

Vilniaus universitetas  
Fizikos fakultetas  
Lazerinių tyrimų centras

Jonas Kumža

PLONŲ METALO OKSIDŲ SLUOKSNIŲ, SUFORMUOTŲ JONAPLUOŠČIO DULKINIMO  
TECHNOLOGIJA OPITNĖS PAŽAIDOS PRIKLAUSOMYBĖ NUO OPTINIŲ PAGRINDUKŲ  
PAVIRŠIAUS NUĖSDINIMO

Magistrantūros studijų baigiamasis darbas

Lazerinės technologijos

studijų programa

Studentas:	Jonas Kumža
Recenzentas:	dr. Rytis Buzelis
Darbo vadovas:	dr. Ramutis Drazdys
Instituto direktorius:	doc. dr. Aidas Matijošius

Vilnius 2020

# Turinys

1. Įvadas .....	3
2. Teorijos apžvalga .....	5
2.1. Jonapluoščio dulkinimo technologija.....	5
2.1.1. „IBS10“ struktūrinė schema .....	6
2.1.2. Vakuuminė schema .....	7
2.1.3. Optinė plataus spektro storio kontrolė.....	9
2.1.4. Jonų šaltinio veikimo principai ir eksploatacijos ypatumai.....	10
2.2. Optinės interferencinės dangos.....	11
2.3. Optinių dangų projektavimas .....	14
2.3.1. Pagrindiniai optinių dangų tipai .....	14
2.3.2. Optinių dangų bazinės konstrukcijos ir projektavimo ypatumai .....	14
2.4. Optinių stiklų poliravimas .....	18
2.5. Popaviršiniai defektai .....	19
2.6. Optinių elementų lazerinė pažaida .....	20
2.6.1. Dangų pažaidos slenksčio vertės padidinimas.....	20
3. Tyrimo metodika .....	22
3.1 Optinių paviršių atsparumo lazerio spinduliuotei tyrimas.....	22
4. Darbo rezultatai .....	25
Išvados.....	38
Santrauka .....	39
Summary .....	40
Literatūros sąrašas .....	41

## 1. Įvadas

Kasdien pasaulyje yra pagaminami tūkstančiai lazerinių optinių elementų. Jie naudojami lazerių aktyviųjų terpių generuojamai spinduliutei valdyti, fokusuoti, nukreipti, apgręžti, kitaip ja manipuluoti. Tokių optinių elementų naudotojų ratas yra platus, pradedant mokslinėmis institucijomis – universitetais, institutais, tyrimų centrais, baigiant komercinėmis įmonėmis ir valstybių gynybos padaliniais. Lazerinių optinių elementų taikymo sritys labai įvairios, tad jų kokybei yra keliami aukšti reikalavimai. Bendra tendencija yra tokia, jog lazerių gamintojai siekia pagaminti vis galingesnius spinduliuotės šaltinius [1]. Dėl to optiniai elementai dažnai yra naudojami ekstremaliomis spinduliuotės intensyvumo sąlygomis, kas lemia jų optinę pažaidą [2]. Ši reiškinį gali sąlygoti platus spektras priežasčių, tokių kaip elementų švara, medžiagų iš kurių pagamintas elementas grynumas, gamybos technologija ir kitos, bei visų šių veiksnių sąveika tarpusavyje.

Lazeriniai optiniai elementai įprastu atveju yra sudaryti iš pagrindo, padengto interferencine optine danga, kuri optimizuoja elemento optinius parametrus ir gerina jo veikimą konkrečiam taikymui. Optiniai pagrindukai dažniausiai yra stiklai, kristalai arba keramikos, visos šios grupės pasižymi aukštais reikalavimais medžiagos kokybei ir grynumui. Medžiagos ruošinys, išlydytas reikiamos sudėties stiklas yra papildomai apdorojamas, pjaustomas, šlifuojamas ir poliruojamas, kol pasiekama reikiama paviršiaus kokybė. Lazeriniams taikymams skirti optiniai elementai yra klasifikuojami remiantis keliais standartais, pagrindiniai yra ISO 10110 ir MIL 13830, kurie nusako liekamųjų rėžių, duobučių, kiekį poliruotame paviršiuje. Liekamieji defektai gali sąlygoti tokius nepageidaujamus reiškinius kaip sklaida ar lazerinė pažaida.

Optinius pagrindukus padengus interferencinėmis dangomis, jie tampa optiniais elementais, turinčiais konkretų taikymą ir apibrėžtas optines savybes, tarkime poliarizatoriais ar veidrodžiais. Optinės interferencinės dangos yra plonų sluoksnių sistemos, kuriose vyksta per ją sklindančios šviesos konstruktyvi arba destruktivi interferencija, kuria manipuluojant yra gaunamos norimos optinio elemento savybės. Įprasta tokioms plonasluoksnėms dangoms naudoti metalų oksidus, tokius kaip  $Al_2O_3$ ,  $HfO_2$ ,  $Nb_2O_5$ ,  $SiO_2$ ,  $TiO_2$ ,  $Ta_2O_5$ ,  $ZrO_2$ . Dangos yra formuojamos įvairiomis technologijomis, įprastai vakuuminėmis, optiniai padėklai būna visokių formų – plokšti, išgaubti, įgaubti, asferiniai.

Pasaulinėje fotonikos rinkoje vyraujančios tendencijos reikalauja, vis patvaresnių ir ilgaamžiškesnių optinių elementų bei jų sistemų. Mikroapdirbimui skirtų sistemų gamintojai, matydami puslaidininkių rinkos poreikį sumažinti gaminių dimensijas, ieško būdų kaip tai patenkinti. Metodas tai pasiekti – trumpinti spinduliuotės, su kuria vykdomas mikroapdirbimas, bangos ilgį, taip gaunant galimybę sufokusuoti pluoštus į mažesnę plotelį bei pasinaudoti daugiau energijos turinčiais

fotonais [3]. Šis metodas taip pat turi trūkumą - įprasta lazerinė optika neatlaiko ekstremalių galių trumpesnių bangų diapazone ir būna pažeidžiama.

Šio darbo tikslas yra ištirti skirtingomis medžiagomis (Zr, Hf, HfO<sub>2</sub>) suformuotų dielektrinių plonų sluoksnių pažaidos slenksčio priklausomybę nuo pagrindukų paviršių paruošimo: nuėsdintų ir su jonų asistavimo šaltiniu nuėsdintų. Darbo tikslui įgyvendinti buvo išsikelti tokie uždaviniai:

1. Su jonų asistavimo šaltiniu esančiame „IBS10“ įrenginyje, nuėsdinti UVFS pagrindukų paviršius.
2. Jonų dulkinimo sistema „IBS23“ padengti pagrindukus 300 nm storio sluoksnius dulkinant Zr, Hf ir HfO<sub>2</sub> medžiagomis.
3. Išmatuoti bei išanalizuoti LIDT vertes, pažaidų paviršiaus morfologiją bei nustatyti priežastis ir dėsningumus.
4. Įvertinti, kurios medžiagos yra tinkamos naudoti ultravioletinėje srityje ir koks yra optimalus pagrindukų paruošimo būdas.

## 2. Teorijos apžvalga

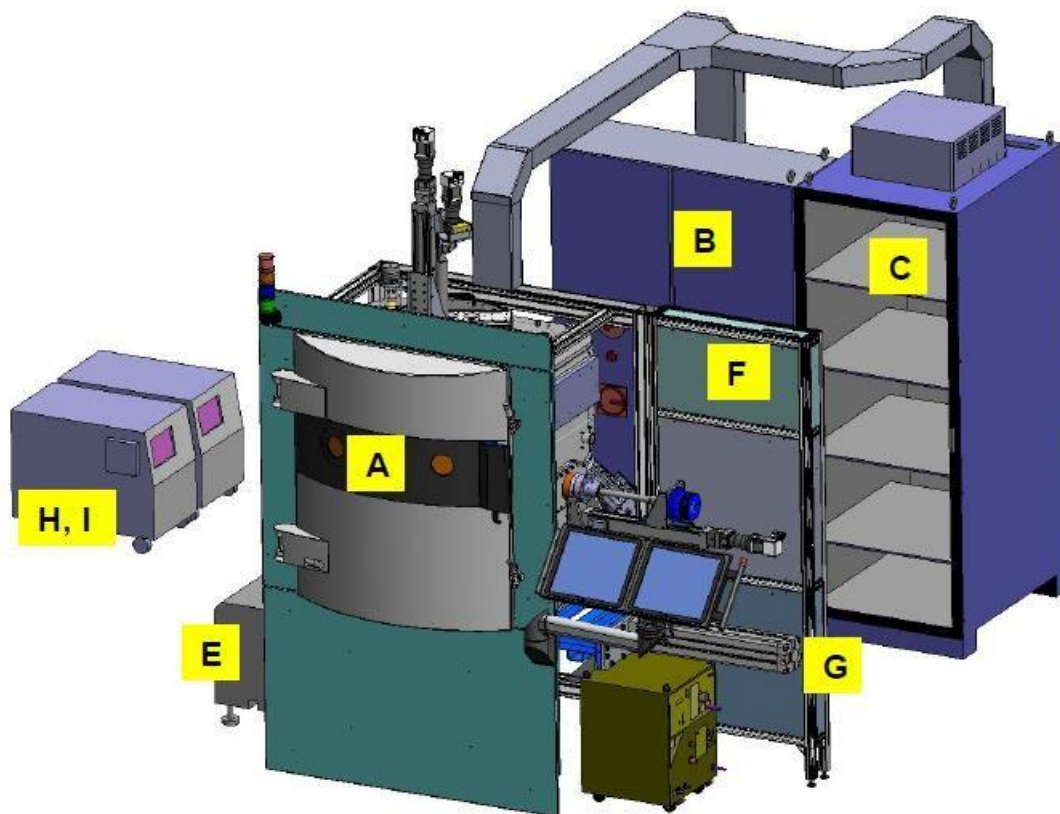
### 2.1. Jonapluoščio dulkinimo technologija

Vystantis lazerinei ir optinio ryšio technikai kyla ir reikalavimai optinėms dangoms, o joms pagaminti reikalingi nauji dangų dengimo metodai. Pastarąjį dešimtmetį ypatingas susidomėjimas kilo jonapluoščio dulkinimo metodu (angl. *Ion Beam Sputtering, IBS*). Jonapluoščio dulkinimo technologija iš pagrindų skiriasi nuo tradicinio optinių dangų formavimo naudojant terminį garinimą elektronų pluošteliu. Vakuuminėje kameroje neutralių jonų pluošteliu yra bombarduojamas metalo arba metalo oksido taikinys, ir tokiu būdu paviršiuje yra išmušami taikinio atomai bei molekulės, kurie įgyja žymiai didesnę kinetinę energiją, nei terminio garinimo metu kur jonų energiją apsprendžia medžiagos garavimo temperatūra ir papildomas asistavimui skirtas jonų šaltinis. Dėl tos priežasties ant dengiamų padėklų formuojasi didelio tankio, homogeniški ir pasižymintys puikia stochiometrija ir adhezija amorfiniai sluoksniai.

Pagrindiniai IBS technologijos pranašumai yra šie:

1. Deterministinis procesas, turintis didelį atsikartojamumą;
2. Formuojami ypatingai aukšto tankio ir mechaninio atsparumo sluoksniai, jų lūžio rodiklis žymiai artimesnis pačios medžiagos lūžio rodikliui, geresnis ir terminis laidumas;
3. Sėkmingai naudojamos žemesnės, nei 100°C padėklų temperatūros proceso metu;
4. Tankūs, homogeniški sluoksniai įgalina labai preciziškai valdyti sluoksnio storį;
5. Formuojamų sluoksnių paviršius pasižymi dideliu tolygumu ir ypatingai gera stochiometrija, o tai lemia labai mažą optinę sklaidą ir sugertį;
6. Patikima proceso kontrolė, atsikartojamumas bei tankūs, homogeniški sluoksniai lemia ypatingai gerą pagamintų dangų optinių savybių atitikimą siekiamoms teorinėms spektrinėms charakteristikoms;
7. Didelis plonų sluoksnių tankis iki minimumo sumažina jų spektrinius pokyčius, dėl aplinkos sąlygų kaitos.

### 2.1.1. „IBS10“ struktūrinė schema



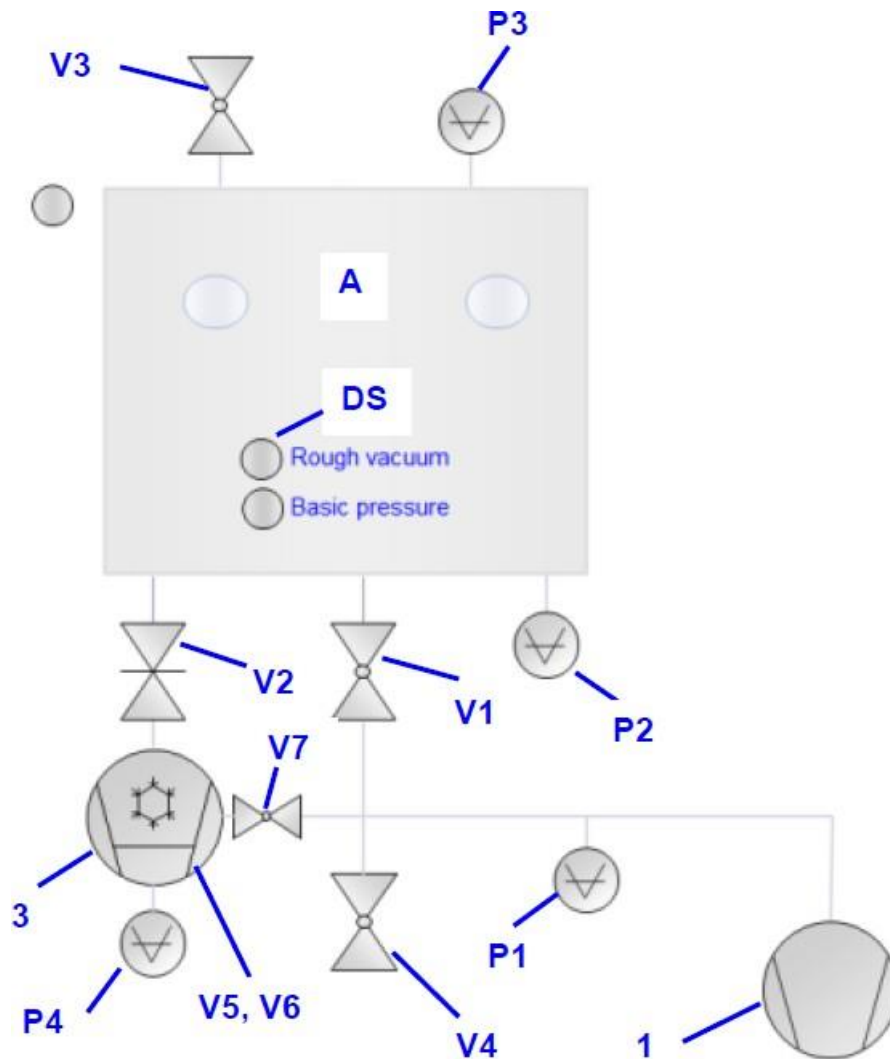
1 pav. „IBS10“ sistemos struktūrinė schema [4]

Joninio dulkinimo sistema yra sudaryta iš atskirų dalių, pavaizduotų 1 paveiksle.

A dalis – vakuuminė kamera, kuri yra sujungta su kriogeniniu siurbliu ir atskirta sklende. B dalis – komutatorius. C dalis – kabinetas, kuriame yra vakuuminės sistemos kompiuteriai, maitinimo šaltiniai ir valdymo blokai. E dalis – mechaninis siurblys. F dalis – darbinių dujų paskirstymo sistema. G dalis – vandens tiekimo skydelis. H ir I dalys – vakuuminės kameros bei joninių šaltinių ir taikinio aušinimo blokai.

Joninio dulkinimo sistemos funkcionalumui yra reikalingas elektros, vandens, darbinių dujų ir suspausto oro tiekimas. Joninio dulkinimo sistema yra valdoma dviem kompiuteriais. Pirmuoju kompiuteriu – „VISU-PC“ yra valdomas sistemos aušinimas vandeniu, vakuumo sudarymo kontrolė, joniniai šaltiniai bei neutralizatorius, darbinių dujų tiekimas. Antruoju kompiuteriu – „BBM-PC“ yra kontroliuojami dangų sluoksnių storai, naudojantis integruota „Optilayer“ programa ir tiesioginiu matomos šviesos spektro pralaidumo kitimu dėl interferencijos plonų dangų susidarymo metu.

