

**VILNIAUS UNIVERSITETAS  
VALSTYBINIS MOKSLINIŲ TYRIMŲ INSTITUTAS  
FIZINIŲ IR TECHNOLOGIJOS MOKSLŲ CENTRAS**

Gabrielius Rimšelis

**PADIDINTOS LAZERINĖS PAŽAIDOS PLUOŠTO PLĖSTUVO, SKIRTO  
ULTRAVIOLETINĖS SPINDULIUOTĖS LAZERIAMS, PROTOTIPO SUKŪRIMAS**

Magistro studijų baigiamasis darbas  
(studijų programa – LAZERINĖ TECHNOLOGIJA)

Studentas

Gabrielius Rimšelis

Darbo vadovas

dr. Kęstutis Juškevičius

Centro direktorius

prof. dr. Roaldas Gadonas

Vilnius 2018

## Turinys

1. Įvadas .....	3
1.1. Darbo tikslas ir uždaviniai .....	4
2. Literatūros apžvalga .....	4
2.1. Optiniai stiklai .....	4
2.2. Lydytas kvarcas .....	6
2.3. Skirtingų rūšių lydyto kvarco gamintojai ir gamybos technologijos.....	7
2.4. Optinių stiklų poliravimas .....	10
2.5. Popaviršiniai defektai .....	11
2.6. Optinių elementų lazerinė pažaida .....	12
2.7. Optinės dangos .....	13
3. Tyrimo metodika .....	13
3.1. Optinių stiklų paruošimas tyrimui ir tyrimo eiga .....	13
3.2. Argono plazmos ėsdinimas optiniams stiklams.....	15
3.3. Optinių stiklų atsparumo lazerio spinduliuotei tyrimas.....	15
3.4. Optinių parametrų matavimai .....	17
4. Eksperimento rezultatai ir jų aptarimas.....	18
4.1. Optinių stiklų atsparumas lazerio spinduliuotei .....	18
4.2. Optinių parametrų įvertinimas ir palyginimas.....	20
4.3. Skaidrinančiomis dangomis padengtų ėsdintų langelių tyrimas.....	23
4.4. Padidintos lazerinės pažaidos pluošto plėstuvo prototipas.....	25
5. Pagrindiniai rezultatai ir išvados .....	27
6. Santrauka .....	28
7. Summary .....	28
8. Literatūros sąrašas .....	30

## 1. Įvadas

Kasdien pasaulyje pagaminami tūkstančiai lazerinių optinių elementų. Jie naudojami lazerių aktyviųjų terpių generuojamai spinduliuotei valdyti, fokusuoti, nukreipti, apgręžti, kitaip ja manipuliuoti. 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 pažeidimą [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 grynūmui. Medžiagos ruošinys, išlydytas reikiamos sudėties stiklas yra papildomai apdorojamas, pjaustomas, šlifuojamas ir poliruojamas, kol pasiekama reikiama paviršiaus kokybės klasė. Lazeriniams taikymams skirti optiniai elementai yra klasifikuojami remiantis keliais standartais, pagrindiniai yra ISO 10110 ir MIL 13830, kurie nusako liekamųjų režių, duobučių, kiekį poliruotame paviršiuje. Liekamieji defektai gali sąlygoti tokius nepageidaujamus reiškinius kaip sklaidą ar lazerinę pažeidimą.

Optinius pagrindukus padengus interferencinėmis dangomis, jie tampa optiniais elementais, turinčiais konkretų taikymą ir apibrėžtas optines savybes, tarkime poliarizatoriais ar dispersiniais veidrodžiais. Optinės interferencinės dangos yra plonų (storis gali siekti kelis nanometrų) sluoksnių sistemos, kuriose vyksta per ją sklindančios šviesos konstruktyvi arba destruktivi interferencija, kuria manipuliuojant yra gaunamos norimos optinio elemento savybės. Įprasta tokioms plonasluoksniams 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, pačias dangas gali sudaryti tūkstančiai sluoksnių [3], [4].

Pasaulinėje fotonikos rinkoje vyraujančios tendencijos reikalauja, vis patvaresnių ir ilgaamžiškesnių optinių elementų bei jų sistemų. Mikroapdirbimui skirtų sistemų gamintojai, matydami puslaidininkinių 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 dėmesį į mažesnę dydį bei pasinaudoti daugiau energijos turinčiais fotonais [5]. Šis metodas taip pat turi trūkumą - įprasta lazerinė optika neatlaiko ekstremalių galių trumpesnių bangų diapazone ir būna pažeidžiama.

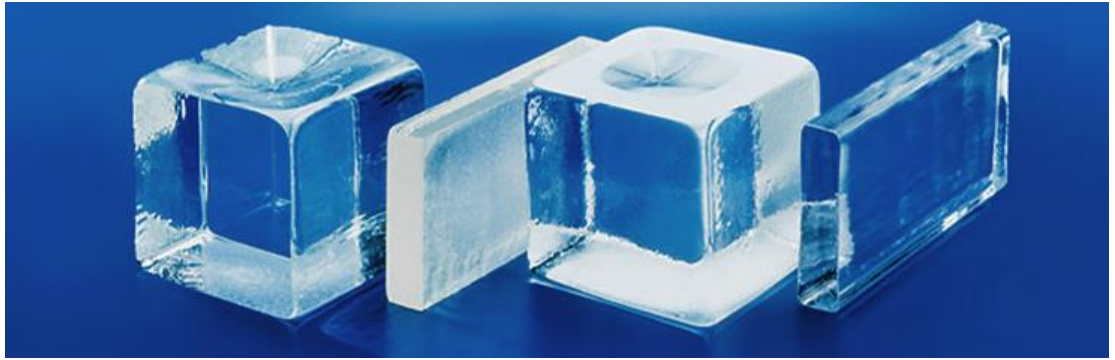
## 1.1. Darbo tikslas ir uždaviniai

Šio darbo tikslas yra sukurti aukštą lazerinės pažaidos slenkstį turintį pluošto plėstuvą, skirtą ultravioletinės (UV) spinduliuotės lazerinėms sistemoms. Tam reikės ištirti 5 populiariausius rinkoje naudojamus lydytus kvarcus. Išmatuoti skirtingų bandinių lazerinės pažaidos slenksčius (UV) srityje, palyginti juos. Skirtingiems bandiniams pritaikius skirtingo gylio argono plazmos ėsdinimo metodą, kuris turėtų pašalinti bandinių poliravimo likučius, išmatuoti jų lazerinės pažaidos slenkstį. Palyginti matavimų rezultatus ir rasti optimalų stiklą bei argono plazmos ėsdinimo režimą, kad gautume aukščiausią lazerinės pažaidos vertę bandiniui. Ištirti ir įsitikinti ar po tokio papildomo apdirbimo lazerinė optika yra tinkama naudojimui ir ar nepasikeitė jos kritinės savybės – pralaidumas, paviršiaus kokybė, paviršiaus šiurkštumas ir praėjusio pluošto iškraipymas. Vėliau elementus iš geriausių rezultatų pademonstravusių lydytų kvarcų padengti skaidrinančiomis dangomis, surinkti pluošto plėstuvą ir jo lazerinės pažaidos slenkstį palyginti su įprastu, lazerinio apdirbimo rinkoje naudojamu pluošto plėstuvu.

## 2. Literatūros apžvalga

### 2.1. Optiniai stiklai

Optinis stiklas yra lazerinio optinio elemento pagrindas, tad natūralu, kad būtent nuo stiklo ir jo apdirbimo kokybės priklauso didžioji dalis galutinio elemento kokybės. Nuo seno, optinių stiklų gamybos įmonės įsikūrė ten, kur buvo didžiausias poreikis jų gaminamam produktui. Tarkime, visame pasaulyje garsi, stiklo gamintoja *Schott* 1884 metais įkurta Jenoje (Vokietija). Įmonės įkūrėjai yra Otto Schott, Ernst Abbe, Carl ir Roderich Zeissai. Vėdini tuometinio poreikio pramonei ir sėkmingų tyrimų, atidarė gamyklą, kurioje pradėjo lydyti optinius stiklus, skirtus mikroskopų, teleskopų, žiūronų ir kitų optinių elementų gamybai. Dabar *Schott* yra vienas didžiausių stiklo gamintojų pasaulyje, o *Carl Zeiss* prekinis ženklas yra kokybės etalonas, mikroskopų ir optinių taikiklių rinkoje [6].



1 pav. Schott optinio stiklo ruošiniai [6]

Pasaulyje yra daug stiklo gamintojų, keli didžiausieji yra, jau minėtasis *Schott*, *Corning*, *Ohara*, *Heraeus*, *Nikon*, *CDGM*, *Viosil* ir kiti. Dažnai, jų gaminami produktai būna labai panašūs, bet gamybos technologija ir naudojamos medžiagos šiek tiek skiriasi, tokiu atveju, produktai yra vienas kito pakaitalai, bet esant ekstremalioms, ribinėms sąlygoms, galima pamatyti produktų skirtumus. Tarkime optiniai stiklai, tiksliau UV lydyti kvarcai *Corning 7980 0F* (*Corning*), *Suprasil 300* (*Heraeus*) ir *JGSI* (*CDGM*) yra ekvivalentai vienas kitam, bet medžiagos tūrio lazerinės pažaidos testas parodė, kad šių stiklų pažaidos slenksčiai skiriasi bent ~20% ( $4.6 \text{ J/cm}^2$  ir  $5.36 \text{ J/cm}^2$ ) [2].

Tinkamos rūšies stiklo pasirinkimas modeliuojant optinę sistemą yra labai svarbus veiksnys, o tuo atveju jeigu sistema veiks ribiniais parametrais, tai gali būti netgi kritinis veiksnys. Renkantis stiklus reikia įvertinti ar unikalios stiklo savybės padės sistemai veikti geriau ar kaip tik trukdys.

Kertinis optinio stiklo parametras yra pralaidumas. Tai yra stiklo skaidrumas tam tikram bangos ilgiui arba bangos ilgių diapazonui. Vertinant optinės medžiagos pralaidumą nėra atsižvelgiama yra frenelio atspindžius (*Fresnel reflections*), kadangi šių atspindžių vertės priklauso nuo aplinkos lūžio rodiklio kurioje yra skaidri terpė.

Kitas svarbus, optinio stiklo parametras yra lūžio rodiklis. Jis parodo santykį, tarp šviesos sklaidimo greičio vakuume ir sklaidimo greičio tame stikle [6]. Tarkime modeliuojame fiksuotą pluošto plėstuvą ir renkamės optinį stiklą jo lęšių gamybai. Tokiu atveju mums svarbu įvertinti pasirinktos medžiagos lūžio rodiklį naudojamam bangos ilgiui. Kadangi didesnio lūžio rodiklio stiklas lauš šviesą didesnių kampų, ir tokiu atveju, mums reikės mažesnio išgaubimo radiuso lęšio, kas supaprastintų jo gamybą.

Kitas svarbus stiklų parametras yra abės skaičius (*Abbe number*). Šis parametras parodo kaip keisis skaidraus stiklo lūžio rodiklis keičiantis bangos ilgiui spinduliuotės kuri sklinda per jį. Įsivaizduokime, kad modeliuojame achromatinį lęšį ir norime, kad jo fokusuojami du bangos ilgiai, raudonas ir mėlynas, būtų fokusuojami toje pačioje židinio plokštumoje. Tam reiks kompensuoti lęšio sukuriamas chromatines aberacijas kitu lęšiu, su atvirkščiomis dispersinėmis savybėmis, kurias ir apibrėžia abės skaičius.

Modeliuojant optines sistemas svarbu atsižvelgti ir į mechanines optinio stiklo savybes, tokias kaip tankis, ar šiluminio plėtimosi koeficientas. Naudojamo stiklo tankis, tampa svarbiu parametru tokiais atvejais, kai gaminama sistema iš daug optinių elementų, jiems pozicijuoti naudojama precizinė mechanika, arba optika yra labai didelės apertūros, pavyzdžiui optinis teleskopas skirtas dangaus stebėjimui. Šiluminis plėtimosi koeficientas tampa svarbia medžiagos savybe, tuomet kai optines sistemas reikia naudoti įvairiomis kritinių temperatūrų sąlygomis, tai ypatingai svarbu optinėms sistemoms skirtoms gynybos reikmėms. Jos dažniausiai naudojamos skirtingos temperatūromis, vieną dieną dykumoje, kitą – neigiamoje temperatūroje. Norint užtikrinti, kad sistema nepakeis savo veikimo parametrų dėl šiluminio plėtimosi, yra naudojami stiklai turintys labai mažą šiluminio plėtimosi koeficientą (angl. *Ultra Low Expansion – ULE*) [7].

## 2.2. Lydytas kvarcas

Lydytas kvarcas yra vienas populiariausių optinių stiklų lazerinės optikos gamyboje. Iš esmės nuo įprastų stiklų jis skiriasi tuo, jog lydant jį nėra dedama jokių priemaišų (natrio ir kalcio oksidai žemina stiklų mišinių lydymosi temperatūrą. Švino, bismuto ir bario oksidai padeda sutankinti lydinius, taip padidindami jų lūžio rodiklį. Magnio, aliuminio, geležies ir boro oksidai suteikia stiklų lydinams lankstumo, taip sumažindami trapumą. Cinko, fosforo bei bario oksidai didina lydalų stiprumą ir fizinį atsparumą.), kuriomis būtų stengiamasi sumažinti stiklo lydymosi temperatūrą ar pakeisti kitas savybes ir tokiu būdu supaprastinti gamybą bei atpiginti procesą ar pritaikyti stiklą konkrečiam taikymui [2], [8], [9].

