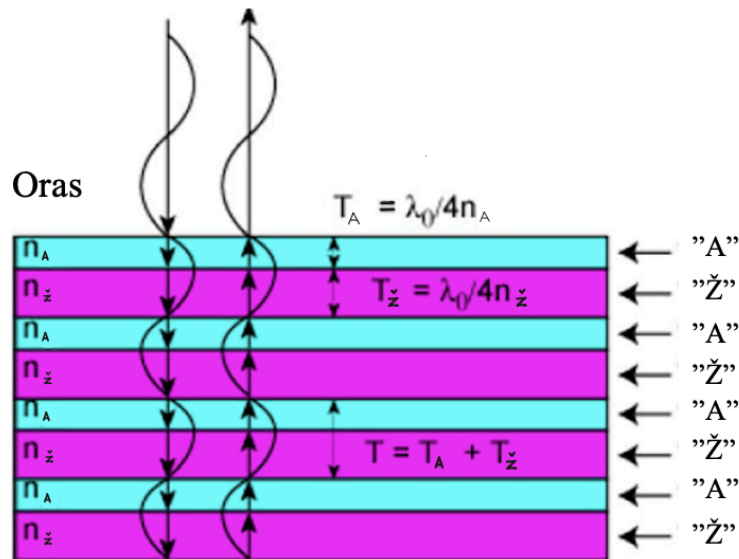
Čia n_i yra i -ojo sluoksnių lūžio rodiklis, d_i yra jo fizinis storis, o λ_0 yra projektinis bangos ilgis vakuume. Kai sluoksnių optinis storis tenkina ketvirčio bangos sąlygą, nuo skirtingų sluoksnių ribų atsispindėjusios bangos interferuoja konstruktyviai. Dėl to didėja bendras dangų atspindys ties tiriamuoju bangos ilgiu. Didinant sluoksnių porų skaičių, atspindys toliau didėja, o pralaidumas didelio atspindžio srityje mažėja. Šis principas sudaro pagrindą didelio atspindžio dielektrinėms dangoms, naudojamoms lazerinėse sistemose.



2 pav. Daugiasluoksnės interferencinės dangos schema. Čia n_L yra mažo lūžio rodiklio sluoksnis, n_H yra didelio lūžio rodiklio sluoksnis, n_z yra pagrindo lūžio rodiklis, d_L ir d_H yra atitinkamų sluoksnių storiai.

Lazerinėse sistemose daugiasluoksnė danga turi užtikrinti reikiamą spektrinį atsaką ir išlaikyti mažus optinius nuostolius. Pagrindiniai optinių nuostolių mechanizmai yra sklaida ir sugertis. Sklaida dažniausiai atsiranda dėl paviršiaus šiurkštumo, sluoksnių netolygumų ir defektų, o sugertis siejama su medžiagos struktūriniais ypatumais, priemaišomis ir defektinėmis būsenomis. [2] Ultravioletiniame ruože šis jautrumas išryškėja, nes trumpesnio bangos ilgio spinduliuotė jautriau reaguoja į defektines būsenas, nevisiškai oksiduotas sritis ir sugerties kraštą [3, 4, 10] Darbe nagrinėjamas 355 nm bangos ilgis atitinka *Nd:YAG* lazerio trečiąją harmoniką. Dėl to dangos turi būti vertinamos ne tik pagal atspindžio ar pralaidumo spektrą, bet ir pagal sugerties nuostolius.

Reikalingas atkreipti daugiasluoksnės dangos parametras yra elektrinio lauko intensyvumo pasiskirstymas sluoksniuose. Dėl daugkartinių atspindžių dangoje susidaro stovinčios bangos laukas **3 pav.** Vienuose sluoksniuose formuojasi elektrinio lauko maksimumai, kituose minimumai. [1, 9] Jeigu elektrinio lauko maksimumas sutampa su labiau sugeriančiu sluoksniu, didėja lokali sugertis, dangos įkaitinimas bei pažaidos tikimybė. Tokiu atveju danga gali būti pažeidžiama net tada, kai vidutinis nuostolių lygis yra mažas. [2, 9]



3 pav. Stovinčios bangos elektrinio lauko intensyvumo pasiskirstymo schema daugiasluoksnėje interferencinėje dangoje. Elektrinio lauko maksimumų padėtis sluoksniuose lemia vietinę energijos sugertį ir šiluminę apkrovą.

Oksidinėms dangoms tai svarbu, nes jų optinius nuostolius lemia ne vien teorinis modelis, bet ir reali sluoksnių sandara. Didelio lūžio rodiklio oksidiniai sluoksniai dažniausiai yra jautresni deguonies stokai, defektinėms būsenoms ir suboksidinių junginių susidarymui. [3, 4] Net ir gerai suprojektuota daugiasluoksnė sistema gali turėti padidintą sugertį, jeigu atskirų sluoksnių medžiaginė kokybė yra nepakankama.

Daugiasluoksnės interferencinės dangos veikimą lemia sluoksnių optiniai storiai, lūžio rodiklių skirtumas, elektrinio lauko pasiskirstymas ir optiniai nuostoliai. Ultravioletiniam ruožui skirtos dangos negali būti vertinamos tik pagal teorinį atspindžio ar pralaidumo profilį. Reikia įvertinti, kaip pasirinktos medžiagos, jų mikrostruktūra ir sluoksnių periodiškumas lemia sugertį bei lazerinį atsparumą. [1, 2, 9, 10]

1.2 Teorinės daugiasluoksnės optinės dangos modelis

Daugiasluoksnės optinės dangos spektrinis atsakas susidaro dėl koherentinių dalinių bangų, kurios atsispindi ir sklinda per visą sluoksnių seką. [1, 7] Kiekviename sluoksnyje banga įgyja fazės poslinkį. Ties sluoksnių ribomis elektromagnetinio lauko ribinės sąlygos apibrėžia krintančios, atsispindėjusios ir praėjusios bangos amplitudžių ryšius. [1, 7] Dėl to galutinis atspindys ir pralaidumas priklauso nuo visos struktūros lūžio rodiklių, sluoksnių storių, jų eiliškumo, kritimo kampo ir poliarizacijos. [7, 8] Tokiam taikymui dažniausiai taikomas charakteristinių matricų metodas. [1, 7] Šiuo metodu kiekvienas sluoksnis aprašomas atskira matrica, o bendras dangos atsakas gaunamas dauginant

sluoksnių matricas dangos sklaidimo kryptimi. [1, 7] Krintanti šviesos banga į dangą sklinda kampu α_0 , kampas j sluoksnyje nustatomas pagal Snelliaus dėsnį (3):

$$n_0 \sin(\alpha_0) = n_j \sin(\alpha_j) \quad (3)$$

Čia n_0 yra į dangą krentančios bangos terpės lūžio rodiklis, n_j yra j sluoksniu lūžio rodiklis, α_0 yra kritimo kampas terpėje, o α_j yra bangos sklaidimo kampas j sluoksnyje. Kadangi banga sklisdama sluoksnyje įgyja fazės prieaugį, įvedamas fazinis storis. j - ojo sluoksniu fazinis storis aprašomas taip (4):

$$\varphi_j = \frac{2\pi}{\lambda} n_j d_j \cos \alpha_j \quad (4)$$

Čia φ_j yra j sluoksniu fazės storis, λ yra bangos ilgis vakuume, o d_j yra fizinis sluoksniu storis. Fazinis storis nusako, kokią fazę elektromagnetinė banga sukaupia sklisdama per konkretų sluoksni. Būtent šis dydis lemia dalinių bangų konstruktyviąją arba destruktiviąją interferenciją. [1] Ribinėms sąlygoms aprašyti naudojamas optinis laidis q_j . Jis priklauso nuo poliarizacijos. s poliarizacijai optinis laidis aprašomas taip (5):

$$q_j = n_j \cos \alpha_j \quad (5)$$

p poliarizacijai optinis laidis užrašomas (6):

$$q_j = \frac{n_j}{\cos \alpha_j} \quad (6)$$

Šios išraiškos rodo, kad s ir p poliarizacijų atspindžio bei pralaidumo savybės skiriasi, ypač tada, kai kritimo kampas nėra artimas nuliui. [1, 7] Kai žinomi φ_j ir q_j , j sluoksniui priskiriama charakteristinė matrica (7):

$$M_j = \begin{pmatrix} \cos \varphi_j & \frac{i}{q_j} \sin \varphi_j & i q_j \sin \varphi_j & \cos \varphi_j \\ \frac{i}{q_j} \sin \varphi_j & \cos \varphi_j & \sin \varphi_j & i q_j \sin \varphi_j \end{pmatrix} \quad (7)$$

Ji aprašo bangos fazės kaupimą sluoksnyje ir elektromagnetinio lauko ryšį ties sluoksniu ribomis. [1] Jeigu danga sudaryta iš m sluoksnių, bendroji dangos matrica gaunama dauginant visų sluoksnių matricas (8):

$$M = M_1 M_2 \cdots M_m \quad (8)$$

Tuomet bendroji matrica užrašoma (9):

$$M = (M_{11} \ M_{12} \ M_{21} \ M_{22}) \quad (9)$$

Iš bendrosios matricos elementų apskaičiuojamas daugiasluoksnės sistemos įėjimo optinis laidis Y . Įvertinamas terpės iš kurios banga krinta į dangą optinis laidis q_0 ir pagrindo optinį laidį q_s (10):

$$Y = \frac{M_{11}q_s + M_{12}}{M_{21}q_s + M_{22}} \quad (10)$$

Žinant Y , amplitudinis atspindžio koeficientas apskaičiuojamas remiantis (11).

$$r = \frac{q_0 - Y}{q_0 + Y} \quad (11)$$

Spektrofotometriniuose matavimuose tiesiogiai vertinami ne amplitudiniai, o intensyviniai dydžiai. Tuomet atspindys apskaičiuojamas pagal atspindžio amplitudinio koeficientą (12):

$$R = |r|^2 \quad (12)$$

Tada pralaidumas apskaičiuojamas iš amplitudinio pralaidumo koeficiento, įvertinant energijos srauto santykį įkrintančioje terpėje ir pagrinde (13):

$$T = \frac{R(q_s)}{R(q_0)} |t|^2 \quad (13)$$

t yra amplitudinis pralaidumo koeficientas, $Re(q_s)$ yra pagrindo optinio laidžio realioji dalis, o $Re(q_0)$ yra įkrintančios terpės optinio laidžio realioji dalis. Idealiame nenuostolingame modelyje energijos tvermė aprašoma lygtimi (14):

$$R + T = 1 \quad (14)$$

Realioms optinėms dangoms ši sąlyga tiksliai nebegalioja, nes atsiranda sugerties ir sklaidos nuostoliai. [1] Tokiu atveju medžiaga turi būti aprašoma kompleksiniu lūžio rodikliu (15):

$$\tilde{n} = n - ik \quad (15)$$

Čia $\tilde{n}$ yra kompleksinis lūžio rodiklis, n yra realioji lūžio rodiklio dalis, o k yra ekstinkcijos koeficientas. Ekstinkcijos koeficientas su sugerties koeficientu α siejamas ryšiu (16):

$$\alpha = \frac{4\pi k}{\lambda}$$

(16)

Čia α yra sugerties koeficientas, k yra ekstinkcijos koeficientas, o λ yra bangos ilgis. Šis ryšys svarbus ultravioletiniame ruože, nes trumpėjant bangos ilgiui net mažos k vertės gali įnešti pastebimą sugerties padidėjimą. [1, 3] Didelio atspindžio dangose dažnai naudojami ketvirčio bangos optinio storio sluoksniai. Tokiu atveju kiekvieno sluoksnio optinis storis projektiniame bangos ilgyje tenkina sąlygą (17):

$$n_j d_j = \frac{\lambda_0}{4}$$

(17)

Čia λ_0 yra projektinis bangos ilgis. Periodinėje didelio ir mažo lūžio rodiklio sluoksnių struktūroje ketvirčio bangos optinio storio sąlyga lemia konstruktyviąją atspindėjusių bangų interferenciją projektiniame bangos ilgyje. [1, 7] Didinant sluoksnių porų skaičių, atspindys didelio atspindžio srityje didėja, o pralaidumas mažėja. Dangos spektrines savybes lemia sluoksnių skaičius, jų optiniai storiai ir lūžio rodiklių skirtumas. Didesnis skirtumas tarp didelio ir mažo lūžio rodiklio medžiagų praplatina didelio atspindžio sritį ir leidžia tą patį atspindį pasiekti naudojant mažiau sluoksnių porų. [7, 8]

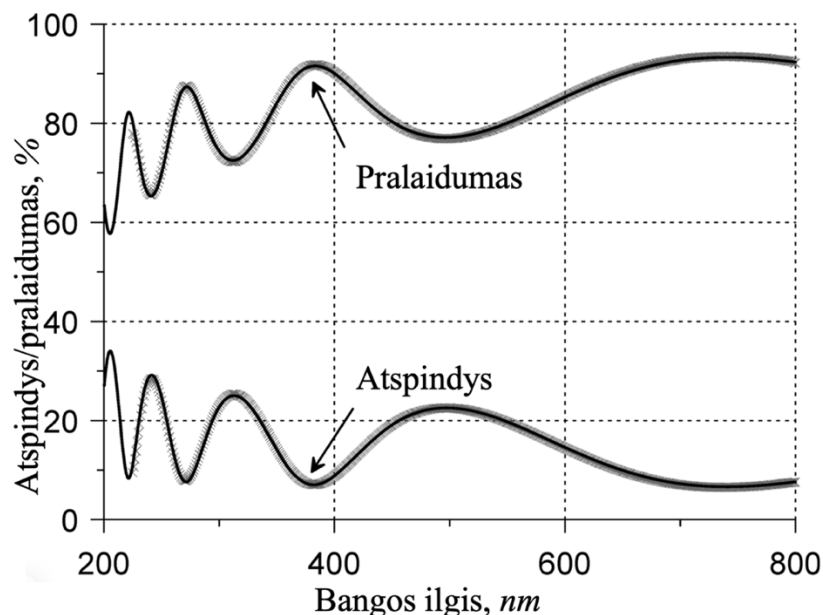
Šis modelis taip pat taikomas eksperimentiniams spektrams analizuoti. Iš išmatuotų atspindžio ir pralaidumo spektrų, naudojant matricinius išvedimus ir pasirinktą dispersijos modelį, galima nustatyti sluoksnių storius, lūžio rodiklio dispersiją ir ekstinkcijos koeficientą [11, 12] Darbe šis metodas naudojamas vienasluoksnių Ta₂O₅/SiO₂ mišinių dangų optinėms konstantoms nustatyti ir jų kitimui po skirtingų formavimo bei atkaitinimo sąlygų įvertinti.

1.3 Naudojamos medžiagos optinėse dangose

Optinių dangų medžiagų parinkimas yra kompromisas tarp dangos optinių, terminių ir mechaninių parametrų suderinamumo su pasirinkta dengimo technologija. Vien didelis lūžio rodiklis dar negarantuoja mažų optinių nuostolių. Porėtumas, nuokrypis nuo stochiometrinės sudėties, deguonies vakansijos, priemaišos ir struktūriniai defektai gali didinti sluoksnio sugertį ir sklaidą. [1, 2] Tai ypač svarbu UV ruože, nes trumpųjų bangų srityje deguonies kiekiui, defektinėms būsenoms ir lokaliai mikrostruktūrai. savosios sugerties krašto ekstinkcijos koeficientas tampa jautrus deguonies kiekiui ir defektinėms būsenoms. [3, 4] Šių parametrų vertinimui dažniausiai naudojami atspindžio ir pralaidumo spektrai, kurie pritaikomi pasirinktam optiniame modelyje **6 pav.**

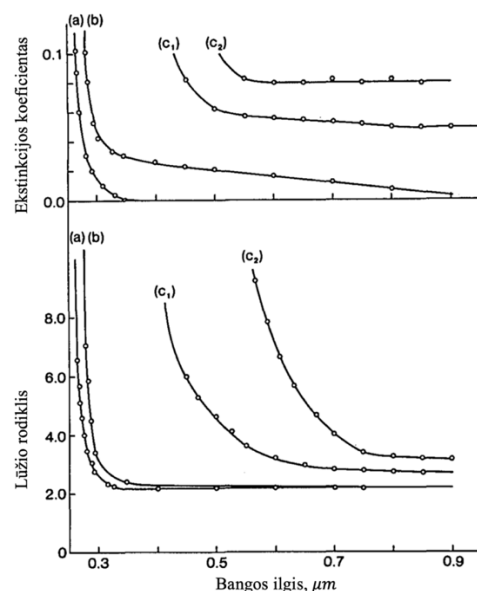
Daugiasluoksnėse interferencinėse dangose medžiagos dažniausiai skirstomos pagal jų funkciją sluoksnių sekoje. Mažo lūžio rodiklio sluoksniams dažniausiai naudojamas SiO₂, o didelio lūžio rodiklio sluoksniams pasirenkami Ta₂O₅, HfO₂, Nb₂O₅ arba TiO₂. Gilesniame ultravioletiniame ruože naudojamos

ir fluoridinės medžiagos kaip MgF_2 , AlF_3 ir LiF , tačiau šiame darbe nagrinėjama oksidinė Ta_2O_5 ir SiO_2 danga. Ši medžiagų pora tinka 355 nm ruožui ir yra suderinama su jonapluoščio dulkinimo technologija.



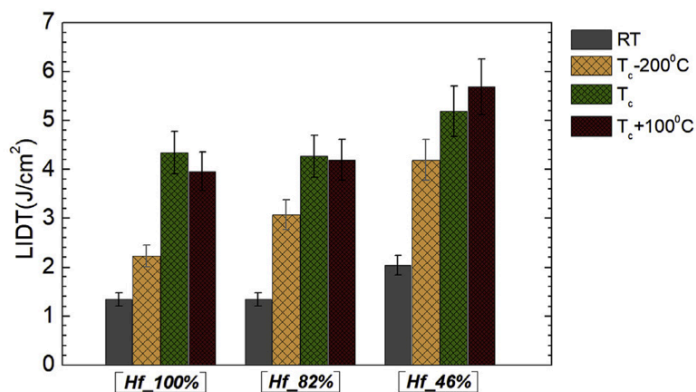
6 pav. HfO_2 sluoksnio spektrinio modeliavimo pavyzdys. Paveiksle parodytas išmatuotų atspindžio ir pralaidumo spektrų pritaikymas modeliuojant oksidinės plėvelės optinį atsaką. [3]

SiO_2 yra plačiai naudojama mažo lūžio rodiklio oksidinė medžiaga optinėse dangose. Ji pasižymi plačia draustine juosta, maža sugertimi ir geru cheminiu stabilumu. [1, 3] Dėl šių savybių SiO_2 naudojamas kaip mažo lūžio rodiklio sluoksnis didelio atspindžio veidrodžiuose ir antirefleksinėse dangose. [1, 7] Vis dėlto jo optinės savybės priklauso nuo nusodinimo technologijos, sluoksnio tankio ir terminio apdorojimo. [3, 10] Ta_2O_5 yra viena svarbiausių didelio lūžio rodiklio oksidinių medžiagų. [1, 3] Kartu su SiO_2 ji sudaro didelį lūžio rodiklių skirtumą, todėl ši medžiagų pora plačiai naudojama interferencinėse dangose. [1, 7] H. Demiryont straipsnyje, kuriame jonapluoščio dulkinimu suformuotiems stochiometriniais tantalio oksido sluoksniams nustatė apie 2,18 lūžio rodiklį ties 550 nm ir apie 4,3 eV optinį draustinės juostos tarpą. [4] Šios vertės yra matomojo ruožo literatūrinis atskaitos taškas, rodantis Ta_2O_5 kaip didelio lūžio rodiklio oksidinę medžiagą. Darbe svarbesnis 355 nm ultravioletinis ruožas, kuriame Ta_2O_5 optinis atsakas tampa jautresnis oksidacijos pilnumui, suboksidinėms būsenoms ir defektingiems lygmenims draustinėje juostoje [4, 17] Oksidacijos būsenos įtaka tantalio oksido optinėms konstantoms parodyta **7 pav.**



7 pav. Tantalio oksido sluoksnių lūžio rodiklio ir ekstinkcijos koeficiento priklausomybė nuo bangos ilgio ir oksidacijos būsenos pagal H. Demiryont. [4] Kreivė (a) atitinka stochiometrinį Ta_2O_5 sluoksnį, (b) atitinka suboksidinį tantalio oksido sluoksnį, o (c₁) ir (c₂) atitinka deguonies stokojančius cermet tipo sluoksnius, kuriuose yra tantalio oksido ir metališko tantalio fazių. Deguonies trūkumas didina ekstinkcijos koeficientą ir keičia lūžio rodiklį, o tai trumpųjų bangų ruože didina sugerties nuostolius.

HfO_2 taip pat naudojamas kaip didelio lūžio rodiklio medžiaga ultravioletinėms dangoms, nes jo optinis draustinės juostos plotis yra didesnis negu Ta_2O_5 . [10, 13] A. Abromavičius tyrime parodė, kad $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$ mišinių pagrindu sudarytuose UV veidrodžiuose atkaitinimas gali padidinti lazeriu indukuotos pažaidos slenkstį daugiau kaip 2,5 karto, o 46 % HfO_2 ir 54 % SiO_2 mišinio veidrodžiui ties 266 nm buvo gauta $5,5 \pm 0,6 \text{ J/cm}^2$. [13] Šis rezultatas rodo, kad oksidinių mišinių sudėtis ir terminis apdorojimas gali būti svarbūs UV dangų lazeriniam atsparumui **8 pav.**



8 pav. HfO_2 ir $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$ UV veidrodžių lazeriu indukuotos pažaidos slenkščio pokytis po atkaitinimo pagal G. Abromavičiaus straipsnyje pateiktą informaciją. [13] RT žymi dangą po nusodinimo be atkaitinimo. T_c žymi konkrečios dangos kristalizacijos pradžios temperatūrą. Ši temperatūra skiriasi priklausomai nuo HfO_2 ir SiO_2

mišinio sudėties. $T_c - 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ir $T_c + 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ žymi atkaitinimą atitinkamai $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ žemiau ir $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ aukščiau kristalizacijos pradžios temperatūros. Atkaitinimas padidina LIDT vertes, o Hf₄₆ % mišinio danga pasiekia didžiausią lazerinį atsparumą ties 266 nm .