## 2.1.2. Vakuuminė schema



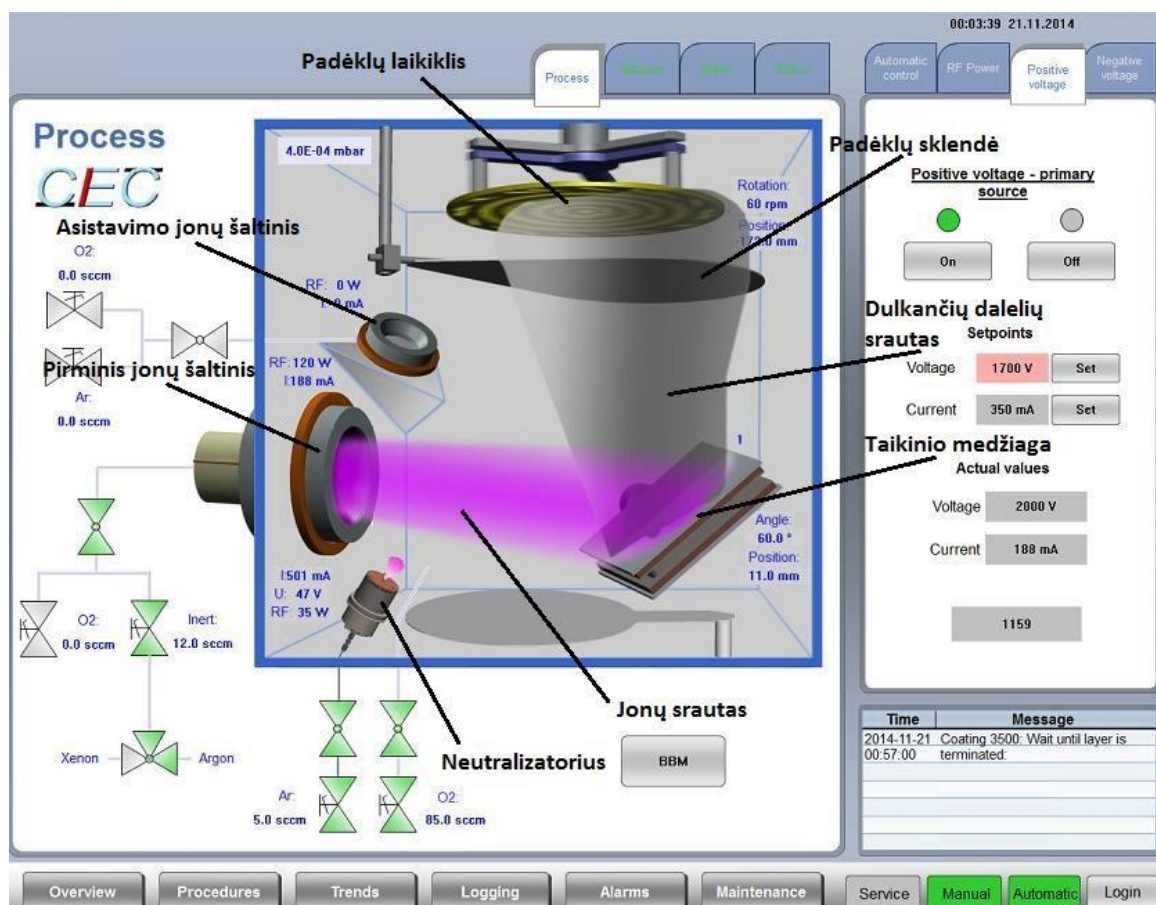
2 pav. „IBS10“ sistemos vakuuminė schema

„IBS10“ vakuuminė sistema yra sudaryta iš vakuuminės kameros, rotacinio siurblio, kriogeninio siurblio, vakuumetrų ir sklendžių, pavaizduotų antrame paveiksle. A dalis – vakuuminė kamera. 1 dalis – rotacinis siurblys, skirtas sudaryti pradiniam vakuumui. 3 dalis – kriogeninis siurblys, skirtas sudaryti aukštam vakuumui, kai yra pasiektas pradinis vakuumas rotaciniu siurbliu. V1 dalis – sklendė, jungianti rotacinį siurblių su vakuumine kamera. V2 dalis – sklendė, jungianti kriogeninį siurblių su vakuumine kamera. V3 dalis – sklendė, skirta įleisti orą į vakuuminę kamerą. V4 dalis – sklendė, skirta įleisti orą į rotacinio siurblio vamzdžius. V5 – sklendė, skirta įleisti pašildytas darbinės dujas į kriogeninį siurblių. V6 – sklendė, skirta avariniu atveju įleisti orą į kriogeninį siurblių. V7 – sklendė, jungianti kriogeninį siurblių su rotaciniu siurbliu. P1 – vakuumetras, matuojantis slėgį rotacinio siurblio vamzdžiuose. P2, P3 – vakuumetrai, matuojantys slėgį vakuuminėje kameroje. P4 – vakuumetras matuojantis slėgį kriogeniniame siurblyje.

Jonapluoščio dulkinimo įrenginys pavaizduotas 3 paveiksle. Svarbiausi komponentai yra pirminis jonų šaltinis, neutralizatorius, taikinio medžiaga, padėklų laikiklis, padėklų sklendė, vakuumo sistema. Dulkinimas vykdomas kameroje aukšto vakuumo sąlygomis ( $10^{-4}$  Pa eilės). Iš pirminio jonų šaltinio išlėkė aukštos energijos jonai atsitrenkia į taikinį ir išmuša dulkinamos medžiagos atomus. Atomai dėl deguonies fono oksiduojasi ir sėda ant padėklų formuodami ploną oksidinės dangos sluoksnį. Sluoksnio dulkinimas sustabdomas uždarant sklendę.

Taikinio dulkinamas paviršius yra stačiakampio formos. Taikiny sudarytas iš dviejų skirtingų metalų sričių, kuriuos dulkinant deguonies dujų fone, gaunami aukšto ir žemo lūžio rodiklio metalų oksidų sluoksniai. Priklausomai nuo taikinio pozicijos galima formuoti dangas pasižyminčias vienos iš grynų medžiagų savybėmis arba tų dviejų medžiagų mišinio savybėmis (lūžio rodikliu).

Padėklų sklendė yra plona aliuminio plokštė, kuria galima uždengti arba atidengti padėklus nuo tiesioginio dengiamos medžiagos srauto. Sklendė yra tarp zoninio taikinio ir padėklų laikiklio. Proceso metu padėklų laikiklis sukamas siekiant užtikrinti didesnę dangos storio tolygumą ant visų padėklų. Dangos storis proceso metu gali būti kontroliuojamas plačiajuoste optine storio kontrole. Šiuo metu naudojama plačiajuostė optinė storio kontrolė šviesai praeinant per atskirą kontrolei skirtą padėklą – liudininką.



3 pav. Jonapluoščio dulkinimo įrenginys



### 2.1.3. Optinė plataus spektro storio kontrolė

Proceso metu būtina matuoti, kokio storio medžiagos sluoksnis uždengiamas ant esamos dangos struktūros tam kad būtų galima laiku uždaryti sklendę. Sluoksnio storiui įvertinti naudojama optinė plataus spektro storio kontrolė (BBM, angl. *broadband optical monitoring*). Tokia kontrolė lyginamas teorinis (4 pav. raudona kreivė) ir eksperimentinis (4 pav. mėlyna kreivė) pralaidumo koeficientai plačiame spektre ir prognozuojamas pralaidumo koeficiento pokytis.

Pralaidumo spektro kontrolei realizuoti panaudojamas plataus spektro šviesos šaltinis ir spektrometrai, matuojantys spinduliuotę bangos ilgiams intervale 450 – 950 nm. Proceso metu fiksuojami trys šviesos intensyvumo spektrai: tamsos, šviesos ir bandinio (liudininko). Tamsos spektras fiksuojamas tada, kai iš šaltinio šviesa nepatenka į spektrometrus. Šviesos spektras – kai į spektrometrus patenka maksimalus šviesos kiekis (šviesa patenka tiesiogiai). Bandinio spektras fiksuojamas tada, kai šviesa į spektrometrus patenka praėjusi liudininką. Visi trys spektrai siunčiami į kompiuterį ir analizuojami programiškai.



4 pav. Optinės storio kontrolės programa BBM.

Optinės storio kontrolės programa pastoviai skaičiuoja teorinį dulkinamos dangos pralaidumo koeficiento spektrą pagal įvestus parametrus, lygina su eksperimentiniu spektru ir iš spektro pokyčio apskaičiuoja einamojo sluoksnio storį ir garavimo greitį. Proceso pradžioje naudojamas nulinio storio dangos teorinis spektras, kuris keičiamas atsiradus užfiksuojamam spektro pokyčiui. Kai sluoksnio storis pasiekia teorinį, sklendė uždaroma ir pakeičiama dulkinama medžiaga. Kito sluoksnio storio kontrolė vykdoma analogiškai.

#### 2.1.4. Jonų šaltinio veikimo principai ir eksploatacijos ypatumai

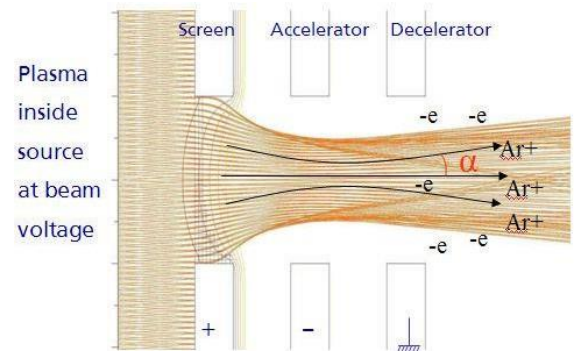
Jonų šaltinis yra prietaisas, jonizuojantis daleles. Jonų šaltiniai dažniausiai naudojami vakuuminėse kamerose, kuriose yra sudarytas aukšto arba vidutinio vakuumo lygis. Tam tikras vakuumo lygis yra reikalingas, kad jonai galėtų

nukeliauti tam tikrą nuotolį nesusidurdami su kitomis dalelėmis. Nuo vakuumo lygio priklauso jonų nukeliamas kelias, vadinamas laisvuju lėkiu.

Jonai yra sukuriami jonizuojant neutralius atomus ar molekules. Medžiagos būseną, kai dujos yra iš dalies arba visiškai jonizuotos (teigiamųjų ir neigiamųjų krūvių tankis praktiškai vienodas), vadinama plazma. Joninio dulkinimo sistemoje

„IBS10“ plazma yra sukuriama kintamo dažnio jonų šaltiniuose. Kintamo dažnio jonų šaltinis yra

sudarytas iš korpuso, ričių, kuriomis teka kintamo dažnio srovė, darbinių dujų įleidimo angos, teigiamo ir neigiamo potencialų, kurie skirti ištraukti jonus iš jonų šaltinio. Dėl ritėmis tekančios kintamosios srovės elektronai jonų šaltinyje juda osciliuodami. Osciliuodami elektronai susiduria su darbinių dujų atomais ir juos jonizuoja, taip sukurdami ir palaikydami plazminę medžiagos būseną jonų šaltinyje. Jonai, sudaryti jonų šaltinyje yra ištraukiami iš jonų šaltinio ekstraktoriumi. Tai yra dviejų arba trijų gardelių sistema. Pirma gardelė yra teigiamo potencialo, kuri yra skirta įgreitinti teigiamo potencialo jonus. Antra gardelė yra neigiamo potencialo, kuri yra skirta ištraukti teigiamo potencialo jonus iš jonų šaltinyje sudarytos plazmos. Trečia gardelė yra įžeminta. Ši gardelė yra skirta stabilizuoti jonų srautą ir pailginti ekstraktoriaus veikimo laiką. Kintamo dažnio jonų šaltiniu yra sudaroma švari (be pašalinių medžiagų) plazma. Kintamo dažnio jonų šaltiniu galima sudaryti aktyvių dujų (pavyzdžiui deguonies) arba inertinių dujų (pavyzdžiui argono) plazmą. Šio tipo šaltinis pasižymi ilgaamžiškumu ir stabiliu veikimu.



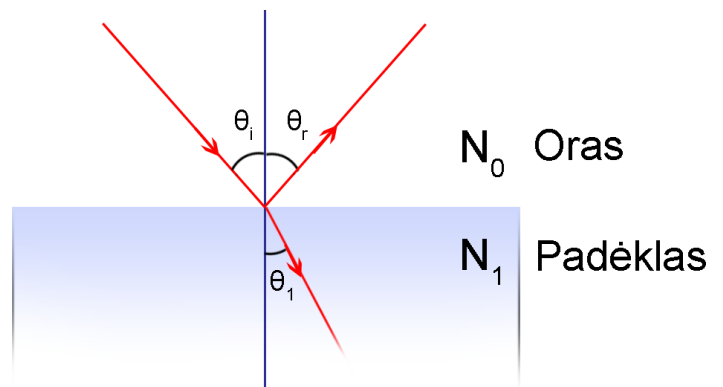
5 pav. Jonų šaltinio gardelės struktūrinė schema

## 2.2. Optinės interferencinės dangos

Optinė danga — tai vieno ar kelių sluoksnių kombinacija, kuri, dėka interferencijos reiškinio, keičia optinio padėklo pralaidumą arba atspindį tam tikrame bangos ilgių ruože. Optinės dangos naudojamos lazerių pramonėje pasižymi aukštais reikalavimais: tam tikrais atvejais atspindys turi siekti 99.99%, kitu atveju — atspindys turi neviršyti 0.1%. Labai aukštą atspindžio vertę optinėje dangoje labiausiai lemia kuo mažesni optiniai nuostoliai. Tokių optinės dangos funkcionavimą lemia teisingai parinktas sluoksnių skaičius, kiekvieno sluoksnio storis, bei medžiagų lūžio rodikliai. Optinės dangos yra projektuojamos tam tikram šviesos kritimo kampui, šviesos poliarizacijai (s poliarizacijai, p poliarizacijai arba nepoliarizuotai šviesai).

Optinės dangos yra auginamos ant labai kruopščiai nupoliruotų paviršių (pvz.: stiklo, silicio, kvarco, kristalo) ir gali siekti nuo kelių nanometrų iki 30-50  $\mu\text{m}$  storio. Medžiagos, iš kurių gaminamos optinės dangos, yra parenkamos pagal reikalingas optines savybes. Dažniausiai yra naudojami metalų oksidai, VIS/IR ir UV srityje.

Optinių dangų pralaidumas bei atspindys priklauso nuo sugerties, sklaidos, lūžio rodiklių, sluoksnių skaičiaus bei jų storių, todėl svarbu žinoti kiekybinę šių parametru sąryšį [5]. Apžvelkime pavyzdį, kuriame šviesa atsispindi nuo vieno paviršiaus (6 pav.). Atspindys nuo vieno paviršiaus gali būti apskaičiuotas pagal formulę:



6 pav. Šviesa dalinai atsispindi nuo paviršiaus

$$R = \frac{n_0 - n_1}{n_0 + n_1} \quad (1)$$

kur  $n_0$  yra pirmos aplinkos, o  $n_1$  antros aplinkos optiniai laidžiai. Optinis laidis apibrėžiamas kaip  $n = H/E$ , kur  $H, E$  – magnetinio ir elektrinio lauko stipriai. Jis priklauso nuo medžiagos lūžio rodiklio  $n$  bei yra skirtingas  $s$  ir  $p$  poliarizacijos šviesai [6]:

$$n_s = \frac{\epsilon_{xx}}{\epsilon_{yy}} \quad (2)$$

$$n_p = n_s \cos^2 \theta \quad (3)$$

$Y = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}}$  yra vakuomo optinis laidis.