Optinių elementų gamybos industrijoje dažniausiai yra naudojamas amorfinis lydytas kvarcas. Jo aukšta lydymosi temperatūra (~1650 °C), mažas šiluminio plėtimosi koeficientas ( $5,5 \cdot 10^{-7}/^{\circ}\text{C}$  normaliomis sąlygomis), šios savybės padaro medžiagą atsparią terminiam šokui, tinkamą naudoti plačiame temperatūriniame diapazone. Lydytas kvarcas turi santykinai platų pralaidumo spektrą – nuo 200 nm iki ~1400 nm, diapazono krašte pradeda reikštis OH<sup>-</sup> elementų grupėms būdinga sugertis, kurios galima išvengti šiek tiek modifikuojant kvarco gamybos procesą, tai yra lydant jį mažą vandenilio koncentraciją turinčioje aplinkoje. Tokiu atveju galima gauti lydytą kvarcą, turintį mažesnę OH<sup>-</sup> junginių koncentraciją nei 0,001% (literatūroje dažnai išreiškiama ir kitokiais sisteminiiais vienetais - 10 dalelių per milijoną) kas leidžia praplėsti šios medžiagos pralaidumo spektrą iki 3400 nm [10], [11].

Kitas lydyto kvarco privalumas yra santykinai paprasta ir patogų apdirbti, jį galima pjaustyti, šlifuoti, poliruoti, frezuoti, tekinti, lieti ir apdirbti kitais klasikiniais apdirbimo metodais. Svarbu

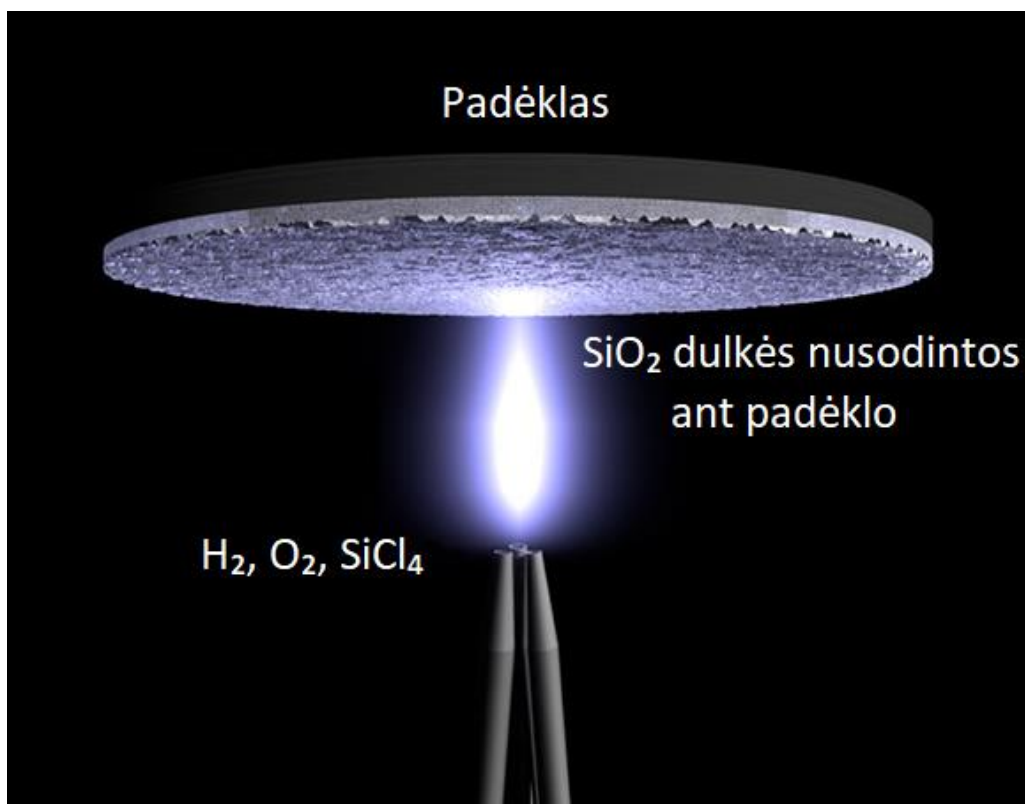
paminėti ir tai, jog lydytas kvarcas yra patogi medžiaga neįprastiems apdirbimo metodams, tokiems kaip stiklo lakštų tempimas iš lydalo (*Corning Gorilla Glass* gamyba), šviesolaidžių tempimas, karšto lydalo presavimas ir laisvos formos optikos gamyba [12].

Visos šios savybės leido lydytam kvarcui įsitvirtinti lazerinės optikos, šviesolaidžių, puslaidininkių, smulkiosios elektronikos ir netgi automobilių rinkose. Stambiausi lydyto kvarco gamintojai yra *Schott* (Vokietija), *Corning* (JAV), *CDGM* (Kinija) ir *Heraeus* (Vokietija).

### 2.3. Skirtingų rūšių lydyto kvarco gamintojai ir gamybos technologijos

Skirtingi lydyto kvarco gamintojai naudoja šiek tiek modifikuotą gamybos procesą, siekdami pagaminti pranašesnę ir geresnę stiklą nei jų konkurentai. Pagrindiniai parametrai apibūdinantys lydyto kvarco kokybę, priklausomai nuo konkretaus taikymo, yra pralaidumas (ties konkrečiu bangos ilgiui), sugertis (taip pat ties konkrečiu bangos ilgiui), priemaišos, vienalytiškumas (visomis trimis ašimis), intarpai (dažniausiai tai būna oro burbuliukai), lūžio rodiklio variacijos bei fluorescencija. Dažniausiai didžioji dalis šių parametrų būna įvardinti konkretaus lydyto kvarco specifikacijų lape, bet svarbu paminėti tai, jog įprastai gamintojai mėgsta paminėti pranašumą suteikiančias jų lydyto kvarco savybes, bet nutylėti neigiamas. Toliau panagrinėsime penkias populiarias lydyto kvarco rūšis, gaminamas trijų skirtingų gamintojų. Šios stiklo rūšys pasirinktos dėl savo panašių ir palyginamų specifikacijų, bet labai skirtingų kainų.

*Corning 7980 0F* (*Corning*), labai populiarus, vidutinės kainos, ultravioletiniam (UV) spektrui optimizuotas lydytas kvarcas. Šis sintetinis, amorfinis kvarcas gaminamas liepsnos hidrolizės metodu (principinė schema 2 paveikslėlyje) iš didelio švarumo kvarcinio smėlio dulkių, visas procesas atliekamas švariuose kambariuose, siekiant, kad lydomas stiklas nebūtų užterštas pašalinėmis priemaišomis. Šio stiklo intarpų klasė yra „0“, tai reiškia, kad visų 100 mm<sup>3</sup> esančių intarpų diametrų skerspjūvių ploto suma negali viršyti 0,03 mm<sup>2</sup>, taip pat nė vieno intarpo diametras negali viršyti 0,1 mm. Vienalytiškumo (literatūroje taip pat labai populiaru sąvoka – homogeniškumo) klasė, indikuojama raide „F“, kas parodo, jog santykinis vienetas apibūdinantis lūžio rodiklio variacijas 450 mm diametro švarios apertūros bulėje, iš kurios buvo išpjauta medžiaga, neviršija ar yra lygus 5.



2 pav. Lydyto kvarco gamybos liepsnos hidrolizės metodu principinė schema [13]

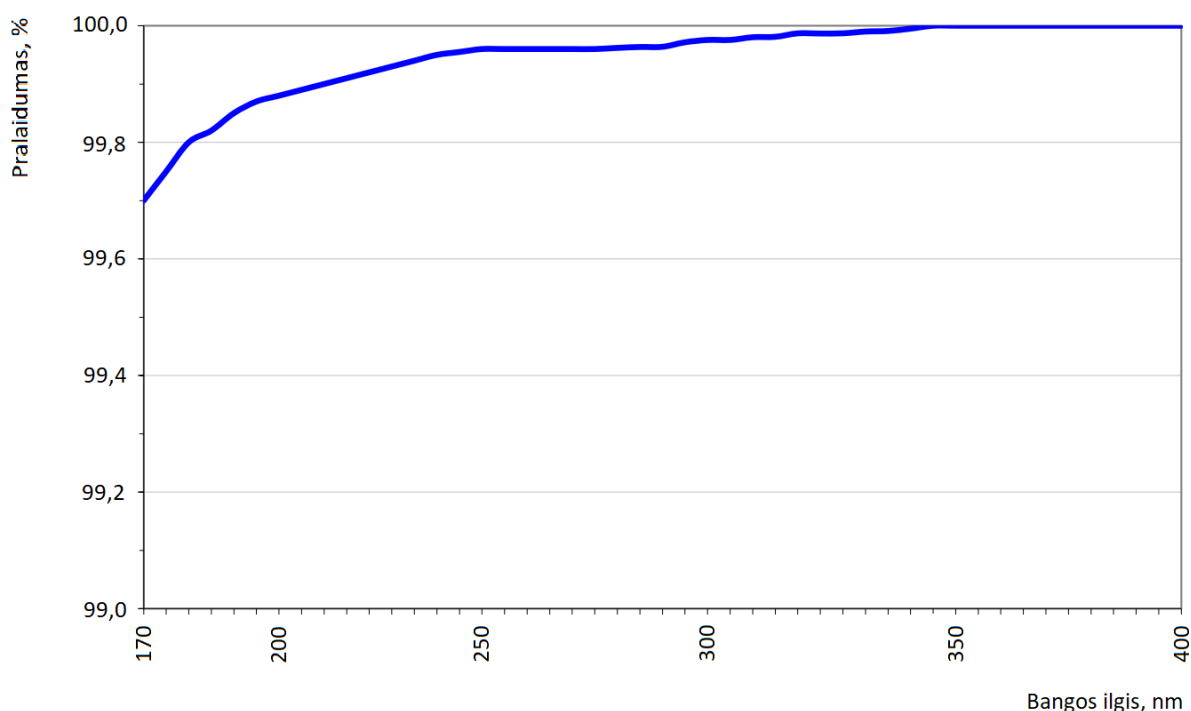
Skaičius „7980“, neturi jokios su stiklo savybės susijusios prasmės, šis skaičius parodo vadinamąjį „recepto numerį“, t.y. eksperimento numerį, kurio metu stiklo gamintojui pavyko išlydyti norimų savybių stiklą. Tuomet stiklo gamybos parametrai yra užfiksuojami ir stiklo lydiniui priskiriamas unikalus skaičius, sutampantis su eksperimento numeriu. Tokia numeracija galioja tik *Corning* gaminamiems stiklams. Kitos svarbios *Corning 7980 0F* lydyto kvarco specifikacijos - lydymosi temperatūra 1585 °C, tankis – 2,201 g/cm<sup>3</sup>, visas kitas specifikacijas, tokias kaip kietumas, tirpumas šarmuose, rūgštyse ir kitas, galima rasti specifikacijų lape [10], [12].

Intarpų klasė			Homogeniškumas						
Klasė	Intarpų skerspjūvių plotų suma (mm <sup>2</sup> )	Didžiausio intarpo diametras (mm)	Rūšis						
			AA ≤ 0,5	A ≤ 1,0	B ≤ 1,5	C ≤ 2,0	D ≤ 3,0	E ≤ 4,0	F ≤ 5,0
0	≤ 0,03	0,10	□	□	□	□	□	□	□
1	≤ 0,10	0,28		□	□	□	□	□	□
2	≤ 0,25	0,50			□	□	□	□	□
3	≤ 0,50	0,76				□	□	□	□
4	≤ 1,00	1,00					□	□	□
5	≤ 2,00	1,27						□	□

2 lent. Corning optinių stiklų indeksų reikšmės [12]



*Corning 8655 0F (Corning)* yra UV srityje praplėsto veikimo sintetinis, amorfinis lydytas kvarcas, įprastai naudojamas ten kur reikalingas precizinis tikslumas, minimalūs praėjusio pluošto iškraipymai, nykstamai maži nuostoliai dėl medžiagos sugerties UV srityje ir aukštas terminis stabilumas. Šio stiklo pralaidumas (nepaisant frenelio atspindžių) ties 193 nm yra > 99,75%, kas yra nepalenkiama specifikacija lyginant su kitais lydytais kvarcais (platesnis pralaidumo spektras pateikiamas 3 paveikslėlyje).



3 pav. *Corning 8655 0F* medžiagos pralaidumo spektras [12]

Ne visi svarbūs lydyto kvarco parametrai būna nurodyti specifikacijų lapuose, tad dažnai tenka tiesiog išbandyti konkretų stiklą tam tikromis sąlygomis ir įsitikinti ar jis tinkamas. Skirtingų rūšių stiklų tiksliai sudėtis bei gamybos receptas yra laikomas komercine paslaptimi, tad tokių parametru kaip lazerinės pažaidos slenkstis paviršiuje ar tūryje (kuris priklauso ne vien nuo pačio stiklo, bet ir nuo jo apdorojimo, aplinkos sąlygų) nepavyks įvertinti be eksperimento atlikimo. Kadangi *Corning 8655 0F* UV sugerties linija yra pastumta kaip galima toliau į UV spektro pusę, būtent iš jo ir tikimasi geriausių rezultatų paviršiaus lazerinės pažaidos tyrimuose UV srityje [10].