TiO₂ pasižymi dideliu lūžio rodikliu, tačiau ultravioletinėms aukštos galios dangoms jis mažiau palankus. TiO₂ taikymą 355 nm mažos sugerties dangose riboja didesnė trumpųjų bangų sugertis, galimas kristalizavimasis atkaitinimo metu ir mechaninių įtempių sudarymas. [1, 14]

Oksidinių medžiagų tinkamumą ultravioletiniam ruožui dažniausiai riboja keturi veiksniai. Pirmas veiksnys yra stoichiometrija, nes deguonies trūkumas Ta₂O₅ sluoksniuose didina defektinių būsenų indėlį į sugertį. [4] Antras veiksnys yra sluoksnio tankis ir porėtumas, nes mažesnio tankio struktūroje lengviau susidaro priemaišų ir lokalių sudėties netolygumų. [1, 6] Trečias veiksnys yra liekamieji įtempiai, kurie gali keisti dangos stabilumą ir paviršiaus morfologiją. [6, 10] Ketvirtas veiksnys yra kristalizacija, nes kristalitų augimas gali didinti paviršiaus šiurkštumą ir sklaidą UV srityje. [10, 13] Dėl šių priežasčių tyrime pagrindinė analizė sutelkiama į Ta₂O₅ ir SiO₂ porą, kurioje galima keisti optinį kontrastą, sugertį, mikrostruktūrą ir lazerinį atsparumą. [5, 15] Ta₂O₅/SiO₂ mišinių tyrimuose parodyta, kad mišinio sudėtis veikia įtempius ir lazeriu indukuotos pažaidos slenkstį. [15] Ta₂O₅/SiO₂ dangų tyrimai 355 nm ruože parodė, kad didėjant Ta₂O₅ kiekiui daugkartinio impulsinio apšvitinimo metu gali stiprėti sugerties augimas ir mažėti dangos atsparumas. [17]

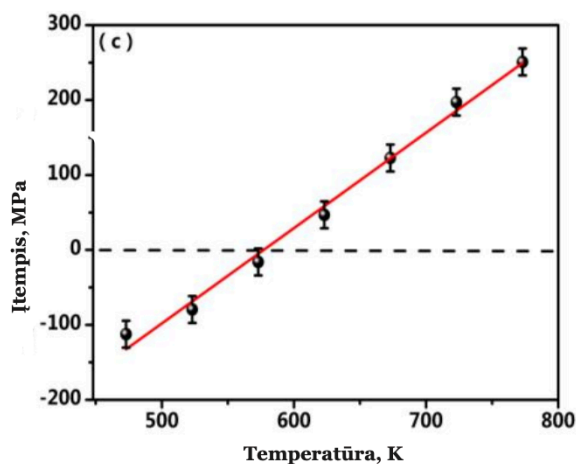
Naujausi tyrimai rodo, kad Ta₂O₅/SiO₂ galima būti sukuriamas ne tik kaip paprastas mišrus sluoksnis, bet ir kaip kvantuotųjų nanolaminatų pagrindu formuojama medžiaga. [19, 20] Magnetroniniu dulkinimu suformuoti Ta₂O₅/SiO₂ kvantuotieji nanolaminatai nagrinėti kaip optinės metamedžiagos, kurių savybės valdomos nanolaminato periodu ir medžiagų seka. [19] 2025 m. paskelbtame darbe parodyta, kad Ta₂O₅/SiO₂ kvantuotieji nanolaminatai gali būti naudojami UV dangoms, įskaitant antirefleksines dangas $266 - 350\text{ nm}$ ruože. [20] Tai tiesiogiai siejasi su šio darbo kryptimi, nes rodo, kad Ta₂O₅/SiO₂ mišiniu dengta optika išlieka aktuali naujoms UV dangų technologijoms. [20]

Optinių dangų medžiagos negalima vertinti atskirai nuo nusodinimo proceso. Net nominaliai tos pačios sudėties sluoksniai, suformuoti skirtingomis technologinėmis sąlygomis, gali skirtis lūžio rodikliu, ekstinkcijos koeficientu, įtempių būseną ir atsparumu lazerinei spinduliuotei. [3, 4, 6, 13] Tyrime Ta₂O₅/SiO₂ dangos vertinamos pagal kelis tarpusavyje susijusius parametrus. Tai yra n , k , sugerties nuostoliai, paviršiaus morfologija ir atsparumas 355 nm lazerinei spinduliuotei.

1.4 Optinių dangų atkaitinimas

Optinių dangų atkaitinimas yra po nusodinimo taikomas terminis apdorojimas. Galutinės dangos savybės priklauso ne tik nuo nusodinimo technologijos, bet ir nuo pasirinkto atkaitinimo režimo.

Atkaitinimo metu siekiama keisti sluoksnių struktūrinę būseną, mažinti defektų įtaką ir gerinti optines bei mechanines savybes. [21, 22] Nusodintos dangos dažnai susidaro ne termodinaminės pusiausvyros sąlygomis. Jose lieka įtempiai, metastabilios cheminės būsenos, deguonies stoka ir lokalūs tankio nevienalytiškumai. [21, 23, 24] Atkaitinimas ypač svarbus jonapluoščio dulkinimo būdu formuotoms dangoms. Technika leidžia gauti tankius ir mažų optinių nuostolių sluoksnius, tačiau tokie sluoksniai dažnai pasižymi gniuždomaisiais įtempiais. [21, 24, 32] Dideli įtempiai keičia optinio dangos formą, iškraipo bangos frontą ir mažina daugiasluoksnės dangos ilgaamžiškumą. [23, 32] Ta₂O₅ dangų tyrime parodyta, kad neatkaitintos dvigubo jonapluoščio dulkinimo, *angl.* dual ion beam sputtering, DIBS, dangos turėjo apie 160 MPa įtempius, o didėjant atkaitinimo temperatūrai įtempiai mažėjo beveik tiesiškai ir apie 591 K pasiekė artimą nuliui vertę **9 pav.** [21] Terminis apdorojimas gali būti naudojamas optiniams nuostoliams mažinti, pavyzdžiui, mažinant deguonies vakansijų ir defektyvių būsenų indėlį į sugertį, ir mechaninei dangos būsenai reguliuoti, keičiant liekamųjų įtempių dydį bei ženklą. [21, 27]



9 pav. Ta₂O₅ monosluoksnių įtempio priklausomybė nuo atkaitinimo temperatūros. Didėjant atkaitinimo temperatūrai, gniuždomasis įtempis mažėja, o apie 591 K pasiekama artima nulinio įtempio būsena. [21]

Atkaitinimas mažina optinius nuostolius tada, kai sumažėja defektyvių būsenų tankis draustinėje juostoje ir pagerėja oksidacijos pilnumas. Oksidinėse dangose sugertį lemia ne tik fundamentali juostinė sandara, bet ir defektiniai lygmenys, susiję su deguonies vakansijomis, suboksidinėmis būsenomis, priemaišomis ir amorfinio tinklo netvarka. [4, 16, 21, 25] Kaitinant didėja atomų judrumas, dėl to sluoksnyje vyksta struktūros relaksacija, mažėja metastabilių būsenų kiekis ir gerėja oksidacijos pilnumas. [21, 22, 25] Ta₂O₅ sluoksniuose atkaitinimas mažina ekstinkcijos koeficientą ir sugertį, tačiau kartu keičia lūžio rodiklį dėl sluoksnių tankio pokyčio. [21, 25, 26] Atkaitinimo poveikis priklauso nuo temperatūros. Iki tam tikros ribos vyrauja įtempių relaksacija, defektų mažėjimas ir sluoksnių tankio pokyčiai. Aukštesnėje temperatūroje prasideda kristalizacija, faziniai virsmai, kristalitų augimas,

tarpsluoksnninė difuzija ir paviršiaus šiurkštumo didėjimas. [21, 22, 28, 30] Ta_2O_5 atveju amorfinė struktūra išlieka stabilesnė, kai atkaitinimo temperatūra yra mažesnė nei apytiksliai 923 K, nes aukštesnėje temperatūroje XRD duomenyse atsiranda kristalinės fazės požymių. [21] Atkaitinimo temperatūra turi būti parenkama pagal medžiagą, sluoksnių sudėtį ir formavimo technologiją. [22, 28, 29, 30] Atkaitinimas taip pat veikia lazeriu indukuotos pažaidos slenkstį. LIDT lemia ne vien draustinės juostos tarpas ar elektrinio lauko pasiskirstymas sluoksniuose. Jam svarbi sugertis, defektų pasiskirstymas, šiluminės savybės, įtempių būseną, paviršiaus šiurkštumas ir sluoksnių ribų kokybė. [9, 13, 22, 29] Dėl to terminis apdorojimas gerina lazerinį atsparumą tik tada, kai defektų ir sugerties mažėjimas yra svarbesnis už kristalizacijos, šiurkštumo augimo arba struktūrinio pažeidimo poveikį. [21, 22, 30]

Rašto darbe atkaitinimas siejamas su Ta_2O_5/SiO_2 dangų sugerties nuostoliais 355 nm ruože. Šie nuostoliai gali priklausyti nuo deguonies stokos, defektinių būsenų, sluoksnių tankio ir įtempių. [4, 16, 21] Jei po atkaitinimo mažėja ekstinkcijos koeficientas arba tiesiogiai išmatuota sugertis ties 355 nm, tai rodo mažesnę defektinių būsenų indėlį, geresnę oksidaciją arba struktūros relaksaciją. [21, 25] Jei kartu didėja šiurkštumas arba atsiranda kristalizacijos požymių, optinės savybės gali blogėti dėl sklaidos arba struktūrinių pokyčių. [21, 22, 30]

1.5 Tantalo pentoksido (Ta_2O_5) ir silicio oksido (SiO_2) mišinių optinės dangos

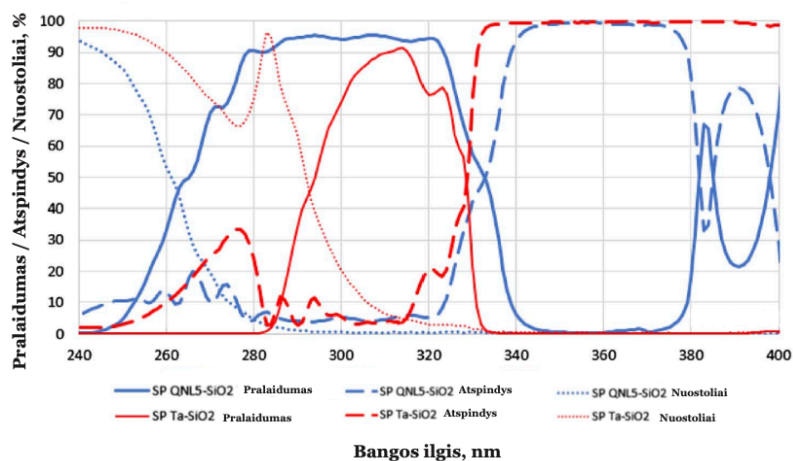
Ta_2O_5/SiO_2 mišiniai optinėse dangose naudojami tada, kai reikia suderinti didesnę lūžio rodiklį ir mažesnius optinius nuostolius ultravioletiniame ruože. Grynas Ta_2O_5 pasižymi dideliu lūžio rodikliu, tačiau trumpųjų bangų srityje jo optinis atsakas jautrus deguonies stokai, suboksidinėms būsenoms ir ekstinkcijos koeficiento didėjimui. [4] SiO_2 turi mažesnę lūžio rodiklį, bet pasižymi plačiu optiniu draustinės juostos tarpu, maža sugertimi ir geru cheminiu stabilumu. [1, 3] Ta_2O_5/SiO_2 mišiniai leidžia turėti kompromisą tarp lūžio rodiklių kontrasto ir sugerties nuostolių. [5, 36] Mišinio idėja remiasi tuo, kad optinis atsakas keičiamas ne tik sluoksnių storio, bet ir pačios medžiagos sudėtimi. [36, 37] Didėjant SiO_2 daliai, efektyvus lūžio rodiklis mažėja, tačiau kartu gali didėti optinis draustinės juostos tarpas ir mažėti trumpųjų bangų sugertis. [36, 38] Tai aktualu 355 nm ruože, nes grynas Ta_2O_5 suteikia didelį optinį kontrastą, bet jo sugertis gali tapti ribojančiu veiksniu. [4, 17] Ta_2O_5/SiO_2 mišrios dangos gali būti formuojamos keliais būdais. Vienu atveju naudojamas kompozitinis arba padalintas taikiny, kai jonapluostis dulkinimo metu šalina abi medžiagų sritis. [36] Kitu atveju taikomas ko-dulkinimas. [43] Dar viena kryptis yra labai trumpaperiodžiai nanolaminatai. Juose Ta_2O_5 ir SiO_2 sluoksnių periodas yra daug mažesnis už šviesos bangos ilgį, o optiškai tokia struktūra artėja prie efektyviosios terpės. [19, 20]

Trumpųjų bangų ruože svarbus ne tik lūžio rodiklis n , bet ir ekstinkcijos koeficientas k . Deguonies trūkumas Ta_2O_5 sluoksniuose siejamas su suboksidinėmis būsenomis ir defektine sugerties uodega. [4] Įterpus SiO_2 , sumažėja efektyvus tantalio oksido kiekis ir keičiasi amorfinio tinklo sandara, o tai gali mažinti defektinės sugerties indėlį. [15, 17] Tačiau didėjant SiO_2 daliai mažėja lūžio rodiklių kontrastas, dėl šios priežasties, daugiasluoksnėje dangoje tam pačiam atspindžiui gali reikėti daugiau sluoksnių arba didesnio bendro dangos storio. [7, 36]

$\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ mišinių svarba matoma ir per mechanines savybes. Jonapluoščiu formuotų mišinių tyrimuose parodyta, kad mišinio sudėtis veikia liekamuosius įtempius ir lazeriu indukuotos pažaidos slenkstį. [15] Rugatinių filtrų tyrimai taip pat parodė, kad $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ kompozitiniai sluoksniai gali būti naudojami laipsniškai kintančio lūžio rodiklio dangoms, tačiau jų mechaninė būsena turi būti vertinama kartu su optiniu dizainu. [42] Tai svarbu, nes 355 nm dangoms nepakanka vien mažo k . Danga taip pat turi išlaikyti formą, sukibimą ir paviršiaus kokybę.

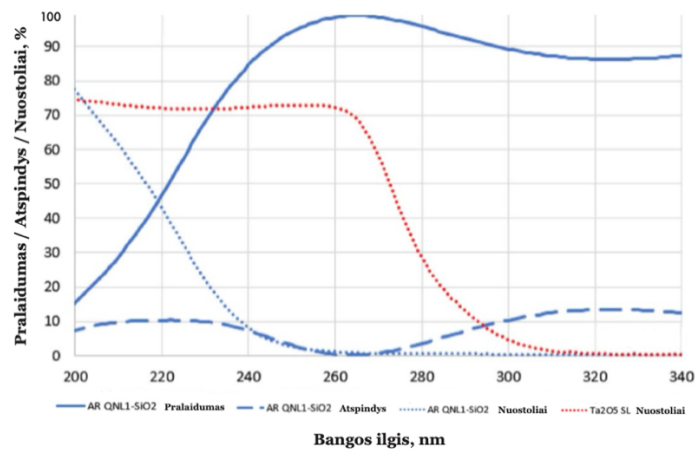
Lazerinio atsparumo požiūriu $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ mišiniai aktualūs dėl defektinės sugerties ir pažaidos kaupimosi. Tyrimuose ties 355 nm parodyta, kad $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ dangų LIDT gali mažėti didėjant impulsų skaičiui, o šis mažėjimas siejamas su sugerties augimu ir defektyvių būsenų aktyvacija. [17] Tai reiškia, kad mišinio sudėtis veikia ne tik pradinį ekstinkcijos koeficientą, bet ir dangos elgseną ilgalaikio apšvitinimo metu.

Naujausia $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ mišinių kryptis yra kvantuotieji nanolaminatai. [19, 20] Tokiose struktūrose efektyvus lūžio rodiklis daugiausia priklauso nuo Ta_2O_5 ir SiO_2 tūrinio santykio, o sugerties krašto padėtis gali būti keičiama per individualaus Ta_2O_5 sluoksnio storį **10 pav.**



10 pav. $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ kvantuotųjų nanolaminatų sugerties krašto poslinkis. Mažėjant individualaus Ta_2O_5 sluoksnio storiui, sugerties kraštas pasislenka į trumpesnių bangų sritį, o ilgesnių bangų ruože lūžio rodiklis išlieka beveik pastovus. [20]

Kvantuotųjų nanolaminatų tyrimai rodo, kad Ta_2O_5 ir SiO_2 derinimas gali sumažinti UV ruožo optinius nuostolius. Šis principas aktualus ir čia, nes SiO_2 įterpimas į Ta_2O_5 pagrindą formuojamas dangas turėtų mažinti sugertį trumpabangėje srityje. Literatūroje parodyta, kad $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ kvantuotojo nanolaminato antirefleksinė danga ties 266 nm pasiekia didesnę kaip 99 % pralaidumą, kai atspindys yra apie 0,2 %, o apskaičiuoti nuostoliai yra artimi nuliui. Tuo pačiu bangos ilgiu Ta_2O_5 vienasluoksnė danga išlaiko didelius optinius nuostolius **11 pav.** [20]



11 pav. $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ kvantuotojo nanolaminato ir Ta_2O_5 vienasluoksnės dangos optiniai nuostoliai UV ruože. Mėlynos kreivės rodo $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ nanolaminato antirefleksinės dangos pralaidumą, atspindį ir nuostolius, o raudona punktyrinė kreivė rodo Ta_2O_5 vienasluoksnės dangos nuostolius. $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ nanolaminato nuostoliai ties 266 nm yra labai maži, o gryno Ta_2O_5 vienasluoksnė danga bangų ruože dar pasižymi didele sugertimi [20].

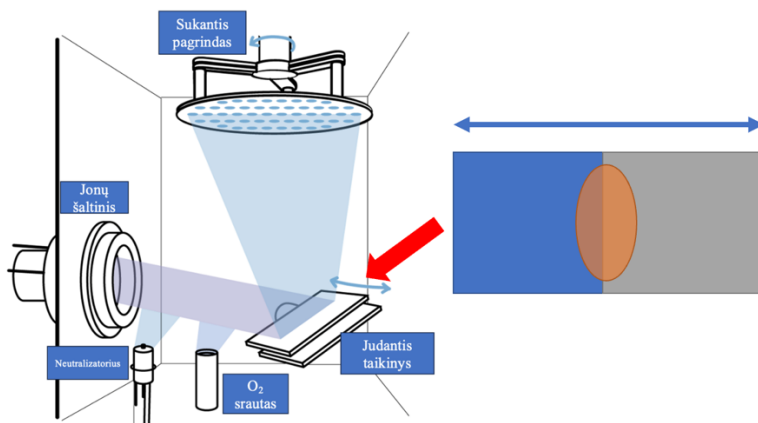
Tyrimė $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ mišiniai nagrinėjami kaip medžiagų pora, kurios optinės savybės keičiamos per mišinio frakciją, deguonies srautą ir atkaitinimą. Analizė leidžia įvertinti, ar SiO_2 įterpimas sumažina 355 nm sugerties nuostolius tiek, kad būtų išlaikytas praktinis dangos tinkamumas UV optinėms sistemoms. [17, 20, 35] Toliau vertinamos ne tik spektrinės kreivės, bet ir tiesiogiai išmatuota sugertis, paviršiaus morfologija ir daugiasluoksnės dangos atsparumas lazerinei spinduliui.

2. Metodika

2.1 Jonapluoščio dulkinimo įrenginio aprašymas

Jonapluoščio dulkinimas yra fizikinio garinimo technologija, kurioje plonas sluoksnis formuojamas kryptingo jonų pluošto sąveika su taikiniu. Jonų generavimas, jų pagreitinimas, taikinio bombardavimas ir sluoksnio augimas ant pagrindo vyksta erdviškai atskirtose srityse. [6] Toks proceso atskyrimas leidžia tiksliau valdyti sluoksnį formuojančių dalelių energiją, srautą ir kampinį pasiskirstymą. [6, 50] Jonapluoščio dulkinimas taikomas tada, kai reikia tankių ir gerai atkuriamų optinių dangų. [6, 35, 50]

Pagrindiniai procesų kameros mazgai: pirminis jonų šaltinis, taikiny, pagrindo laikiklis, proceso dujų tiekimo sistema, neutralizatorius ir sluoksnio augimo stebėjimo įranga **12 pav.** [51] Jonų šaltinyje generuojamas ir pagreitinamas inertinių dujų jonų pluoštas, kuris nukreipiamas į taikinį. Bombarduojant taikinį iš jo išmuštos dalelės vakuume sklinda pagrindo link ir sudaro ploną sluoksnį. Taikinio padėtis keičiama jonų šaltinio atžvilgiu.



12 pav. Jonapluoščio dulkinimo IBS schema. Jonų šaltinis generuoja ir pagreitina Ar^+ pluoštą, kuris bombarduoja taikinį. Iš taikinio išmuštos dalelės nusėda ant besisukančio pagrindo padėklo. Į kamerą papildomai tiekiamas O_2 , reikalingas oksidacijos režimui valdyti. Neutralizatorius mažina krūvio kaupimąsi proceso metu. [51] Šalia pavaizduota iliustracija, kurioje parodyta, kaip taikiny juda šaltinio atžvilgiu.