Skaičiavimai sudėtingėja, kai skiriamųjų paviršių yra keletas. 7 pav. vaizduoja plonos plėvelės

esančios ant padėklo atvejį (2 skiriamieji paviršiai). Šviesos atspindį šiuo atveju lemia abu paviršiai, todėl galime suskaičiuoti efektyvųjį laidį  $Y = C/B$  iš padėklo ( $\eta_2$ ) ir plonosios plėvelės ( $\eta_1$ ) laidžių. Kadangi skaičiavimų atsiranda daugiau, pravartu pasinaudoti sluoksnio charakteringąja matrica  $M$  [7]:

$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} 1 \\ \eta_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \delta & (i \sin \delta) / \eta_1 \\ i \eta_1 \sin \delta & \cos \delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \eta_2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

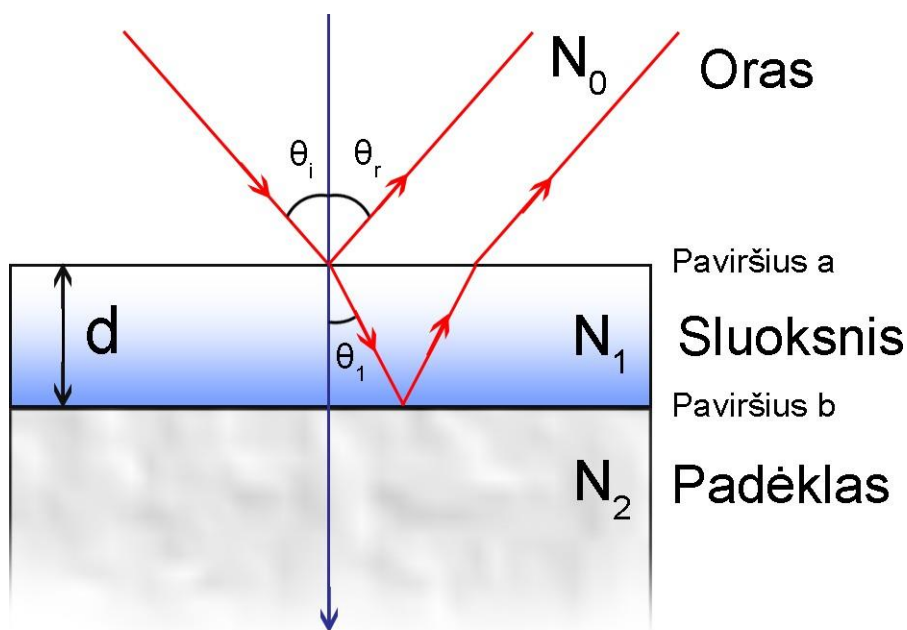
Parametras  $\delta$  yra sluoksnio fazės faktorius suskaičiuotas iš storio  $d$ , kompleksinio lūžio rodiklio  $N_1$ , bangos ilgio  $\lambda$  ir lūžio kampo  $\Theta_1$ .

$$\delta = \frac{2\pi d N_1 \cos \Theta_1}{\lambda} \quad (5)$$

Tada pralaidumas ir atspindys apskaičiuojamas taip:

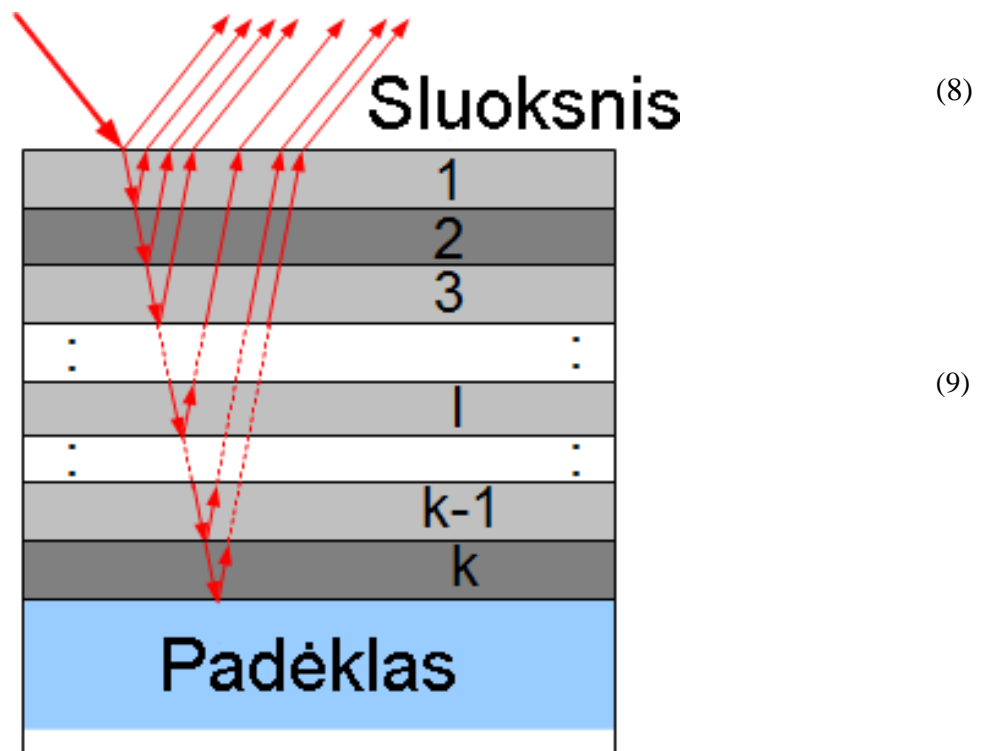
$$R = \left( \frac{n_0 \cos \theta_i - n_1 \cos \theta_r}{n_0 \cos \theta_i + n_1 \cos \theta_r} \right)^2 \quad (6)$$

$$T = \frac{4n_0 \cos \theta_i \cos \theta_t}{(n_0 \cos \theta_i + n_1 \cos \theta_r)(n_1 \cos \theta_t + n_2 \cos \theta_t)} \quad (7)$$



7 pav. Šviesa atspindi nuo dviejų plonos plėvelės paviršių

Šis skaičiavimo būdas gali būti taikomas ir daugiasluoksnei dangai (8 pav.) atitinkamai padauginus charakteringąsias sluoksnio matricas (4) išraiškoje:



8 pav. Šviesa atsispindi nuo k sluoksnių paviršių.

$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = M_1 M_2 \dots M_l \dots M_{k-1} M_k \begin{bmatrix} 1 \\ \eta_{pad} \end{bmatrix}$$

Kur  $M_l$  yra l-ojo sluoksnio charakteringoji matrica:

$M_l = \begin{bmatrix} \cos \delta_l & (i \sin \delta_l) / \eta_l \\ i \eta_l \sin \delta_l & \cos \delta_l \end{bmatrix}$  u gali būti suskaičiuojami pagal (6) ir (7) išraiškas atitinkamai. Svarbu pažymėti tai, jog šis skaičiavimo būdas yra naudojamas tik tada, kai sluoksnių sugertis yra nykstamai maža [8].

## 2.3. Optinių dangų projektavimas

### 2.3.1. Pagrindiniai optinių dangų tipai

Pagrindiniai optinių dangų tipai yra:

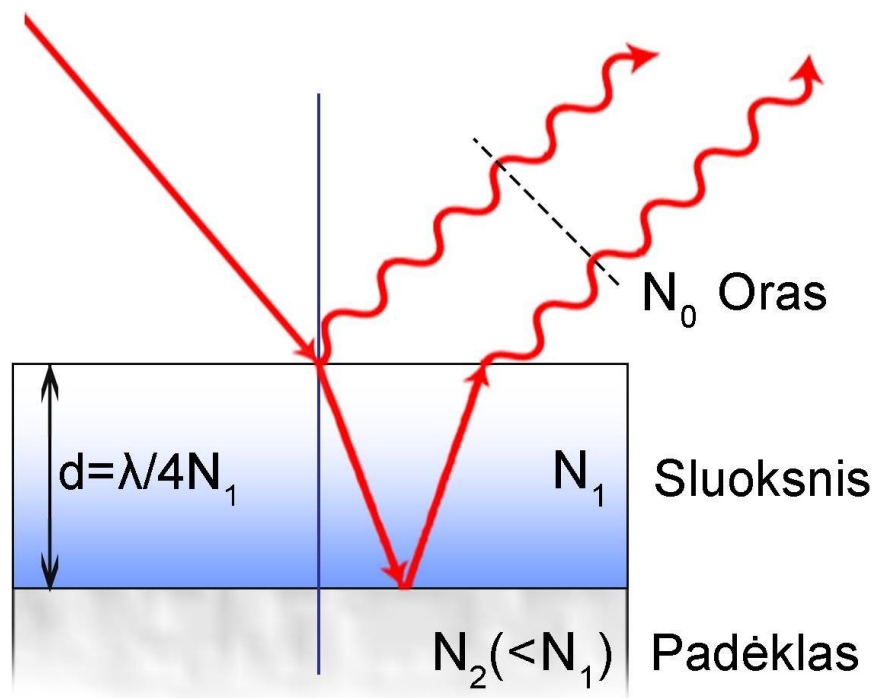
- 1) **Skaidrinančios dangos.** Tai yra dangos, kurios siaurame arba plačiame elektromagnetinių bangų diapazone pasižymi pralaidumu artimu 100%.
- 2) **Veidrodinės dangos.** Tai yra dangos, kurios siaurame arba plačiame elektromagnetinių bangų diapazone pasižymi atspindžiu artimu 100%.
- 3) **Poliarizatoriai.** Tai yra dangos, kurios tam tikrame elektromagnetinių bangų diapazone, tam tikru kampu, išskaido šviesos poliarizacijas.
- 4) **Šviesos dalikliai.** Tai yra dangos, kurios siaurame arba plačiame elektromagnetinių bangų diapazone pasižymi daliniu atspindžiu (pavyzdžiui nuo 1% iki 99%).
- 5) **Šviesos separatoriai.** Tai yra dangos, kurios yra skirtos atspindėti vieno elektromagnetinių bangų diapazono bangas, ir praleisti kito elektromagnetinių bangų diapazono bangas.
- 6) **Metalinės dangos.** Tai yra dangos, kurios vidutiniškai atspindi plataus elektromagnetinių bangų ruožo bangas.

### 2.3.2. Optinių dangų bazinės konstrukcijos ir projektavimo ypatumai

Optinės dangos projektuojamos iš dviejų arba daugiau medžiagų, kurių lūžio rodiklių vertės yra skirtingos. Optinių dangų spektrinės charakteristikos priklauso nuo sudaromų dangų sluoksnių storio; medžiagų, naudojamų sudaryti dangoms; padėklų storio ir tipo; dangų sudarymo metodo ir kitų parametrų. Paprasčiausio tipo dangos yra skaidrinančios dangos ir veidrodinės dangos.

1. **Skaidrinančios dangos.** Šio tipo dangos yra projektuojamos apskaičiuojant interferencijos efektą. Skaidrinančios dangos yra projektuojamos taip, kad tam tikro bangos ilgio spinduliai, atsispindėję nuo dangos paviršiaus ir padėklo (ant kurio yra nusodinta danga) destruktviai interferuotų ir panaikintų viena kitą. Skaidrinančios dangos yra sudaromos ant abiejų padėklo pusių, kad būtų pasiektas didžiausias galimas skaidrinimo efektas. Skaidrinančios dangos, skirtos praskaidrinti konkretų vienetinį elektromagnetinių bangų diapazoną yra modeliuojamos iš dviejų sluoksnių. Skaidrinančios dangos, skirtos praskaidrinti platų, kelių šimtų nanometrų elektromagnetinių bangų diapazoną, yra projektuojamos iš 4 arba daugiau sluoksnių.
2. **Veidrodinės dangos.** Veidrodinės dangos pasižymi priešingomis savybėmis nei skaidrinančios dangos. Šios dangos projektuojamos periodiškai sudarant aukšto ir žemo lūžio

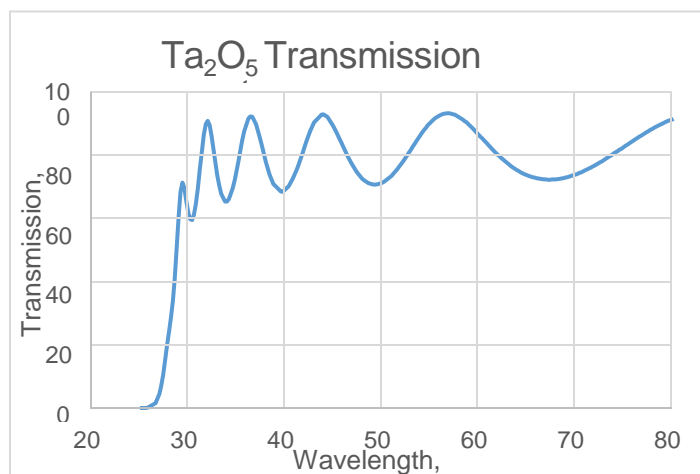
rodiklio medžiagų sluoksnius, kurių optiniai storiai yra lygūs ketvirčiui projektuojamo veidrodžio bangos ilgio. Šie sluoksniai projektuojami taip, kad specifinio bangos ilgio spinduliai, atsispindėję nuo dangos sluoksnių ir padėklo konstruktyviai interferuotų ir sustiprėtų (9 pav.). Konstruktyvi interferencija yra galima, nes atsiranda  $180^\circ$  fazės poslinkis šviesai pereinant iš aukšto lūžio rodiklio medžiagos į žemo lūžio rodiklio medžiagą. Dangų atspindžio vertės priklauso nuo sluoksnių kiekio dangoje. Šviesą atspindinčio elektromagnetinių bangų ruožo plotis priklauso nuo veidrodinė dangą sudarančių medžiagų lūžio rodiklių skirtumo didumo. Veidrodinės dangos turi būti sudarytos ant idealiai lygių paviršių iš šviesą nesugėriančių medžiagų.



9 pav. Konstruktyvi interferencija nuo  $d = \lambda/4N_1$  storio plėvelės

Prieš projektuojant optines dangas yra būtina nustatyti medžiagų, naudojamų optinėms dangoms sudaryti lūžio rodiklius ir sugerties koeficientus. Lūžio rodiklių ir sugerties koeficientų vertės yra nustatomos sudarant monosluoksnį ant žinomo lūžio rodiklio padėklo ir tiriant sudaryto monosluoksnio spektrines charakteristikas. Tantalio oksido 400 nm storio monosluoksnis pavaizduotas 10 paveiksle. Pagal optinį

monosluoksnio spektrą galima nustatyti sluoksnio fizinį storį, medžiagos lūžio rodiklį, sugerties koeficientus ir monosluoksnio medžiagos draustinės juostos plotį. Draustinės juostos plotis ir sugerties koeficientų vertės yra nustatomi pagal tai kuri trumpųjų elektromagnetinių bangų dalis yra sugerama dangos medžiagos. Sugerta elektromagnetinių bangų dalis nepraeina per dangos medžiagą ir nėra



10 pav. 400nm storio Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> monosluoksnio optinis spektras

detektuojama spektrometre. Lūžio rodiklio vertė yra apskaičiuojama naudojant „OptiLayer – Thin Film Software“ programinį paketą. Fizinio storio nustatymui reikia žinoti medžiagos lūžio rodiklį.

Skaidrinančias, veidrodines ar kitokio tipo optines dangas sumodeliuoti galima naudojantis „OptiLayer“, „TFCalc“ ar kitokiomis optinių dangų modeliavimo programomis. Optinės dangos formuojamos įvedant į optinių dangų modeliavimo programą padėklų medžiagos lūžio rodiklius, padėklo storį, sudaromų medžiagų lūžio rodiklius ir sudaromų medžiagų kiekį. Į optinių dangų modeliavimo programą įvedus norimų sudaryti dangų spektrines charakteristikas ir kampą (kuriuo bus pasuktos dangos) galima sumodeliuoti optines dangas pagal savo skaičiavimus arba leisti programai automatiškai sumodeliuoti optines dangas.

Jeigu vykstant optinių dangų sudarymui vyrauja dideli netolygumai tarp teorinio spektro ir matuojamo spektrometru optinio spektro, arba optinių dangų sudarymo procesas tampa nekontroliuojamas, tuomet reikia perskaičiuoti optinių dangų struktūrą su „OptiRe“ programa ir pratęsti optinių dangų sudarymo procesą. „OptiRe“ programa leidžia įvertinti sudarytų dangos sluoksnių storį, lūžio rodiklių ir sugerties koeficientų paklaidas. Pakeitus sluoksnių storio ar lūžio rodiklių vertes ir gavus mažesnio dydžio neatitikimą tarp teorinio ir išmatuoto spektrometru spektro, galima pratęsti dangų sudarymo procesą su didesne tikimybe gauti teisingų optinių charakteristikų spektrą.

Darbo su optinių dangų projektavimo programa „Optilayer“ buvo pastebėta, kad norint



pasiekti reikalingas optinių dangų charakteristikas nebūtina modeliuoti daug sluoksnių turinčią dangos struktūrą. Modeliuojant optines dangas reikia parinkti mažiausią sluoksnių kiekį, reikalingą pasiekti užsakovo keliamus reikalavimus, kad optinės dangos būtų plonesnės. Modeliuojant optines dangas reikia vengti plonų (iki 10 nm) sluoksnių, nes yra sudėtinga kontroliuoti ypač plonų sluoksnių tikslumą.