*Suprasil 300 (Heraeus)* yra aukštos kokybės, taip pat praplėsto veikimo UV srityje, sintetinis lydytas kvarcas. Šis stiklas taip pat lydomas liepsnos hidrolizės metodu, atliekant papildomą kaitinimo procedūrą, kuri padeda sumažinti OH<sup>-</sup> junginių kiekį lydale. Dėl savo mažos sugerties

spektre nuo 200 nm iki 1100 nm, šis stiklas yra labai vertinamas lazerių gamintojų, kuriančių sistemas visoms keturioms Nd:LAG ar Yb:KGV harmonikoms, dirbančioms aukštomis galiomis [11].

*Suprasil 1 (Heraeus)* yra dar vienas aukštos kokybės sintetinio lydyto kvarco pavyzdys. Gamybos metodas taip pat pagrįstas liepsnos hidrolizės principu, deginant  $\text{SiCl}_4$  dujas [13], [14]. Šiuo atveju stiklo rūšis pristatoma, kaip aukštą pažaidos slenkstį turintis lydytas kvarcas UV diapazone. Svarbu paminėti, kad šis gamintojas vykdo griežtą optinio stiklo kokybės kontrolę, atliekant homogeniškos medžiagos, visomis 3 ašimis išpjovimą iš lydyto kvarco bulės. Kadangi šis stiklas rekomenduojamas tokiems taikymams, kaip lęšių, objektyvų, pluošto plėstuvų, etalonų ir panašiams gaminiams, kur kritinis aspektas yra medžiagos homogeniškumas. Šių kriterijų neatitinkantis stiklas panaudojamas kaip prastesnė rūšies lydytas kvarcas [15].

## 2.4. Optinių stiklų poliravimas

Šiuolaikinės lazerinės technologijos orientuojasi į vis didesnės ir didesnės galios sistemas. Norint pasiekti nuolatinį progresą, užtikrinti sistemų ilgaamžiškumą ir stabilumą, reikia optinių elementų, kurie pasižymėtų aukšta kokybe – mažais sklaidos, sugerties nuostoliais, aukšta lazerine pažaida ir neryškiais senėjimo efektais [16]. 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 [4].

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 [4], [9], [17], [18].

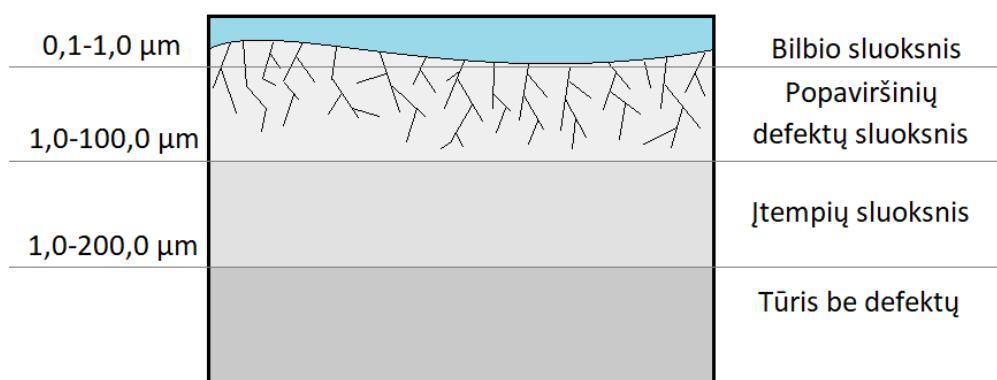
Yra ir kitų poliravimo metodų, tarkime poliravimas naudojantis tekančia abrazyvine medžiaga. Šio principo privalumas, stiklo ruošinių nereikia trinti į deimantinį pagrindą, ruošinio paviršiumi tekanti abrazyvinė medžiaga atlieka poliravimo procesą. Dėl mažesnių naudojamų jėgų, gaunama geresnė gaminių kokybė (mažiau rėžių ir duobučių, kurias palieka abrazyvas), bet procesas yra žymiai lėtesnis ir komerciškai nepopuliarus [9], [19].

Optinius pusgaminius po poliravimo procedūros labai svarbu kruopščiai nuvalyti, nepaliekant jokių poliravimo ar poliruojamos medžiagų likučių. Tam atlikti dažnai naudojamas plovimas ultragarsinėje vonelėje, šio proceso metu optiniai elementai skirtingais etapais yra plaunami įvairių temperatūrų šarminiuose tirpaluose, vandentiekio vandenyje, dejonizuotame vandenyje ir galiausiai džiovinami [20], [21].

## 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 [4]. Bendrai, 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  $\mu\text{m}$  sluoksnuose medžiaga yra be defektų ir pasižymi visomis įprastomis tūrinėmis savybėmis [22], principinė šio pasiskirstymo schema 4 paveikslėlyje.



4 pav. Poliruoto optinio pagrinduko skerspjūvis [4][23]

Kadangi medžiagos turinčios, ypač ryškia sugertį UV srityje, tokios kaip  $\text{CeO}_2$ , 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 pažaida

Medžiagos lazerinė pažaida (*Laser Induced Damage Threshold – LIDT*), yra medžiagos fizinė charakteristika, ji apibrėžia kritinį energijos intensyvumą ploto vienetui, kuris sukelia medžiagoje negrįžtamus pasikeitimus. Kitaip tariant, medžiagos pramušimo slenkstis yra riba, iki kurios medžiaga veikiamą lazerinės spinduliuotės nekeis savo optinių savybių [24]. Medžiagos pramušimo slenkstis yra svarbi specifikacija kiekvienam optiniam elementui sistemoje. Renkantis elementus optinei sistemai, reiktų įvertinti ir tai, jog bėgant laikui jų pramušimo slenkstis mažėja, dėl laiko, nuolatinio veikimo spinduliuote ar aplinkos poveikio. Medžiagos lazerinės pažaidos prigimtimi esant ilgiems impulsams (nanosekundžių eilės) yra laikomas lokalus kaitimas, sąlygotas spinduliuotės sugerties [25].

Šiame darbe bus analizuojama įvairių rūšių vienodai poliruotų ir vienodomis skaidrinančiomis dangomis padengtų, lydyto kvarco optinių langelių ir lęšių paviršiaus lazerinė pažaida. Rezultatų vertinimo metu svarbu atsižvelgti į tai, jog vertinama ne medžiagos tūrio lazerinė pažaida, o paviršiaus. Tokios lazerinės pažaidos, ant poliruoto optinio langelio paviršiaus, pavyzdys parodytas 5 paveikslėlyje.



5 pav. Poliruoto optinio pagrinduko paviršiaus lazerinė pažaida

## 2.7. Optinės dangos

Įprastai lazeriniuose taikymuose naudojami poliruoti optiniai elementai, tokie kaip langeliai ir lęšiai yra dengiami optinėmis interferencinėmis dangomis, kurios būna optimizuotos konkrečiam taikymui, pavyzdžiui atspindžių minimizavimui. Šių plonasluoksnių dangų veikimo principas paremtas šviesos interferencijos reiškiniu plonose plėvelėse.

Ant poliruoto optinio elemento yra nusodinami bent dviejų skirtingą lūžio rodiklį turinčių, tikslaus storio, medžiagų sluoksniai (yra išimtinių atvejų, kuomet nusodinamas tik vienas sluoksnis, bet jo lūžio rodiklis privalo skirtis nuo pagrinduko lūžio rodiklio). Įprastai sluoksnio storis būna  $\lambda/4$  kartotinis (šiuo atveju  $\lambda$  yra spinduliuotės bangos ilgis, kuriai optimizuojamas optinis elementas), tokiu atveju tarp dviejų skirtingą lūžio rodiklį turinčių sluoksnių pasireiškia šviesos interferencija. Taip, priklausomai nuo konkretaus taikymo, manipuluojama sluoksnių kiekiu, jų storiu, medžiagų lūžio rodikliais ir konstruktyvi arba destruktvyvi interferencija plonųjų plėvelių sistemoje panaudojama optinio elemento veikimo optimizavimui. Tarkime įprasti vienbangiai sferiniai lęšiai, kurie yra pritaikyti turėti minimalius atspindžius nuo kiekvieno paviršiaus, yra padengti optinėmis dangomis, kuriose interferencija destruktvyviai slopina atsispindėjusius spindulius ir konstruktyviai stiprina praėjusius [4], [26], [27].

Žinant, kad optinės dangos įprastai nusodinamos ant skaidrių padėklų iš garų fazės, tad vienas iš kritinių parametrų yra pagrindukų paviršiaus kokybė ir švara. Visi nešvarumai, poliravimo netikslumai, rėželiai, duobelės ir kiti defektai, kurių nepavyko nuvalyti ar nuplauti prieš optinės dangos dengimą, lieka po ja ir gali sąlygoti lazerinės pažaidos formavimosi centrus arba suprastėjusią dangos adheziją tuose regionuose [26]. Šiame darbe taikomo argono plazmos ėsdinimo metodo tikslas ir yra sumažinti popaviršinių defektų tankį ant poliruotų optinių ruošinių, prieš optinių dangų dengimą, taip padidinant lazerinės pažaidos slenkstį [16].

Šio tyrimo metu, poliruoti ir ėsdinti bandiniai bus dengiami garinant metalų ir puslaidininkių oksidus elektronų pluoštu. Norint užtikrinti bandinių vienalytiškumą ir atsikartojamumą, visi tyrime dalyvaujantys optiniai elementai bus dengiami vieno garinimo proceso metu.

## 3. Tyrimo metodika

### 3.1. Optinių stiklų paruošimas tyrimui ir tyrimo eiga

Šiam tyrimui pasirinkti penkių skirtingų rūšių lydyti kvarcai, *Corning 7980 0F*, *Corning 8655 0F*, *Suprasil 300*, *Suprasil 1* ir *JGSI*, šie kvarcai pasirinkti dėl savo savybių tinkamų naudoti juos su

UV spinduliuote. Taip pat šios penkios UV lydytų kvarcų rūšys lyderiauja rinkoje pagal užimamą rinkos dalį.

Visi eksperimente naudoti bandiniai buvo poliruojame tokiomis pačiomis sąlygomis, kontaktinio poliravimo metodu, kai poliruojamas bandinys yra spaudžiamas vertikaliai į poliravimo padą ir pasikartojančiais horizontaliais sukamaisiais judesiais poliruojamas. Poliravimo metu naudota abrazyvinė medžiaga - CeO<sub>2</sub>. Atlikus poliravimo ir pirminio plovimo procedūras, elementai buvo įvertinti vizualiai, visų optinių langelių paviršiaus kokybė buvo įvertinta 20-10 S-D (remiantis MIL 13830 standartu).

Po vizualinės apžiūros, elementų matinės briaunos buvo išgraviruoti unikaliais numeriais, kad būtų lengva atskirti elementus. Tuomet, elementus nuvalius etanoliu, buvo išmatuotas pro elementus praėjusio bangos fronto iškraipymas, naudojant 633 nm šviesos šaltinį ir *Verifire (Zygo)* interferometrą. Po interferometrinių matavimų, buvo išmatuota kiekvienos atskiros lydyto kvarco rūšies pralaidumas diapazone 320 nm – 600 nm, naudojantis *Specord (Analytik Jena AG)* spektrofotometru, matuojama 0° kampu, matavimo etalonas, pralaidumas šaltinis – detektorius. Vėliau, elementai buvo plaunami ultragarsinėje keturių etapų vonelėje *UCS40 (Optima Technologies)*, sekant tokias procedūras:

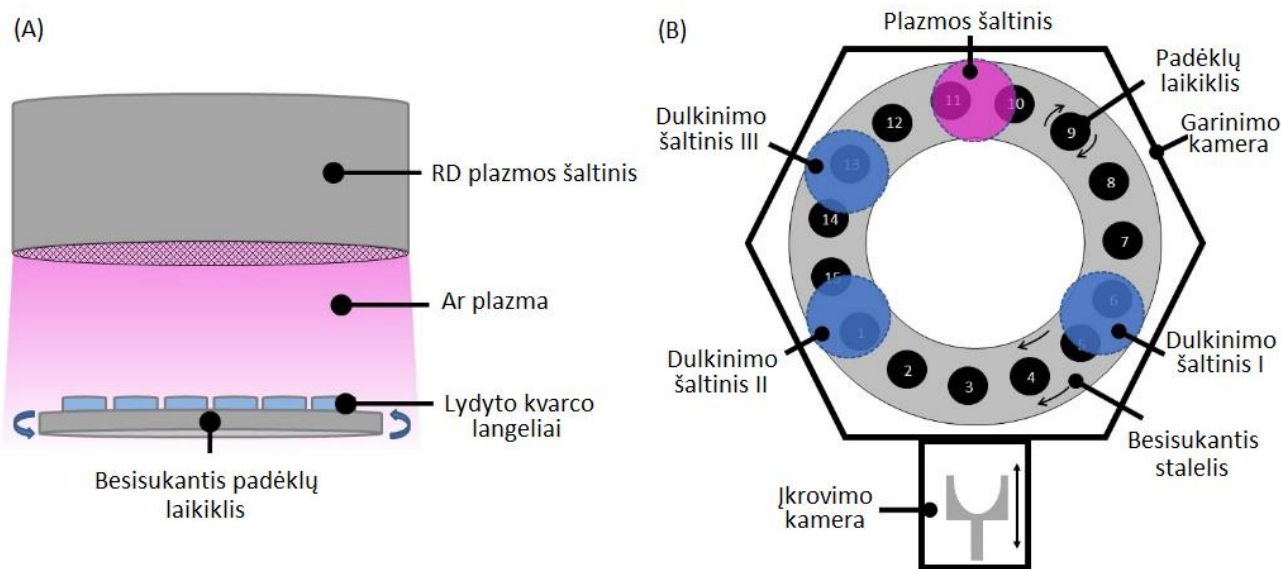
- 1.) 7 min plovimas 4% šarmo tirpale, 50 °C temperatūroje, su nuolatiniu temperatūros ir tirpalo tėkmės palaikymu.
- 2.) 8 min plovimas nuolatinės tėkmės vandentiekio vandeniu.
- 3.) 5 min plovimas nuolatinės tėkmės dejonizuotu vandeniu.
- 4.) 7 min džiovinimas 60 °C temperatūros ore.