Oksidinių dangų formavimui į procesų kamerą papildomai tiekiamas deguonis. Deguonies srautas yra vienas svarbiausių jonapluoščio dulkinimo parametru, nes jis lemia augančio sluoksnio oksidacijos lygį. Tantalo oksido sluoksnių tyrimai rodo, kad mažėjant deguonies kiekiui sluoksnis pereina iš stoichiometrinio Ta_2O_5 į suboksidinę būseną, o trumpųjų bangų ruože didėja ekstinkcijos koeficientas. [4] Optiniai pagrindai įrenginyje tvirtinami ant besisukančio laikiklio. Sukimas reikalingas vienodesniam sluoksnio storio pasiskirstymui per bandinio paviršių. Tai aktualu interferencinėms dangoms, nes jų spektrinį atsaką lemia optinis sluoksnio storis. Nedideli storio nuokrypiai keičia atspindžio ir pralaidumo spektrus. Sluoksnio homogeniškumas yra būtina sąlyga tolesniam optinių konstantų modeliavimui. [11, 12]

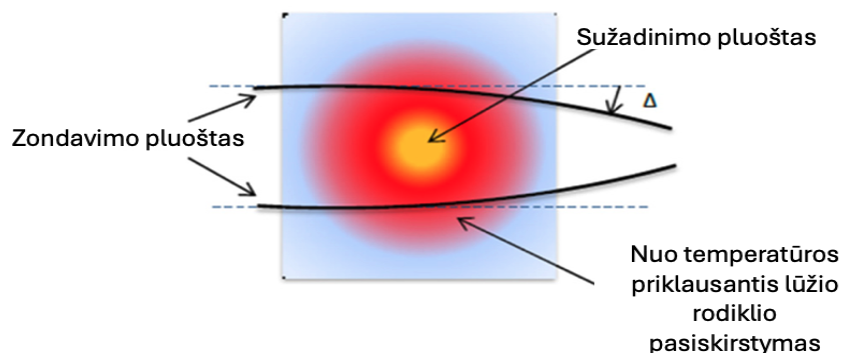
IBS sistemoje dujos tiekiamos per masės srauto valdiklius. Atskirai reguliuojamas argono ir deguonies tiekimas. Taip pat sistemoje naudojamas neutralizatorius, mažinantis krūvio kaupimąsi pluošto ir dangos formavimo metu. Sluoksnio augimas gali būti stebimas kvarciniu storio jutikliu ir optinio monitoringo sistema. Optinis monitoringas yra svarbi proceso dalis daugiasluoksnėms dangoms, nes leidžia sluoksnio formavimą sieti ne tik su nusodinimo laiku, bet ir su realiu optiniu atsaku. [52] Jonapluoščio dulkinimo technologija turi ir ribojimų. Ji paprastai pasižymi mažesniu nusodinimo greičiu

negu magnetroninis dulkinimas arba garinimas. [6, 35] Didinant dengiamą plotą tenka spręsti našumo ir sluoksnio kokybės klausimus. [35] Sakiew straipsnyje teigia, kad naudojant sunkesnius jonus galima didinti Ta₂O₅ nusodinimo našumą, tačiau kai kuriais atvejais kartu gali didėti ekstinkcijos koeficientas. [35] Proceso našumas negali būti vertinamas atskirai nuo optinių nuostolių. [35, 53]

Ta₂O₅/SiO₂ mišinių dangoms jonapluoščio dulkinimas yra tinkamas, nes leidžia valdyti sluoksnio sudėtį, deguonies tiekimą ir optinį storį. [6, 35, 51] Didėjant Ta₂O₅ daliai, didėja efektyvus lūžio rodiklis, tačiau kartu didėja jautrumas oksidacijos režimui ir defektinių būsenų indėliui ultravioletiniame ruože. [4, 15, 17] Darbe jonapluoščio dulkinimas naudojamas kaip kontroliuojamas būdas formuoti skirtingos sudėties Ta₂O₅/SiO₂ dangas ir tirti jų sugerties nuostolius ties 355 nm.

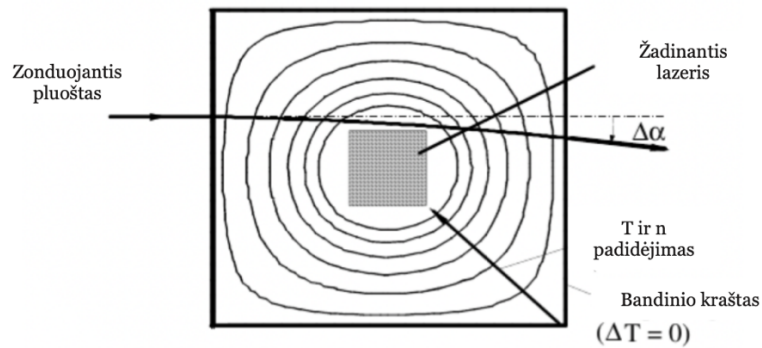
2.2 LID metodikos aprašymas

LID, angl. *laser induced deflection*, yra fototerminė sužadinimo ir zondavimo metodika, skirta labai mažai sugerčiai optinėse medžiagose ir plonosiose dangose matuoti. Metodo principas pagrįstas tuo, kad sugerta sužadinimo spinduliuotės dalis virsta šiluma ir mėginyje sukuria temperatūros pasiskirstymą **13 pav.** Dėl temperatūrinės lūžio rodiklio priklausomybės susidaro lūžio rodiklio gradientas, kuris veikia kaip šiluminis lęšis. Per šią sritį praeinantis zondavimo pluoštas nukrypsta nuo pradinės sklaidimo krypties, o nukrypimo dydis susiejamas su sugerta vidutine galia. [55, 56] Ši metodika yra viena jautriausių tiesioginės sugerties matavimo metodikų tada, kai įprasti pralaidumo ir atspindžio matavimai nebeleidžia patikimai atskirti sugerties nuo sklaidos. [57]



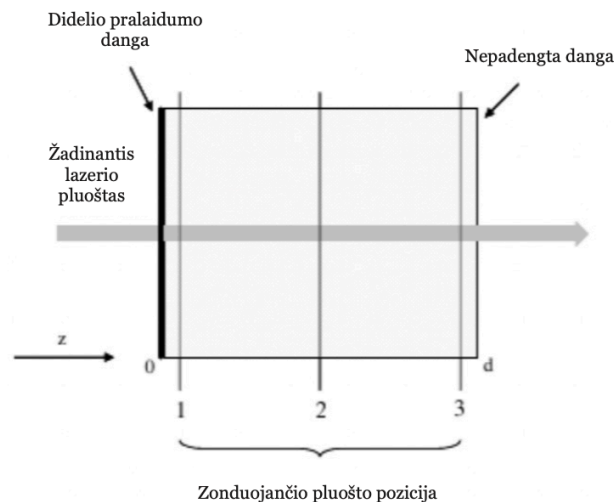
13 pav. LID matavimo schema su dviem zondavimo pluoštais. Sužadinimo pluoštas apšviečia mėginį, o zondavimo pluoštai sklinda per temperatūros ir lūžio rodiklio gradiento sritį. Zondavimo pluoštų nuokrypis registruojamas padėčiai jautriais detektoriais. [56]

Esminis LID metodo bruožas yra skersinė matavimo geometrija. Sužadinimo pluoštas sukuria šiluminį lauką mėginyje, o zondavimo pluoštas praeina per lūžio rodiklio gradiento sritį **14 pav.** [55, 56] Tokiu atveju matuojamas diferencinis signalas sumažinamas zondavimo lazerio padėties nestabilumo ir kitų bendrųjų triukšmo šaltinių įtaka. [56]



14 pav. LID principas su temperatūros ir lūžio rodiklio izolinijomis. Sužadinimo pluošto sugertis sukuria temperatūros pasiskirstymą mėginyje. Dėl temperatūrinės lūžio rodiklio priklausomybės susidaro lūžio rodiklio gradientas, kuris nukreipia zondavimo pluoštą. [56]

LID signalas dažniausiai vertinamas pagal zondavimo pluošto padėties kitimą laike, kol susidaro stacionarus arba beveik stacionarus šiluminis pasiskirstymas **15 pav.** [55, 56] Metodika jautri sugertai vidutinei galiai. Gali būti taikoma tiek nuolatinio, tiek impulsinio lazerio režimu. Jei medžiagoje pasireiškia netiesinė sugertis, defektų arba spalvinių centrų susidarymas, LID signalas turi būti sekamas ir skaičiuojamas atidžiai. [58, 60] Kadangi registruojama tik ta sugertos fotonų energijos dalis, kuri virsta šiluma. Jei dalis energijos išspinduliuojama fluorescencijos ar kitais nešiluminiais būdais, fototerminiškai nustatyta sugertis gali būti mažesnė už tikrąją optinę sugertį. [58] LID metodika yra ypač naudinga skaidriems bandiniams ir pralaidžioms dangoms tirti. Keičiant zondavimo pluošto padėtį išilgai tiriamos dangos, galima atskirti skirtingus sugerties šaltinius tame pačiame bandinyje.



15 pav. Zondavimo pluošto padėčių parinkimas pralaidžiai danga. Skirtingos zondavimo pluošto padėties bandinyje leidžia atskirti dangos, pagrindo tūrio ir nepadengto paviršiaus sugerties indėlius. [55]

Sugerties koeficientas siejamas su Bouguer ir Lamberto dėsniais (18):

$$I = I_0 \exp(-\alpha L)$$

(18)

Čia I_0 yra įeinančios spinduliuotės intensyvumas, I yra po sklaidimo likęs intensyvumas, α yra sugerties koeficientas, o L yra optinio kelio ilgis medžiagoje. Mažų nuostolių atveju, kai $\alpha L \ll 1$, sugertoji dalis gali būti aproksimuojama tiesine priklausomybe (19):

$$A \approx \alpha L$$

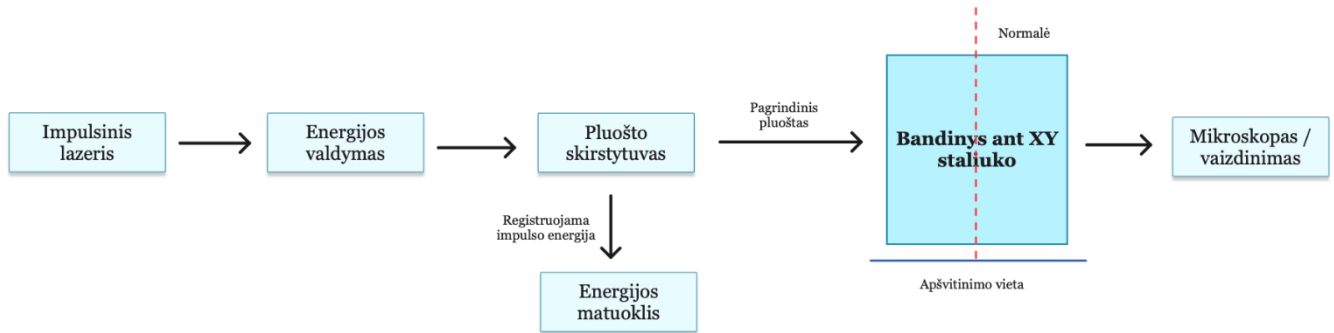
(19)

LID metodika nematuoja α tiesiogiai. Pirmiausia įvertinama sugerties sukeltas fototerminis signalas, o sugerties koeficientas arba sugerties dalis apskaičiuojama tada, kai žinoma bandinio optinis kelias ir kalibracijos koeficientas. [55, 56] Trumpųjų bangų ruože LID metodika ypač svarbi, nes net maža defektinė sugertis gali lemti dangos kaitimą, bangos fronto iškraipymą ir mažesnį lazeriu indukuotos pažaidos slenkstį. [57, 60] LID dažnai naudojama kartu su spektrofotometrijos ir elipsometrijos matavimais. Spektriniai metodai leidžia nustatyti bendrus optinius parametrus, o LID leidžia tiesiogiai įvertinti sugerties indėlį. [57] LID metodika naudojama 355 nm ruože tyrime ir leidžia jautriai įvertinti Ta₂O₅/SiO₂ dangų sugerties nuostolius ir palyginti juos su iš spektrinių matavimų gautomis k vertėmis. Tirtame bangos ilgyje spektriniai skirtumai tarp artimų bandinių gali būti nedideli, dėl to tiesioginis fototerminis sugerties matavimas yra būtinas norint atskirti tikrą sugertį nuo bendrųjų optinių nuostolių.

2.3 LIDT metodikos aprašymas

Lazeriu indukuotos pažaidos slenkščio (*angl. Laser – Induced Damage Threshold – LIDT*) matavimai atliekami siekiant įvertinti optinių dangų atsparumą intensyviai lazerio spinduliuotei. LIDT apibrėžiamas kaip krintančios spinduliuotės energijos tankis, kuriam esant optinėje dangoje, jos paviršiuje arba optiniame tūryje atsiranda negrįžtamas pažaidos požymis. [61, 62] Tokiu požymiu laikomas lokalus optinių savybių pokytis, paviršiaus modifikacija, įtrūkimas, atsisluoksniavimas arba kraterio susidarymas. [61, 63] LIDT vertė visada turi būti siejama su konkrečiomis bandymo sąlygomis, nes ji priklauso nuo bangos ilgio, impulso trukmės, impulsų skaičiaus, pluošto skersmens, kritimo kampo ir pažaidos nustatymo kriterijaus. [61, 62] Darbe LIDT matavimas naudojamas kaip papildomas Ta₂O₅/SiO₂ dangų kokybės vertinimo metodas. Didesnė sugertis ties 355 nm gali stiprinti vietinį šilimą ir mažinti dangos atsparumą lazerio impulsams. [13, 17] Pažaidos slenkstį taip pat veikia paviršiaus švarumas, lokalių defektų tankis, šiurkštumas, sluoksnių ribų kokybė, mechaniniai įtempiai ir elektrinio lauko pasiskirstymas daugiasluoksnėje struktūroje. [9, 13, 63] LIDT rezultatai darbe vertinami kartu su spektrofotometriniais, LID sugerties ir paviršiaus morfologijos duomenimis.

LIDT matavimo standą sudaro impulsinis lazerio šaltinis, pluošto valdymo optika, energijos registravimo dalis, bandinio laikiklis su padėties keitimo sistema ir pažaidos stebėjimo įrankiai. [61, 62] Lazerio impulso energija keičiama atenuatoriumi. Dalis pluošto nukreipiama į energijos matuoklį, o pagrindinė pluošto dalis fokusuojama į tiriamos dangos paviršių. Bandinys perstumiamas tarp apšvitinimų, o kiekvienas impulsas arba impulsų seka veikia naują dangos vietą **16 pav.** [62]



16 pav. Lazeriu indukuotos pažaidos slenksčio matavimo stendo schema. Impulsinė lazerio spinduliuotė nukreipiama į energijos valdymo optiką ir bandinio paviršių. Dalis pluošto naudojama impulso energijai registruoti. Bandinys perstumiamas tarp apšvitinimų, tad kiekvienas matavimas atliekamas naujoje dangos vietoje. [61, 62]

Prieš LIDT matavimus nustatomas lazerio pluošto skersmuo bandinio plokštumoje ir įvertinamas impulso energijos stabilumas. [62] Šie parametrai būtini energijos tankiui apskaičiuoti. Bendruoju atveju vieno impulso energijos tankis aprašomas taip (20):

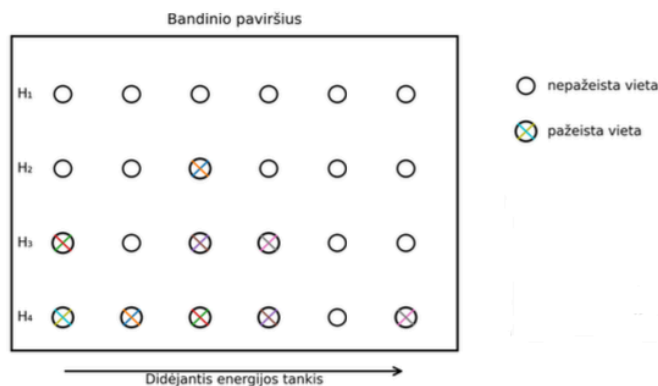
$$H = \frac{E_{\text{imp}}}{A_{\text{eff}}} \quad (20)$$

E_{imp} yra impulso energija, o A_{eff} yra efektyvus pluošto plotas bandinio plokštumoje. Jei pluoštas nėra apskritas arba spinduliuotė krinta kampu, efektyvus plotas turi būti nustatomas pagal realų pluošto skerspį bandinio paviršiuje. [62] Aprašant LIDT matavimą būtina nurodyti bangos ilgį, impulso trukmę, pasikartojimo dažnį, pluošto matmenis, kritimo kampą ir impulsų skaičių vienoje apšvitinimo vietoje. [61, 62] Matavimo metu energijos tankis didinamas pakopomis. Kiekviename energijos tankio intervale apšvitinamos kelios bandinio vietos. Po apšvitinimo kiekviena vieta tikrinama optiniu mikroskopu. Pažeistos ir nepažeistos vietos registruojamos atskirai. Pažaidos tikimybė apskaičiuojama pagal pažeistų vietų dalį (21):

$$P = \frac{N_d}{N} \quad (21)$$

Čia P yra pažaidos tikimybė, N_d yra pažeistų vietų skaičius, o N yra bendras apšvitintų vietų skaičius tame pačiame energijos tankio intervale. Tikimybinis vertinimas yra patikimesnis negu vieno pažaidos taško interpretacija, nes optinių dangų pažaida dažnai prasideda nuo pavienių defektinių vietų

17 pav. [61, 62, 64] Tokiu būdu galima atskirti sisteminį dangos atsaką nuo atsitiktinių lokalių defektų.



17 pav. LIDT matavimo vietų išdėstymo ir pažaidos tikimybės nustatymo principas. Bandinio paviršiuje parenkamos atskiros apšvitinimo vietos, kurios veikiamos skirtingais energijos tankiais. Kiekvienai energijos tankio vertei nustatoma pažeistų ir nepažeistų vietų dalis. Pagal šiuos duomenis apskaičiuojama pažaidos tikimybės priklausomybė nuo energijos tankio. [61, 62]

Bandinio paviršiaus kokybė turi tiesioginę įtaką LIDT rezultatams. Dulkės, poliravimo liekanos, įbrėžimai ir lokalūs dangos defektai gali veikti kaip papildomi sugerties centrai. [63, 65] Tokios vietos pažeidžiamos esant mažesniai energijos tankiui negu vienalytė dangos sritis. Prieš matavimus bandiniai turi būti apžiūrimi, o akivaizdžiai užterštos arba defektinės sritys neturi būti naudojamos slenksčiui nustatyti. [61, 62] UV dangose šis reikalavimas ypač svarbus, nes trumpesnio bangos ilgio spinduliuotė jautriau reaguoja į defektines būsenas ir lokalius sugerties centrus. [4, 17, 34]

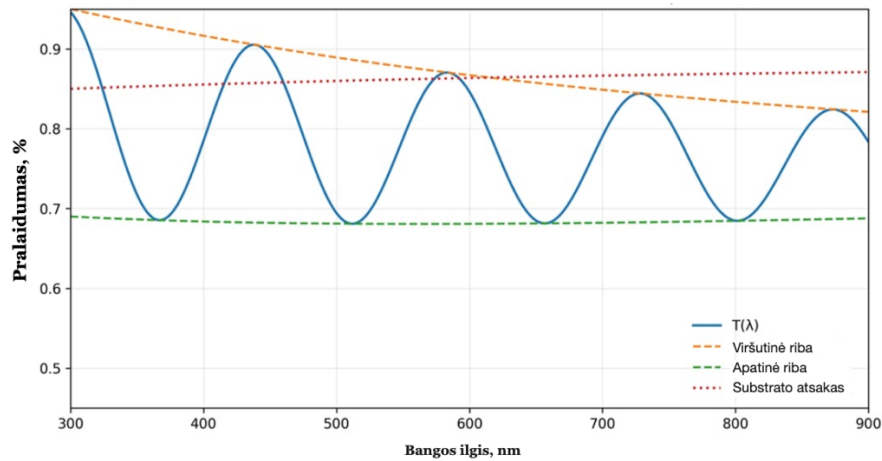
LIDT rezultatams įtaką turi dangos sandara. Daugiasluoksnėje dangoje pažaidos pradžia gali būti susijusi ne tik su vidutine sugertimi, bet ir su elektrinio lauko maksimumais, sluoksnių ribomis bei mechaniniais įtempiais. [9, 13, 21] Jei elektrinio lauko maksimumas sutampa su labiau sugeriančia arba defektų turinčia sritimi, vietinė šiluminė apkrova padidėja.

Ta₂O₅/SiO₂ dangų atveju LIDT rezultatai darbe naudojami kaip praktinis dangos atsparumo rodiklis. Jei didesnė sugertis arba didesnis ekstinkcijos koeficientas sutampa su mažesniu LIDT, galima teigti, kad dangos atsparumą riboja medžiaginės kilmės nuostoliai. [15, 17, 39] Jei aiškios priklausomybės nėra, didesnę įtaką gali turėti lokalių defektų pasiskirstymas, paviršiaus kokybė arba sluoksnių mechaninė būseną. [13, 21, 63] Tiriamajame darbe LIDT vertinamas ne kaip vienintelis dangos

kokybės parametras, o kaip papildomas rodiklis, susiejantis sugerties nuostolius su dangos atsparumu lazerio spinduliutei.