## 2.4. Optinių stiklų poliravimas

Šiuolaikinės lazerinės technologijos orientuojasi į vis didesnės galios sistemas. Norint pasiekti nuolatinį progresą, užtikrinti sistemų ilgaamžiškumą ir stabilumą, reikia optinių elementų, kurie pasižymėtų aukšta kokybe – mažais sklaidos bei sugerties nuostoliais, aukšta lazerine pažaida ir neryškiais senėjimo efektais [9]. Iš esmės kiekvienas optinis elementas iš stiklo ar kristalo bulės virsdamas galutiniu optiniu elementu turi praeiti pjaustymo, šlifavimo, poliravimo ir plovimo etapus. Du paskutiniai etapai, poliravimas ir plovimas yra vadinami galutiniu apdirbimu, jų įtaka optinio elemento kokybei ir atsparumui yra kritinė [10].

Plačiai komerciškai naudojami optiniai elementai įprastai yra poliruojami klasikiniu poliravimo būdu – stiklų ruošiniai derva priklijuojami prie nerūdijančio plieno padėklo, tada vertikaliai spaudžiami prie deimantinio poliravimo pado ir horizontaliais pasikartojančiais judesiais trindami į jį. Poliruojamo stiklo ir deimantinio pado terpė yra užpildoma skysta abrazyvine medžiaga ( $\text{CeO}_2$ ,  $\text{AlO}_3$ ,  $\text{SiO}_2$  ir kt.), kuri ir atlieka poliravimo procesą. Šis gamybinis procesas kartojamas skirtingais etapais, vis mažinant abrazyvinės medžiagos frakciją, taip gaunant vis mažesnę poliruojamo paviršiaus šiurkštumą [10], [11].

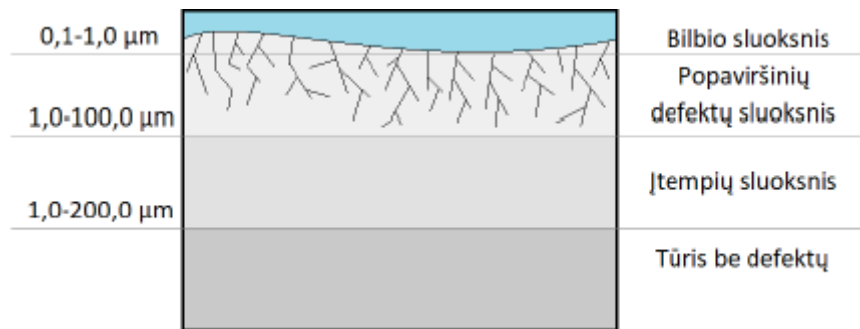
Yra ir kitų poliravimo metodų, tarkime poliravimas naudojantis tekančia abrazyvine medžiaga. Šio principo privalumas, stiklo ruošinių nereikia trinti į deimantinį pagrindą, ruošinio paviršiumi tekanti abrazyvinė medžiaga atlieka poliravimo procesą. Dėl mažesnių naudojamų jėgų, gaunama geresnė gaminių kokybė (mažiau rėžių ir duobučių, kurias palieka abrazyvas), bet procesas yra žymiai lėtesnis ir komerciškai nepopuliarus [11].

Optinius pusgaminus po poliravimo procedūros labai svarbu kruopščiai nuvalyti, nepaliekant jokių poliravimo ar poliruojamos medžiagų likučių. Tam atlikti dažnai naudojamas plovimas ultragarsinėje vonelėje, šio proceso metu optiniais elementais skirtingais etapais yra plaunami įvairių temperatūrų šarminiuose tirpaluose, vandentiekio vandenyje, dejonizuotame vandenyje ir galiausiai džiovinami.

## 2.5. Popaviršiniai defektai

Poliruojant optinius elementus, neišvengiamai yra suformuojami rėžių masyvai, mikroįtrūkimai, įskilimai ir pan. Dažniausiai šie defektai dėl pasikartojančių horizontalių poliravimo judesių yra užpildomi poliravimo ir poliruojamos medžiagos dalelėmis, kurios tvirtai įstringa elemento paviršiaus kanjonuose, suformuodami, literatūroje vadinamą, Bilbio (*Bilbey*) sluoksnį [10]. Tokie elemento paviršiuje užsislėpę defektai vadinami popaviršiniais defektais (angl. *Sub-Surface Damage, SSD*).

Nacionalinėje Lorencio Livermoro Laboratorijoje (*Lawrence Livermore National Laboratory*) atliktų tyrimų metu buvo išsiaiškinta popaviršinių defektų topografija, kuri siekia 200  $\mu\text{m}$  gylį. Poliruotame optinio elemento paviršiuje iki 1  $\mu\text{m}$  užima iš poliravimo likučių sudarytas Bilbio sluoksnis, iki 100  $\mu\text{m}$  įtrūkimai ir gilūs rėžiai, kurie daliniai užpildyti poliravimo medžiaga, iki 200  $\mu\text{m}$  – įtrūkių ir rėžių masyvų sukeltas įtempių sluoksnis. Gilesniuose nei 200  $\mu\text{m}$  sluoksniuose medžiaga yra be defektų ir pasižymi visomis įprastomis tūrinėmis savybėmis [12], principinė šio pasiskirstymo schema 11 paveikslėlyje.



11 pav. Poliruoto optinio pagrindo skerspjūvis [9].

Kadangi medžiagos turinčios ypač ryškia sugertį UV srityje, tokios kaip cerio oksidas ( $\text{CeO}_2$ ), kurios naudojamos optinių elementų poliravimui, užpildo mikroįtrūkimus ir sukuria Bilbio sluoksnį. Tai sąlygoja spinduliuotės sugertį elemento paviršiuje. Toks lokalaus kaitimo centras gali inicijuoti elemento lazerinę pažaidą paviršiuje ir negrįžtamai jį sugadinti. Dėl šios priežasties poliravimo medžiagų likučių pašalinimas yra viena iš prioritetinių užduočių norint pagerinti optinių elementų lazerinės pažaidos slenkstį. Tai ryškiausia tuo atveju, jeigu optika naudojama pralaidume, tarkime lęšiai, apsauginiai langeliai, poliarizatoriai ir spektro dalikliai. Spinduliuotė praėjusi optinę dangą, pasiekia daugiasluoksnės dangos ir pagrinduko ribą, kurioje pasireiškia popaviršinių defektų sugertis ir tai inicijuoja lazerinę pažaidą. Ši priežastis neturi tokios svarbios įtakos optikai, kuri tik atspindi spinduliuotę, tarkime mažų nuostolių dielektriniai veidrodžiai.

## 2.6. Optinių elementų lazerinė pažeida

Medžiagos lazerinė pažeida (*Laser Induced Damage Threshold – LIDT*), yra medžiagos fizinė charakteristika, ji apibrėžia kritinį energijos intensyvumą ploto vienetui, kuris sukelia medžiagoje negrįžtamus pasikeitimus. Kitaip tariant, medžiagos pažeidos slenkstis yra riba, iki kurios medžiaga veikiamą lazerinės spinduliuotės nekeis savo optinių savybių [12]. Ši specifikacija yra svarbi kiekvienam optiniam elementui sistemoje. Renkantis elementus optinei sistemai, reiktų įvertinti ir tai, jog bėgant laikui jų pažeidos slenkstis mažėja, dėl laiko, nuolatinio veikimo spinduliuote ar aplinkos poveikio. Medžiagos lazerinės pažeidos prigimtimi esant ilgiems impulsams (nanosekundžių eilės) yra laikomas lokalus kaitimas, sąlygotas spinduliuotės sugerties [13].



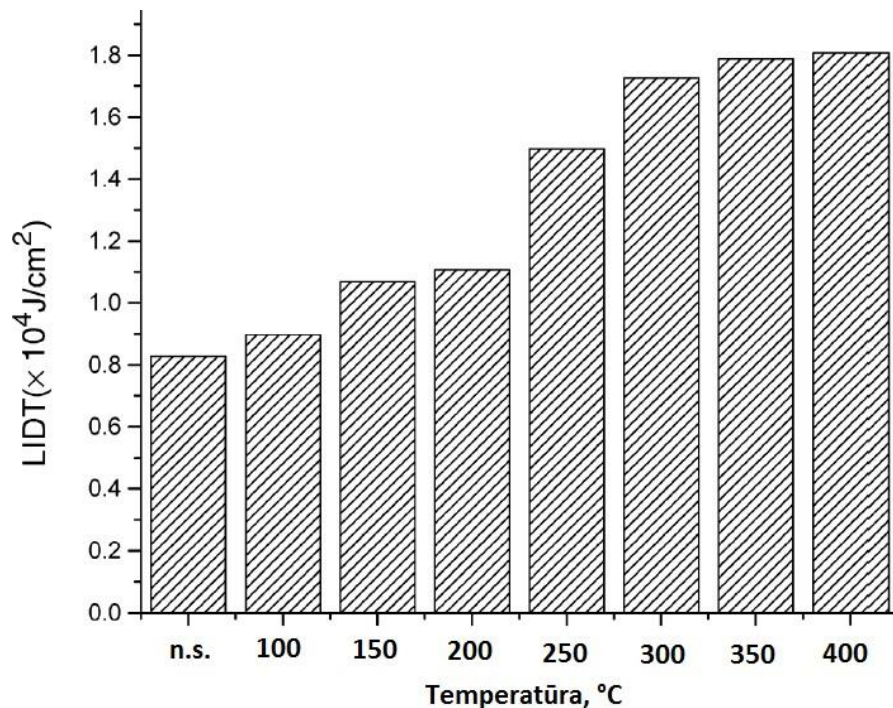
12 pav. Paviršiaus lazerinė pažeida

### 2.6.1. Dangų pažeidos slenkščio vertės padidinimas

Dangų pažeidos slenkščio vertė priklauso nuo optinių dangų sudarymo metodo, optines dangas sudarančių medžiagų, optinių dangų storio, optinių dangų sluoksnių struktūros bei šviesos sugerties. Optinių dangų pažeidos energijos slenkščio vertę galima padidinti atkaitinant optines dangas.

Atkaitinus optines dangas aukštoje temperatūroje padidėja dangų pažeidos slenkščio vertės ir sumažėja šviesos sugertis. Šiuos pokyčius nulemia dangas sudarančių medžiagų pilnutinė oksidacija. Neigiami plonų dangų atkaitinimo efektai yra spektrinių charakteristikų „poslinkis“ ir

paviršiaus šiurkštumo padidėjimas. Spektrinių charakteristikų pokytį nulemia optines dangas sudarančių medžiagų lūžio rodiklio pokytis. Paviršiaus šiurkštumo pokytį nulemia optines dangas sudarančių medžiagų dalelių difuzija. Žemiau esančiame paveiksle pavaizduota dielektrinių veidrodžių, sudarytų iš tantalo oksido ir silicio oksido medžiagų pažaidos slenksčio vertės priklausomybė nuo atkaitinimo temperatūros. Pažaidos energijos verčių matavimai atlikti „1-on-1“ režimu, naudojant 1064nm laisvų pulsų lazerį 220  $\mu$ s dažniu. [14]



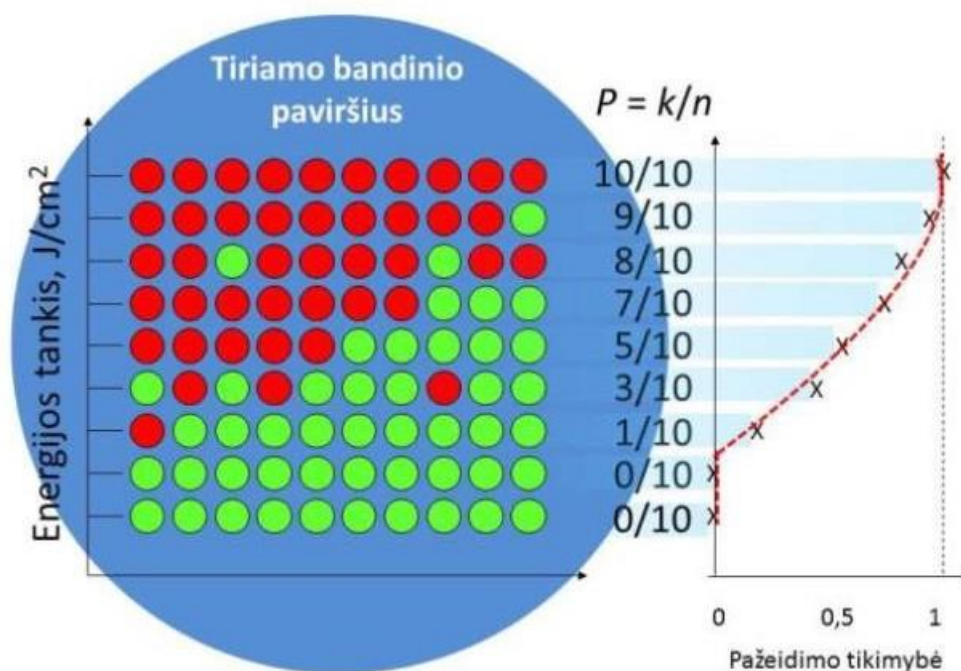
13 pav. Veidrodžių, sudarytų iš tantalo oksido ir silicio oksido medžiagų pažaidos slenksčio verčių priklausomybė nuo atkaitinimo temperatūros.

Iš grafiko verčių matyti, kad pažaidos slenksčio vertė sparčiai kinta iki 300 laipsnių atkaitinimo temperatūros. Pasiekus šią temperatūros vertę tolesnis atkaitinimo temperatūros didinimas mažai įtakoja pažaidos energijos slenksčio vertę. Atkaitinus dielektrinį veidrodį 300 laipsnių temperatūroje pažaidos energijos vertė padidėjo dvigubai. [14]

### 3. Tyrimo metodika

#### 3.1 Optinių paviršių atsparumo lazerio spinduliutei tyrimas

Siekiant eksperimentiškai nustatyti tiriamosios medžiagos optinį atsparumą - pažeidimo slenkstį, taikomi destruktiniai metodai. Taigi, optinio elemento atsparumo testavimui naudojama intensyvi impulsinė lazerinė spinduliutė, kuri pažeidžia tiriamuosius bandinius. Optinis atsparumas testuojamas pagal ISO21254 standarte aprašytą „1-i-1” metodiką ir vyksta dviem etapais.



14 pav. Optinių paviršių atsparumo lazerio spinduliutei nustatymas

Pirmame etape pavieniais, žinomo energijos tankio -  $F_i$  lazerio impulsais, bandinys eksponuojamas tam tikrose vietose (pvz. vienoje eilutėje iš viso  $n_i = 10$  vietų, 14 pav.): eksperimentiškai matuojama priklausomybė -  $P(F)$ . Tuo pat metu arba po ekspozicijos stebimi pažeidimo ( $k_i$ ) atvejai ir apskaičiuojama jų pasikartojimo tikimybė (statistinis pažeidimo pasikartojimo dažnis) :

$$P_i(n_i, k_i) = k_i / n_i, \quad (10)$$

įvertinamas vidutinis  $i$ -tosios eilutės vidutinis lazerio impulsų energijos tankis  $F_i(E_i, d)$ :

$$F_i = \frac{8 \square \square}{\square \square^2 (\square \square \square / \square^2)}, \quad (11)$$

kur  $E_i$  – vidutinė fiksuotos energijos lazerinių impulsų energija [J], matuojama kalibruotu energijos

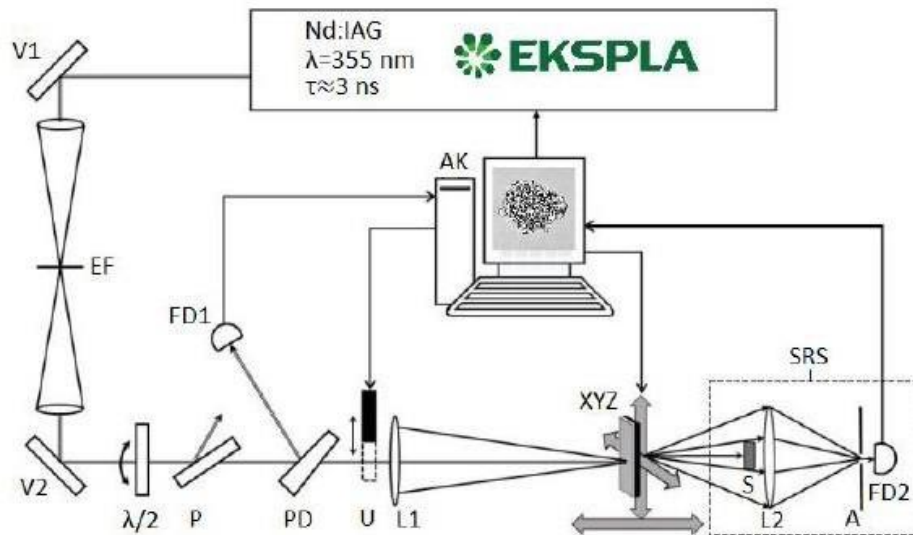
matuokliu, o  $d$  – vidutinis Gauso f-jos formos lazerinio pluošto diametras ( $I_{\max}/e^2$ ) lygyje [cm], matuojamas CCD kamera ir skaičiuojamas atitinkama programa. Čia  $I_{\max}$  – maksimalus pluošto intensyvumas, kuris matuojamas CCD kamera. Tokiu būdu gaunamas vienas  $i$ -tasis eksperimento taškas, kuris atidedamas  $P(F)$  diagramoje. Pakeitus impulso energijos tankį, reguliuojant vidutinę lazerio impulsų energiją  $E$ , procedūra kartojama kitose prieš tai neapšviestose bandinio vietose, kol išmatuojama visa kreivė t.y. apimanti intervalą kuriame  $P(F)$  auga nuo 0 iki 1 (14 pav. x taškai).