Po plovimo, buvo matuojamas elementų paviršiaus šiurkštumas, naudojantis *Edge (Bruker)* atominių jėgų mikroskopu. Matuotos trys 20 μm x 20 μm sritys bandinio paviršiuje ir *Nano Scope Analysis (Bruker)* programiniu paketu išanalizavus duomenis suskaičiuotos paviršiaus šiurkštumo RMS (angl. **R**oot **M**ean **S**quare) išraiška. Tada elementai buvo sudėti į SiO<sub>2</sub> danga padengtą aliumininį laikiklį ir įvairiais režimais ėsdinami argono plazma, *RADIANCE sputter cluster platform (Evatec AG)* reaktoriuje. Iškart po ėsdinimo proceso, buvo pakartoti spektrofotometriniai matavimai, tada atlinktas elementų plovimas ir vėl pakartoti spektrofotometriniai, interferometriniai ir paviršiaus šiurkštumo matavimai. Po šių matavimų buvo atliekami LIDT matavimai, naudojantis Nd:YAG nanosekundiniu lazeriu (*Ekspla*) ir trečios harmonikos (355 nm) moduliui. Plačiau matavimų atlikimo metodika aprašoma tolesniuose skyriuose.

### 3.2. Argono plazmos ėsdinimas optiniams stiklams

Ultragarsinėje vonelėje išplauti elementai buvo padalinti į 3 grupes, sudėti į SiO<sub>2</sub> danga padengtą aliumininį laikiklį ir paruošti ėsdinimo procedūrai. Visi ėsdinimai buvo atliekami naudojantis *ClusterLineRAD* (Ecatec AG) reaktoriumi, kuriame įdiegti trys magnetroninio dulkinimo šaltiniai ir radiodažniu (RD), kurio dažnis 13,5 MHz, generuojamos plazmos šaltinis. Naudotos įrangos supaprastina schema pavaizduota 6 paveikslėlyje.

Eksperimentiniai ėsdinimai buvo atliekami vienas po kito esant vienodiems ėsdinimo parametrams, neskaitant ėsdinimo laiko, kuris kiekvienai grupei buvo skirtingas. Ėsdinimai buvo atliekami 0,23 Pa slėgio argono aplinkoje, esant 1 kW radiodažnio generatoriaus galiai, bandinių padėklui besisukant 53 apsisukimų per minutę dažniu. Pirmoji bandinių grupė buvo ėsdinami 450 s, taip gaunant  $50 \pm 3,5$  nm nuėsdintą sluoksnį, antroji atitinkamai 900 s ir nuėsdinto sluoksnio storis yra  $100 \pm 7$  nm, trečioji 1350 s ir sluoksnio storis –  $150 \pm 10,5$  nm.



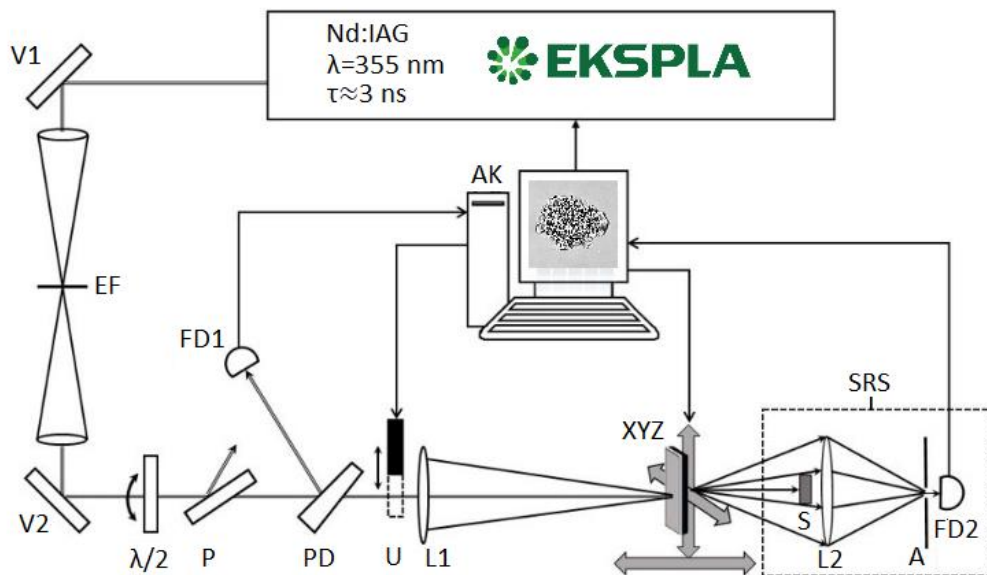
6 pav. Plazminio ėsdinimo principinė schema. (A) vaizdas iš šono, (B) vaizdas iš viršaus [16]

### 3.3. Optinių stiklų atsparumo lazerio spinduliuotei tyrimas

Po elementų ėsdinimo ir plovimo ultragarsinėje vonelėje buvo atliekami lazerinės pažaidos matavimai. Šiam tyrimui buvo naudojama atsparumo lazerinei spinduliuotei schema kurios supaprastinta versija pateikiama 7 paveikslėlyje. Testavimo metu buvo naudojamas šiek tiek modifikuotas 1-į-1 tyrimo metodas [16]. Pasirinkta tiriamo paviršiaus vieta yra virtualiai padalinama į 144 taškų matricą. Kiekvienas taškas eksponuojamas vienu lazerio impulsu, padidinama impulso

energija. Taip kartojama, kol būna eksponuoti visi matricą sudarantys taškai. Vėliau lazerio sukelti pažeidimai buvo registruojami optiniu mikroskopu BX51 (*Olympus*), nustatomos pažeidimo tikimybės iš kurių nustatomos lazerinės pažeidimo slenksčių vertės

Šio tyrimo metu buvo tiriami nešdinto skirtingų rūšių lydyto kvarco, 50 nm, 100 nm ir 150 nm šdinto lydyto kvarco bandiniai, iš viso 20 bandinių. Kadangi darbas orientuotas į optinių elementų pažeidimo tyrimą UV srityje, 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 λ/2 fazinės plokštelės ir briusterio tipo poliarizatoriaus sukonstruotu atenuatoriumi.



7 pav. Lazerinės pažeidimo testavimo principinė schema [16]

Visi sistemą sudarantys elementai: V1 ir V2 – veidrodėliai, EF – erdvinis filtras, λ/2 – fazinė plokštelė, P – briusterio tipo 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 – skydas apsaugantis fotodiodą nuo tiesioginės spinduliuotės, A – apertūra, FD2 – sklaidą sukeltą lazerinio pažeidimo registruojantis fotodiodas.

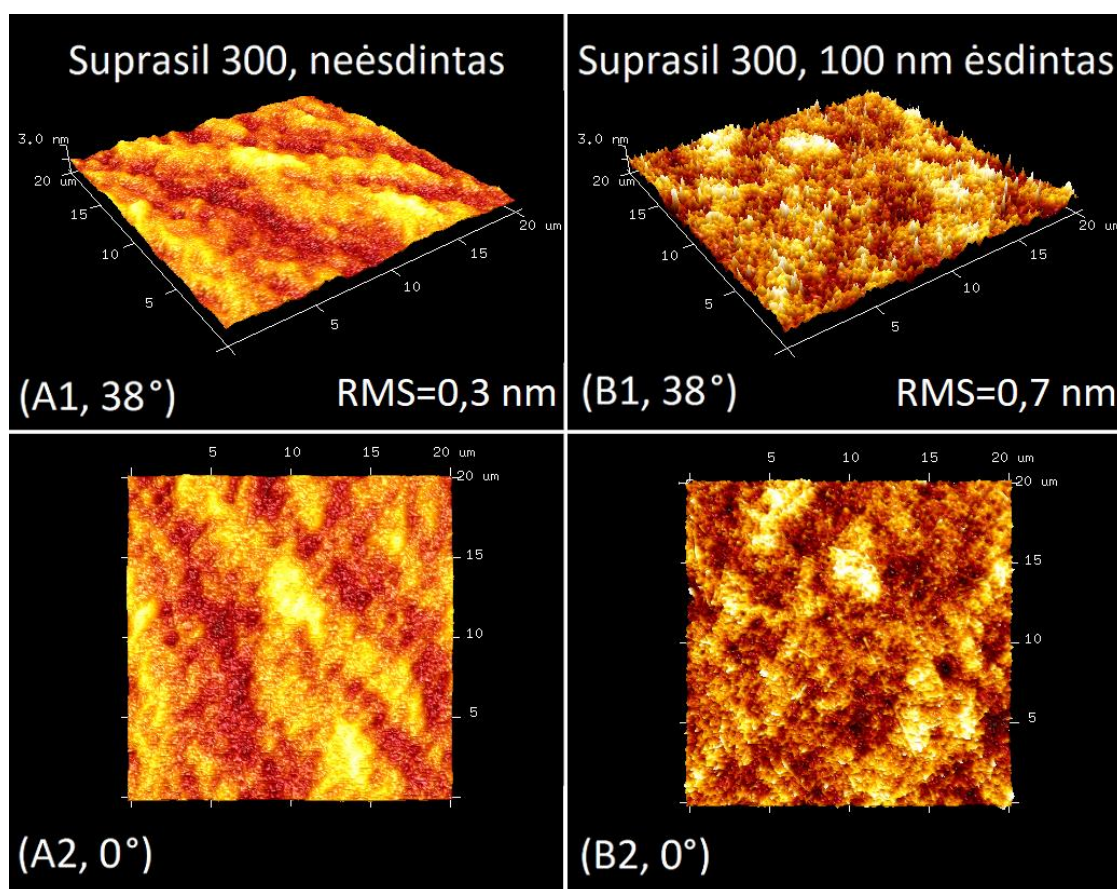


### 3.4. Optinių parametru matavimai

Norint nustatyti ėsdinimo įtaką optiniams parametrms, tiek prieš, tiek po ėsdinimo buvo atliekami kitų optinių parametru matavimai. Optinių langelių pralaidumas,  $0^\circ$  kampu, 320 nm - 600 nm diapazone, prieš ir po ėsdinimo, naudojantis *Specord (Analytik Jena AG)* spektrofotometru.

Norint išsiaiškinti koks yra ėsdinimo poveikis optinio elemento paviršiui ir kokią įtaką tai padarys atspindėto arba praėjusio pluošto fronto iškraipymui, buvo matuojamas optinių langelių praėjusio pluošto fronto iškraipymas, naudojantis *Verifire (Zygo)* interferometru. Šio interferometrinio matavimo principas yra toks, pro elementą prėjusios 633 nm bangos ilgio spinduliuotės pluoštas, atspindi nuo etaloninės plokštumos ir grįžta atgal į CCD (angl. Charge-Coupled Device) kamerą. Tada kompiuterinė programa analizuojamas bangos fronto pasikeitimą, kuris įvyko du kartus praėjus pro tiriamąjį elementą.

Taip pat vertinant paviršiaus šiurkštumą ir jo pasikeitimą po optinių langelių paviršiaus ėsdinimo kiekvienam bandiniui buvo atlikti paviršiaus šiurkštumo matavimai atominių jėgų mikroskopu *Edge (Bruker)*.