2.4 Vienasluoksnės dangos charakterizavimas spektrometru.

Vienasluoksnės dangos charakterizavimas spektrofotometru yra pradinis optinių dangų tyrimo etapas. Jo metu išmatuojami atspindžio $R(\lambda)$ ir pralaidumo $T(\lambda)$ spektrai. Iš šių spektrų modeliavimo nustatomi optiniai parametrai: sluoksnio storis d , lūžio rodiklio dispersija $n(\lambda)$ ir ekstinkcijos koeficientas $k(\lambda)$. Šie parametrai vėliau naudojami daugiasluoksnių dangų projektavimui ir eksperimentinių rezultatų interpretacijai. [1, 11, 12] Matavimas yra reikalingas, nes net tos pačios cheminės sudėties sluoksniai gali turėti skirtingas optines konstantas, jeigu jie suformuoti skirtingomis technologinėmis sąlygomis **18 pav.** [3, 66, 67]



18 pav. Homogeniško silpnai sugeriančio vienasluoksnio interferencinio spektras. Viršutinė ir apatinė gaubtinės leidžia įvertinti sluoksnio optinį atsaką ir atskirti jį nuo pliko pagrindo atsako. [1]

Silpnai sugeriančių sluoksnių charakterizavimui dažnai taikomas gaubtinės metodas, kuris susietas su J. C. Manifacier ir R. Swanepoel darbais. [66, 67] Remiantis literatūra, juose teigiama, kad iš pralaidumo spektro maksimumų ir minimumų galima apskaičiuoti lūžio rodiklį pasirinktuose bangos ilgiuose, o iš gretimų ekstremumų padėčių nustatyti sluoksnio storį. Esant beveik normaliam kritimui ir skaidriam pagrindui, sluoksnio lūžio rodiklis gali būti įvertintas taip (22):

$$n(\lambda) = [N + (N^2 - s^2)^{1/2}]^{1/2} \quad (22)$$

s yra optinio pagrindo lūžio rodiklis, o N apskaičiuojamas iš pralaidumo maksimumų ir minimumų (23):

$$N = \frac{2s(T_M - T_m)}{T_M T_m} + \frac{s^2 + 1}{2} \quad (23)$$

Čia T_M yra pralaidumo maksimumo vertė, o T_m yra pralaidumo minimumo vertė. Šios išraiškos taikomos tik tada, kai sluoksnis yra silpnai sugeriantis. Taip pat turi būti optiškai homogeniškas ir neturėti didelio paviršiaus šiurkštumo. [66, 67, 68] Jeigu sluoksnyje yra stipresnė sugertis, storio netolygumas arba lūžio rodiklio gradientas, gaubtinių metodas tampa tik pradiniu įvertinimu. [68, 69]

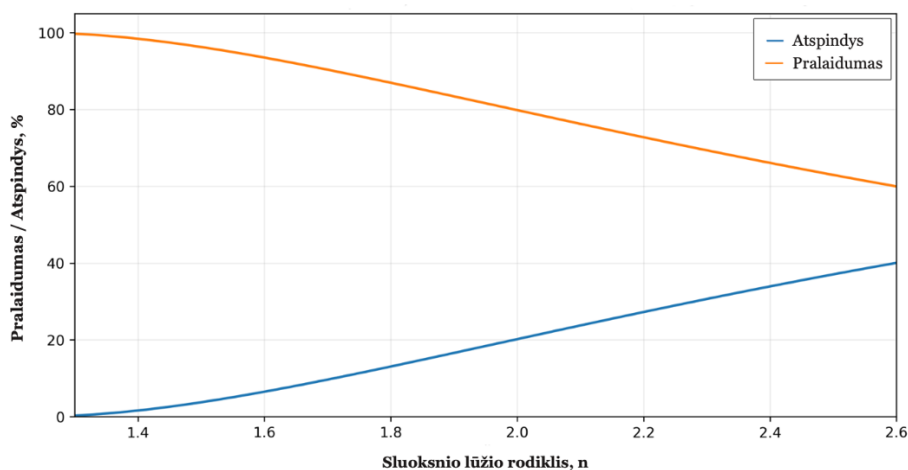
Taip pat, sluoksnio storis gali būti apskaičiuojamas iš dviejų gretimų tos pačios rūšies interferencinių ekstremumų. [67] Jei jų bangos ilgiai yra λ_1 ir λ_2 , o atitinkamos lūžio rodiklio vertės yra n_1 ir n_2 , sluoksnio storis išreiškiamas (24):

$$d = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{2(n_2 \lambda_1 - n_1 \lambda_2)} \quad (24)$$

Ši formulė naudinga tada, kai spektre aiškiai matomos interferencinės osciliacijos. [67, 68] Trumpųjų bangų ruože didėjant sugerčiai, osciliacijos slopinamos, o to rezultatas yra, jog storio ir optinių konstantų nustatymo tikslumas mažėja. [68] Vienasluoksnių dangų spektrofotometrinė analizė taip pat leidžia įvertinti bendruosius optinius nuostolius. Jeigu atspindys ir pralaidumas išmatuoti tame pačiame bangos ilgio intervale, bendras nuostolių dydis gali būti įvertintas iš energijos balanso

$$L(\lambda) = 1 - R(\lambda) - T(\lambda) = A(\lambda) + S(\lambda) \quad (25)$$

Čia $L(\lambda)$ yra bendrieji optiniai nuostoliai, $A(\lambda)$ yra sugertis, o $S(\lambda)$ yra sklaida. Išraiška naudinga pradiniam vertinimui, tačiau ji neatskiria sugerties nuo sklaidos. [2, 12] Mažų nuostolių dangoms spektrofotometriniai duomenys turi būti lyginami su tiesioginiais sugerties matavimais, pavyzdžiui LID metodika **19 pav.** [55, 56, 57] Jeigu reikia didesnio tikslumo, vienasluoksnių dangų parametrai nustatomi ne tik gaubtinių metodu, bet ir skaitmeniniu spektrų pritaikymu. Tokiu atveju eksperimentiniai $R(\lambda)$ ir $T(\lambda)$ spektrai modeliuojami taikant charakteristinių matricių metodą ir pasirinktą dispersijos modelį. [7, 11, 12] Šis metodas leidžia vienu metu nustatyti sluoksnio storį, $n(\lambda)$, $k(\lambda)$ ir, jei reikia, modelinius nehomogeniškumo parametrus. [69, 70, 72] Vis dėlto rezultatas priklauso nuo pradinių parametrų, dispersijos modelio ir matavimo duomenų kiekio. Skaitmeninis pritaikymas turi būti vertinamas ne tik pagal mažą paklaidą, bet ir pagal fizikinį gautų parametrų pagrįstumą. [11, 70, 72]



19 pav. Ketvirčio bangos atspindžio ir pralaidumo priklausomybė nuo vienasluoksnės dangos lūžio rodiklio. Priklausomybė parodo, kodėl interferencinio spektro ekstremumai gali būti naudojami sluoksnio lūžio rodikliui įvertinti. [1]

Daugkampė spektrofotometrija sumažina parametrų nustatymo nevienareikšmiškumą. Tikhonravov ir bendra autoriai parodė, kad matuojant atspindžio ir pralaidumo spektrus keliuose kritimo kampuose bei skirtingose poliarizacijose galima patikimiau nustatyti vienasluoksnių ir daugiasluoksnių dangų parametrus. [11] Tai reikalinga nustatant vienasluoksnių dangų optinės konstantos vėliau naudojamos kaip įvesties duomenys daugiasluoksnės dangos projektavimui.

Sugerties krašto analizė leidžia spręsti apie sluoksnio elektroninę netvarką. Amorfinėse ir netvarkingose medžiagose absorbcijos kraštas dažnai nėra staigus, nes draustinės juostos pakraščiuose susidaro lokalizuotos būsenos. [75, 76, 77] Ekstinkcijos koeficiento padidėjimas UV ruože gali rodyti ne tik fundamentalią medžiagos sugerties ribą, bet ir defektinių būsenų, struktūrinės netvarkos arba stechiometrijos nuokrypių indėlį. [4, 75] Ta₂O₅ pagrindo sluoksniams tai yra aktualu, kadangi deguonies stoka gali didinti suboksidinių būsenų koncentraciją ir trumpųjų bangų sugertį. [4]

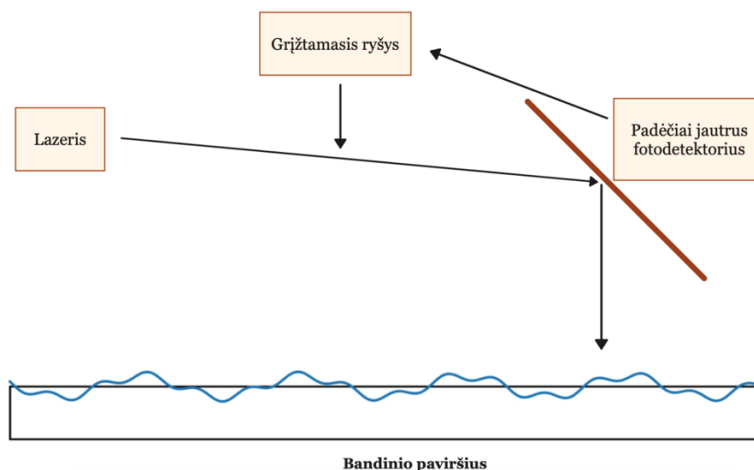
Darbe spektrofotometriniai matavimai buvo naudojami kaip pirminis Ta₂O₅, SiO₂ ir jų mišinių dangų optinių parametrų nustatymo etapas. Matavimai atlikti spektrofotometru 280 - 960 nm bangos ilgių ruože, esant 8° kritimo kampui. Pasirinktas ruožas leidžia stebėti ultravioletinio krašto elgseną ir matomosios srities interferencines oscilacijas. Iš gautų spektrų nustatytas sluoksnio storis, lūžio rodiklio dispersija ir ekstinkcijos koeficiento kitimas. Šie duomenys vėliau lyginami su LID matavimais, nes vien spektrofotometrijos nepakanka tiesiogiai atskirti sugerties nuo kitų optinių nuostolių. [55, 56]

2.5 AFM metodikos aprašymas

Atominių jėgų mikroskopija naudojama optinių dangų paviršiaus topografijai įvertinti. Šiuo metodu registruojamas paviršiaus aukščio pasiskirstymas. Juo galima nustatyti šiurkštumą, lokalius

defektus ir morfologijos pokyčius po technologinio apdorojimo arba lazerinio apšvitinimo. [78, 79] Ta₂O₅/SiO₂ dangų tyrime AFM yra papildomas metodas, leidžiantis patikrinti, ar optinių nuostolių pokyčiai gali būti siejami su paviršiaus reljefu, ar labiau su tūriniu sugertimi ir defektinėmis būsenomis. AFM svarbus tyrimas optinėms dangoms, nes paviršiaus ir sluoksnių ribų nelygumai gali didinti sklaidos nuostolius. Tai reikšminga trumpųjų bangų ruože, nes sklaida stiprėja mažėjant bangos ilgiui. [82, 83, 84] 355 nm dangoms paviršiaus morfologijos kontrolė yra svarbi ne mažiau negu spektrinių parametru ar sugerties matavimai.

AFM veikimas pagrįstas zondo smaigalio ir bandinio paviršiaus sąveika. Zondas pritvirtintas prie lanksčios svirtelės. Jam judant virš paviršiaus, sąveikos jėgos keičia svirtelės padėtį. Svirtelės nuokrypis dažniausiai registruojamas, kai nuo jos atsispindėjęs lazerio pluoštas nukreipiamas į padėčiai jautrų fotodetektorių. Grįžtamojo ryšio sistema palaiko pasirinktą zondo ir paviršiaus sąveiką, o pagal vertikalų zondo poslinkį sudaromas paviršiaus aukščio žemėlapis **20 pav.** [78, 79]



20 pav. Atominių jėgų mikroskopijos veikimo schema. Zondo smaigalys skenuoja bandinio paviršių, o svirtelės nuokrypis registruojamas atsispindėjusio lazerio pluošto padėties pokyčiu fotodetektoriuje. [78, 79]

Matavimuose gali būti naudojami kontaktinis ir dinaminiai režimai. Kontaktiniame režime smaigalys nuolat liečia paviršių ir iš to gaunamas stabilus aukščio signalas. Tačiau paviršius gali būti mechaniškai veikiamas. Adatėlė virpa arti paviršiaus, todėl sumažėja šoninė jėga ir paviršiaus pažeidimo rizika. [79] Optinių dangų tyrimuose svarbiausias yra patikimas aukščio pasiskirstymas ir šiurkštumo parametru nustatymas. Matavimų rezultatas priklauso nuo skenavimo ploto, taškų skaičiaus ir duomenų apdorojimo. Skirtingus bandinius galima lyginti tik tada, kai naudojamos vienodos matavimo ir apdorojimo sąlygos. [79, 81] Per mažas skenavimo plotas gali neatspindėti viso paviršiaus, o per didelis plotas gali paslėpti smulkesnius erdvinius nelygumus. Šiurkštumo reikšmė visada turi būti pateikiama kartu su skenavimo plotu.

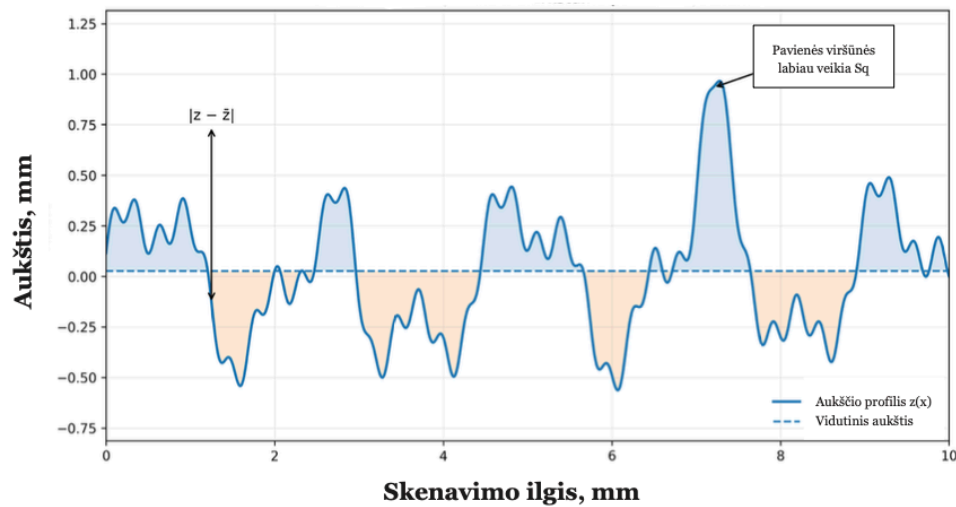
Pagrindiniai AFM duomenų parametrai yra aritmetinis vidutinis šiurkštumas S_a ir kvadratinis vidutinis šiurkštumas S_q . S_a nusako vidutinį absoliutų aukščio nuokrypį nuo vidutinės paviršiaus plokštumos (26):

$$S_a = \frac{1}{A} \iint_A |z(x, y) - \bar{z}| dx dy \quad (26)$$

S_q nusako kvadratinę vidutinę aukščio nuokrypių vertę ir yra jautresnis pavienėms viršūnėms arba gilesnėms įduboms (27):

$$S_q = \left[\frac{1}{A} \iint_A (z(x, y) - \bar{z})^2 dx dy \right]^{1/2} \quad (27)$$

Čia A yra analizuojamas paviršiaus plotas, $z(x, y)$ yra vietinis aukštis, o $\bar{z}$ yra vidutinis paviršiaus aukštis. Šie parametrai naudojami paviršiaus tekstūrai aprašyti ir leidžia kiekybiškai palyginti skirtingų dangų paviršius **21 pav.** [85]



21 pav. Paviršiaus aukščio profilio ir šiurkštumo parametrų schema. S_a apibūdina vidutinį absoliutų aukščio nuokrypį, o S_q yra vidutinis kvadratinis aukščio nuokrypis. [85]

Vien tik S_a arba S_q reikšmės ne visada pakanka. Du paviršiai gali turėti panašų šiurkštumą, bet skirtingą erdvinę struktūrą. Optinių dangų sklaidos analizei svarbus ir nelygumų erdvinių dažnių pasiskirstymas. [82, 84] Paviršiaus morfologija turi būti vertinama ne tik pagal vieną skaitinį parametą, bet ir pagal topografijos vaizdą.

AFM duomenų apdorojimas turi būti atliekamas atidžiai. Prieš skaičiuojant šiurkštumą pašalinamas bendras paviršiaus nuolydis, koreguojamos skenavimo linijos ir atmetami aiškūs artefaktai. Per stipri plokštumos arba linijų korekcija gali dirbtinai pakeisti šiurkštumo vertę. Lyginant bandinius būtina naudoti tą pačią korekcijos procedūrą. Nečas ir bendraautorai parodė, kad netinkamas duomenų lyginimas gali reikšmingai iškreipti šiurkštumo parametrus. [81]

AFM matavimai šiuose tyrimuose naudojami Brego veidrodžio paviršiaus kokybei įvertinti prieš atkaitinimą ir po jo. Matavimai leidžia patikrinti, ar 300 °C terminis apdorojimas keičia paviršiaus morfologiją ir galėtų padidinti sklaidos nuostolius.

3. Eksperimento rezultatai

Šiame skyriuje pateikiami Ta₂O₅/SiO₂ dangų eksperimentiniai rezultatai ir jų analizė. Tyrimas atliktas nuosekliai. Pirmiausia buvo suformuotos vienasluoksnės dangos, kurių optinės konstantos ir sugerties nuostoliai įvertinti ties 355 nm bangos ilgiu. Vėliau tie patys bandiniai buvo atkaitinti 300, 400 ir 500 °C temperatūrose. Toks tyrimo eiliškumas leidžia įvertinti, kaip formavimo sąlygos ir terminis apdorojimas keičia sluoksnių lūžio rodiklį n , ekstinkcijos koeficientą k ir tiesiogiai išmatuotą sugertį. Rezultatų analizėje nagrinėjami trys pagrindiniai technologiniai veiksniai. Tai bandinio padėtis taikinio atžvilgiu, deguonies srautas formavimo metu ir atkaitinimo temperatūra. Šių veiksmų poveikis vertinamas pagal spektrofotometrijos metodu nustatytas optines konstantas, LID metodika išmatuotus sugerties nuostolius ir AFM metodu įvertintą paviršiaus morfologiją. Palyginimas leidžia atskirti, ar stebimi pokyčiai labiau susiję su sluoksnio sudėtimi ir optiniu tankiu, ar su defektine sugertimi bei paviršiaus kokybe.

Rezultatai pateikiami nuo vienasluoksnių dangų prie daugiasluoksnės dangos. Pirmiausia aprašomos bandinių grupės ir jų formavimo sąlygos. Toliau analizuojami atspindžio bei pralaidumo spektrai ir iš jų nustatytos optinės konstantos. Po to aptariami LID metodika išmatuoti sugerties nuostoliai prieš atkaitinimą ir po jo. Galiausiai šie duomenys susiejami su paviršiaus morfologija, LIDT tyrimu ir daugiasluoksnės Brego dangos rezultatais. Toks rezultatų pateikimas leidžia pagrįsti, kurios technologinės sąlygos yra tinkamiausios mažų sugerties nuostolių Ta₂O₅/SiO₂ mišinio optinei dangai formuoti ties 355 nm.

3.1 Tiriamųjų bandinių grupavimas

Tiriamieji bandiniai buvo suskirstyti į dvi grupes pagal pagrindinį keičiamą formavimo parametą. Pirmąją grupę sudaro bandiniai B1 - B5. Šioje grupėje keista taikinio padėtis nuo 85 iki 164 mm. Kito ir Ta₂O₅ bei SiO₂ frakcijų santykis dangos sluoksnyje. Ta₂O₅ dalis mažėjo nuo 100 % bandinyje

B1 iki 9,3 % bandinyje B5, o SiO₂ dalis atitinkamai didėjo nuo 0 % iki 90,7 %. Bandinių seka leidžia įvertinti, kaip mišinio sudėtis veikia lūžio rodiklį, ekstinkcijos koeficientą ir sugerties nuostolius.

Antrąją grupę sudaro bandiniai B6 - B9. Šiuose bandiniuose buvo keičiamas deguonies srautas nuo 48 iki 58 sccm. Ta₂O₅ frakcija šioje grupėje išliko panaši ir kito tik nuo 73,4 % iki 76,1 %. Pagrindiniu kintamuoju galima laikyti tik deguonies srautą. Tokia bandinių grupė leidžia atskirai įvertinti oksidavimo sąlygų poveikį dangos optinėms konstantoms ir sugerties nuostoliams.

Visi bandiniai pirmiausia buvo charakterizuoti neatkaitintoje būsenoje. Vėliau tie patys bandiniai buvo atkaitinti 300, 400 ir 500 °C temperatūrose. Tolesnėje analizėje kiekvienam bandiniui galima lyginti pradinę būseną ir tris atkaitinimo režimus. Toks palyginimas leidžia nustatyti, ar terminis apdorojimas mažina sugerties nuostolius, keičia optines konstantas ir ar šis poveikis priklauso nuo mišinio frakcijos arba deguonies srauto.

1 lentelė. Tirtų bandinių grupavimas pagal pagrindinius formavimo parametrus.

Nr.	Analizės žymuo	Taikinio padėtis, mm	Deguonies srautas, sccm	Bandinių frakcija	
				Ta₂O₅, %	SiO₂, %
1	B1	85	40	100	0,00
2	B2	105	50	92,6	7,40
3	B3	125	60	54,1	45,9
4	B4	145	70	23,0	76,0
5	B5	164	80	9,30	90,7
6	B6	113	48	73,4	26,6
7	B7	113	50	75,2	24,8
8	B8	113	54	76,1	23,9
9	B9	113	58	75,9	24,1

Iš 1 lentelės matyti, kad B1 - B5 grupėje vienu metu kinta taikinio padėtis, deguonies srautas ir mišinio frakcija. Šios grupės analizėje pagrindinis dėmesys skiriamas bendram sudėties kitimo poveikiui. B6 - B9 grupėje mišinio frakcija išlieka artima, dėl to ši grupė yra tinkamesnė deguonies srauto įtakai vertinti. Toks atskyrimas reikalingas, kadangi mišinio sudėties ir oksidacijos režimo poveikiai neturi būti painiojami tarpusavyje.