Antruoju etapu eksperimentiniai  $P(F)$  taškai aproksimuojami fizikinio modelio (punktyrinė linija 1,1 pav)

funkcija pagal didžiausio tikėtimumo algoritmą. Šiuo atveju išmatuotoju pažaidos slenksčiu laikomas labiausiai tikėtinas aproksimacijos modelio parametras, turintis slenksčio prasmę. Tokiu atveju optinis atsparumas nusakomas didžiausiu energijos tankiu  $F(\text{slenkstinis})$ , kurį viršijus aproksimuotoji pažeidimo tikimybė lygi nuliui.

Pažaidos slenksčio matavimo tyrimui buvo naudojama atsparumo lazerinei spinduliotei schema, kurios supaprastinta versija pateikiama 15 paveikslėlyje. Pasirinkta tiriamo paviršiaus vieta yra virtualiai padalinama į 144 taškų matricą. Vėliau lazerio sukelti pažeidimai buvo registruojami optiniu mikroskopu tamsaus lauko metodika BX51 (*Olympus*), nustatomos pažaidos tikimybės iš kurių nustatomos lazerinės pažaidos slenksčių vertės.

Šio tyrimo metu buvo tiriami naudojant Zr, Hf, HfO<sub>2</sub> medžiagų taikinius sudaryti oksidiniai monosluoksniai ant ęsdintų (nuęsdinta 100 nm) ir neęsdintų lydyto kvarco bandinių. Kadangi darbas orientuotas į optinių elementų pažaidos tyrimą UV srityje, eksperimente lazerio naudotas bangos ilgis buvo 355 nm, impulso trukmė ~3 ns, pluoštas buvo fokusuojamas trumpo židinio nuotolio lęšiu – 20 cm, pluošto sąsmaukos diametras ~64 μm. Tyrimo metu lazerio energija buvo valdoma iš  $\lambda/2$  fazinės plokštelės ir briusterio tipo poliarizatoriaus sukonstruotu atenuatoriumi.



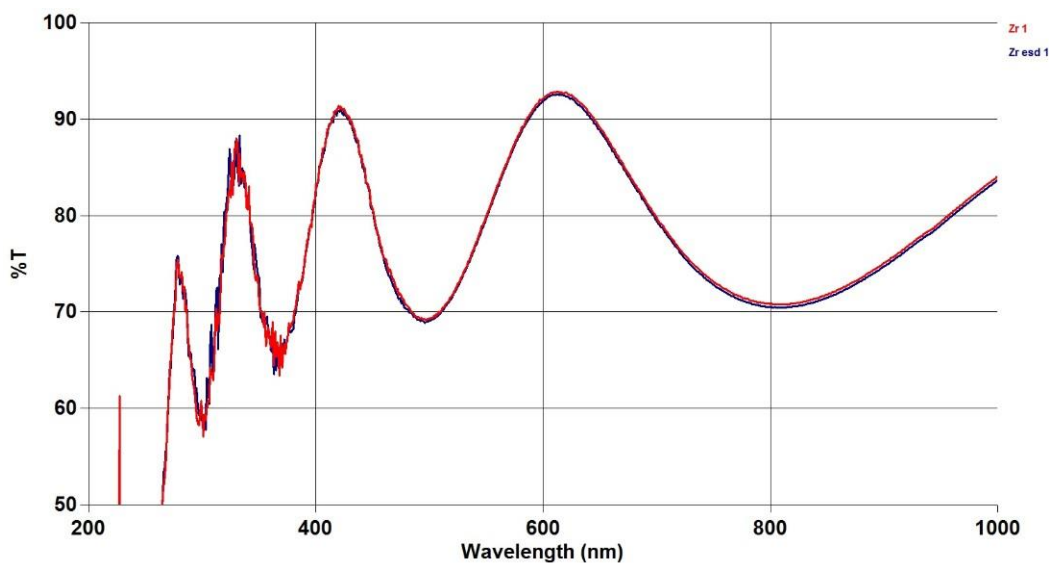
15 pav. Lazerinės pažaidos testavimo principinė schema [9]

Visi sistemą sudarantys elementai: V1 ir V2 – veidrodėliai, EF – erdvinis filtras,  $\lambda/2$  – fazinė plokštelė, P – briusterio kampo poliarizatorius, PD – pluošto daliklis, FD1 – fotodiodas skirtas energijos kalibracijai, AK – kompiuteris duomenų registravimui, U – užraktas impulsų sulaikymui, L1 ir L2 – fokusuojantys lęšiai, XYZ – pozicionavimo staleliai, S – atskiriantis sklaidą nuo tiesioginės spinduliuotės, A – apertūra, FD2 – sklaidą sukeltą lazerinio pažeidimo registruojantis fotodiodas.



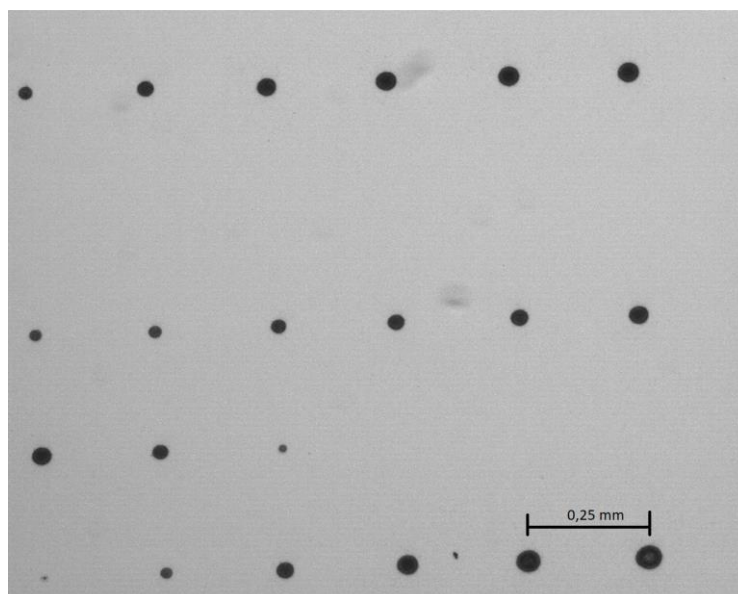
## 4. Darbo rezultatai

Ekspertas prasidėjo nuo to, kad su jonų asistavimo šaltiniu „IBS10“ kameroje buvo nuėsdinti apie 100 nm storio UVFS pagrindukai. Tada visi pagrindukai (ėsdinti ir neėsdinti) buvo perplauti ultragarsiniame plovimo įrenginyje „UCS-120“, ir nešami į jonapluoščio dulkinimo įrenginį „IBS23“ metalo oksido sluoksnio užgarinimui. Dulkinimo procesas negalėjo vykti „IBS10“ kameroje, dėl techninių priežasčių. Eksperimentai buvo atliekami su trimis taikinio medžiagomis - cirkoniu, hafniu ir pilnai oksiduotu hafniu. Žemiau pateiktame grafike (16 pav.) matome 300 nm užgarinto cirkonio oksido monosluoksnio spektrą, kai užgarinta buvo ant ėsdinto ir neėsdinto pagrindo paviršiaus.

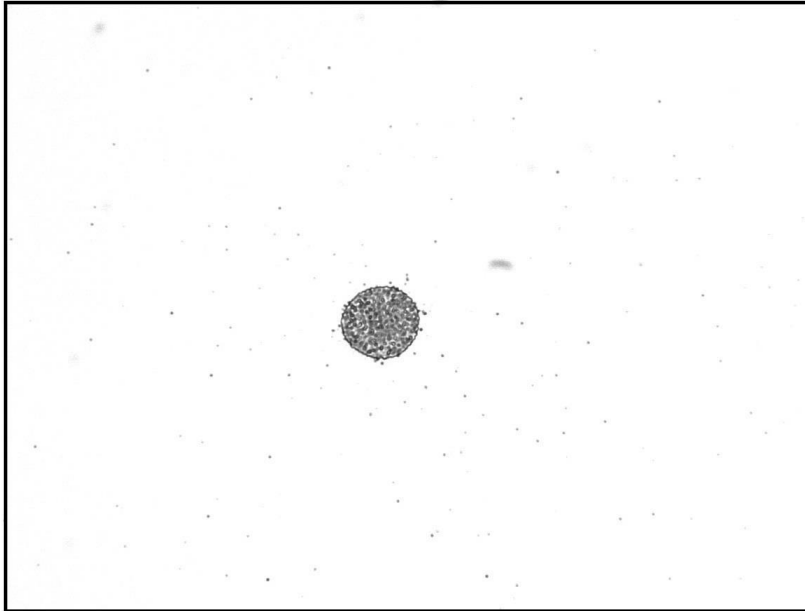


16 pav. 300 nm storio ZrO<sub>2</sub>, suformuoto ant ėsdinto ir neėsdinto paviršiaus pralaidumo spektras

a)

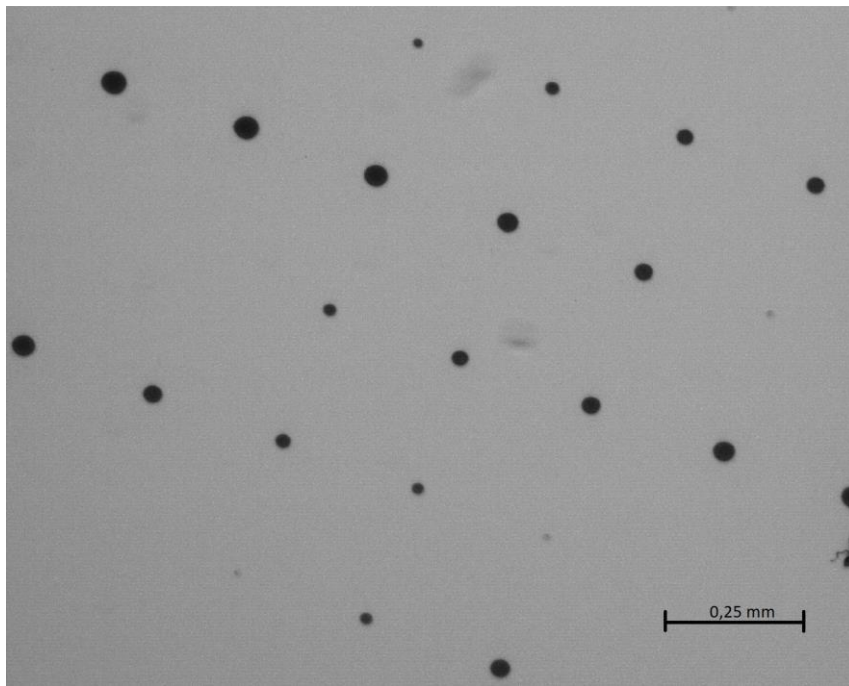


b)

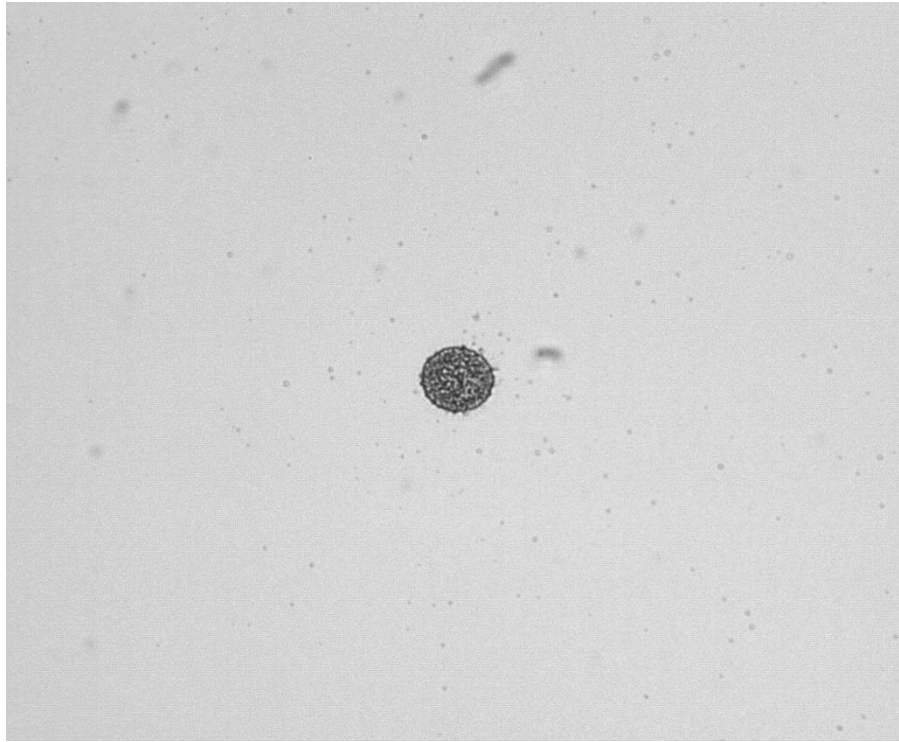


17 pav. ZrO<sub>2</sub> suformuoto ant ėsdinto bandinio pažaidos vaizdas per mikroskopą, a – daugelio impulsų pažaidimų vietos, b – vieno impulso pažaidimo morfologija.