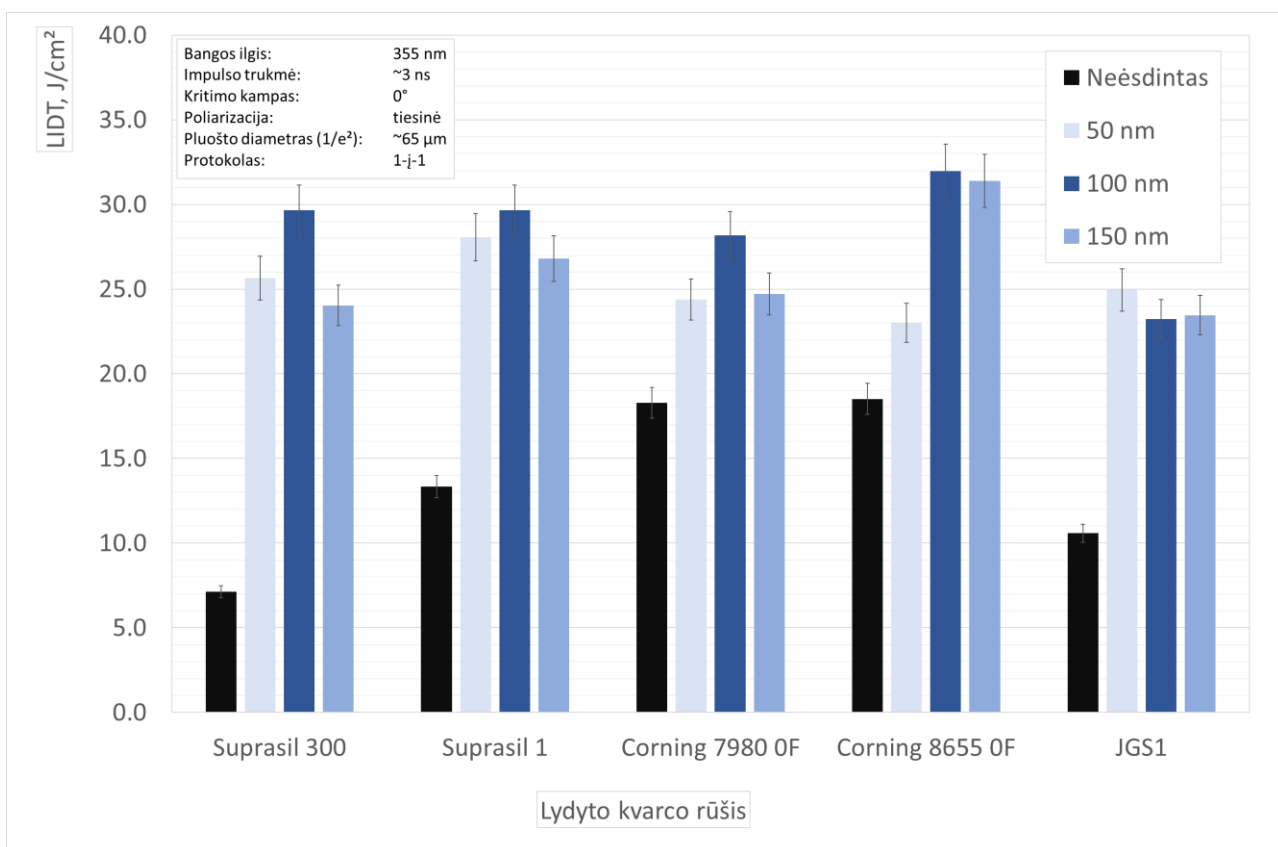


8 pav. Paviršiaus šiurkštumo matavimų pavyzdys

## 4. Eksperimento rezultatai ir jų aptarimas

### 4.1. Optinių stiklų atsparumas lazerio spinduliutei

Nustatyta, kad argono plazmos ęsdinimas visoms lydyto kvarco rūšims turėjo teigiamą poveikį, t.y. padidino poliruotų optinių pagrindukų atsparumą 355 nm bangos ilgio lazerio spinduliutei. Gautas lazerinės pažaidos vertės pateikiamos 9 paveikslėlyje.

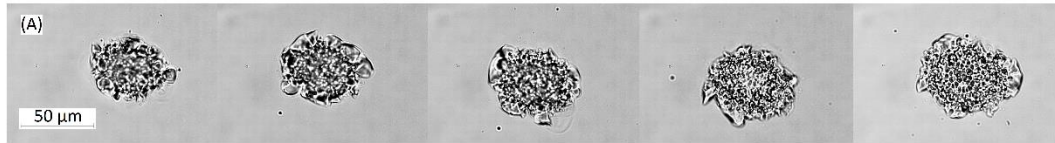


9 pav. Skirtingų rūšių lydytų kvarcų lazerinės pažaidos slenksčio vertės. Legendoje esančios vertės parodo kokio storio sluoksnis buvo nuęsdintas nuo optinio langelio paviršiaus

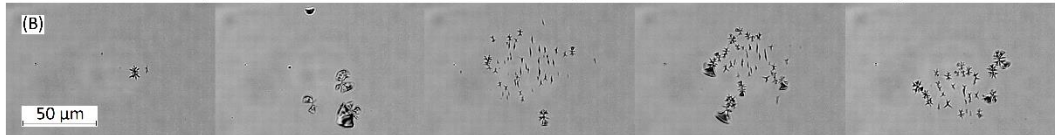
Tyrimo metu buvo analizuojama ne vien slenkstinės vertės, bet ir pažeidimų morfologija ir priežastingumas. Pažeidimą sąlygojančių sugerties centrų tankis gerai matosi 10 paveikslėlyje.

Apibendrinus gautus rezultatus, galima teigti, jog argono plazmos ęsdinimas yra technologiškai tinkamas procesas pagerinti vienodai apdirbtų skirtingų rūšių lydytų kvarcų paviršiaus lazerinės pažaidos slenkstį. Visų tyrime naudotų lydytų kvarcų, pritaikius argono plazmos ęsdinimo metodą, lazerinės pažaidos slenkstis padidėjo maždaug dvigubai, nuo vidutinės  $13,6 \pm 0,7 \text{ J/cm}^2$  vertės iki vidutinės  $28,5 \pm 1,4 \text{ J/cm}^2$  vertės. Iš trijų skirtingų ęsdinamo sluoksnio storių, atitinkamai  $50 \pm 3,5 \text{ nm}$ ,  $100 \pm 7 \text{ nm}$  ir  $150 \pm 10,5 \text{ nm}$ , geriausi rezultatai gauti esant 100 nm ęsdinamo sluoksnio storiui. Šie rezultatai koreliuoja su panašaus eksperimento rezultatais literatūroje [16].

## Neėsdintas Corning 8655 OF poliruotas bandinys



## 50 μm ėsdintas Corning 8655 OF bandinys



## 100 μm ėsdintas Corning 8655 OF bandinys



## 150 μm ėsdintas Corning 8655 OF bandinys



32 J/cm<sup>2</sup>

33 J/cm<sup>2</sup>

34 J/cm<sup>2</sup>

35 J/cm<sup>2</sup>

36 J/cm<sup>2</sup>

Impulso energijos didėjimas

10 pav. Lazerinės pažaidos evoliucija didėjant impulso energijai, esant skirtingam nuėsdinto sluoksnio storiui

Geriausią absoliutųjį lazerinės pažaidos slenksčio vertės rezultatą pavyko pasiekti ėsdinant *Corning 8655 OF* stiklą, nuėsdinto sluoksnio storiui esant  $100 \pm 7$  nm, gauta lazerinės pažaidos vertė  $32,0 \pm 1,6$  J/cm<sup>2</sup>, kai neėsdinto *Corning 8655 OF* pagrinduko lazerinės pažaidos slenkstis buvo  $18,5 \pm 0,9$  J/cm<sup>2</sup>.

Geriausią santykinį lazerinės pažaidos slenksčio vertės padidėjimą pavyko gauti, ėsdinant *Suprasil 300* stiklą, nuėsdinto sluoksnio storiui taip pat esant  $100 \pm 7$  nm. Šiuo atveju slenksčio vertė padidėjo nuo  $7,1 \pm 0,3$  J/cm<sup>2</sup> iki  $29,7 \pm 1,5$  J/cm<sup>2</sup>, tai yra slenksčio vertės padidėjimas daugiau nei 4 kartus.

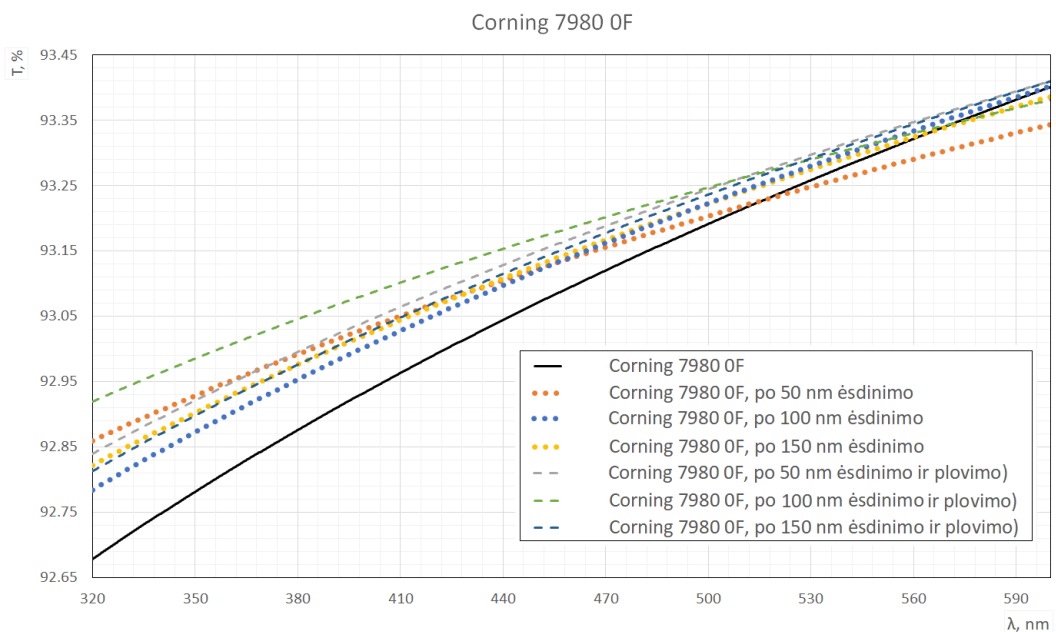
Svarbu paminėti tai, jog neėsdintų stiklų lazerinės pažaidos slenkstis svyravo nuo  $7,1 \pm 0,3$  J/cm<sup>2</sup> (*Suprasil 300*) iki  $18,5 \pm 0,9$  J/cm<sup>2</sup> (*Corning 8655 OF*), šios vertės nekoreliavo nei su

deklaruojama stiklo kokybe nei su jo kaina. Atlikus argono plazmos ęsdinimą, ęsdinamo sluoksnio storiui esant  $100 \pm 7$  nm, visų lydytų kvarcų (neskaitant *JGSI*) lazerinės pažaidos slenksčių vertės tapo labai artimos, praktiškai sutampančios paklaidų ribose, atitinkamai *Suprasil 300* -  $29,7 \pm 1,5$  J/cm<sup>2</sup>, *Suprasil 1* -  $29,7 \pm 1,5$  J/cm<sup>2</sup>, *Corning 8655 0F* -  $32,0 \pm 1,6$  J/cm<sup>2</sup>, *Corning 7980 0F* -  $28,2 \pm 1,4$  J/cm<sup>2</sup>.

Galima daryti prielaidą, kad kiekvienas iš šių lydytų kvarcų poliravimo metu suformuoja skirtingo storio Bilbio sluoksnį, kurį greičiausiai sąlygoja minimalūs kvarcų lydalų sudėties skirtumai. Dėl šios priežasties prieš ęsdinimą medžiagų lazerinės pažaidos vertės buvo labai skirtingos, o po argono plazmos ęsdinimo buvo praktiškai suvienodintos. Lydytas kvarcas *JGSI*, į tyrimą buvo įtrauktas kaip pačio pigiausio rinkoje esančio lydyto kvarco pavyzdys, tačiau gauti rezultatai parodo, kad šio kvarco lazerinės pažaidos slenkstis po ęsdinimų buvo mažiausias iš visų bandinių -  $23,2 \pm 1,1$  J/cm<sup>2</sup>. Tai yra beveik 25% mažesnė vertė, nei kitų rūšių lydytų kvarcų vidutinis lazerinės pažaidos slenkstis.

## 4.2. Optinių parametų įvertinimas ir palyginimas

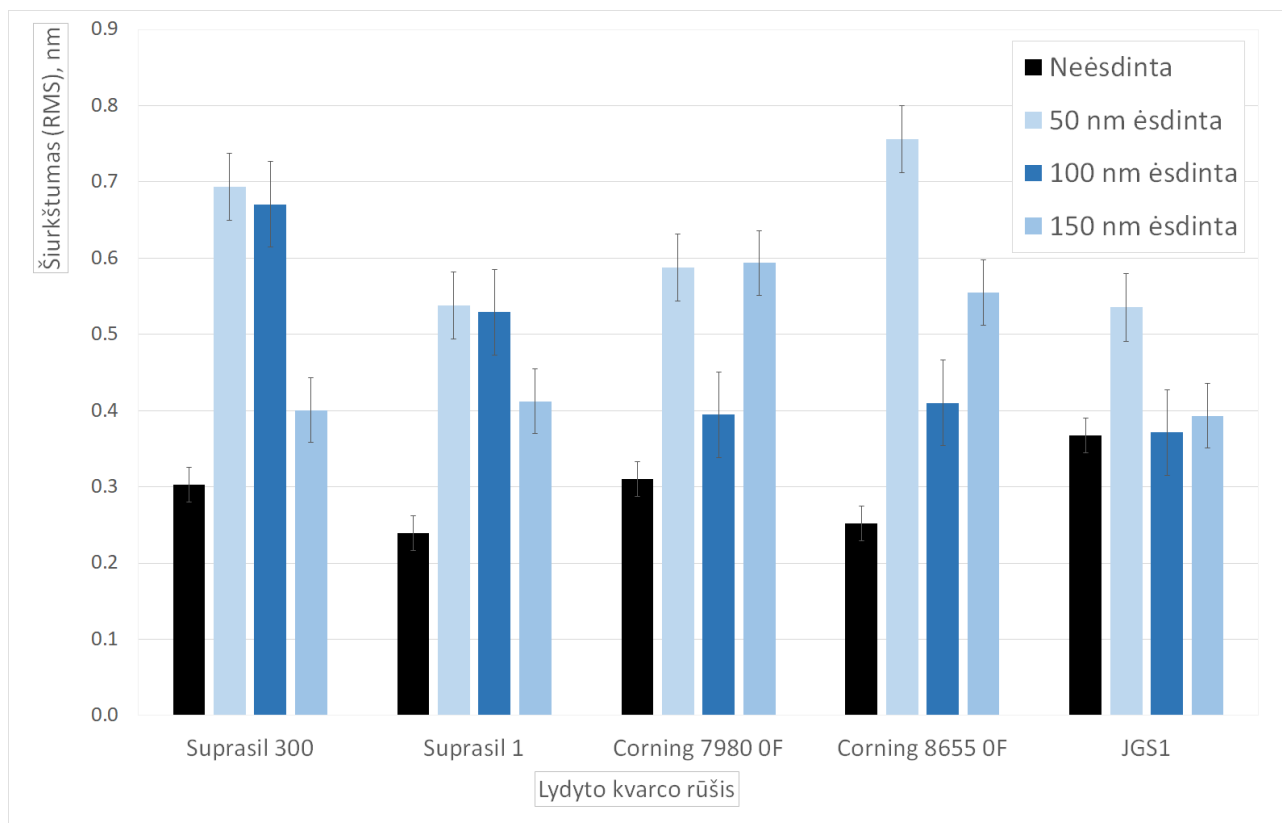
Atlikus ęsdinimą, buvo tikrinami trys svarbūs tiriamų langelių optiniai parametrai – pralaidumas, paviršiaus šiurkštumas ir praėjusio pluošto fronto iškraipymas. Optinių langelių pralaidumas buvo matuojamas trimis etapais - prieš ęsdinimą, po ęsdinimo, norint įvertinti galimą optinių langelių „užsinešimą“ nuėsdinto sluoksnio liekanomis ir po ęsdinimo ir nuplovimo ultragarsinėje vonelėje. Šių trijų etapų matavimų rezultatų pavyzdys pateikiamas 11 paveikslėlyje.