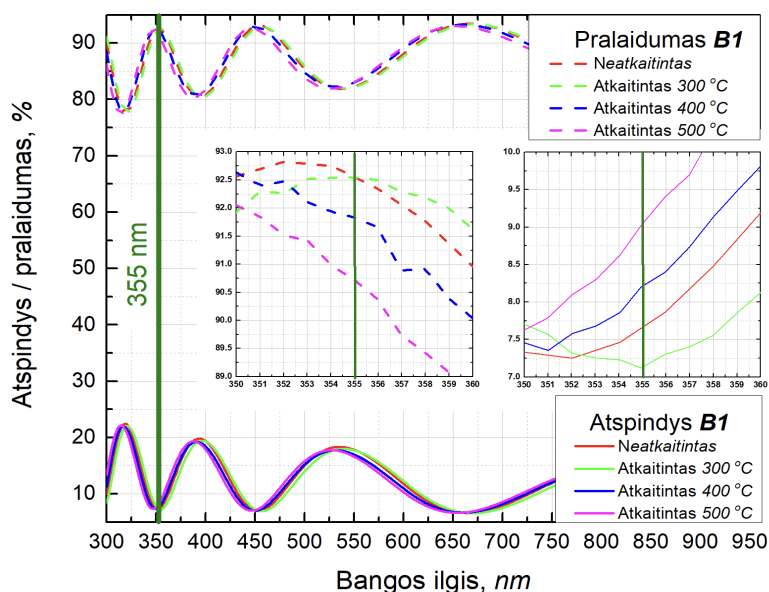
Vienasluoksnių dangų tyrimas darbe naudojamas kaip atrankinis etapas prieš daugiasluoksnės dangos formavimą. Iš pradžių nustatomos kiekvieno bandinio optinės konstantos ir sugerties nuostoliai. Vėliau šie rezultatai naudojami parenkant tinkamiausias sąlygas daugiasluoksnei Ta₂O₅/SiO₂ optinei danga formuoti.

3.2 Vienasluoksnių Ta₂O₅/SiO₂ dangų spektrinė analizė

Vienasluoksnių Ta₂O₅/SiO₂ dangų optinės savybės buvo vertinamos pagal išmatuotus atspindžio $R(\lambda)$ ir pralaidumo $T(\lambda)$ spektrus. Šie spektrai buvo aproksimuoti naudojant *OptiChar* programinę įrangą. Iš aproksimavimo nustatytos lūžio rodiklio $n(\lambda)$ ir ekstinkcijos koeficiento $k(\lambda)$ priklausomybės nuo bangos ilgio. Toliau analizuojamos ne tik viso spektro kreivės, bet ir optinių konstantų vertės ties 355 nm. Šis bangos ilgis pasirinktas kaip pagrindinis palyginimo taškas, nes būtent ties juo darbe vertinami dangų sugerties nuostoliai. Spektrinė analizė naudojama kaip pirmasis žingsnis, leidžiantis palyginti skirtingomis IBS sąlygomis suformuotus sluoksnius ir atrinkti tinkamiausius bandinius tolimesniems LID, AFM ir daugiasluoksnės dangos tyrimams. Poskyryje pirmiausia aptariami išmatuoti atspindžio ir pralaidumo spektrai bei jų pokyčiai po atkaitinimo. Toliau vertinama spektrų modeliavimo kokybė, o po to analizuojamos iš modeliavimo gautos $n(355\text{ nm})$ ir $k(355\text{ nm})$ vertės. Toks pateikimas leidžia atskirti du dalykus: spektrinio atsako pokytį, matomą tiesiogiai iš $R(\lambda)$ ir $T(\lambda)$ kreivių, ir optinių konstantų pokytį, nustatytą iš modeliavimo.

3.2.1 Spektriniai matavimai ir atkaitinimo įtaka

Reprezentatyvaus vienasluoksnės dangos bandinio *B1* atspindžio ir pralaidumo spektrai pateikti **1 grafike**. Iš rezultatų matyti, kad atkaitinimas keičia sluoksnio spektrinį atsaką visame tirtame bangos ilgių ruože. Kreivių poslinkis rodo, kad po terminio apdorojimo pakito sluoksnio optinis storis, kuris priklauso nuo lūžio rodiklio ir fizinio storio sandaugos. Kadangi kartu kinta ir maksimumų bei minimumų amplitudės, galima spręsti, kad atkaitinimas pakeitė sluoksnio lūžio rodiklį. Tikėtina, kad terminio apdorojimo metu vyko struktūros persitvarkymas ir vidinių įtempių mažėjimas.

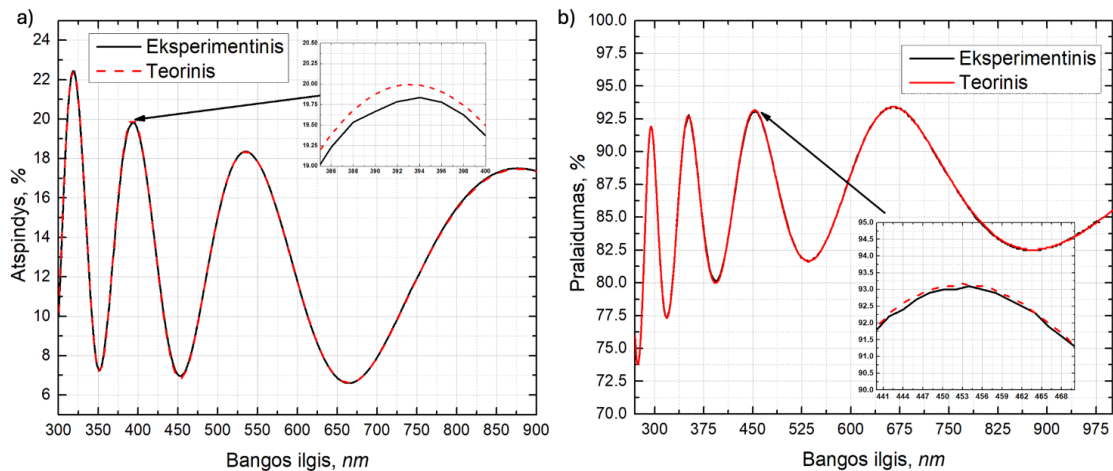


1 grafikas. Atspindžio ir pralaidumo spektrinis grafikas pirmiems eksperimento bandiniams. Žaliai

pažymėta 355 nm bangos ilgio vieta. Mažesniame grafike pritraukta vieta su atspindžio ir pralaidumo vertėmis skirtingiems bandiniams ties 355 nm.

3.2.2 Bandinių spektrų modeliavimas

Vienasluoksnių dangų optinės konstantos buvo nustatytos modeliuojant išmatuotus atspindžio ir pralaidumo spektrus. Reprezentatyvaus bandinio eksperimentinių ir teorinių spektrų palyginimas pateiktas **2 grafike**: **a** dalyje parodytas atspindžio spektras, o **b** dalyje - pralaidumo spektras. Abiem atvejais teorinės kreivės gerai atitinka eksperimentinių duomenis. Sutampa pagrindinių interferencinių ekstremumų padėtys, o daugumoje spektro sričių sutampa ir jų amplitudės.

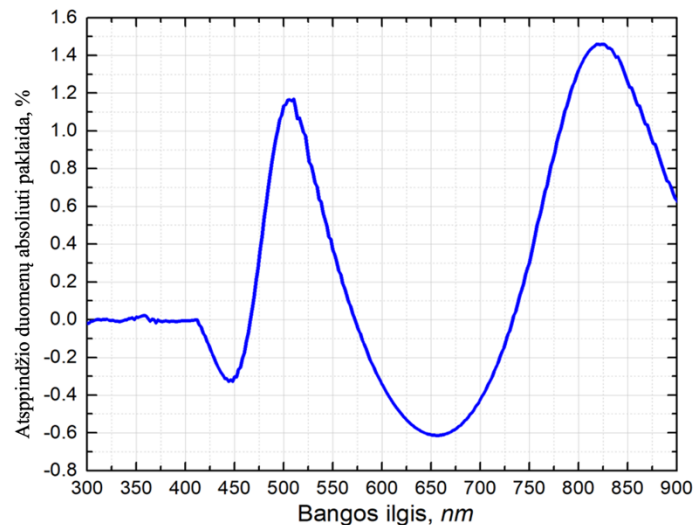


2 grafikas. Vienasluoksnės dangos bandinio eksperimentinių ir teorinių spektrų palyginimas: a) atspindžio spektras, b) pralaidumo spektras. Įterptuose abiejų dalių grafikuose parodytos padidintos spektro sritys.

Geras teorinio ir eksperimentinio spektro sutapimas rodo, kad pasirinktas modelis tinkamai aprašo vienasluoksnės dangos optinį atsaką. Tai svarbu, kad iš šio modeliavimo toliau nustatomos lūžio rodiklio $n(\lambda)$ ir ekstinkcijos koeficiento $k(\lambda)$ priklausomybės. Jeigu modelis neteisingai atkurtų interferencinių maksimumų padėtis, pirmiausia būtų galima įtarti netiksliai nustatytą sluoksnio optinį storį. Jeigu nesutaptų maksimumų ir minimumų amplitudės, didesnė problema būtų susijusi su netiksliai aprašytu lūžio rodikliu, ekstinkcijos koeficientu arba papildomais nuostoliais. Šiuo atveju abiejų tipų neatitikimai yra nedideli, tad modeliavimas laikomas tinkamu tolesnei analizei.

Padidintuose spektro fragmentuose matyti, kad teorinės ir eksperimentinės kreivės nėra visiškai tapčios. Skirtumai yra lokalūs ir labiau išryškėja atskirose spektro vietose, tačiau jie nekeičia bendros spektro formos. Tai reiškia, kad modelis gerai aprašo pagrindinį sluoksnio interferencinį atsaką, nors reali danga gali turėti nedidelių nukrypimų nuo idealaus vienasluoksnio modelio. Tokie nukrypimai gali būti susiję su nedideliu storio netolygumu, lūžio rodiklio gradientu per sluoksnio storį, paviršiaus šiurkštumu arba matavimo netikslumais. Modeliavimo kokybė papildomai įvertinta absoliuti paklaida,

pateikta **3 grafike**. Iš šio grafiko matyti, kad ultravioletinėje srityje absoliuti paklaida yra labai maža. Ties 355 nm ji yra artima nuliui. Tai yra svarbiausias rezultatas šiam darbui, nes būtent pasirinktame bangos ilgyje lyginamos skirtingų bandinių optinės konstantos ir sugerties nuostoliai.

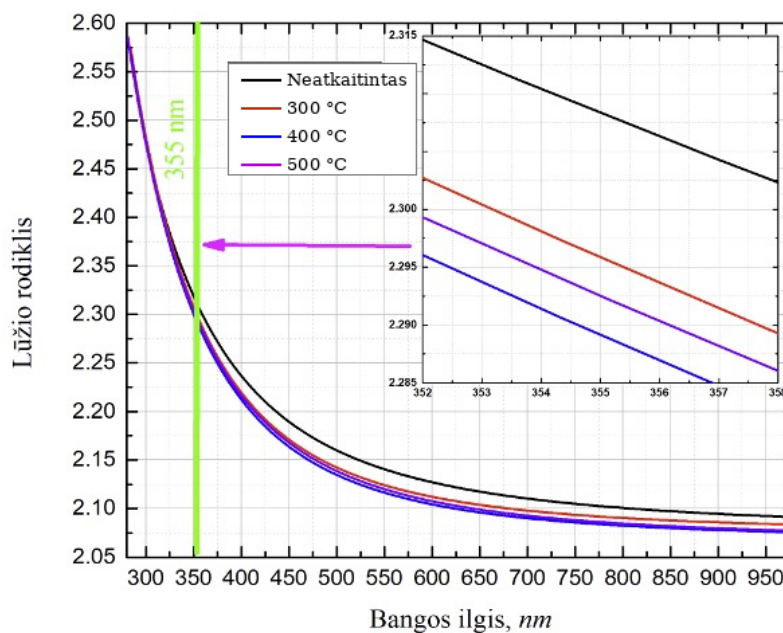


3 grafikas. Reprezentatyvaus vienasluoksnės dangos bandinio modeliavimo absoliuti paklaida. Ultravioletinėje srityje, ypač ties 355 nm, paklaida yra artima nuliui, o ilgesnių bangų ruože ji padidėja dėl mažesnio modelio jautrumo optinėms konstantoms ir galimo nedidelio interferencinės fazės neatitikimo.

Ilgesnių bangų ruože absoliuti paklaida padidėja. Šis padidėjimas greičiausiai nėra atsitiktinis matavimo triukšmas, nes paklaidos kreivė turi aiškų spektrinį pobūdį. Ji labiau primena nedidelį interferencinės fazės neatitikimą tarp eksperimento ir modelio. Toks neatitikimas gali atsirasti tada, kai realus sluoksnio optinis storis arba lūžio rodiklio dispersija šiek tiek skiriasi nuo modelyje aprašytos vertės. Ilgesnių bangų ruože spektrinės kreivės kinta lėčiau, o nedidelis interferencinių maksimumų poslinkis gali sukurti santykinai didesnę skirtumą tarp teorinės ir eksperimentinės kreivės. Svarbu tai, kad šis paklaidos padidėjimas nepaneigia modeliavimo tinkamumo. Pagrindinis tyrimų bangos ilgis patenka į tą spektro ruožą, kuriame teorinis ir eksperimentinis spektrai sutampa geriausiai. $n(355 \text{ nm})$ ir $k(355 \text{ nm})$ vertės gali būti naudojamos tolesniam bandinių palyginimui. Ilgesnių bangų ruožo paklaida šiuo atveju parodo ne modelio netinkamumą, o jo ribas. Modelis patikimiausiai aprašo tą sritį, kuri yra svarbiausia šio darbo sugerties analizei. Taigi, **2 ir 3 grafikai** kartu parodo, kad pasirinktas spektrų modeliavimo metodas yra tinkamas vienasluoksnių $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ dangų optinių konstantų nustatymui. Eksperimentinių ir teorinių kreivių sutapimas ties 355 nm yra geras, o absoliuti paklaida šiame bangos ilgyje yra artima nuliui. Toliau analizuojamos $n(355 \text{ nm})$ ir $k(355 \text{ nm})$ vertės laikomos pakankamai patikimu pagrindu vertinti formavimo sąlygų ir atkaitinimo įtaką dangų optinėms savybėms.

3.2.3 Modeliavimo metu gautos optinės konstantos

Iš spektrų modeliavimo buvo nustatytos vienasluoksnės dangos lūžio rodiklio $n(\lambda)$ ir ekstinkcijos koeficiento $k(\lambda)$ priklausomybės. Reprezentatyvaus bandinio rezultatai pateikti **4** ir **5 grafikuose**. Kadangi darbe sugerties nuostoliai vertinami ties 355 nm, ši bangos ilgio sritis naudojama kaip pagrindinis optinių konstantų palyginimo taškas.

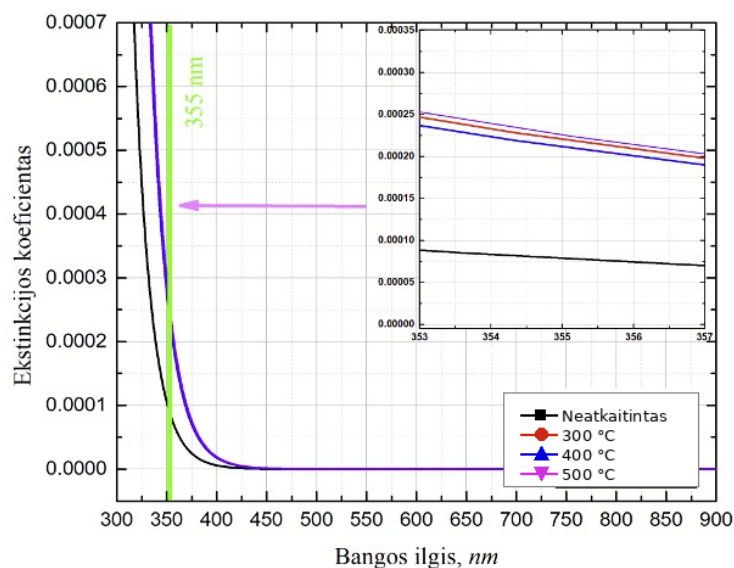


4 grafikas. Vienasluoksnės dangos lūžio rodiklio $n(\lambda)$ priklausomybė nuo bangos ilgio prieš atkaitinimą ir po atkaitinimo 300, 400 ir 500 °C temperatūrose. Žalia linija pažymėtas 355 nm bangos ilgis. Įterptame lange parodyta padidinta sritis ties 355 nm.

Iš **4 grafiko** matyti, kad visose būsenose lūžio rodiklis mažėja didėjant bangos ilgiui. Tai būdinga tipinei oksidinių dielektrinių sluoksnių dispersijai šiame spektriniame ruože. Didžiausios n vertės stebimos trumpųjų bangų srityje, o ilgesnių bangų ruože kreivės palaipsniui artėja prie pastovesnės vertės.

Atkaitinimas sumažina lūžio rodiklį visame tirtame spektro ruože. Ties 355 nm neatkaitinto bandinio n yra didžiausias ir siekia apie 2,31. Po atkaitinimo 300 °C temperatūroje n sumažėja iki maždaug 2,30. Po 400 °C atkaitinimo gaunama mažiausia vertė, apie 2,29, o po 500 °C atkaitinimo n išlieka panašus, bet šiek tiek didesnis negu po 400 °C. Taigi didinant atkaitinimo temperatūrą lūžio rodiklis mažėja.

Šis pokytis rodo, kad terminis apdorojimas keičia sluoksnio optinį tankį ir vidinę sandarą. Kadangi optinis atsakas priklauso nuo sluoksnio lūžio rodiklio ir fizinio storio, net apie 0,01 - 0,02 dalies n pokytis ties 355 nm yra reikšmingas. Toks pokytis gali paaiškinti ankstesniame poskyryje stebėtą atspindžio ir pralaidumo spektrų poslinkį po atkaitinimo.



5 grafikas. Vienasluoksnės dangos ekstinkcijos koeficiento $k(\lambda)$ priklausomybė nuo bangos ilgio prieš atkaitinimą ir po atkaitinimo 300, 400 ir 500 °C temperatūrose. Žalia linija pažymėtas 355 nm bangos ilgis. Įterptame lange parodyta padidinta sritis ties 355 nm.

Ekstinkcijos koeficiento priklausomybė pateikta **5 grafike**. Matyti, kad k vertės yra didžiausios trumpųjų bangų srityje ir sparčiai mažėja didėjant bangos ilgiui. Tai rodo, kad nagrinėjamo sluoksnio nuostoliai daugiausia susiję su trumpųjų bangų sugerties kraštu. Ties 355 nm neatkaitinto bandinio k vertė yra mažiausia ir siekia apie $7 \cdot 10^{-5}$. Po atkaitinimo k padidėja. 300 °C atkaitinto bandinio k vertė ties 355 nm yra apie $2,1 \cdot 10^{-4}$, 400 °C atveju apie $2,0 \cdot 10^{-4}$, o 500 °C atveju apie $2,2 - 2,3 \cdot 10^{-4}$. Taigi, po atkaitinimo modeliuotas ekstinkcijos koeficientas padidėja maždaug tris kartus, palyginti su neatkaitinta būsena.

Svarbu paminėti, kad k vertė čia gauta iš spektrofotometrinio modelio. Ji nėra tiesiogiai išmatuota elemento sugertos galios dalis. Šio poskyrio išvada turi būti tikrinama LID matavimais. Jeigu LID duomenys taip pat rodys didesnę sugertį po aukštesnės temperatūros atkaitinimo, bus galima teigti, kad modeliuotas k padidėjimas atspindi realų sugerties nuostolių augimą. Jeigu LID sugertis nesikeis arba mažės, tada spektrofotometrinio k pokytį reikės vertinti atsargiau, kaip modelio jautrumo, sklaidos indėlio arba spektrinio atsako persiskirstymo rezultata.

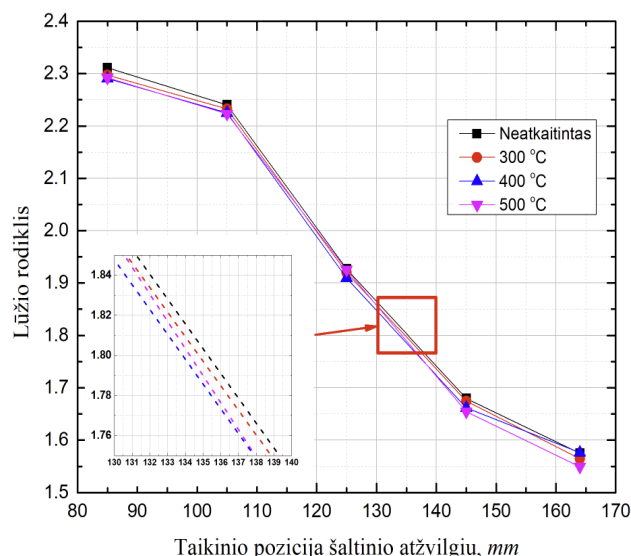
Modeliavimo metu gautos optinės konstantos rodo aiškų atkaitinimo poveikį vienasluoksnei dangai. Ties 355 nm atkaitinimas mažina lūžio rodiklį nuo maždaug 2,31 iki 2,29 - 2,30 ir didina modeliuotą ekstinkcijos koeficientą nuo maždaug $7 \cdot 10^{-5}$ iki apie $2,0 - 2,3 \cdot 10^{-4}$. Iš trijų nagrinėtų temperatūrų 300 °C režimas pagal šį reprezentatyvų bandinį atrodo palankiausias, nes po jo n sumažėja mažiausiai, o modeliuotas k neparodo aiškaus pranašumo aukštesnėms temperatūroms. Vis dėlto šis vertinimas negali būti laikomas galutiniu atkaitinimo temperatūros optimumu, nes mažų sugerties

nuostolių atveju k iš spektrinio modeliavimo nustatomas ribotu tikslumu. Šis pasirinkimas toliau tikrinamas pagal LID sugerties rezultatus.