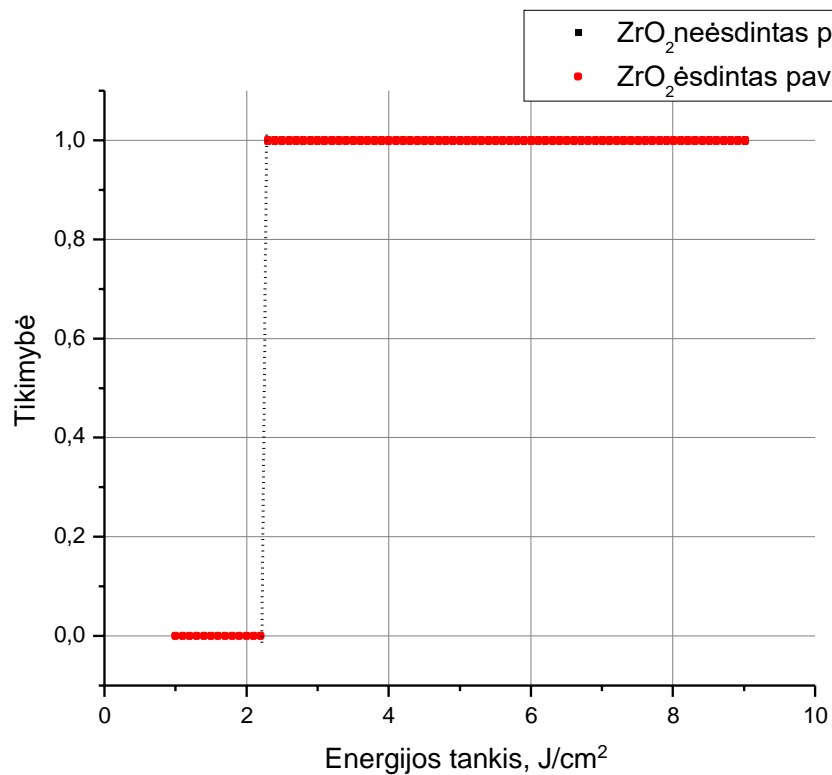
a)



b)



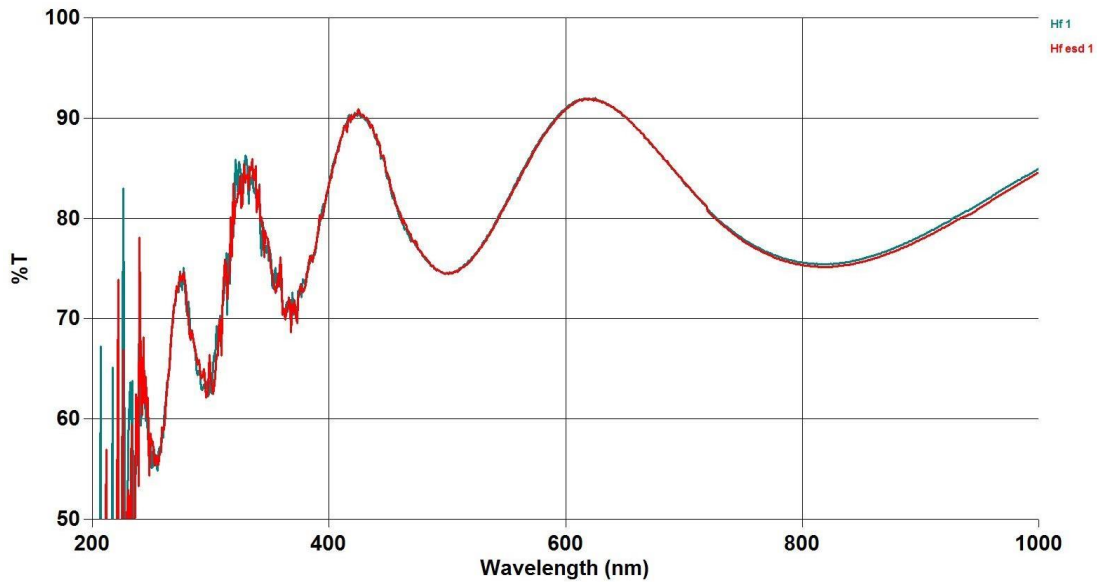
18 pav.  $ZrO_2$  suformuoto ant nešdinto bandinio pažaidos vaizdas per mikroskopą, a – daugelio impulsų pažaidimų vietos, b – vieno impulso pažaidimo morfologija.



19 pav.  $ZrO_2$  sluoksnio, šdinto ir nešdinto bandinio paviršiaus pažaidos tikimybės nuo energijos tankio priklausomybė

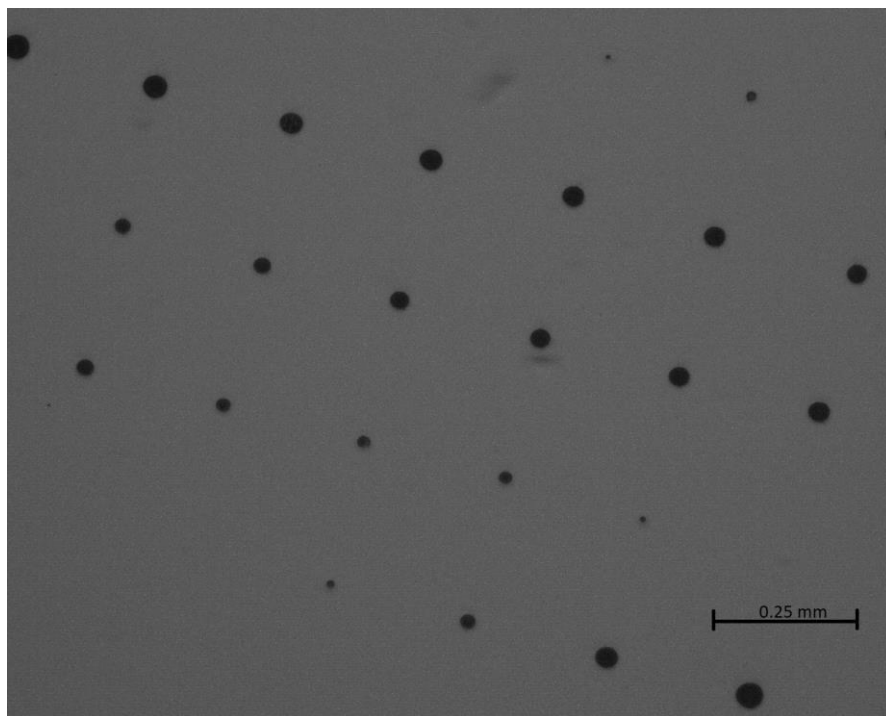
Iš 16 paveikslėlio matome, kad bandinio paviršiaus šdinimas spektro poslinkiui įtakos nedaro. 19

paveikslėlyje yra pateiktas cirkonio oksido sluoksnio pažaidos tikimybės priklausomybė nuo energijos tankio tiek ėsinto tiek neėsinto bandinio. Matome kad šiame matavime ėsdinimas neturi jokios įtakos pažaidos slenksčiui, kuri tiek ėsintam tiek neėsintam bandiniui yra vienoda –  $2,2 \text{ J/cm}^2$ . Taip yra dėl to, kad cirkonis ultravioletinėje srityje ties  $355 \text{ nm}$  bangos ilgiu turi labai didelę sugertį, todėl paviršiaus ėsdinimas pažaidos slenksčiui neturi. Sekančiuose paveikslėliuose bus pateikti hafnio taikinio eksperimento rezultatai.

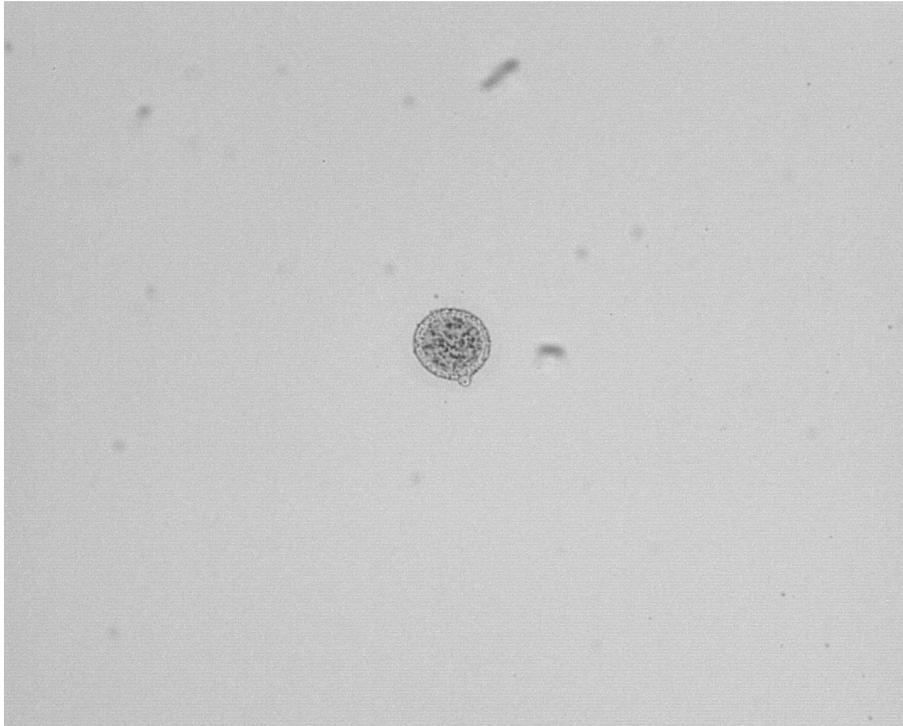


20 pav.  $300 \text{ nm}$  storio  $\text{HfO}_2$ , suformuoto ant ėsinto ir neėsinto paviršiaus pralaidumo spektras

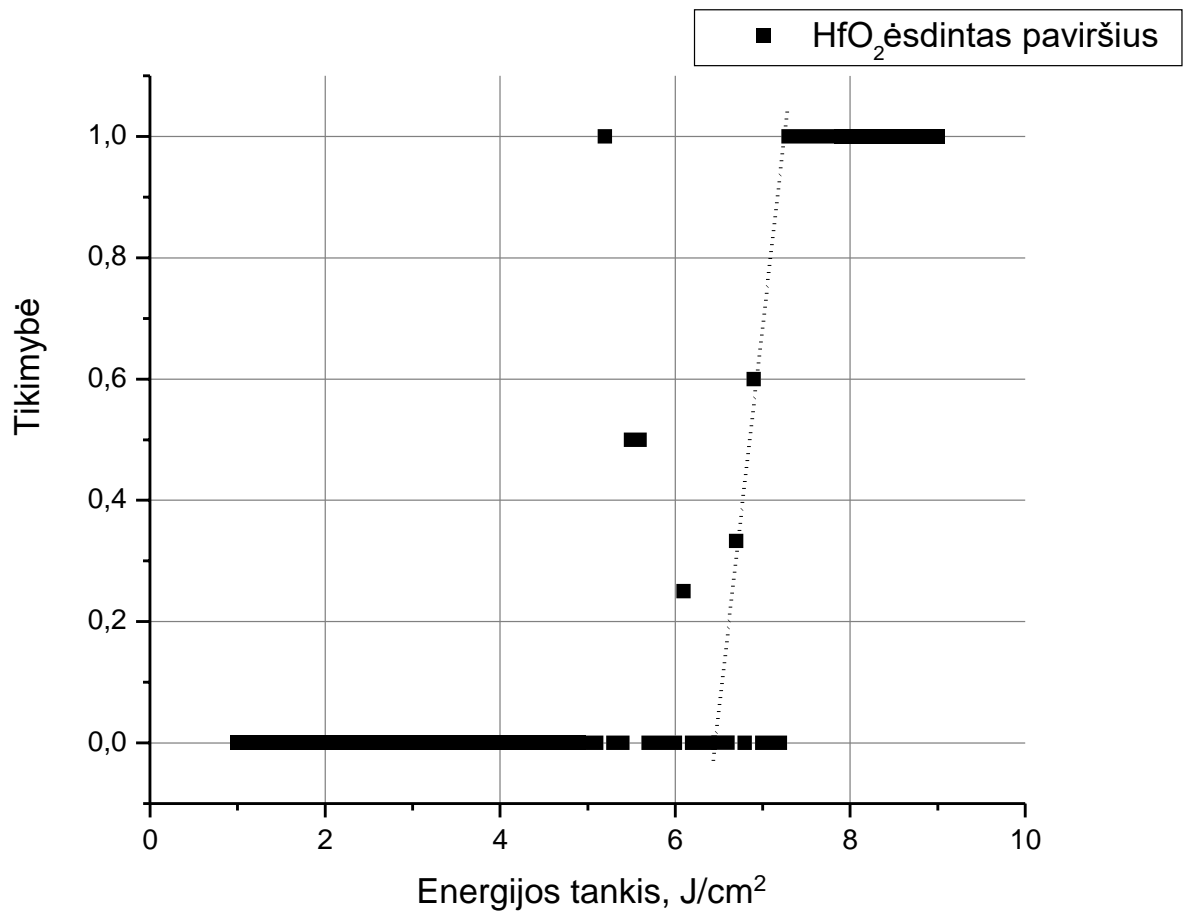
a)



b)

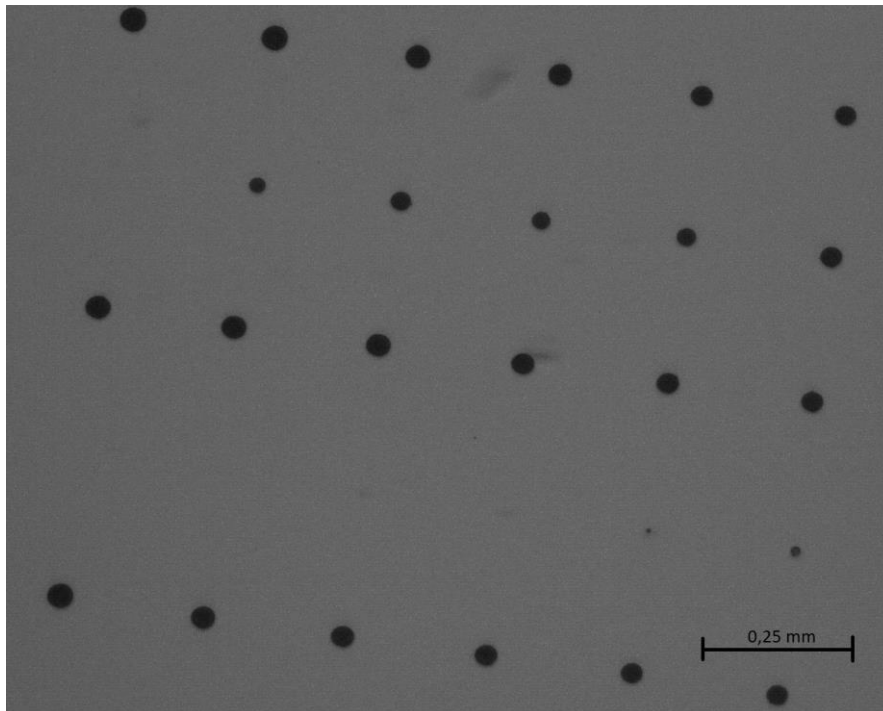


21 pav.  $\text{HfO}_2$  suformuoto ant nešdinto bandinio pažaidos vaizdas per mikroskopą, a – daugelio impulsų pažeidimų vietos, b – vieno impulso pažeidimo morfologija.

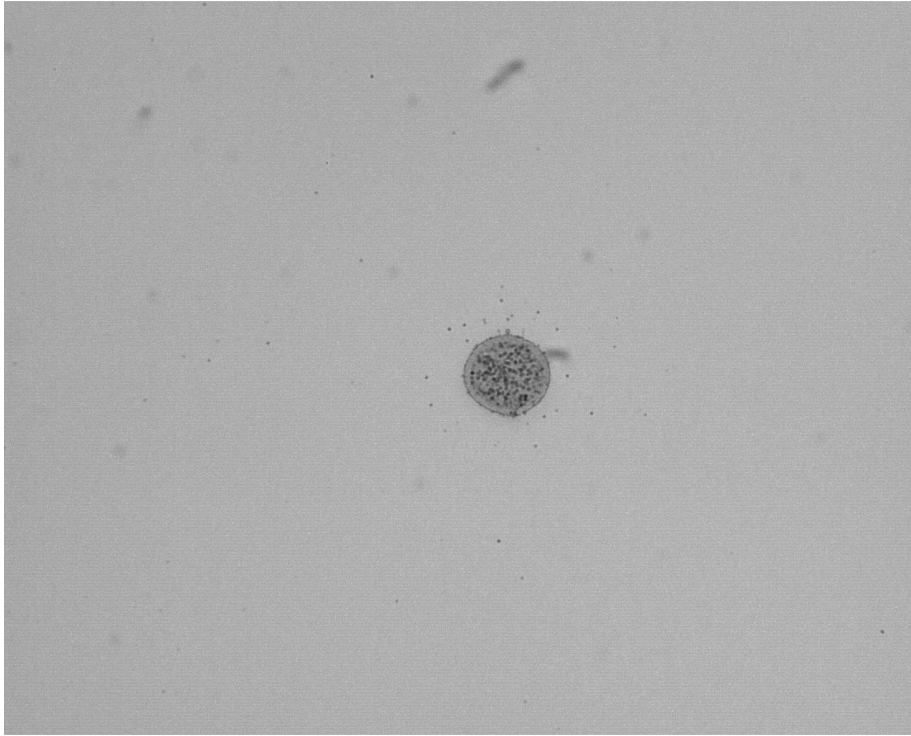


22 pav. HfO<sub>2</sub> sluoksnio, ęsdinto bandinio paviršiaus paųaidos tikimybė nuo energijos tankio priklausomybė