11 pav. *Corning 7980 0F* pralaidumo spektrai prieš ir po įvairaus gylio ęsdinimo

Pamatuoti pralaidumo spektrai, visuose eksperimento etapuose, nustatyta, kad elemento pralaidumas nepasikeičia nė viename iš eksperimento etapų. Tai leidžia daryti prielaidą, kad tokių mažų gylių ėsdinimo metu elementai neapsineša ir juos galima dengti optinėmis dangomis be papildomo plovimo.

Paviršiaus šiurkštumo matavimai atlikti optiniams langeliams prieš ir po ėsdinimo, jų apibendrinti rezultatai pateikiami 12 paveikslėlyje.



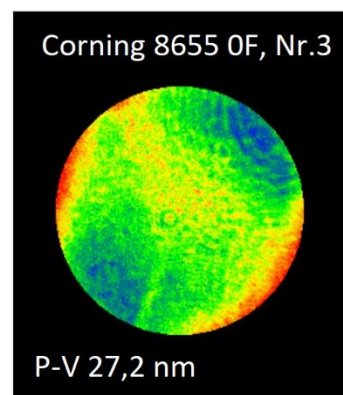
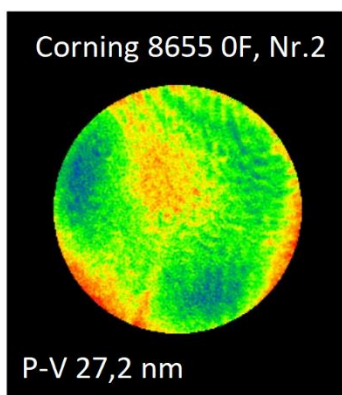
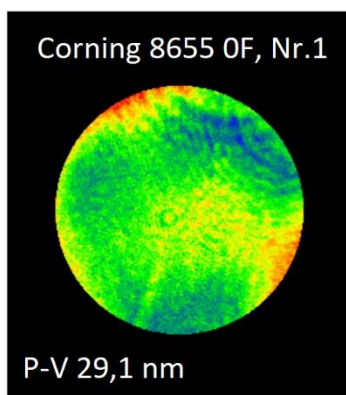
12 pav. Skirtingų lydytų kvarcų paviršiaus šiurkštumo palyginimas esant skirtingiems nuėsdinto sluoksnio storiams

Įvertinus optinių langelių paviršiaus šiurkštumą prieš ir po ėsdinimo, matavimai rodo, jog paviršiaus šiurkštumas po ėsdinimo vidutiniškai padidėja nuo  $\sim 0,3 \pm 0,04$  nm iki  $\sim 0,6 \pm 0,07$  nm. Taip nutinka, dėl to, jog ėsdinimo metu iš įvairių rėžių yra išėsdinami poliravimo medžiagos likučiai. Tokios paviršiaus šiurkštumo vertės yra laikomos įprastomis lazeriniams taikymams ir elementai tinkami naudoti kaip optiniai elementai [4].

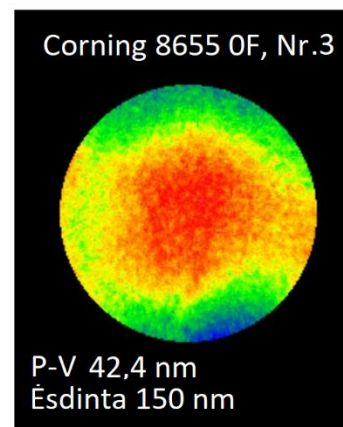
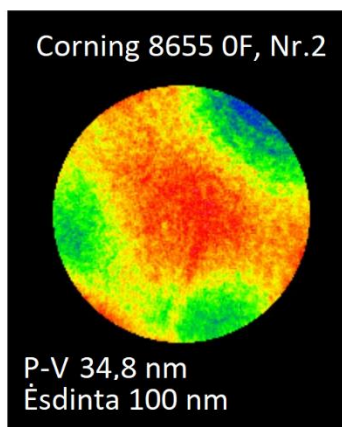
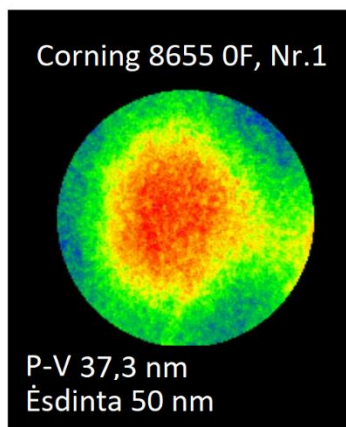
Prაėjusio pluošto fronto iškraipymo matavimai prieš ir po optinių langelių ėsdinimą taip pat parodė rezultatų pasikeitimą po elementų ėsdinimo. Matavimo rezultatai apibendrinami 13 paveikslėlyje.



# Prieš ėsdinimą



# Po ėsdinimo



Ėsdinimo gylio didėjimas

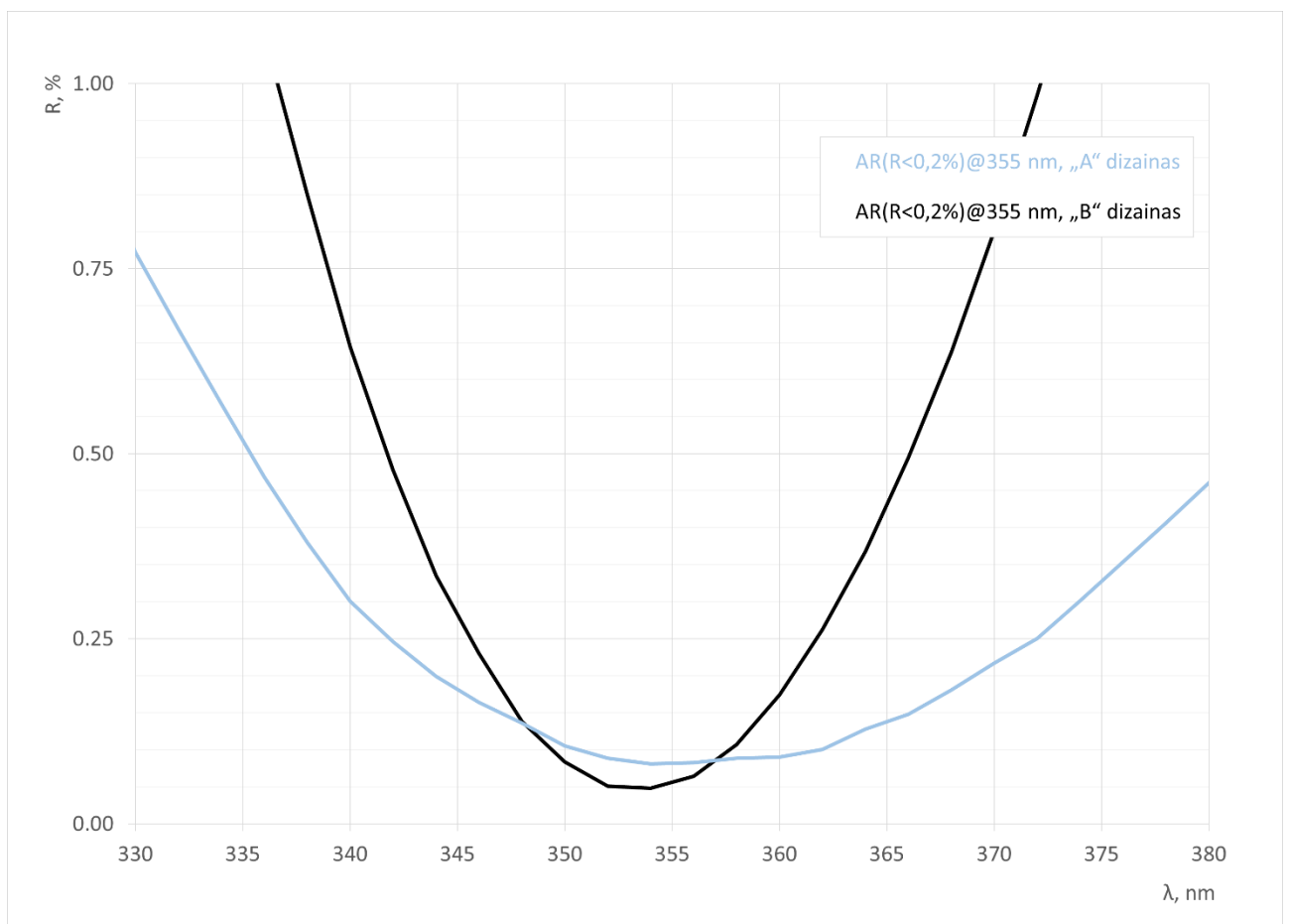
13 pav. *Corning 8655 0F* kvarco langelio praėjusio pluošto fronto iškraipymo palyginimas prieš ėsdinimą ir po ėsdinimo

Atlikus praėjusio pluošto fronto iškraipymo matavimus, pastebėta, kad optiniai langeliai, kurių paviršius buvo ėsdintas, turi prastesnes praėjusio pluošto fronto iškraipymo vertes. Vidutinės vertės lyginant neėsdintus ir ėsdintus langelius suprastėjo nuo  $\sim \lambda/20$  iki  $\sim \lambda/16$ , tyrimo bangos ilgis  $\lambda=633$  nm. Tokio lygio pluošto iškraipymas laikomas nežymiu ir neturėtų daryti įtakos optinio elemento veikimui.

### 4.3. Skaidrinančiomis dangomis padengtų ėsdintų langelių tyrimas

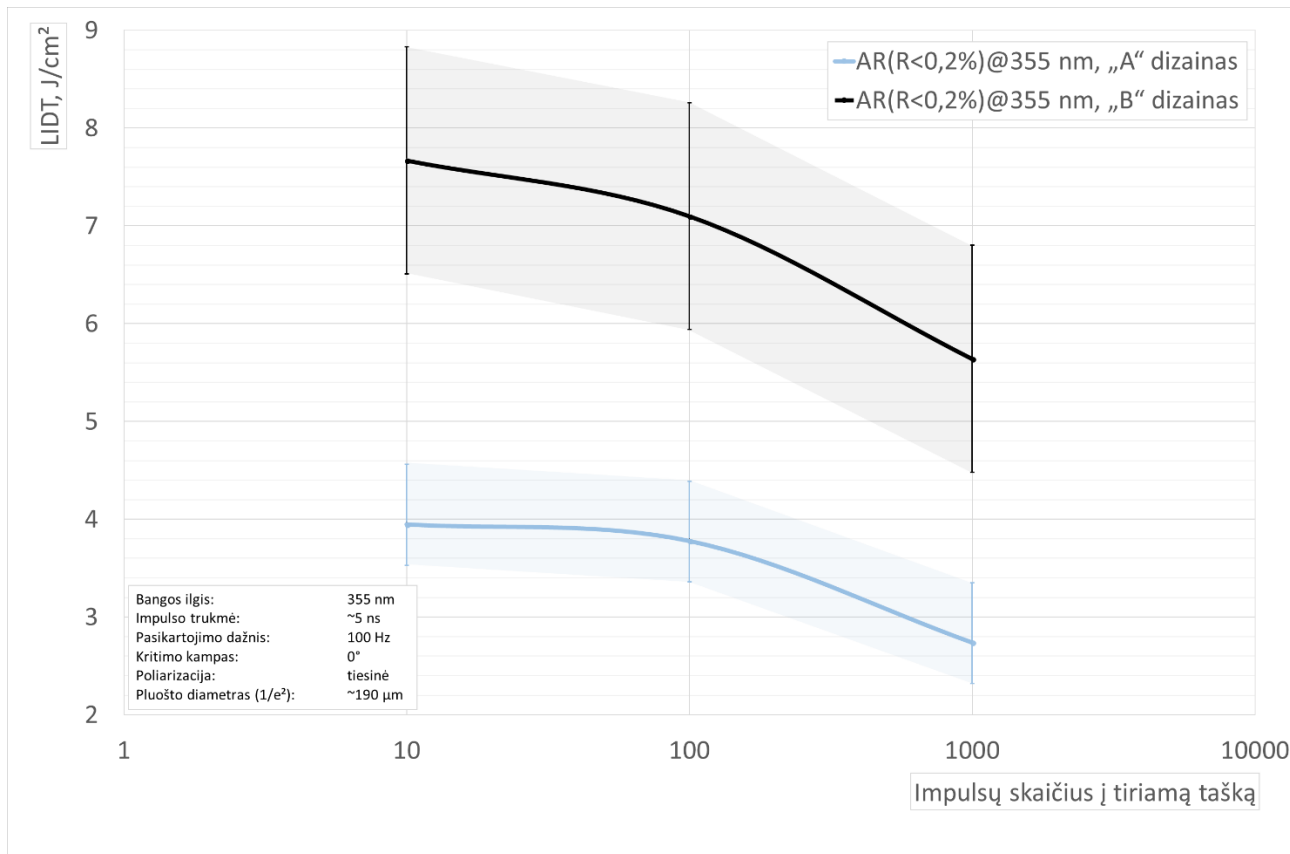
Įsitikinus, kad jokie esminiai optiniai lydyto kvarco parametrai pritaikius argono plazmos ėsdinimo metodą nesuprastėja, tyrimas buvo tęsiamas ir bandiniai buvo dengiami optinėmis skaidrinančiomis dangomis. Kadangi darbas yra orientuotas į komerciškai įgyvendinamo, nesudėtingai pritaikomo ir santykinai ekonomišką metodo pritaikymą gamybos linijoje, todėl optinių dangų dengimui buvo pasirinkta garinimo elektronų pluoštu technologija. Ši technologija yra plačiai taikoma optinių dangų dengimui, santykiniai nebrangi ir šiuo būdu užgarintos dangos pasižymi aukštu lazerinės pažaidos slenksčiu.