3.2.4 Ekstinkcijos koeficientų ir lūžio rodiklių priklausomybė nuo atkaitinimo

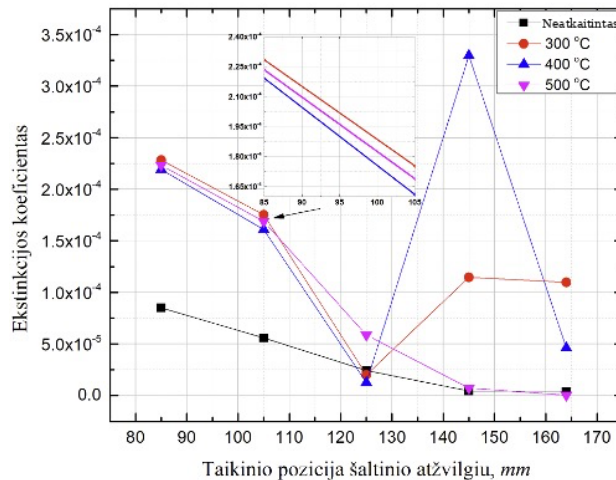
Modeliuojant atspindžio ir pralaidumo spektrus buvo nustatytos kiekvieno vienasluoksnio bandinio optinės konstantos ties 355 nm. Poskyryje nagrinėjama, kaip lūžio rodiklis n ir ekstinkcijos koeficientas k priklauso nuo dangos sudėties, deguonies srauto ir atkaitinimo temperatūros. Lūžio rodiklis svarbus daugiasluoksnės dangos optiniam kontrastui, o ekstinkcijos koeficientas apibūdina trumpųjų bangų srities slopinimą.

Pirmiausia nagrinėjama $B1 - B5$ bandinių grupė. Šioje grupėje keičiant taikinio padėtį jonų pluošto dėmės atžvilgiu mažėja Ta_2O_5 dalis ir didėja SiO_2 dalis. **6 ir 7 grafikai** daugiausia parodo sudėties poveikį optinėms konstantoms. Toliau nagrinėjama $B6 - B9$ bandinių grupė, kurioje Ta_2O_5 ir SiO_2 frakcijos kinta nedaug, o pagrindinis keičiamas parametras yra deguonies srautas.



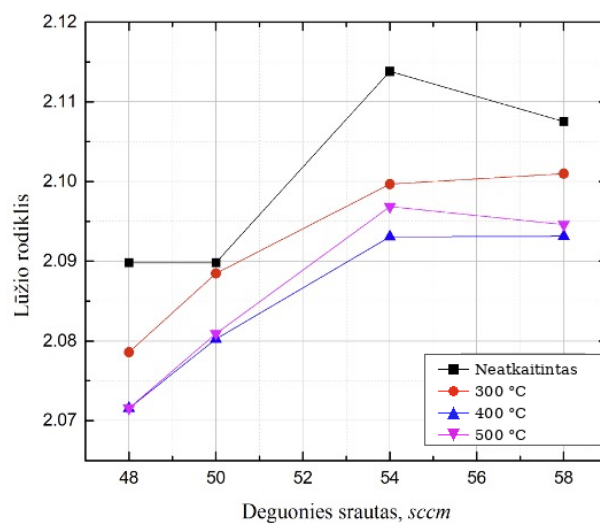
6 grafikas. Vienasluoksnių Ta_2O_5/SiO_2 dangų lūžio rodiklio n ties 355 nm priklausomybė nuo taikinio padėties prieš atkaitinimą ir po atkaitinimo 300, 400 ir 500 °C temperatūrose. $B1 - B5$ eilėje didėjant taikinio padėčiai mažėja Ta_2O_5 frakcija ir didėja SiO_2 frakcija.

Iš **6 grafiko** matyti, kad didėjant SiO_2 frakcijai lūžio rodiklis n mažėja. Neatkaitinto gryno Ta_2O_5 bandinio n ties 355 nm siekia apie 2,30, o didžiausią SiO_2 dalį turinčio bandinio sumažėja iki apie 1,56. Ši priklausomybė rodo, kad lūžio rodiklio kitimą daugiausia lemia Ta_2O_5 ir SiO_2 frakcijų santykis. Ta_2O_5 veikia kaip didelio lūžio rodiklio komponentas, o SiO_2 mažina bendrą sluoksnio optinį tankį. Atkaitinimas $B1 - B5$ bandinių grupėje dažniausiai sumažina lūžio rodiklį. Mažiausias pokytis matomas po 300 °C atkaitinimo, o po 400 ir 500 °C vertės daugeliu atvejų yra mažesnės. Pagal lūžio rodiklio išlaikymą 300 °C atkaitinimas yra palankesnis už aukštesnes temperatūras.



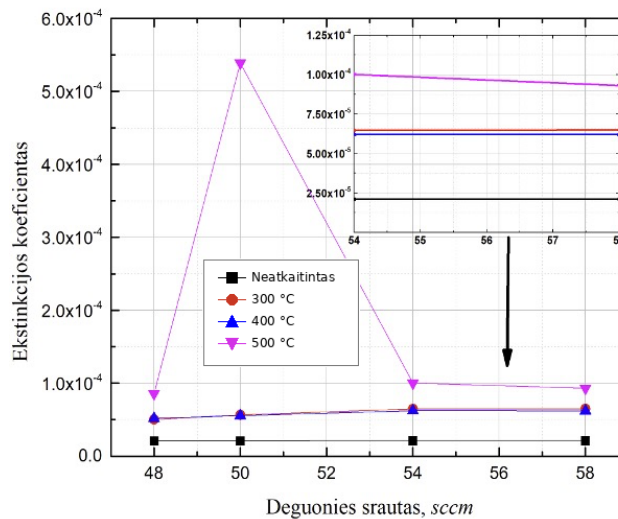
7 grafikas. Vienasluoksnių $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ dangų ekstinkcijos koeficiento k ties 355 nm priklausomybė nuo taikinio padėties prieš atkaitinimą ir po atkaitinimo 300 , 400 ir $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperatūrose. Didėjant taikinio padėčiai mažėja Ta_2O_5 frakcija ir didėja SiO_2 frakcija.

7 grafike pateikta ekstinkcijos koeficiento k priklausomybė nuo taikinio padėties. Neatkaitintų bandinių k mažėja didėjant SiO_2 frakcijai. Tai atitinka 6 grafike matomą lūžio rodiklio mažėjimą ir rodo, kad SiO_2 įmaišymas mažina ne tik optinį tankį, bet ir modeliuotą trumpųjų bangų slopinimą. Po atkaitinimo k kitimas nėra vienodas visai $B1 - B5$ grupei. Didesnę Ta_2O_5 dalį turinčiuose bandiniuose k po atkaitinimo padidėja. Kai kuriuose taškuose, ypač po aukštesnės temperatūros atkaitinimo, matomi ryškesni k šuoliai. Šių šuolių nereikėtų tiesiogiai laikyti vien medžiagos sugerties padidėjimu, nes k čia gautas iš spektrinio modelio. Mažų nuostolių srityje net nedideli spektro neatitikimai gali paveikti modeliuotą ekstinkcijos koeficientą.



8 grafikas. Vienasluoksnių $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ dangų lūžio rodiklio n ties 355 nm priklausomybė nuo deguonies srauto prieš atkaitinimą ir po atkaitinimo 300 , 400 ir $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperatūrose. Taikinio padėtis išlaikyta pastovi, 113 mm , o pagrindinis kintamasis yra deguonies srautas.

8 grafike pateikta B6 - B9 bandinių lūžio rodiklio priklausomybė nuo deguonies srauto. Neatkaitintoje būsenoje n padidėja didinant deguonies srautą nuo 48 iki 54 sccm, o ties 58 sccm šiek tiek sumažėja. Didžiausia n vertė šioje grupėje gaunama ties 54 sccm. Kadangi Ta_2O_5 ir SiO_2 frakcijos šioje grupėje artimos, šis pokytis siejamas su deguonies srauto poveikiu formavimo metu. Atkaitinimas sumažina n visame tirtame deguonies srautų intervale. Po 300 °C atkaitinimo lūžio rodiklis išlieka didesnis negu po 400 ir 500 °C atkaitinimo. Taip pat ir šioje grupėje 300 °C temperatūra yra palankesnė, jeigu siekiama išlaikyti didesnį lūžio rodiklį.



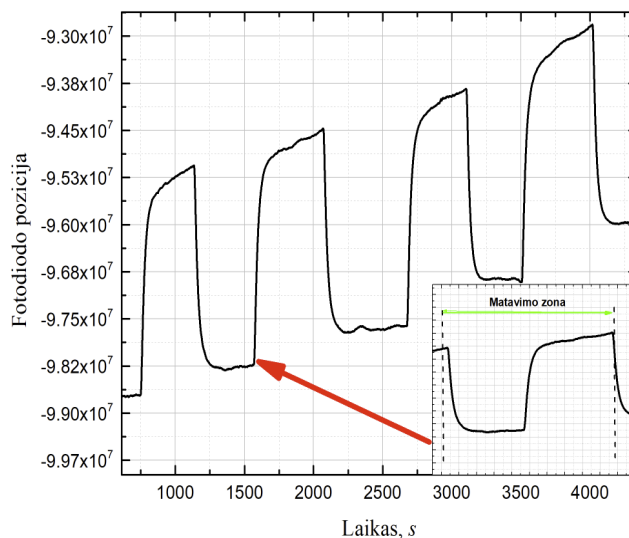
9 grafikas. Vienasluoksnių $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ dangų ekstinkcijos koeficiento k ties 355 nm priklausomybė nuo deguonies srauto prieš atkaitinimą ir po atkaitinimo 300, 400 ir 500 °C temperatūrose. Taikinio padėtis išlaikyta pastovi, 113 mm.

9 grafike matyti, kad neatkaitintų B6 - B9 bandinių k yra mažas ir šiame deguonies srautų intervale kinta nedaug. Po 300 ir 400 °C atkaitinimo k padidėja, tačiau šis padidėjimas yra gerokai tolygesnis negu B1 - B5 grupėje. Po 500 °C atkaitinimo matomas ryškesnis k padidėjimas, ypač viename taške ties 50 sccm. Šis taškas neturėtų būti vertinamas kaip bendra deguonies srauto tendencija, nes gretimuose taškuose tokio šuolio nėra.

Apibendrinant 6 - 9 grafikų rezultatus matyti, kad B1 - B5 grupėje lūžio rodiklį ir ekstinkcijos koeficientą daugiausia keičia Ta_2O_5 ir SiO_2 frakcijų santykis. Didėjant SiO_2 daliai, n mažėja, o neatkaitintų bandinių k taip pat mažėja. B6 - B9 grupėje sudėtis beveik nekinta, dėl to aiškiau matomas deguonies srauto poveikis. Pagal lūžio rodiklį šioje grupėje išsiskiria 54 sccm deguonies srautas.

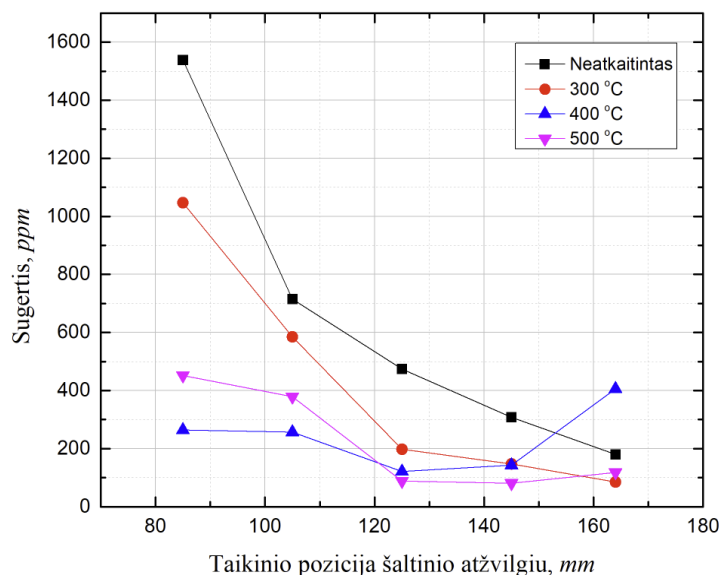
3.3 Sugerties analizė

Sugerties nuostoliai buvo vertinami lazerio sukulto užlinkimo LID metodu. Ši metodika tiesiogiai parodo fototerminį dangos atsaką ties 355 nm, o darbe ji yra svarbiausia vertinant realius sugerties nuostolius.



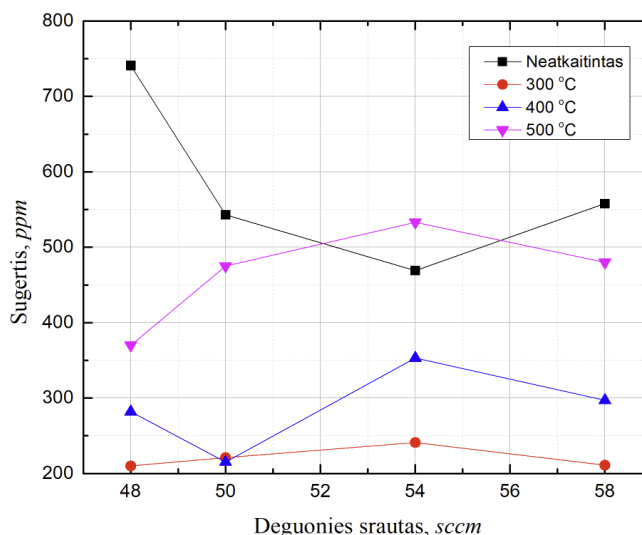
10 grafikas. LID matavimo signalo pavyzdys. Fotodiodo pozicijos pokytis registruojamas laike, įjungiant ir išjungiant sužadinimo pluoštą. Intarpe pažymėta matavimo zona, pagal kurią nustatomas stacionarus signalo pokytis.

Tipinis LID matavimo signalas pateiktas **10 grafike**. Įjungus sužadinimo pluoštą, dangoje sugerta spinduliuotės dalis sukelia temperatūros gradientą, todėl nukrypsta zondavimo pluoštas. Sugerties vertei apskaičiuoti naudojamas stacionarus signalo pokytis, pažymėtas intarpe. Pereinamoji signalo dalis nevertinama.



11 grafikas. Vienasluoksnių $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ dangų sugerties priklausomybė nuo taikinio padėties prieš atkaitinimą ir po atkaitinimo 300, 400 ir 500 °C temperatūrose.

11 grafike pateikta *B1 - B5* bandinių sugerties priklausomybė nuo taikinio padėties. Šioje bandinių grupėje keičiant taikinio padėtį jonų pluošto dėmės atžvilgiu mažėja Ta_2O_5 frakcija ir didėja SiO_2 frakcija. Šis grafikas pirmiausia parodo sudėties įtaką sugerčiai. Neatkaitintų bandinių kreivė rodo tendenciją, kad didėjant SiO_2 daliai, sugertis mažėja. Didžiausia sugertis gauta grynam Ta_2O_5 sluoksniui, o mažiausia tada, kai sluoksnyje vyrauja SiO_2 . Tai rodo, kad grynas Ta_2O_5 nėra palankiausias mažų sugerties nuostolių dangai ties 355 nm. Atkaitinimas pakeičia sugerties kreives. Po 300 °C atkaitinimo sugertis sumažėja beveik visoje *B1 - B5* bandinių grupėje, tačiau didesnę Ta_2O_5 dalį turintys bandiniai vis dar išlieka labiau sugeriantys. Po 400 °C atkaitinimo *B1 - B3* bandinių sugertis sumažėja dar labiau, bet *B5* taškas išsiskiria padidėjusia verte. 400 °C poveikis nėra vienodas visai sudėties grupei. Po 500 °C atkaitinimo mažiausios sugerties vertės gaunamos *B3 - B5* srityje. Tai rodo, kad mišrios sudėties sluoksniai arba sluoksniai, kuriuose didesnė SiO_2 dalis, po aukštesnės temperatūros atkaitinimo gali turėti mažesnius sugerties nuostolius. Vis dėlto didesnę Ta_2O_5 dalį turintiems *B1* ir *B2* bandiniams 500 °C atkaitinimas nėra palankiausias. Taigi atkaitinimo poveikis priklauso nuo dangos sudėties. Šie rezultatai rodo kompromisą tarp sugerties ir lūžio rodiklio n . Didėjant SiO_2 frakcijai sugertis mažėja, tačiau kartu mažėja ir lūžio rodiklis. Daugiasluoksnei dangai netikslinga rinktis nei gryno Ta_2O_5 , nei vien mažiausią sugertį turinčios sudėties. Tinkamesnė yra mišrios sudėties sritis, kurioje išlaikomas pakankamas lūžio rodiklis ir sumažėja sugerties nuostoliai. Pagal šią priklausomybę geriausiai išsiskiria *B3 - B4* bandiniai.



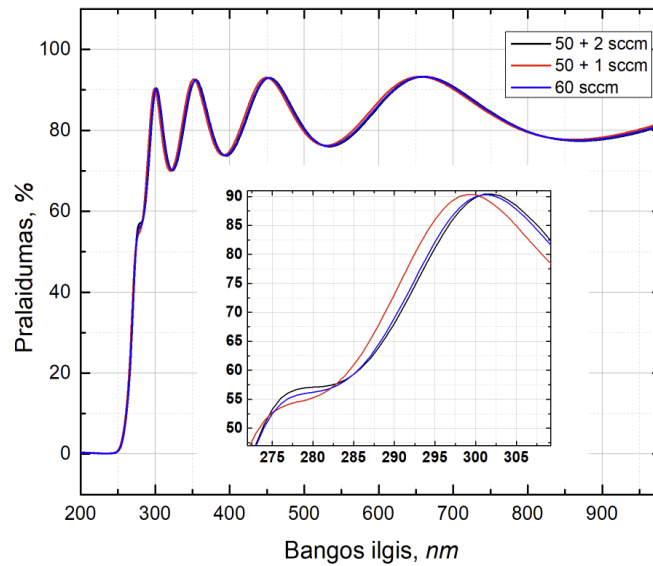
12 grafikas. Vienasluoksnių $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ dangų sugerties priklausomybė nuo deguonies srauto prieš atkaitinimą ir po atkaitinimo 300, 400 ir 500 °C temperatūrose. Taikinio padėtis išlaikyta pastovi. Pagrindinis kintamasis yra deguonies srautas.

12 grafike pateikta *B6 - B9* bandinių sugerties priklausomybė nuo deguonies srauto. Šioje bandinių grupėje Ta_2O_5 ir SiO_2 frakcijos kinta nedaug, tad sugerties pokyčiai daugiausia siejami su oksidavimo sąlygomis ir atkaitinimu. Neatkaitintų bandinių sugertis kinta nemonotoniškai. Mažiausia vertė gaunama ties 54 sccm deguonies srautu. Po 300 °C atkaitinimo sugertis sumažėja iki maždaug 210 - 240 ppm ir tampa beveik nepriklausoma nuo deguonies srauto. Tai rodo, kad 300 °C atkaitinimas šiai bandinių grupei yra palankiausias mažų sugerties nuostolių požiūriu. Po 400 °C atkaitinimo sugertis kai kuriuose taškuose padidėja, o po 500 °C atkaitinimo ši tendencija dar ryškesnė. Lyginant **11** ir **12 grafikus** matyti, kad *B1 - B5* bandinių grupėje labiausiai išryškėja sudėties įtaka, o *B6 - B9* grupėje aiškiau matomas deguonies srauto ir atkaitinimo poveikis. Daugiasluoksnei dangai formuoti racionalu rinktis ne didžiausią lūžio rodiklį turinčias sąlygas, o tokias, kurios išlaiko pakankamą optinį kontrastą ir mažina sugertį ties 355 nm.

Spektrofotometrijos metodu nustatytas ekstinkcijos koeficientas k ir LID metodu išmatuota sugertis ne visais atvejais kinta vienodai. Modeliuotas k turi būti vertinamas kartu su tiesioginiu sugerties matavimu. Parenkant mažų nuostolių dangos formavimo sąlygas šiame darbe svarbesni yra LID rezultatai ties 355 nm.

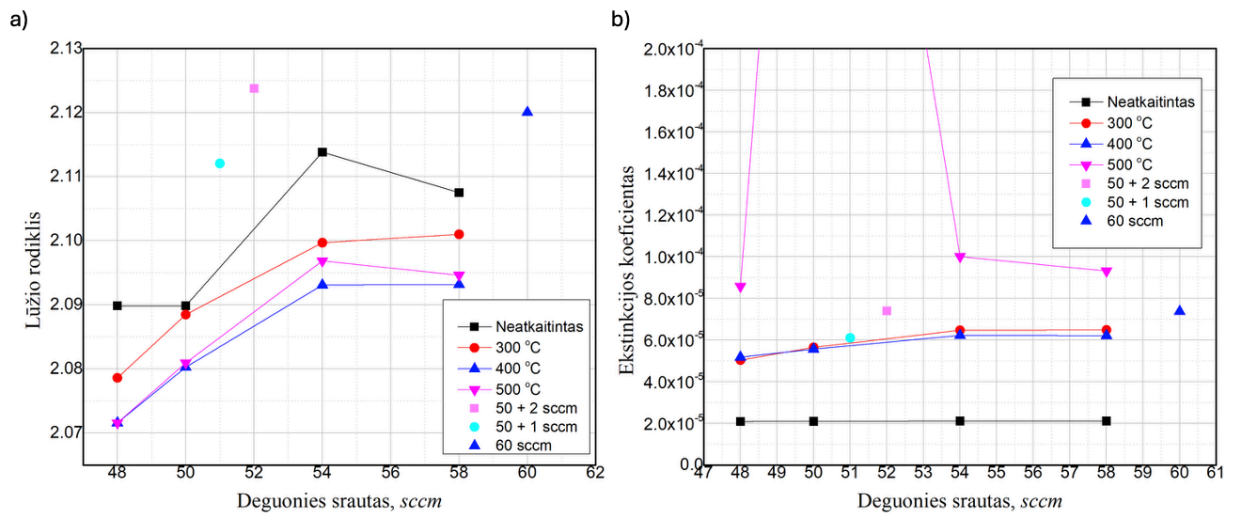
3.4 Optinių koeficientų ir sugerties priklausomybė nuo IBS pirminio šaltinio

Skyriuje vertinama papildomas IBS pirminio jonų šaltinio režimo keitimas veikia vienasluoksnių $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ dangų optines konstantas ir sugerties nuostolius. Ankstesniuose poskyriuose buvo nagrinėta dangos sudėties, deguonies srauto ir atkaitinimo įtaka. Šiuo atveju papildomai lyginami bandiniai, kuriuose buvo keistas deguonies tiekimas per pirminį šaltinį. Toks palyginimas leidžia patikrinti, ar šis technologinis parametras turi pastebimą poveikį dangos optiniam atsakui.