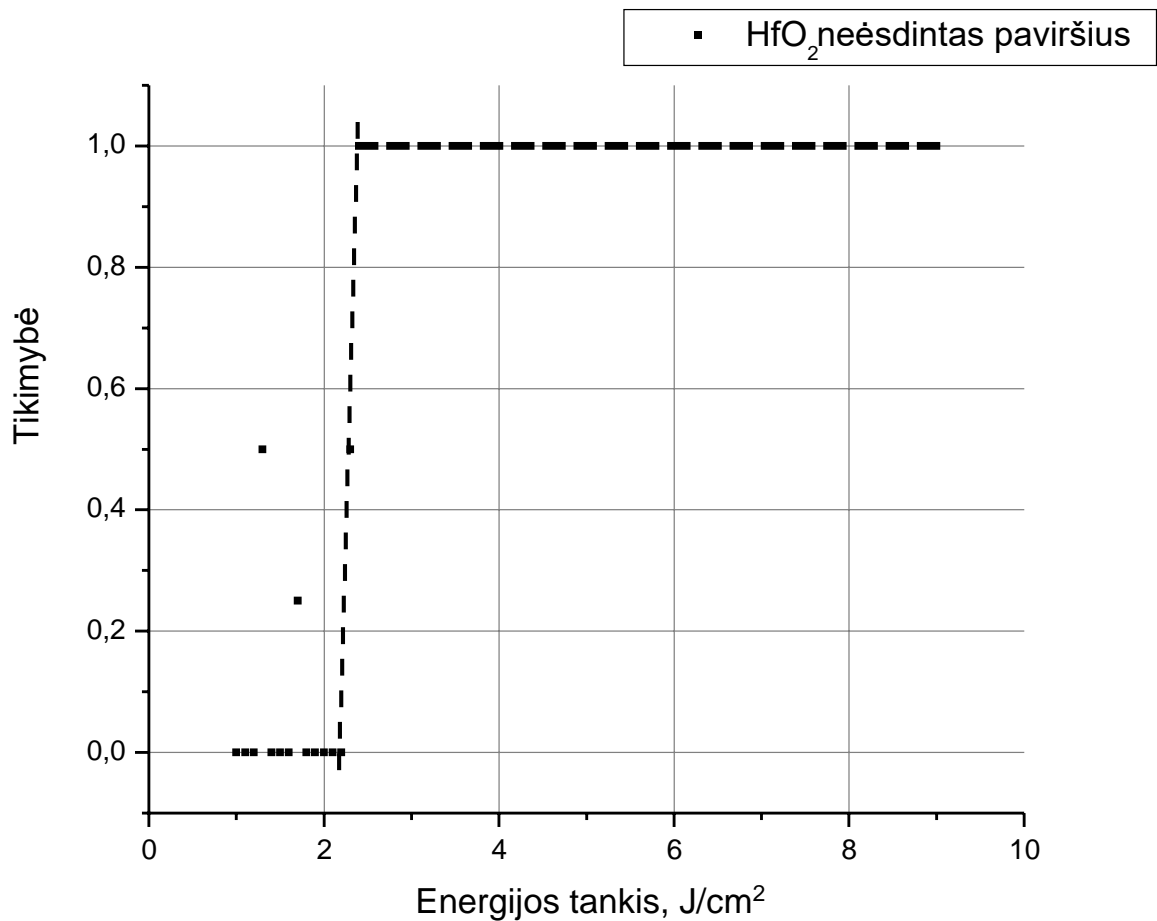
a)



b)



23 pav.  $\text{HfO}_2$  suformuoto ant ėsdinto bandinio pažaidos vaizdas per mikroskopą, a – daugelio impulsų pažaidimų vietos, b – vieno impulso pažaidimo morfologija.

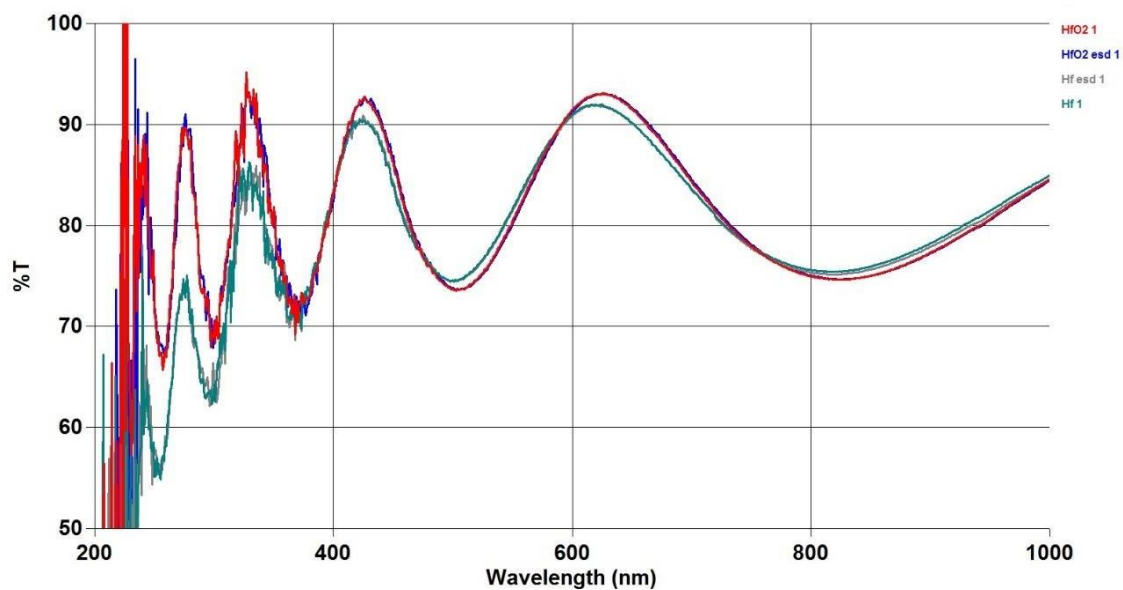


24 pav. HfO<sub>2</sub> sluoksnio, neėsdinto bandinio paviršiaus pažaidos tikimybės nuo energijos tankio priklausomybė

Hafnio oksido pažaidos slenksčio matavime rezultatai tarp ėsdinto paviršiaus ir neėsdinto paviršiaus skiriasi ženkliai. Neėsdinto paviršiaus pažaidos slenksčio vertė yra 2,3 J/cm<sup>2</sup>, o ėsdinto bandinio paviršiaus pažaidos slenkstis – 6,4 J/cm<sup>2</sup>. Šis skirtumas leidžia manyti, kad 100 nm nuėsdinimas panaikino ar bent jau sumažino Bilbio sluoksnį, kuris ženkliai padidino pažaidos slenksčio vertę.

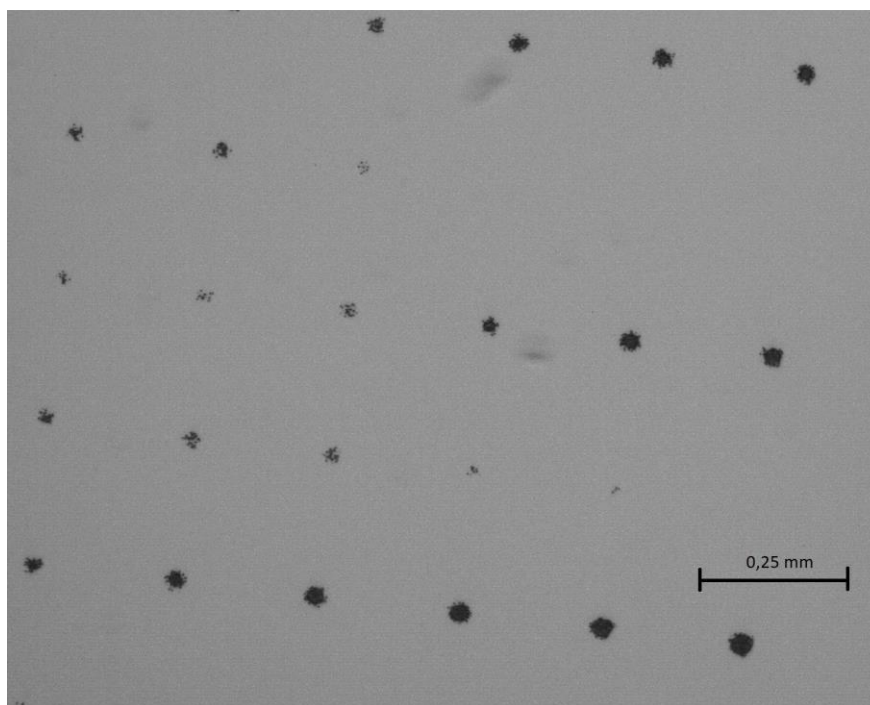


Paskutinis eksperimentas buvo atliktas su hafnio oksidinio taikinio medžiaga. Oksidinio hafnio taikinyje nuo paprasto hafnio taikinio skiriasi tuo, kad oksidinio hafnio taikinyje yra pilnai oksiduotas.

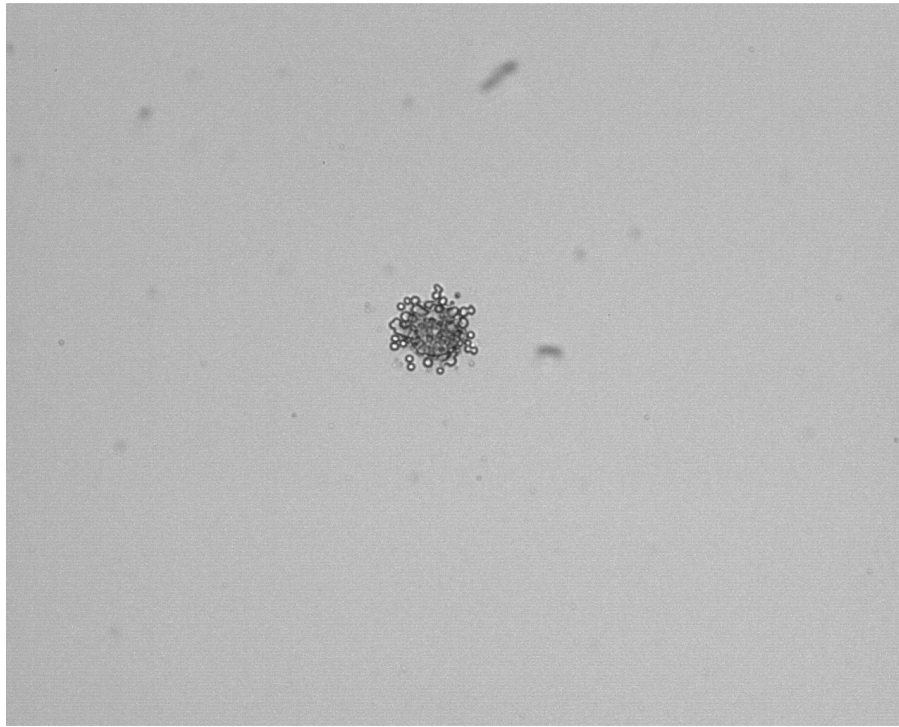


25 pav. Ėsdinto ir neėsdinto bandinio paviršiaus 300 nm sluoksnio storio oksidų, naudojant Hf ir HfO<sub>2</sub> taikinio medžiagas pralaidumo spektrai

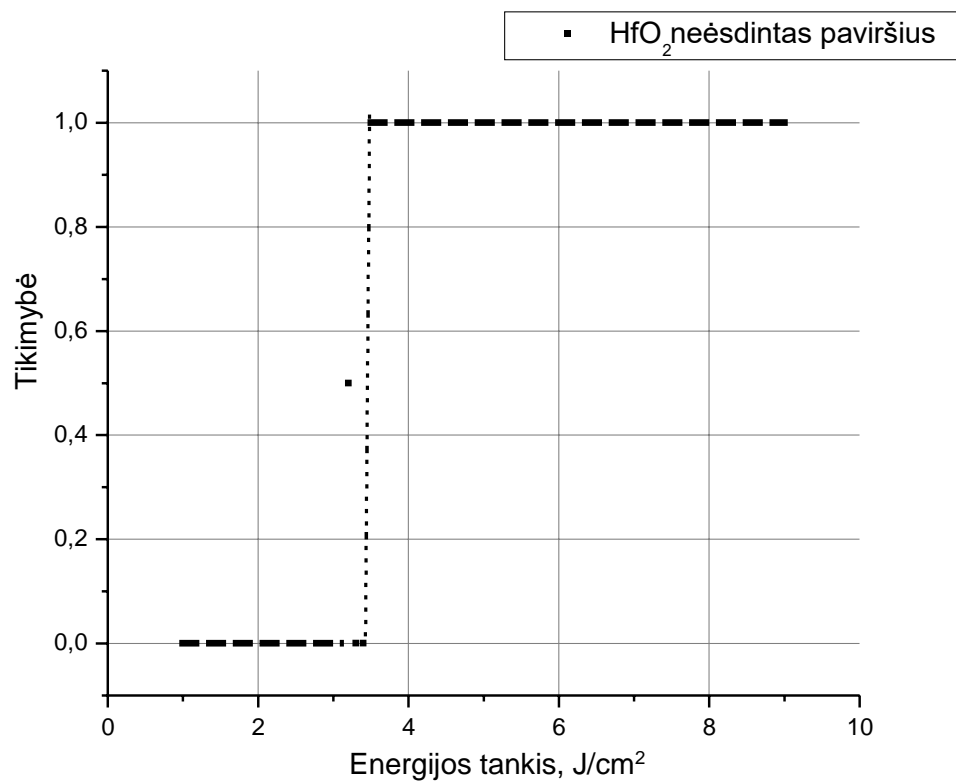
a)



b)

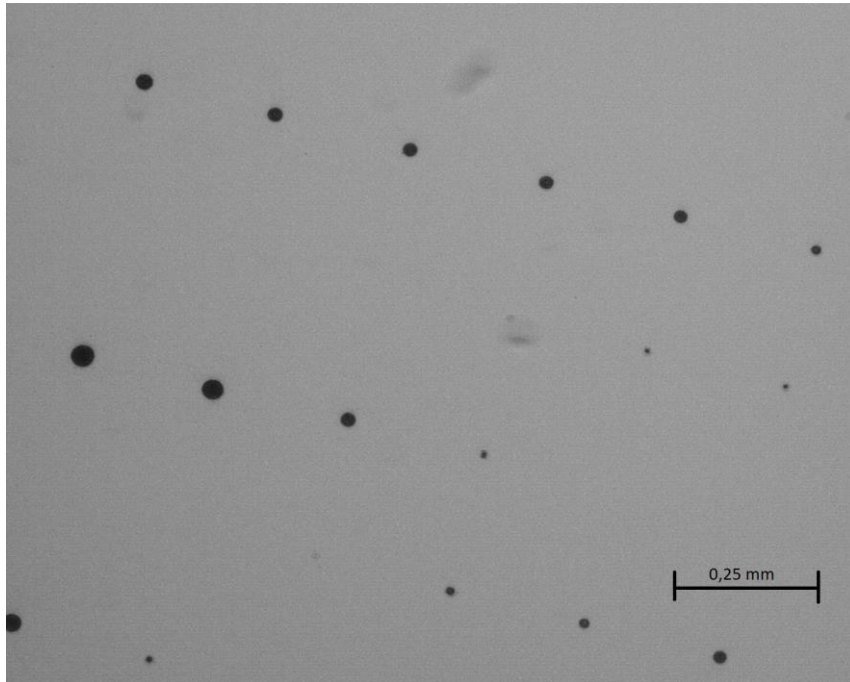


26 pav. Pilnai oksiduoto  $\text{HfO}_2$  sluoksnio ant nešdinto bandinio, pažaidos vaizdas per mikroskopą, a – daugelio impulsų pažeidimų vietos, b – vieno impulso pažeidimo morfologija.