Norint išsiaiškinti optimalų garinamos dangos dizainą, tiek elementų skaidrinimo atžvilgiu, tiek lazerinės pažaidos, buvo atlikto dvi bandomosios garinimo partijos – A ir B. Šios partijos skyrėsi skaidrinančios optinės dangos dizainu ir garinamomis medžiagomis. Garinimams naudoti optiniai padėkliukai buvo iš to pačios poliravimo partijos, neėsdinti argono plazma, siekiant išsiaiškinti kokios lazerinės pažaidos vertės turės kiekvienas dizainas nepritaikius šios ėsdinimo metodikos.



14 pav. Skirtingų skaidrinančių optinių dangų dizainu atspindžio priklausomybė nuo bangos ilgio. matuota mažu kampu ( $\sim 5^\circ$ )

Išmatavus skaidrinančiomis dangomis padengtų optinių pagrindukų spektrus įsitikinome, kad šie dangų dizainai tinka pluošto plėstuvo skirto 355 nm spinduliuotės šaltiniams gamybai, optiniai elementai turi nykstamai mažą atspindį ties 355 nm bangos ilgiu. Kitas etapas, buvo šių optinių dangų lazerinės pažaidos tyrimai, kurių rezultatai pateikiami 15 paveikslėlyje.

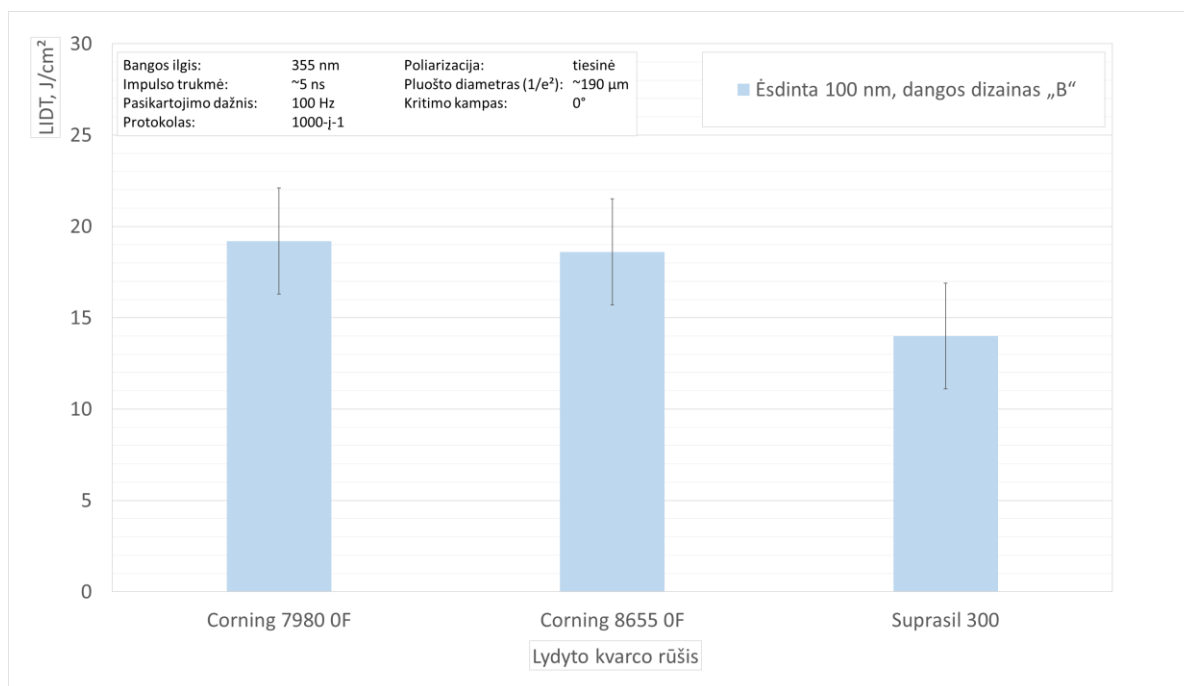


15 pav. Skirtingų skaidrinančių optinių dangų dizainų lazerinės pažaidos vertės priklausomybė nuo impulsų skaičiaus į tiriamąjį tašką

Šio tyrimo metu paaiškėjo, kad optinis pagrindukas padengtas „B“ dizaino danga turi aukštesnę lazerinės pažaidos slenkstį lyginant su dizainu „A“, matavimus atliekant 1000-į-1 protokolu, atitinkamai  $5,64 \pm 1,16 \text{ J/cm}^2$  („B“) ir  $2,74 \pm 0,42 \text{ J/cm}^2$  („A“). Tolimesni tyrimai bus vykdomi naudojantis optiniais elementais padengtais „B“ dizaino skaidrinančia danga.

Kitame eksperimento etape, tiriamė aukščiausią lazerinės pažaidos slenkstį turėjusius, optimaliu gyliu ( $100 \pm 7 \text{ nm}$ ) nuėsdintus skirtingų rūšių lydyto kvarco pagrindukus. Juos padengėme „B“ dizaino danga ir vertinome lazerinės pažaidos slenkstį. Šio tyrimo etapo tikslas yra išsiaiškinti, kuris iš didžiausių lazerinės pažaidos slenkstį turėjusių lydytų kvarcų, parodys geriausią rezultatą ir padengti skaidrinančiomis dangomis.





16 pav. Argono plazma ėsdintų skirtingų rūšių lydyto kvarcų pagrindukų, padengtų tokia pačia skaidrinančia danga (dizainas „B“) lazerinės pažaidos vertės

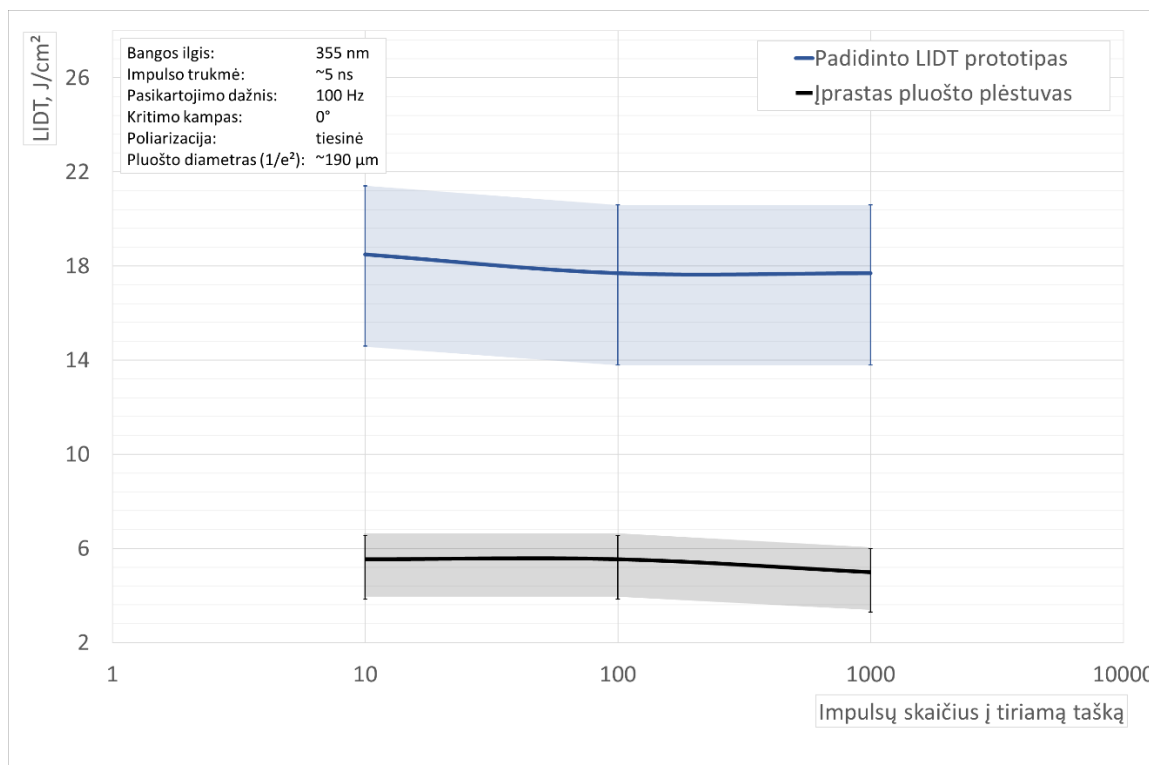
Svarbu pastebėti, kad tiriant skaidrinančia danga dengtus optinius langelius yra naudojamas 1000-į-1 lazerinės pažaidos tyrimo protokolas. Toks tyrimo metodas pasirinktas dėl to, jog geriau atspindi optinio elemento ilgaamžiškumą nei tyrimo protokolas 1-į-1 kuris buvo naudojamas pradiniuose eksperimento etapuose. Jis buvo pasirinktas kaip greitas būdas išsiaiškinti didelio kiekio bandinių lazerinės pažaidos vertes greitai, bet neįvertina ilgaamžiškumo.

Kaip matome iš 16 pav., geriausias lazerinės pažaidos vertę parodė *Corning 7980 OF* optinis langelis -  $19,2 \pm 2,9 \text{ J/cm}^2$ , bei *Corning 8655 OF* atitinkamai  $18,6 \pm 2,8 \text{ J/cm}^2$ . Šių rezultatų tendencija koreliuoja su analogiškais matavimais atliktais ant optinėmis dangomis nedengtų langelių, tik tuo atveju buvo matuojama pagal 1-į-1 protokolą (9 pav.). Gautos lazerinės pažaidos vertės paklaidų ribose sutampa, tad negalima tiksliai pasakyti kuris iš lydytų kvarcų yra ryškiai pranašesnis. Dėl to tolimesniame etape bus naudojamas *Corning 7980 OF*, kuris yra pigiausias ir paklausiausias lazerinės optikos rinkoje, taip pat jo išmatuota lazerinės pažaidos vertė buvo didžiausia -  $19,2 \pm 2,9 \text{ J/cm}^2$ .

#### 4.4. Padidintos lazerinės pažaidos pluošto plėstuvo prototipas

Pagrindinis eksperimento tikslas yra sukonstruoti padidintos lazerinės pažaidos pluošto plėstuvą skirta UV (355 nm) lazerinės spinduliuotės šaltiniui ir palygint jį su įprastu, lazerinio

apdirbimo staklėse naudojamu, pluošto plėstuvu skirtu 355 nm lazeriams. Prototipui pasirinktas *Corning 7980 OF* lydytas kvarcas,  $100 \pm 7$  nm, argono plazmos ėsdinimo gylis ir „B“ dizaino skaidrinanti danga. Surinkto padidintos lazerinės pažaidos pluošto plėstuvo pažaidos verčių matavimas ir palyginimas su įprastu pluošto plėstuvu pateikiamas 17 paveikslėlyje.



17 pav. Padidintos lazerinės pažaidos pluošto plėstuvo ir įprasto lazerinės pažaidos verčių priklausomybė nuo impulsų skaičiaus į tiriamąjį tašką

Gauti rezultatai – padidintos lazerinės pažaidos pluošto plėstuvo lazerinės pažaidos vertė -  $17,7 \pm 2,9$  J/cm<sup>2</sup>, o įprasto pluošto plėstuvo -  $4,9 \pm 1,7$  J/cm<sup>2</sup>, matuojant 1000-į-1 protokolu. Šie rezultatai paklaidų ribose atsikartoja su ankstesniuose etapuose atliktais pavienių ėsdintų skaidrintų langelių tyrimo rezultatais (16 pav.), taip pat tendencija atsikartoja ir su literatūroje aprašytais tyrimais [16].