13 grafikas. Vienasluoksnių Ta₂O₅/SiO₂ dangų pralaidumo spektrai, gauti keičiant IBS pirminio šaltinio režimą. Įterptame lange parodytas skirtumas tarp spektrų.

Iš **13 grafiko** matyti, kad pralaidumo spektrai yra panašūs. Didžiausi skirtumai išryškėja trumpųjų bangų srityje. Tai rodo, kad pirminio šaltinio režimas nedaug keičia bendrą spektro pobūdį, tačiau gali turėti įtakos UV srities optiniam atsakui. Tuo remiantis modeliuojami spektrai ir įvertinamos optinės konstantos ties 355 nm kiekvienam spektrui bei palyginimas su bendru bandiniu kontekstu **14 grafikas**.



14 grafikas. Vienasluoksnių Ta₂O₅/SiO₂ dangų optinių konstantų priklausomybė nuo deguonies srauto ir pirminio šaltinio režimo ties 355 nm. a) lūžio rodiklis n , b) ekstinkcijos koeficientas k .

14 grafiko a dalyje matyti, kad papildomas pirminio šaltinio režimo keitimas padidina lūžio rodiklį n . Papildomuose režimuose, pažymėtuose kaip 50 + 1 sccm, 50 + 2 sccm ir 60 sccm, gaunamos didesnės n vertės negu bandiniuose, kuriuose deguonies srautas buvo keistas per papildomus šaltinius. Tai rodo, kad pirminio šaltinio sąlygos gali paveikti sluoksnio optinį tankį arba dangos sudėtį. Tuo tarpu

14 grafiko b dalyje matyti, kad kartu su didesniu n padidėja ir ekstinkcijos koeficientas k . Papildomuose režimuose k yra didesnis. Pokytis nėra vienareikšmiškai palankus mažų sugerties nuostolių dangai. Didesnis lūžio rodiklis gali būti naudingas daugiasluoksnės dangos optiniam kontrastui, tačiau padidėjęs k rodo didesnę sugerties riziką 355 nm.

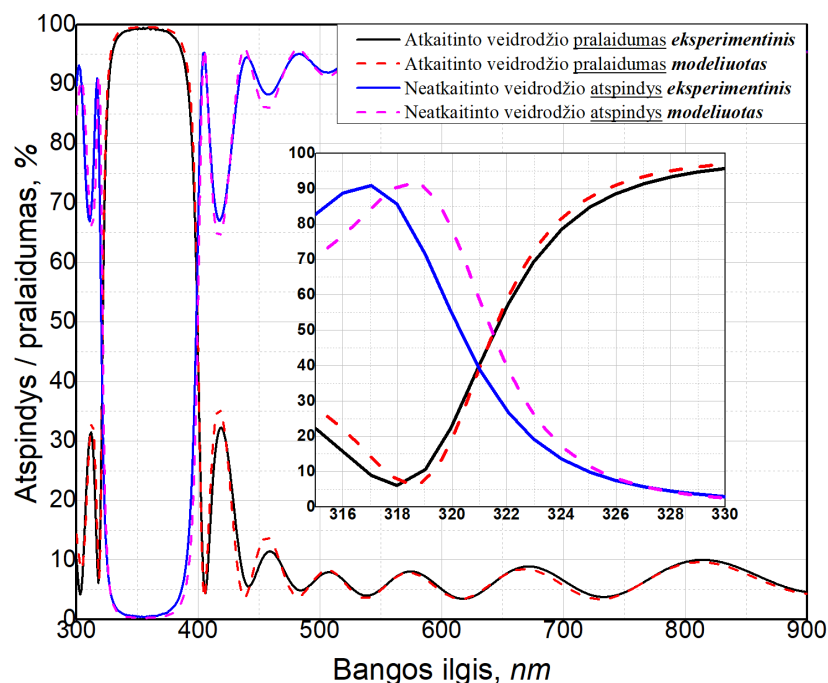
Pirminio šaltinio naudojimas rodo, kad vien deguonies srauto didinimas ir pirminio šaltinio režimo keitimas nėra tapatūs veiksniai dengimo metu. Pirminio šaltinio režimas leidžia padidinti n , tačiau kartu gali padidinti ir nuostolius. Optimaliam dangos formavimui parinkti nepakanka siekti didžiausio lūžio rodiklio. Reikia rinktis tokias sąlygas, kuriose išlaikomas pakankamas n , bet nedidindamas k ir LID metodu nustatyta sugertis.

3.5 Optimaliausio Brego veidrodžio tyrimas

Pagal vienasluoksnių $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ dangų tyrimus buvo pasirinktos sąlygos daugiasluoksnei Brego dangai formuoti. Atrankai naudoti trys pagrindiniai kriterijai: lūžio rodiklis n , ekstinkcijos koeficientas k ir LID metodu išmatuota sugertis ties 355 nm. Brego dangai pasirinkta 99 mm taikinio padėtis, 54 sccm deguonies srautas ir 300 °C atkaitinimas. Šios sąlygos pasirinktos kaip praktiškai palankus režimas pagal turimus vienasluoksnių dangų duomenis, bet jos nėra įvardijamos kaip vienareikšmiškai optimali atkaitinimo temperatūra. Toks atsargumas būtinas, nes pralaidumo spektrai 300 - 370 nm ruože rodo bendrą atkaitinimo naudą, tačiau neleidžia patikimai atskirti vienos geriausios temperatūros. Tada atliekama veidrodžio analizė: palyginami neatkaitinto ir atkaitinto veidrodžio spektrai, LID metodu išmatuota sugertis, LIDT vertės ir AFM paviršiaus morfologija.

3.5.1 Spektriniai matavimai ir atkaitinimo įtaka

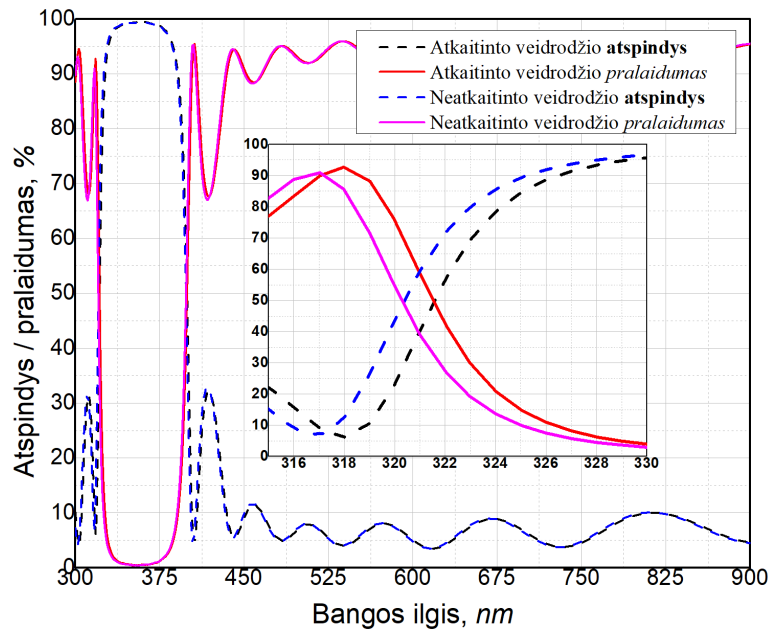
Tyrime palyginami neatkaitinto ir 300 °C temperatūroje atkaitinto Brego veidrodžio atspindžio bei pralaidumo spektrai. Vertinama, ar atkaitinimas pakeitė dangos spektrinę padėtį ir ar 355 nm bangos ilgis išlieka didelio atspindžio juostoje.



15 grafikas. Neatkaitinto ir 300 °C temperatūroje atkaitinto Brego veidrodžio atspindžio bei pralaidumo spektrai. Įterptame grafike parodytas trumpabangis didelio atspindžio juosta.

Iš **15 grafiko** matyti, kad po atkaitinimo trumpabangis didelio atspindžio juostos kraštas nežymiai pasislenka į ilgesnių bangų pusę. Pagal 50 % atspindžio ir pralaidumo susikirtimo sritį poslinkis sudaro apie 1 nm. Toks pokytis rodo nedidelį dangos optinio storio pasikeitimą po atkaitinimo. 355 nm sritis po atkaitinimo lieka didelio atspindžio juostoje.

Papildomai iš pralaidumo spektrų 300 - 370 nm ruože matyti, kad atkaitinimas bendrai gerina dangos optinį atsaką. Neatkaitintas bandinys pasižymi mažesniu pralaidumu, todėl bangų ruože tikėtinas didesnis sugerties arba kitų optinių nuostolių indėlis. Atkaitintų bandinių pralaidumas yra didesnis, tačiau skirtumai tarp skirtingų atkaitinimo temperatūrų nėra pakankamai aiškūs, kad pagal šiuos spektrus būtų galima išskirti vieną palankiausią temperatūrą.



16 grafikas. Brego veidrodžio eksperimentinių ir modeliutų spektrų palyginimas. Juodos ir raudonos kreivės rodo atkaitinto veidrodžio pralaidumą, mėlynos ir rausvos kreivės rodo neatkaitinto veidrodžio atspindį. Įterptame grafike parodytas skirtumas trumpame bangos ilgio juostoje.

Pateiktame **16 grafike** matomas eksperimentinių ir modeliutų spektrų palyginimas rodo, kad modelis gerai atkuria pagrindinę veidrodžio spektrinę elgseną. Atkaitinto veidrodžio pralaidumo kraštas sutampa geriausiai. Pagal 50 % lygmenį modelio ir eksperimento skirtumas yra mažesnis negu 0,5 nm. Neatkaitinto veidrodžio atspindžio atveju modeliuotas kraštas yra pasislinkęs į ilgesnių bangų pusę maždaug 1 nm. Didesni skirtumai matomi už didelio atspindžio juostos ribų, ypač maždaug 410 - 470 nm ruože. Ten skiriasi osciliacijų amplitudės ir kai kurių minimumų padėtys. Tokį nesutapimą galima sieti su nedideliais sluoksnių storio, lūžio rodiklio arba ekstinkcijos koeficiento nuokrypiais nuo modelyje naudotų verčių. Šie skirtumai nėra lemiami 355 nm analizei, nes darbinė sritis yra didelio atspindžio juostoje.

Atkaitinimas ties 300 °C sukėlė tik nedidelį, apie 1 nm, spektrinį poslinkį į ilgesnių bangų pusę. Ties 355 nm Brego veidrodis išliko didelio atspindžio režime, dėl to vėlesni LID ir LIDT rezultatų pokyčiai neturėtų būti siejami su reikšmingu pokyčiu. Juos tikslingiau vertinti per sugerties, defektinių būsenų, sluoksnių ribų ir paviršiaus morfologijos pokyčius.

3.5.2 Sugerties matavimai ir atkaitinimo įtaka

Brego veidrodžio sugertis buvo išmatuota LID metodu prieš atkaitinimą ir po 300 °C atkaitinimo. Prieš atkaitinimą sugertis ties 355 nm siekė 450 ppm, o po atkaitinimo sumažėjo iki 232 ppm. 300 °C atkaitinimas sumažino daugiasluoksnės dangos sugerties nuostolius. Tačiau šio rezultato nereikia tiesiogiai tapatinti su vienasluoksnių dangų elgsena, nes Brego veidrodyje sugertį papildomai lemia

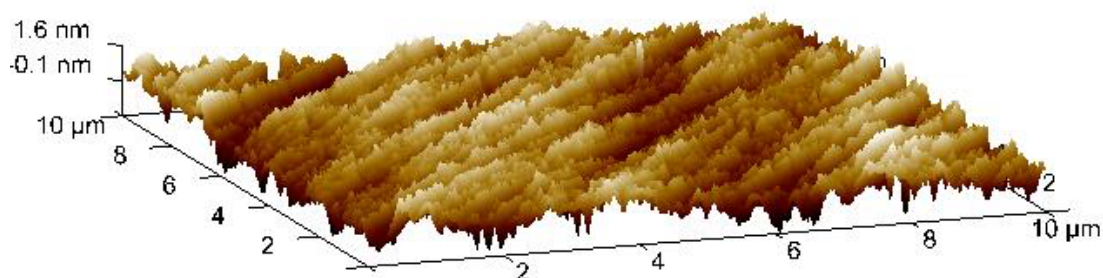
elektrinio lauko pasiskirstymas, sluoksnių sandūros ir dangos struktūros tikslumas. Po atkaitinimo išmatuota 232 ppm sugertis rodo, kad pasirinktas režimas tinka mažesnių sugerties nuostolių Ta₂O₅/SiO₂ Brego dangai formuoti 355 nm srityje.

3.5.3 LIDT tyrimas

Brego veidrodžio atsparumas 355 nm lazerio spinduliuotei buvo įvertintas LIDT matavimais. Tyrimo metu naudotas Ekspla gamintojo lazeris. Matavimo metu naudota impulsų trukmė buvo 2,8 ns, o dažnis 10 Hz. Neatkaitinto bandinio LIDT vertė siekė 5,71 J/cm², o po 300 °C atkaitinimo sumažėjo iki 4,48 J/cm². Pirmosios pažaidos užfiksuotos atitinkamai ties 3,33 J/cm² ir 3,87 J/cm². Energijos tankis, kuriam esant buvo pažeistos visos apšvitintos vietos, abiem atvejais buvo panašus ir siekė apie 14 J/cm². Nors atkaitinimas sumažino LID metodu išmatuotą sugertį, LIDT vertė nepadidėjo. Tai rodo, kad šiame bandinyje lazerinis atsparumas nebuvo tiesiogiai nulemtas vien vidutinės sugerties. Daugiasluoksniėje dangoje pažaidos pradžia gali turėti elektrinio lauko pasiskirstymas, sluoksnių sandūros, vietiniai defektai ir paviršiaus morfologija. AFM matavimai parodė, kad po atkaitinimo kvadratinis vidutinis šiurkštumas padidėjo nuo 0,4 nm iki 0,44 nm. Šis pokytis yra nedidelis, todėl jo negalima laikyti vienintele LIDT sumažėjimo priežastimi. Jis tik rodo, kad po atkaitinimo paviršiaus būseną šiek tiek pasikeitė. Taigi, 300 °C atkaitinimas buvo palankus sugerties mažinimui, bet bandinyje nepagerino lazerinio atsparumo. LID ir LIDT rezultatai turi būti vertinami atskirai, nes jie apibūdina skirtingus dangos kokybės aspektus.

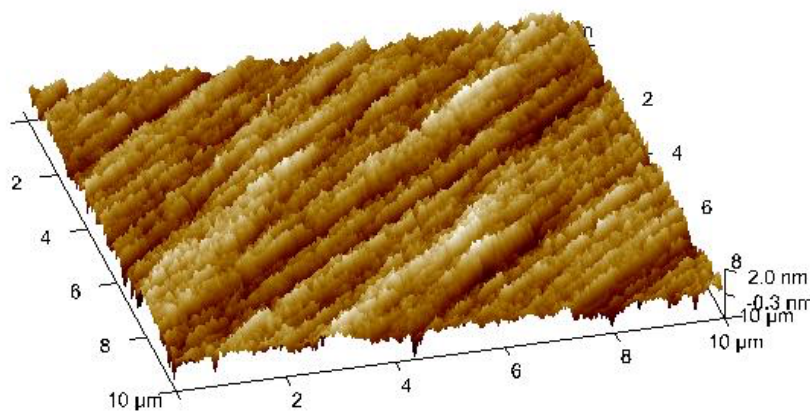
3.5.4 AFM analizė

Veidrodžio paviršiaus morfologija įvertinta AFM metodu prieš atkaitinimą ir po 300 °C atkaitinimo. Matavimai atlikti 10×10 μm² skenavimo plote. Ši analizė reikalinga patikrinti, ar atkaitinimas nepakeitė paviršiaus reljefo tiek, kad tai galėtų paveikti sklaidą arba lazerinės pažaidos pradžią.



22 pav. Neatkaitinto Brego veidrodžio AFM paviršiaus topografija 10×10 μm² skenavimo plote.

Iš **22 pav.** matyti lygus paviršius be stambių lokalių defektų. Paviršiuje išlieka kryptinė ruožuota struktūra. Neatkaitinto veidrodžio kvadratinis vidutinis šiurkštumas buvo 0,40 nm.



23 pav. Po 300 °C atkaitinimo Brego veidrodžio AFM paviršiaus topografija 10 × 10 μm² skenavimo plote.

Po 300 °C atkaitinimo paviršiaus vaizdas išliko panašus. Naujų stambių defektų ar aiškiai šiurkštesnių sričių nepastebėta. Kvadratinis vidutinis šiurkštumas padidėjo nuo 0,40 nm iki 0,44 nm, tačiau absoliutus pokytis yra mažas. AFM rezultatai rodo, kad 300 °C atkaitinimas reikšmingai nepakeitė Brego veidrodžio paviršiaus morfologijos. Šiurkštumo pokytis neturėtų būti laikomas pagrindiniu sugerties ar LIDT pokyčių paaiškinimu.

4. Pagrindiniai rezultatai ir išvados

1. Jonapluoščio dulkinimo technologija suformuotos 9 vienasluoksnės Ta₂O₅/SiO₂ mišinių dangos. *B1 - B5* bandiniuose, keičiant taikinio padėtį nuo 85 mm iki 164 mm, Ta₂O₅ frakcija sumažėjo nuo 100 % iki 9,3 %. *B6 - B9* bandiniuose taikinio padėtis buvo pastovi ir siekė 113 mm, o deguonies srautas buvo keičiamas nuo 48 sccm iki 58 sccm. Šioje grupėje Ta₂O₅ frakcija kito nedaug, nuo 73,4 % iki 76,1 %, dėl to buvo galima vertinti ne sudėties, o oksidavimo sąlygų įtaką dangų savybėms.
2. Iš atspindžio ir pralaidumo spektrų modelių nustatyta, kad didėjant SiO₂ kiekiui lūžio rodiklis n ties 355 nm mažėja (sumažėjo nuo maždaug 2,30 iki 1,56). *B6 - B9* bandiniuose, išlaikant pastovią taikinio poziciją, Ta₂O₅ frakcija pakito 3,7 %. Šios grupės optinių konstantų pokyčiai daugiausia sietini su deguonies srauto sukeltais dengimo greičio pokyčiais Ta₂O₅/SiO₂ medžiagoms ir atkaitinimu.
3. Atkaitinimas pakeitė vienasluoksnių Ta₂O₅/SiO₂ dangų spektrus ir optines konstantas. Didesnę Ta₂O₅ frakciją turinčiuose dangose po atkaitinimo lūžio rodiklis n šiek tiek sumažėjo. Tai rodo, kad dangoje galėjo vykti struktūrinis persitvarkymas arba tankio pokytis, o didesnę SiO₂ frakciją turinčiuose mišiniuose šie pokyčiai buvo silpnesni. SiO₂ dalis stabilizavo optines savybes, bet kartu mažino lūžio rodiklių skirtumą, kuris yra svarbus formuojant daugiasluoksnę Brego dangą.

4. LID matavimai parodė, kad 355 nm spinduliuotės sugertis priklauso nuo mišinio sudėties, deguonies srauto ir atkaitinimo. Didėjant SiO₂ frakcijai sugerties nuostoliai mažėjo. Tai siejama su mažesniu Ta₂O₅ kiekiu, nes ši medžiaga UV ruože yra jautresnė defektinėms ir nevysiškai oksiduotoms būsenoms. B6 - B9 grupėje deguonies srautas mišinio sudėtį keitė mažai, tačiau sugertis vis tiek kito. Vadinasi, sugertį lemia ne tik Ta₂O₅ frakcija, bet ir oksidavimo sąlygos.
5. Po 300 °C atkaitinimo daugiasluoksnės Ta₂O₅/SiO₂ Brego dangos 355 nm spinduliuotės sugertis sumažėjo nuo 450 ppm iki 232 ppm, o lazerinės pažaidos slenkstis sumažėjo nuo 5,71 J/cm² iki 4,48 J/cm². Šie pokyčiai parodo, kad dėl atkaitinimo dangos medžiagų stechiometrija pagerėja, tačiau kaitinimo procesas gali sukelti papildomus defektus sistemoje, nulemiančius nanosekundinių impulsų pažaidos slenkstį. AFM matavimai parodė tik nedidelį paviršiaus šiurkštumo pokytį nuo 0,40 nm iki 0,44 nm.