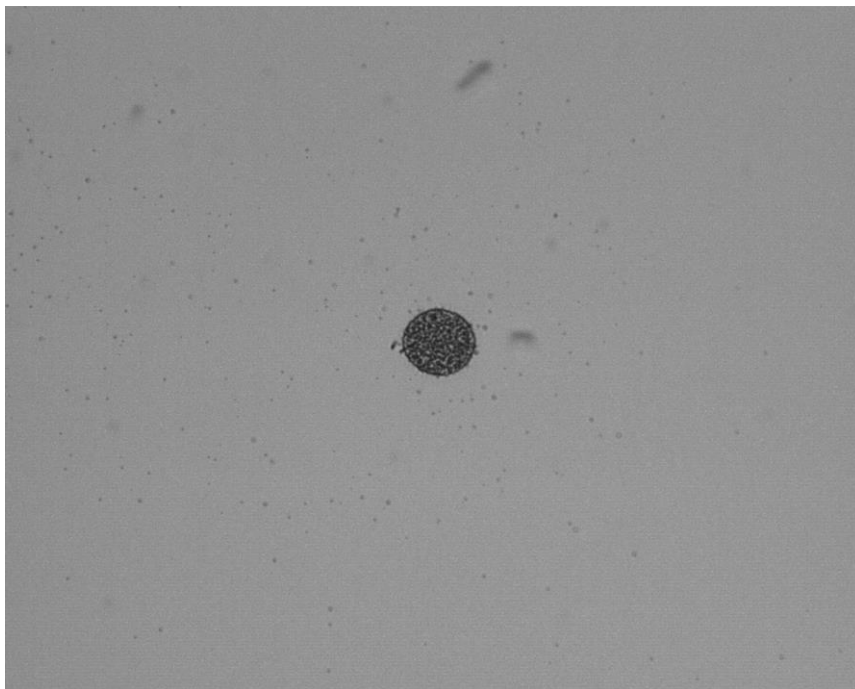


27 pav.  $\text{HfO}_2$  sluoksnio, naudojant pilnai oksiduoto  $\text{HfO}_2$  taikinio medžiagą ant nešdinto bandinio paviršiaus, pažaidos tikimybės nuo energijos tankio priklausomybė

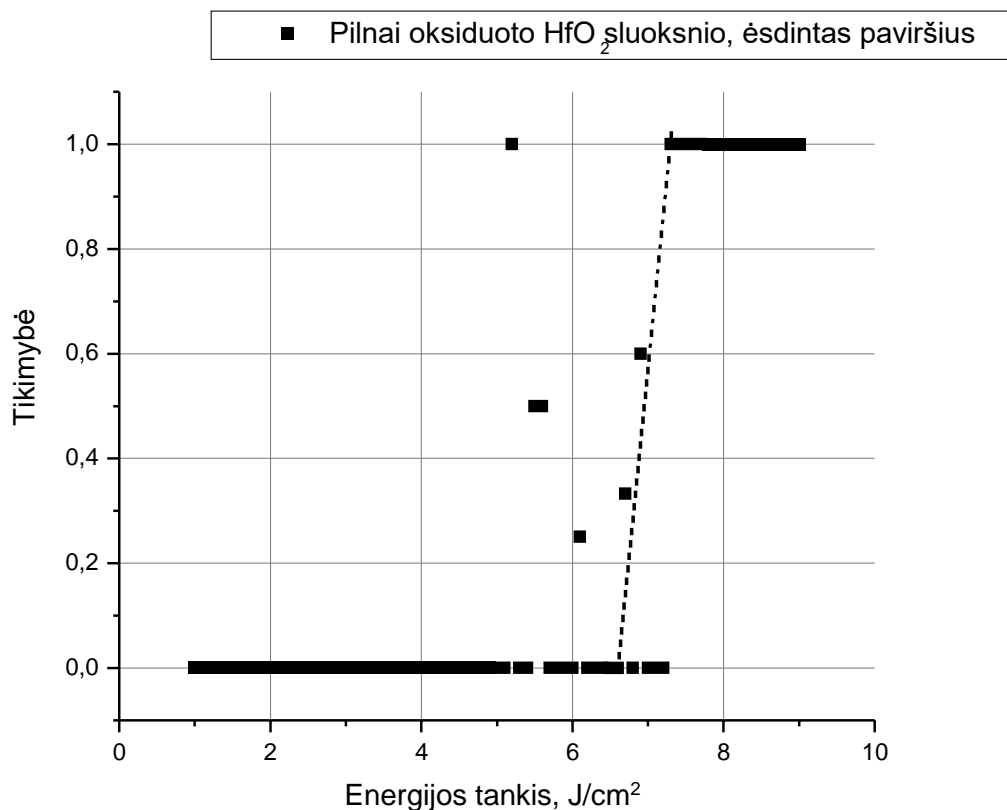
a)



b)



28 pav.  $\text{HfO}_2$  sluoksniu, naudojant pilnai oksiduoto  $\text{HfO}_2$  taikinio medžiagą ant ėsinto bandinio paviršiaus, pažaidos tikimybės nuo energijos tankio priklausomybė



29 pav. HfO<sub>2</sub> sluoksnio, naudojant pilnai oksiduoto HfO<sub>2</sub> taikinio medžiagą ant ęsdinto bandinio paviršiaus, pažaidos tikimybės nuo energijos tankio priklausomybė

Iš 27 bei 29 paveikslėlių matome, kad pilnai oksiduoto HfO<sub>2</sub> taikinio medžiagos pažaidos slenksčiai dar didesni nei hafnio taikinio medžiagos. Kai bandinio paviršius nuėsdintas, tai pažaidos slenksčio vertė siekia net 6,6 J/cm<sup>2</sup>, o neėsdinto bandinio – 3,4 J/cm<sup>2</sup>.

Aukščiausios pažaidos slenksčio vertės buvo pasiektos, kai naudojama pilnai oksiduoto hafnio oksido taikinio medžiaga ant nuėsdinto stikliuko. Taip yra todėl, kad hafnio oksidinis taikinytis yra pilnai oksiduotas, dėl kurių sumažėja fotonų sugertis ultravioletinėje spektro srityje (žiūrėti 25 pav.). Kadangi pramušimo slenksčio nustatymo schemoje naudojamas lazeris generuoja 355 nm bangos ilgio spinduliuotę, toje spektro dalyje hafnio oksido medžiagos sugertis yra mažesnė lyginant su hafnio medžiaga, todėl ir pramušimo slenksčio vertės yra gaunamos didesnės.

Siekiant dar padidinti pažaidos slenksčio vertes, bandinėliai buvo atkaitinti 350 laipsnių temperatūroje tokia seka:

1. 6 val. temperatūra kilo iki 350 °C;
2. 12 val. bandinėliai kaitinomi pastovioje 350 °C temperatūroje;
3. 12 val temperatūra buvo mažinama iki kambario temperatūros (25 °C).

1 lentelė. Pramušimo slenksčio vertės.

<b>MEDŽIAGA</b>	<b>NEĖSDINTA, J/cm<sup>2</sup></b>	<b>ĖSDINTA, J/cm<sup>2</sup></b>	<b>Atkaitinta 350 °C Neėsdinta, J/cm<sup>2</sup></b>	<b>Atkaitinta 350 °C Ėsdinta, J/cm<sup>2</sup></b>
<b>Zr</b>	2,2	2,2	3,3	4,7
<b>Hf</b>	2,3	6,4	3,9	6,4
<b>HfO<sub>2</sub></b>	3,4	6,6	4,2	10,2

1 lentelėje matome ėsdintų ir neėsdintų bandinelių pažaidos slenksčio vertės. Atkaitinus bandinėjus 350 °C temperatūroje, danga pilnai oksiduojasi, sumažėja šviesos sugertis, ko pasekoje pažaidos slenksčio vertės pasiekiamos ženkliai aukštesnės. Labiausiai atkaitinimo įtaka pastebima HfO<sub>2</sub> taikinio medžiagai, kur pažaidos slenksčio vertė ėsdinto bandinėjio padidėjo daugiau nei 2 kartus, nuo 4,2 J/cm<sup>2</sup> iki 10,2 J/cm<sup>2</sup>.

## Išvados

1. Cirkonio oksido pažaidos slenksčio vertė tiek ėsdinto ir neėsdinto bandinio nustatyta vienoda –  $2,2 \text{ J/cm}^2$ . Tai paaiškinama tuo, kad cirkonio oksido sluoksnio sugertis ultravioletinėje srityje ties  $355 \text{ nm}$  bangos ilgiu yra labai didelė, todėl Bilbio sluoksnis neįtakoja pažaidos slenksčio rezultatų. Atkaitinus bandinėlius, pažaidos slenksčio vertės padidėjo, neėsdinto bandinėlio –  $3,3 \text{ J/cm}^2$ , ėsdinto  $4,7 \text{ J/cm}^2$ .
2. Naudojant hafnio metalo taikinio medžiagą, pažaidos slenksčio vertė ant neėsdinto bandinio yra  $2,3 \text{ J/cm}^2$ , o esant nuėsdintame paviršiuje –  $6,4 \text{ J/cm}^2$ . Tai beveik 3 kartus padidina atsparumą lazerinei spinduliuotei. Atkaitinus bandinėlius  $350 \text{ }^\circ\text{C}$  pažaidos slenksčio vertė ėsdintam bandinėliui nepakito, o neėsdintam bandinėliui padidėjo iki  $3,9 \text{ J/cm}^2$ .
3. Pilnai oksiduoto hafnio taikinio medžiaga suformuoto sluoksnio pažaidos slenksčio vertė ant neėsdinto bandinio siekia  $3,4 \text{ J/cm}^2$ , o bandiniui su nuėsdinimu –  $6,6 \text{ J/cm}^2$ . Atkaitinus bandinėlius  $350 \text{ }^\circ\text{C}$  pažaidos slenksčio verčių pokytis nustatytas didžiausias. Neėsdintam bandinėliui padidėjo iki  $4,2 \text{ J/cm}^2$ , o ėsdintam bandinėliui pažaidos slenksčio vertė padidėjo iki  $10,2 \text{ J/cm}^2$ . Didžiausia pažaidos slenksčio vertė pasiekta todėl, kad UV srityje  $\text{HfO}_2$  danga yra pilnai oksiduota ir sugertis yra mažiausia.
4. Iš nustatytų pažaidos slenksčių galima teigti, jog cirkonio metalas kaip taikinio medžiaga nėra tinkama naudoti ultravioletinėje spektro srityje. Naudojant hafnio metalą kaip taikinio medžiagą, stikliuko paviršių paviršių būtina nuėsdinti ir atkaitinti aukštoje temperatūroje, norint gauti aukštą sluoksnio pažaidą.

## Santrauka

Šis darbas buvo vykdomas įmonėje UAB „Eksma Optics“ su jonų pluošto dulkinimo technologijos sistema „IBS10“, kurioje yra jonų asistavimo šaltinis, ir „IBS23“ kurioje buvo vykdomi plonų optinių dangų formavimai. Darbo tikslas buvo ištirti pagrindukų nuėsdinimo jonų asistavimo šaltiniu itaką pažaidos slenksčio nustatymui. Eksperimentuodamas nustaciau, kad cirkonio medžiagos pažaidos slenkstis yra  $2,2 \text{ J/cm}^2$  esant tiek ėsdintam paviršiuje tiek neėsdintame paviršiuje dėl to, kad cirkonis ultravioletinėje srityje ties  $355 \text{ nm}$  bangos ilgiu turi didelę sugertį. Atkaitinus bandinėlius  $350 \text{ }^\circ\text{C}$  temperatūroje pažaidos slenksčio vertės padidėjo – neėsdintam bandinėliui iki  $3,3 \text{ J/cm}^2$ , ėsdintam iki  $4,7 \text{ J/cm}^2$ . Kadangi fotonai yra sugeriami, todėl medžiaga lokaliai įkaista ir toje vietoje paviršius yra pažeidžiamas negrįžtamai. Hafnio metalo taikiniu suformuotų dielektrinių sluoksnių pažaidos slenkstis ant neėsdinto bandinio siekė  $2,3 \text{ J/cm}^2$ , o esant ėsdinimui –  $6,4 \text{ J/cm}^2$ . Atkaitinus bandinėlius, neėsdintame paviršiuje pažaidos slenkstis padidėjo iki  $3,9 \text{ J/cm}^2$ , o ėsdintame bandinėlio paviršiuje pažaidos slenksčio vertė nepakito. Pilnai oksiduoto hafnio metalo taikinio medžiagos suformuotų sluoksnių pažaidos slenksčiai buvo nustatyti didžiausi. Kai paviršius neėsdintas –  $3,4 \text{ J/cm}^2$ , nuėsdinus paviršių energijos tankio vertė siekia net  $6,6 \text{ J/cm}^2$ . Atkaitinus bandinėlius, pažaidos slenksčio vertės pokytis buvo didžiausias. Esant neėsdintam bandiniui padidėjo iki  $4,2 \text{ J/cm}^2$ , o ėsdintame bandinėlyje iki  $10,2 \text{ J/cm}^2$ . Rezultatai tiesiogiai koreliuoja su sugertimi, kurios yra matomos spektrogramose.

## Summary

This work has been made with Ion beam sputtering technology system „IBS10“ that system has Ion beam sputtering assist source also with system „IBS23“ which can make thin film optical layer. Every research has been made in company „Eksma Optics“. The main purpose of this work is to research what impact of laser induced damage threshold is made for substrates which is etched with Ion beam sputtering assist source. While reasearching I determined that damage threshold for zirconium is  $2,2 \text{ J/cm}^2$  and there is no difference if substrate is etched or not and that is because zirconium has big absorbtion in the field of 355 nm wavelength. After annealation of substrates in  $350^\circ\text{C}$  temperature I found out that laser induced damage threshold for unetched and etched substrates increased by  $3,3 \text{ J/cm}^2$  and  $4,7 \text{ J/cm}^2$ . Because of photons absorbtion material locally heat up and surface is irreversibly damaged. For hafnium laser induced damage threshold reached  $2,3 \text{ J/cm}^2$  for unetched and for etched  $6,4 \text{ J/cm}^2$ . After annealing substrates I found out that laser induced damage threshold for unetched substrates increased to  $3,9 \text{ J/cm}^2$  and for etched substrates laser induced damage threshold did not changed. The largest laser induced damage threshold was determined for fully oxidized hafnium. Energy density for unetched substrate is  $3,4 \text{ J/cm}^2$  for etched substrate is  $6,6 \text{ J/cm}^2$ . Laser induced damage threshold variaton after annealing was the largest. Laser induced damage threshold variaton on etched substrate was to  $4,2 \text{ J/cm}^2$  and on etched substrate it was to  $10,2 \text{ J/cm}^2$ . Results directly correlate with absorbtion which we can see in spectrograms.



## Literatūros sąrašas

1. M. Smrž, O. Novak, J. Mužik, H. Turčičova, M. Chyla, S. Sankar, M. Vyvlečka. Advances in High-Power, Ultrashort Pulse DPSSL Technologies at HiLASE. *Applied Sciences*. (2017)
2. L. Gallais, M. Commandré. Laser-induced damage thresholds of bulk and coating optical materials at 1030 nm, 500 fs., *Applied Optics*, **4**. (2014)
3. M. H. Industries. Development of Microfabrication Technology using DUV Laser. **49–54**, (2016)
4. Operation Manual IBS10 ENG 2014-11-21
5. D. T. Wei, H. R. Kaufman, Ch. Lee. Thin films for optical systems. Marcel Dekker, Inc., 1995.
6. D. T. Wei, H. R. Kaufman, Ch. Lee. *Thin films for optical systems*. Marcel Dekker, Inc., 1995
7. O. Stenzel. Optical Coatings. Material Aspects in Theory and Practice. Springer, Berlin, 2014.
8. H. A. Macleod. Thin Film Optical Filters. Institute of Physics Publishing, 2001.
9. K. Juškevičius, R. Buzelis, G. Abromavičius, R. Samuilovas, S. Abbas, A. Belosludtsev, R. Drazdys, S. Kičas. Argon plasma etching of fused silica substrates for manufacturing high laser damage resistance optical interference coatings, *Optical Materials Express*, **3598–3607**. (2017)
10. K. Juškevičius. Plonųjų dielektrinių sluoksnių optinių ir fizinių savybių tyrimas bei jų formavimo technologijų optimizavimas. *Vilniaus Universitetas*. (2014)
11. J. N. Desai. Advances and Processes in Precision Glass Polishing Techniques. **1–12**, (2009) CVI Optics. Laser Induced Damage Threshold of Femtosecond Coatings. **(2013)**
12. J. H. Campbell, Damage resistant optical glasses for high power lasers: A continuing glass science and technology challenge. *Glass Science and Technology*. **75**, **91–108**. (2002)
13. W. Nomura, T. Kawazoe, T. Yatsui, M. Naruse, M. Ohtsu. Observation and analysis of structural changes in fused silica by continuous irradiation with femtosecond laser light having an energy density below the laser-induced damage threshold. *Beilstein Journal of Nanotechnology*, **1334–1340**. (2014)

14. Yuanan Zhao, Yingjian Wang, Hui Gong, Jianda Shao, Zhengxiu Fan. Annealing effects of structure and laser-induced damage threshold of Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/SiO<sub>2</sub> dielectric mirrors // Applied surface science 2003, p 1-6