Įprastai analizuojant optinių elementų lazerinę pažaidą, tiriami pavieniai elementai, pluoštas fokusuojamas ant pirmojo, antrojo paviršiaus arba į elemento tūrį, priklausomai nuo to, kurios dalies atsparumą siekiama įvertinti. Tiriant pluošto plėstuvus, buvo nuspręsta, tirti ne pirmąjį (įėjimo) lęšį atskirai, o visą surinktą optinį ansamblį, fokusuojant spinduliuotę ant pirmojo lęšio paviršiaus. Toks sprendimas priimtas norint įsitikinti, ar pluošto plėstuvo surinkimo metu naudojami kiti komponentai (mechaninės dalys) nepadaro neigiamos įtakos pluošto plėstuvo lazerinės pažaidos vertei.

Svarbu paminėti, kad abu tyrime dalyvavę pluošto plėstuvai buvo pagaminti analogiškai, t.y. naudota optika buvo poliruojama ir garinama toje pačioje partijoje, naudojamas tas pats lydytas

kvarcas *Corning 7980 0F*. Skirtumas buvo tik tai, kad padidintos lazerinės pažaidos pluošto plėstuvo prototipo optiniams elementams, prieš skaidrinančių dangų dengimą, buvo pritaikytas argono plazmos ėsdinimo metodas. Gauti rezultatai įrodo, kad argono plazmos ėsdinimo metodo taikymas yra tinkamas būdas padidinti UV skirto optinio ansamblio lazerinės pažaidos slenkstį daugiau nei 3 kartus, toks metodas gali būti pritaikomas komerciškai ir prailginti optinio ansamblio ilgaamžiškumą.

## 5. Pagrindiniai rezultatai ir išvados

- Optinio pralaidumo matavimai visuose eksperimento etapuose parodė, kad elementų pralaidumas 320 – 600 nm spektro diapazone, pritaikius argono plazmos ėsdinimo metodą, paklaidų ribose nesuprastėjo.
- Ištirtas ir palygintas praėjusio pluošto fronto iškraipymas tarp neėsdintų ir ėsdintų optinių pagrindukų (atitinkamai nuo  $\sim\lambda/20$  iki  $\sim\lambda/16$ ), skirtumas nėra kritinis ir tai neturi esminės įtakos optinio elemento veikimui.
- Išmatuota, kad optinių langelių ėsdinto paviršiaus šiurkštumas, nepriklausomai nuo ėsdinimo gylio, padidėjo maždaug du kartus, nuo  $\sim 0,3 \pm 0,04$  nm iki  $\sim 0,6 \pm 0,07$  nm. Tokio lygio paviršiaus šiurkštumas neturės neigiamos įtakos optinio elemento veikimui.
- Įvertinta, kad vienodomis sąlygomis poliruotų, nedengtų, optinių langelių pažaidos lazerio spinduliuote slenksčio vertė gali svyruoti daugiau nei 2 kartus (atitinkamai nuo  $7,1 \pm 0,3$  J/cm<sup>2</sup> iki  $18,5 \pm 0,9$  J/cm<sup>2</sup>), priklausomai nuo lydyto kvarco rūšies.
- Įvertinta, kad visų rūšių lydytų kvarcų lazerinės pažaidos slenkstis daugiausiai padidėjo esant  $100 \pm 7$  nm paviršiaus ėsdinimui argono plazma.
- Išmatuota, kad skaidrinančios dangos dizainas „B“ parodė geriausią lazerinės pažaidos vertę ant neėsdintų lydyto kvarco langelių -  $5,64 \pm 1,16$  J/cm<sup>2</sup>.
- Ištirta, jog nuėsdinus  $100 \pm 7$  nm optinio langelio paviršiaus, bei uždengus skaidrinančią dangą „B“, optinis langelis pagamintas iš *Corning 7980 0F* turėjo aukščiausią lazerinės pažaidos slenkstį -  $19,2 \pm 2,9$  J/cm<sup>2</sup>.
- Sukonstruoti ir palyginti analogiški pluošto plėstuvai, kurių lazerinės pažaidos vertė, pritaikius argono plazmos ėsdinimą, buvo padidinta daugiau nei tris kartus, nuo  $4,9 \pm 1,7$  J/cm<sup>2</sup> iki  $17,7 \pm 2,9$  J/cm<sup>2</sup>.
- Apibendrinus rezultatus, patvirtinta, kad argono plazmos ėsdinimo metodas gali būti komerciškai pritaikomas, siekiant padidinti pralaidume veikiančių, iš lydyto kvarco pagamintų, skaidrintų optinių elementų lazerinės pažaidos slenkstį daugiau nei 3 kartus.

## 6. Santrauka

Šiame darbe analizuojamas argono plazmos ęsdinimo pritaikymas siekiant sukurti padidintos lazerinės pažaidos pluošto plęstuvą skirta UV spinduliuotės lazeriniams šaltiniams. Tokios technologijos vystymo ir tobulinimo poreikis atsiranda iš pasaulinėje fotonikos rinkoje vyraujančių tendencijų, t.y. siekio gaminti ilgaamžiškas ir patikimas lazerinio apdirbimo sistemas veikiančias su UV spinduliuotės nanosekundiniais lazeriniais šaltiniais.

Tyrimo metu buvo išanalizuoti 5 skirtingų rūšių, fotonikos rinkoje populiarūs lydyti kvarcai – *Corning 7980 0F*, *Corning 8655 0F*, *Suprasil 300*, *Suprasil 1* ir *JGS1*, siekiant išaiškinti kuris iš šių stiklų turi aukščiausią lazerinės pažaidos slenkstį, pritaikius argono plazmos ęsdinimo metodą ir yra tinkamiausias tolimesniam eksperimento plėtojimui. Šie poliruoti bandiniai buvo ęsdinami argono plazma skirtinga trukme, taip sukuriant skirtingo nuęsdinto sluoksnio storius. Vėliau buvo įvertintas bandinių lazerinės pažaidos slenkstis ir išsiaiškinta, jog geriausias rezultatas pasiekiamas nuęsdinus  $100 \pm 7$  nm paviršiaus gylį.

Tolimesniame etape, buvo išsiaiškintas optimalus skaidrinančios optinės dangos dizainas ir ja padengti, optimaliu gyliu nuęsdinti, geriausią lazerinės pažaidos rezultatą parodę lydyto kvarco bandiniai. Ištyrus šiuos skaidrintus langelius nustatyta, kad *Corning 7980 0F*, nuęsdinus  $100 \pm 7$  nm argono plazma ir užgarinus skaidrinančią optinę dangą (dizainas „B“), turėjo aukščiausią lazerinės pažaidos vertę -  $19,2 \pm 2,9$  J/cm<sup>2</sup>.

Paskutinėje tyrimo fazėje buvo pagamintas pluošto plęstuvo prototipas naudojantis optimalios lazerinės pažaidos optikos gamybos receptu. Nustatyta prototipo lazerinės pažaidos vertė ir palyginta su analogiško pluošto plęstuvo lazerinės pažaidos verte, kurios gamybos metu nebuvo taikomas argono plazmos ędinimo metodas. Tyrimas parodė, jog prototipo lazerinės pažaidos vertė yra daugiau nei 3 kartus didesnė, lyginant su įprasto pluošto plęstuvo, atitinkamai  $17,7 \pm 2,9$  J/cm<sup>2</sup> ir  $4,9 \pm 1,7$  J/cm<sup>2</sup>. Šie rezultatai patvirtina, kad argono plazmos ęsdinimo metodas gali būti komerciškai pritaikomas, siekiant padidinti pralaidume veikiančių, iš lydyto kvarco pagamintų, skaidrintų optinių elementų lazerinės pažaidos slenkstį daugiau nei 3 kartus.

## 7. Summary

### IMPROVED LASER-INDUCED DAMAGE THRESHOLD BEAM EXPANDER PROTOTYPE FOR ULTRAVIOLET LASERS

In this work we are analysing way to use argon plasma etching method in order to make the prototype of high LIDT (*Laser Induced Damage Threshold*) fixed beam expander suitable for UV laser micromaching systems. The need for such improvement occurs from the tendencies in the world

photonics market. There is the huge demand for long life, nanosecond, UV micromachining systems which would be stable and could work 24/7.

At the first stage of the research we tested 5 most popular fused silicas in photonics market - *Corning 7980 0F*, *Corning 8655 0F*, *Suprasil 300*, *Suprasil 1* and *JGS1*. This was done in order to find out which glass will have highest LIDT value after applying the argon plasma etching technique and will be suitable for the further development. These polished fused silicas were etched with argon plasma for different amount of time, to create different thickness of the etched layer for each substrate. Afterwards each substrate was tested in the LIDT measuring setup, following the test results we came to the conclusion that optimal etching depth for fused silica substrates is -  $100 \pm 7$  nm.

In the second stage of the experiment, LIDT tests have been done for two different antireflective coatings designs („A“ and „B“), to find the best one which would be applied to etched substrates for the following experiment. The measurements of etched (100 nm) and coated (design „B“) substrates showed that *Corning 7980 0F* optical window had the greatest LIDT value -  $19,2 \pm 2,9$  J/cm<sup>2</sup>.

In the last phase of the experiment, optics for prototype fixed beam expander was manufactured following the knowledge gathered in the previous research stages. LIDT measurements were applied for prototype of the improved LIDT expander and a regular one, during which manufacturing no argon plasma etching method was used. Evaluated results showed that the improved LIDT prototype had more than 3 times higher LIDT values than the regular one, corresponding to  $17,7 \pm 2,9$  J/cm<sup>2</sup> and  $4,9 \pm 1,7$  J/cm<sup>2</sup>. This result confirms, that argon plasma etching method can be used as a commercial manufacturing stage in order to improve LIDT of the optics working in a transmission regime in the UV spectrum.

Gabrielius Rimšelis

## 8. 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] K. D. Hendrix, G. Ockenfuss. Demonstration of narrowband notch and multi-notch filters Demonstration of narrowband notch and multi-notch filters. *Proc. SPIE* (2014)
- [4] K. Juškevičius. Plonųjų dielektrinių sluoksnių optinių ir fizinių savybių tyrimas bei jų formavimo technologijų optimizavimas. *Vilniaus Universitetas*. (2014)
- [5] M. H. Industries. Development of Microfabrication Technology using DUV Laser. **49–54**, (2016)
- [6] Schott AG, Optical Glass Catalog. (2016)
- [7] Schott AG, ULE ® Corning Code 7972 Ultra Low Expansion Glass CTE Variation and Inclusion Quality Grades. (2008)
- [8] Heraeus AG, Base Materials Heraeus Quarzglas. *Products datasheet*. (2014)
- [9] J. N. Desai. Advances and Processes in Precision Glass Polishing Techniques. **1–12**, (2009)
- [10] Corning LTD, HPFS ® Fused Silica Standard Grade. **20–23**, (2003)
- [11] Heraeus AG, Suprasil and Infrasil - Material Grades for the Infrared Spectrum. *Products datasheet*. **1–6**, (2016)
- [12] Corning LTD, High Purity Fused Silica 7979, 7980, 8652, 8655. *Products datasheet*. (2013)
- [13] Y. Li, N. Zheng, H. Li, J. Hou, X. Lei, X. Chen, Z. Yuan, Z. Gou, J. Wang, Y. Guo, Q. Xu. Morphology and distribution of subsurface damage in optical fused silica parts: Bound-abrasive grinding. *Applied Surface Science*. 257, **2066–2073**. (2011)
- [14] Y. Tian, W. Liu, and L. Hang. Influence of oxygen flow rate on the variation of surface roughness of fused silica during plasma polishing process. *Physics Procedia*. 18, **107–111**. (2011)
- [15] Heraeus AG, Standard optics information - HOQ 310. *Products datasheet*. (2012)
- [16] 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)
- [17] H. Takino, M. Kanaoka, K. Nomura. Ultraprecision Machining of Optical Surfaces. *Nikon corporation*. (2012)

- [18] S. D. Jacobs. Manipulating mechanics and chemistry in precision optics finishing. *Science and Technology of Advanced Materials*. 8, **153–157**. (2007)
- [19] M. D. Feit, A. M. Rubenchik. Influence of subsurface cracks on laser-induced surface damage. *Proc. SPIE*, 5273, **264-272**. (2004)
- [20] S. Muthukumar, S. Kentish, S. Lalchandani, M. Ashokkumar, R. Mawson, G. W. Stevens, F. Grieser. The optimisation of ultrasonic cleaning procedures for dairy fouled ultrafiltration membranes. *Ultrasonics Sonochemistry*. 12, **29–35**. (2005)
- [21] Elma GmbH. Ultrasonic-Cleaning Systems for Precision Optics. *Products datasheet*. (2012)
- [22] 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)
- [23] K. Juškevičius, R. Buzelis, S. Kičas, T. Tolenis, R. Drazdys, G. Batavičiūtė, E. Pupka, L. Smalakys, A. Melninkaitis. Investigation of subsurface damage impact on resistance of laser radiation of fused silica substrates. *Proc. SPIE*, 8885, **1–9**. (2013)
- [24] CVI Optics. Laser Induced Damage Threshold of Femtosecond Coatings. **(2013)**
- [25] 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)
- [26] L. Gallais, M. Commandré, H. Krol. Influence of polishing and cleaning on the laser-induced damage threshold of substrates and coatings at 1064 nm, *Optical Engineering*, **2**. (2007)
- [27] L. Gallais, B. Mangote, M. Zerrad, M. Commandré, A. Melninkaitis, J. Mirauskas, M. Jeskevic, V. Sirutkaitis. Laser-induced damage of hafnia coatings as a function of pulse duration in the femtosecond to nanosecond range, *Applied Optics*, **50**. (2011)