Šaltinių sąrašas

1. Stenzel O. Optical Coatings. Material Aspects in Theory and Practice. Springer, 2014. DOI 10.1007/978-3-642-54063-9.
2. Arnon O. Loss Mechanisms in Dielectric Optical Interference Devices. *Applied Optics*, 1977, 16, 2147–2151. DOI 10.1364/AO.16.002147.
3. Tikhonravov A. V., Trubetskov M. K., Amotchkina T. V. et al. Optical Parameters of Oxide Films Typically Used in Optical Coating Production. *Applied Optics*, 2011, 50, C75–C85. DOI 10.1364/AO.50.000C75.
4. Demiryont H., Sites J. R., Geib K. Effects of Oxygen Content on the Optical Properties of Tantalum Oxide Films Deposited by Ion-Beam Sputtering. *Applied Optics*, 1985, 24, 490–495. DOI 10.1364/AO.24.000490.
5. Stenzel O., Wilbrandt S., Kaiser N. et al. Mixed Oxide Coatings for Optics. *Applied Optics*, 2011, 50, C69–C74. DOI 10.1364/AO.50.000C69.
6. Bundesmann C., Neumann H. Tutorial: The Systematics of Ion Beam Sputtering for Deposition of Thin Films with Tailored Properties. *Journal of Applied Physics*, 2018, 124, 231102. DOI 10.1063/1.5054046.
7. Macleod H. A. Thin-Film Optical Filters. 4th ed. CRC Press, 2010. DOI nėra.
8. Thelen A. Design of Optical Interference Coatings. McGraw-Hill, 1989. DOI nėra.
9. Melnikas S., Tolenis T., Smalakys L. et al. Enhancement of Laser-Induced Damage Threshold in Chirped Mirrors by Electric Field Reallocation. *Optics Express*, 2017, 25, 26537–26545. DOI 10.1364/OE.25.026537.
10. Falmbigl M., Godin K., George J. et al. Effect of Annealing on Properties and Performance of HfO₂/SiO₂ Optical Coatings for UV Applications. *Optics Express*, 2022, 30, 12326–12336. DOI 10.1364/OE.453345.
11. Tikhonravov A. V., Amotchkina T. V., Trubetskov M. K. et al. Optical Characterization and Reverse Engineering Based on Multiangle Spectroscopy. *Applied Optics*, 2012, 51, 245–254. DOI 10.1364/AO.51.000245.
12. Stenzel O., Ohlídal M. Optical Characterization of Thin Solid Films. Springer, 2018. DOI 10.1007/978-3-319-75325-6.
13. Abromavičius G., Kičas S., Buzelis R. High Temperature Annealing Effects on Spectral, Microstructural and Laser Damage Resistance Properties of Sputtered HfO₂ and HfO₂-SiO₂

- Mixture-Based UV Mirrors. *Optical Materials*, 2019, 95, 109245. DOI 10.1016/j.optmat.2019.109245.
14. Chen T., Wang D., Xiong Y. Study of Stress in TiO₂ Films Grown by Electron-Beam Evaporation. *Advanced Materials Research*, 2011, 189–193, 1233–1237. DOI 10.4028/www.scientific.net/AMR.189-193.1233.
 15. Qiao Z., Pu Y., Liu H. et al. Residual Stress and Laser-Induced Damage of Ion-Beam Sputtered Ta₂O₅/SiO₂ Mixture Coatings. *Thin Solid Films*, 2015, 592, 221–224. DOI 10.1016/j.tsf.2015.06.023.
 16. Amotchkina T. V., Alexandrovski A., Harthcock C. et al. Study of Spontaneous and Induced Absorption in Amorphous Ta₂O₅ and SiO₂ Dielectric Thin Films. *Journal of Applied Physics*, 2013, 113, 133104. DOI 10.1063/1.4799415.
 17. Zhang M., Qiu F., Qiao Z. et al. High-Repetition Rate Picosecond Laser-Induced Damage Properties of Ta₂O₅:SiO₂ Coatings. *Frontiers in Physics*, 2022, 10, 981024. DOI 10.3389/fphy.2022.981024.
 18. Gischkat T., Schachtler D., Steger F. et al. Low-Temperature Ion Beam Sputtered Optical Coatings. *Applied Optics*, 2023, 62, B195–B201. DOI 10.1364/AO.480089.
 19. Schwyn Thöny S., Bärtschi M., Batzer M. et al. Magnetron Sputter Deposition of Ta₂O₅-SiO₂ Quantized Nanolaminates. *Optics Express*, 2023, 31, 15825–15835. DOI 10.1364/OE.487892.
 20. Bärtschi M., Waldner S., Steger F. et al. UV Coatings Using Ta₂O₅-SiO₂ Quantized Nanolaminates. *Journal of the European Optical Society Rapid Publications*, 2025, 21, 2025021. DOI 10.1051/jeos/2025021.
 21. Lv Q., Huang M., Zhang S. et al. Effects of Annealing on Residual Stress in Ta₂O₅ Films Deposited by Dual Ion Beam Sputtering. *Coatings*, 2018, 8, 150. DOI 10.3390/coatings8040150.
 22. Alam S., Paul P., Beladiya V. et al. Heterostructure Films of SiO₂ and HfO₂ for High Power Laser Optics Prepared by Plasma-Enhanced Atomic Layer Deposition. *Advanced Optical Materials*, 2023, 11, 2202846. DOI 10.1002/adom.202202846.
 23. Falmbigl M., Godin K., George J. et al. Effect of Annealing on Properties and Performance of HfO₂/SiO₂ Optical Coatings for UV Applications. *Supplementary Material. Figshare*, 2022. DOI 10.6084/m9.figshare.19397045.
 24. Bischoff M., Nowitzki T., Voß O. et al. Postdeposition Treatment of IBS Coatings for UV Applications with Optimized Thin-Film Stress Properties. *Applied Optics*, 2014, 53, A212–A220. DOI 10.1364/AO.53.00A212.

25. Zhao Y. A., Wang Y. J., Gong H. et al. Annealing Effects on Structure and Laser-Induced Damage Threshold of Ta₂O₅/SiO₂ Dielectric Mirrors. *Applied Surface Science*, 2003, 210, 353–358. DOI 10.1016/S0169-4332(03)00153-3.
26. Xu C., Xiao Q., Ma J. et al. High Temperature Annealing Effect on Structure, Optical Property and Laser-Induced Damage Threshold of Ta₂O₅ Films. *Applied Surface Science*, 2008, 254, 6554–6559. DOI 10.1016/j.apsusc.2008.04.034.
27. Kičas S., Gimževskis U., Melnikas S. Post Deposition Annealing of IBS Mixture Coatings for Compensation of Film Induced Stress. *Optical Materials Express*, 2016, 6, 2236–2243. DOI 10.1364/OME.6.002236.
28. Modreanu M., Sancho-Parramon J., Durand O. et al. Investigation of Thermal Annealing Effects on Microstructural and Optical Properties of HfO₂ Thin Films. *Applied Surface Science*, 2006, 253, 328–334. DOI 10.1016/j.apsusc.2006.06.005.
29. Jena S., Tokas R. B., Rao K. D. et al. Spectral, Microstructural and Laser Damage Threshold Properties of Annealed HfO₂/SiO₂ Dielectric Mirrors. *Applied Optics*, 2016, 55, 6108–6114. DOI 10.1364/AO.55.006108.
30. Liu H., Jiang Y., Wang L. et al. Effect of Heat Treatment on Properties of HfO₂ Film Deposited by Ion-Beam Sputtering. *Optical Materials*, 2017, 73, 95–101. DOI 10.1016/j.optmat.2017.07.048.
31. Lee S. M., Dummer A., Montcalm C., Kohli S. Annealing Effects on the Properties of Optical Filters. *Proceedings of the Society of Vacuum Coaters Annual Technical Conference*, 2002, 220–223. DOI nėra.
32. Stenzel O., Wilbrandt S., Kaiser N. et al. The Correlation Between Mechanical Stress, Thermal Shift and Refractive Index in HfO₂, Nb₂O₅, Ta₂O₅ and SiO₂ Layers and Its Relation to the Layer Porosity. *Thin Solid Films*, 2009, 517, 6058–6068. DOI 10.1016/j.tsf.2009.05.009.
33. Yoon S. G., Kang S. M., Yoon D. H. Post-Annealing Effects on the Structural Properties and Residual Stress of Ta₂O₅ Thin Films Deposited by Ion Beam Sputtering. *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, 2007, 9, 1246–1249. Prieiga internete: <https://joam.inoe.ro/articles/post-annealing-effects-on-the-structural-properties-and-residual-stress-of-ta2o5-thin-films-deposited-by-ion-beam-sputtering/fulltext>
34. Weiss M., Davenport A., Castro Lucas S. et al. Laser Damage of UV Hafnia-Based Multilayer Dielectric Coatings at 355 nm Wavelength. *Proceedings of SPIE*, 2024, 13190, 1319003. DOI 10.1364/AO.557518.

35. Sakiew W., Schwerdtner P., Jupé M. et al. Impact of Ion Species on Ion Beam Sputtered Ta₂O₅ Layer Quality Parameters and on Corresponding Process Productivity: A Preinvestigation for Large-Area Coatings. *Journal of Vacuum Science and Technology A*, 2021, 39, 063402. DOI 10.1116/6.0001224.
36. Cevro M., Carter G., Leplan H., Szydłowski H. Ion-Beam Sputtering of (Ta₂O₅)_x-(SiO₂)_{1-x} Composite Thin Films. *Thin Solid Films*, 1995, 258, 91–103. DOI 10.1116/1.3137965.
37. Polenzky C., Rickers C., Vergöhl M. Properties of Cosputtered SiO₂-Ta₂O₅ Mixtures. *Thin Solid Films*, 2009, 517, 3126–3129. DOI 10.1016/j.tsf.2008.11.095.
38. Rodríguez-de Marcos L. V., Larruquert J. I., Méndez J. A., Aznárez J. A. Self-Consistent Optical Constants of SiO₂ and Ta₂O₅ Films. *Optical Materials Express*, 2016, 6, 3622–3637. DOI 10.1364/OME.6.003622.
39. Kumar S., Rao K. D., Jena S. et al. Laser Induced Damage Threshold of Ta₂O₅ and Ta₂O₅/SiO₂ Thin Films. *Optik*, 2019, 181, 356–362. DOI 10.1016/j.ijleo.2018.09.026.
40. Zhang L., Chang Z., Peng Y. et al. Effect of Femtosecond Laser Polarization on the Damage Threshold of Ta₂O₅/SiO₂ Film. *Applied Sciences*, 2022, 12, 1494. DOI 10.3390/app12031494.
41. Mangote B., Gallais L., Commandré M. et al. Femtosecond Laser Damage Resistance of Oxide and Mixture Oxide Optical Coatings. *Optics Letters*, 2012, 37, 1478–1480. DOI 10.1364/OL.37.001478.
42. Tang C. J., Jiang C. C., Lee K. S., Lee C. C. Residual Stress in Ta₂O₅-SiO₂ Composite Thin-Film Rugate Filters Prepared by Radio Frequency Ion-Beam Sputtering. *Applied Optics*, 2008, 47, C167–C171. DOI 10.1364/AO.47.00C167.
43. Song S., Cai S., Han D. et al. Tantalum Oxide and Silicon Oxide Mixture Coatings Deposited Using Microwave Plasma Assisted Co-Sputtering for Optical Mirror Coatings in Gravitational Wave Detectors. *Applied Optics*, 2023, 62, B73–B78. DOI 10.1364/AO.477211.
44. Pal S., Kamparath R., Subrahmanyam V. V. V. et al. Sol-Gel Dip Coating of Ta₂O₅/SiO₂ Anti-Reflection Films on Fused Silica for Developing Laser Optics with High Laser Induced Damage Threshold. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 2025, 115, 115–129. DOI 10.1007/s10971-025-06761-1.
45. Pond B. J., DeBar J. I., Carniglia C. K., Raj T. Stress Reduction in Ion Beam Sputtered Mixed Oxide Films. *Applied Optics*, 1989, 28, 2800–2805. DOI 10.1364/AO.28.002800.
46. Bruns S., Vergöhl M., Werner O., Wallendorf T. High Rate Deposition of Mixed Oxides by Controlled Reactive Magnetron-Sputtering from Metallic Targets. *Thin Solid Films*, 2012, 520, 4122–4126. DOI 10.1016/j.tsf.2011.07.014.

47. Langston P., Patel D., Regan B. et al. Influence of Oxygen Pressure Variations on the Optical Properties of Ion Beam Sputtered Metal Oxide Coatings. *Frontiers in Optics* 2011, paper JWA25.
48. Lappschies M., Jupé M., Ristau D. Extension of Ion-Beam-Sputtered Oxide Mixtures into the UV Spectral Range. *Optical Interference Coatings*, OSA Technical Digest, 2007, paper TuA7. DOI 10.1364/OIC.2007.TuA7.
49. Perner L., Wittwer V., Truong G. et al. Ion-Beam-Sputtered Mid-Infrared Coatings for Hybrid Supermirrors. *Applied Optics*, 2026, 65, A201–A207. DOI 10.1364/AO.575163.
50. Sites J. R., Gilstrap P., Rujkorakarn R. Ion Beam Sputter Deposition of Optical Coatings. *Optical Engineering*, 1983, 22, 224447. DOI 10.1117/12.7973141.
51. Laser Zentrum Hannover. Operation Manual V1.1, IBS@LAB Deposition System. 2009.
52. Lappschies M., Gross T., Ehlers H., Ristau D. Broadband Optical Monitoring for the Deposition of Complex Coatings. *Proceedings of SPIE*, 2004. DOI 10.1117/12.514800.
53. Becker J., Hengst J. Coatings for Optical Applications Produced by Ion Beam Sputter Deposition. *Applied Optics*, 1990, 29, 4303–4308. DOI 10.1364/AO.29.004303.
54. Ribeaud A., Pervak V., Guignard R. et al. Accurate Measurement and Reduction of Losses in Ion Beam Sputtering Coatings. *Proceedings of SPIE*, 2024, 13020, 130200P. DOI 10.1117/12.3023035.
55. Triebel W., Mühligh C., Kufert S. Application of the Laser Induced Deflection Technique for Low Absorption Measurements in Bulk Materials and Coatings. *Proceedings of SPIE*, 2005, 5965, 596515. DOI 10.1117/12.625083.
56. Bublit S., Mühligh C. Absolute Absorption Measurements in Optical Coatings by Laser Induced Deflection. *Coatings*, 2019, 9, 473. DOI 10.3390/coatings9080473.
57. Mühligh C., Triebel W., Kufert S., Bublit S. Characterization of Low Losses in Optical Thin Films and Materials. *Applied Optics*, 2008, 47, C135–C142. DOI 10.1364/AO.47.00C135.
58. Heber J., Mühligh C., Triebel W. et al. Deep UV Laser Induced Luminescence in Oxide Thin Films. *Applied Physics A*, 2002, 75, 637–640. DOI 10.1007/s00339-002-1446-0.
59. Mühligh C., Schmidl G., Bergmann J., Triebel W. Characterization of High Reflecting Coatings and Optical Materials by Direct Absorption and Cavity Ring Down Measurements. *Proceedings of SPIE*, 2008, 7102, 71020T. DOI 10.1117/12.797679.
60. Mühligh C., Bublit S., Kufert S. Nonlinear Absorption in Single LaF_3 and MgF_2 Layers at 193 nm Measured by Surface Sensitive Laser Induced Deflection Technique. *Applied Optics*, 2009, 48, 6781–6787. DOI 10.1364/AO.48.006781.

61. ISO 21254-1. Lasers and Laser-Related Equipment. Test Methods for Laser-Induced Damage Threshold. Part 1. Definitions and General Principles. International Organization for Standardization, 2025. Prieiga internete: <https://www.iso.org/standard/43001.html>
62. ISO 21254-2. Lasers and Laser-Related Equipment. Test Methods for Laser-Induced Damage Threshold. Part 2. Threshold Determination. International Organization for Standardization, 2011. Prieiga internete: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:21254:-2:ed-1:v1:en>
63. Ristau D. Laser-Induced Damage in Optical Materials. CRC Press, 2014. DOI 10.1201/b17722.
64. Capoulade J., Natoli J.-Y., Commandré M. et al. Multiscale Analysis of the Laser-Induced Damage Threshold in Optical Coatings. *Applied Optics*, 2008, 47, 5272–5280. DOI 10.1364/AO.47.005272.
65. Velpula P. K., Kramer D., Rus B. Femtosecond Laser-Induced Damage Characterization of Multilayer Dielectric Coatings. *Coatings*, 2020, 10, 603. DOI 10.3390/coatings10060603.
66. Manifacier J. C., Gasiot J., Fillard J. P. A Simple Method for the Determination of the Optical Constants n , k and the Thickness of a Weakly Absorbing Thin Film. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, 1976, 9, 1002–1004. DOI 10.1088/0022-3735/9/11/032.
67. Swanepoel R. Determination of the Thickness and Optical Constants of Amorphous Silicon. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, 1983, 16, 1214–1222. DOI 10.1088/0022-3735/16/12/023.
68. Poelman D., Smet P. F. Methods for the Determination of the Optical Constants of Thin Films from Single Transmission Measurements: A Critical Review. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2003, 36, 1850–1857. DOI 10.1088/0022-3727/36/15/316.
69. Chambouleyron I., Martínez J. M., Moretti A. C., Mulato M. Retrieval of Optical Constants and Thickness of Thin Films from Transmission Spectra. *Applied Optics*, 1997, 36, 8238–8247. DOI 10.1364/AO.36.008238.
70. Birgin E. G., Chambouleyron I., Martínez J. M. Estimation of the Optical Constants and the Thickness of Thin Films Using Unconstrained Optimization. *Journal of Computational Physics*, 1999, 151, 862–880. DOI 10.1006/jcph.1999.6224.
71. Palmer K. F., Williams M. Z. Determination of the Optical Constants of a Thin Film from Transmittance Measurements of a Single Film Thickness. *Applied Optics*, 1985, 24, 1788–1793. DOI 10.1364/AO.24.001788.
72. Andrade R., Birgin E. G., Chambouleyron I. et al. Estimation of the Thickness and the Optical Parameters of Several Stacked Thin Films Using Optimization. *Applied Optics*, 2008, 47, 5208–5220. DOI 10.1364/AO.47.005208.

73. Jin Y., Tanemura T., Okada T. et al. Improvement of Swanepoel Method for Deriving the Thickness and the Optical Constants of Thin Films. *Optics Express*, 2017, 25, 440–451. DOI 10.1364/OE.25.000440.
74. Dutta R., Tan Y. Y., Krishnan S., Lal A. Extracting Film Thickness and Optical Constants from Spectrophotometric Data by Evolutionary Optimization. *PLOS ONE*, 2022, 17, e0276555. DOI 10.1371/journal.pone.0276555.
75. Viezbicke B. D., Patel S., Davis B. E., Birnie D. P. III. Evaluation of the Tauc Method for Optical Absorption Edge Determination: ZnO Thin Films as a Model System. *physica status solidi b*, 2015, 252, 1700–1710. DOI 10.1002/pssb.201552007.
76. Cody G. D., Tiedje T., Abeles B. et al. Disorder and the Optical-Absorption Edge of Hydrogenated Amorphous Silicon. *Physical Review Letters*, 1981, 47, 1480–1483. DOI 10.1103/PhysRevLett.47.1480.
77. Tauc J., Grigorovici R., Vancu A. Optical Properties and Electronic Structure of Amorphous Germanium. *physica status solidi*, 1966, 15, 627–637. DOI 10.1002/pssb.19660150224.
78. Binnig G., Quate C. F., Gerber C. Atomic Force Microscope. *Physical Review Letters*, 1986, 56, 930–933. DOI 10.1103/PhysRevLett.56.930.
79. Klapetek P. Scanning Probe Microscopy Characterization of Optical Thin Films. In: Stenzel O., Ohlídal M. *Optical Characterization of Thin Solid Films*. Springer, 2018. DOI 10.1007/978-3-319-75325-6_11.
80. Nečas D., Klapetek P. Gwyddion: An Open-Source Software for SPM Data Analysis. *Central European Journal of Physics*, 2012, 10, 181–188. DOI 10.2478/s11534-011-0096-2.
81. Nečas D., Valtr M., Klapetek P. How Levelling and Scan Line Corrections Ruin Roughness Measurement and How to Prevent It. *Scientific Reports*, 2020, 10, 15294. DOI 10.1038/s41598-020-72171-8.
82. Schröder S., Duparré A., Coriand L. et al. Roughness Evolution and Scatter Losses of Multilayers for 193 nm Applications. *Applied Optics*, 2008, 47, C88–C93. DOI 10.1364/AO.47.000C88.
83. Jakobs S., Duparré A., Stenzel O. Interfacial Roughness and Related Scatter in Ultraviolet Optical Coatings. *Applied Optics*, 1998, 37, 1180–1193. DOI 10.1364/AO.37.001183.
84. Schröder S., Herffurth T., Duparré A. Impact of Surface Roughness on Scatter Losses and the Scattering Distribution of Surfaces and Thin Film Coatings. *Proceedings of SPIE*, 2011, 8169, 816905. DOI 10.1117/12.896989.

85. ISO 25178-2. Geometrical Product Specifications. Surface Texture. Areal. Part 2. Terms, Definitions and Surface Texture Parameters. International Organization for Standardization, 2021. DOI n'era.
86. Staggs M. C., Kozlowski M. R., Balooch M. In-Situ Atomic-Force Microscopy of Laser-Conditioned and Laser-Damaged Dielectric Mirror Coatings. Proceedings of SPIE, 1992, 1624, 501–510. DOI 10.1117/12.60129.

INVESTIGATION OF ABSORPTION LOSSES IN Ta₂O₅/SiO₂ MULTILAYER OXIDE OPTICAL COATINGS DEPOSITED BY ION BEAM SPUTTERING IN THE UV SPECTRAL RANGE

SUMMARY

This work investigates the optical properties, absorption losses, and laser resistance of Ta₂O₅/SiO₂ oxide coatings deposited by ion beam sputtering. Nine single layer coatings were produced by changing the target position, oxygen flow, and Ta₂O₅/SiO₂ fraction. The coatings were characterized by reflectance and transmittance spectroscopy. The measured spectra were fitted to determine the refractive index $n(\lambda)$ and extinction coefficient $k(\lambda)$. The results showed that increasing the SiO₂ fraction reduced the refractive index at 355 nm from about 2.30 to 1.56. LID measurements showed that the absorption of single layer coatings decreased from about 1530 ppm for pure Ta₂O₅ to about 180 ppm for coatings with a higher SiO₂ fraction. In the B6 - B9 sample group, annealing at 300 °C reduced the absorption to about 210 - 240 ppm. Higher annealing temperatures did not give lower absorption in this group. The spectrophotometrically determined extinction coefficient k and the absorption measured by the LID method did not always change in the same way. For this reason, direct LID measurements were used as the main criterion for evaluating absorption losses at 355 nm, while k was treated as a model parameter obtained from spectral fitting. Based on the single layer results, a Ta₂O₅/SiO₂ Bragg mirror was deposited using a 99 mm target position and 54 sccm oxygen flow. The mirror was annealed at 300 °C. After annealing, the high reflectance band edge shifted by about 1 nm toward longer wavelengths, but the 355 nm wavelength remained inside the high reflectance region. The mirror absorption at 355 nm decreased from 450 ppm to 232 ppm. The laser induced damage threshold decreased from 5.71 J/cm² before annealing to 4.48 J/cm² after annealing. AFM measurements showed only a small increase in surface roughness, from 0.40 nm to 0.44 nm. These results show that lower absorption did not directly lead to higher laser resistance in the tested Bragg mirror. The LIDT result is likely affected not only by average absorption, but also by local defects, layer interfaces, surface morphology, and the electric field distribution inside the multilayer coating.