

Vilniaus universiteto
Fizikos fakulteto
Lazerinių tyrimų centras

Atėnė Gabrielė Valiulytė

AUKŠTO ATSPINDŽIO DAUGIASLUOKSNIŲ DIELEKTRINIŲ VEIDRODŽIŲ SKLAIDOS
NUOSTOLIŲ IR ATSPARUMO LAZERINEI SPINDULIUOTEI TYRIMAS

Magistrantūros studijų baigiamasis darbas

Lazerinė fizika ir optinės technologijos
studijų programa

Studentė

Atėnė Gabrielė Valiulytė

Darbo vadovas

dr. Laurynas Lukoševičius

Darbo konsultantas

doc. Vytautas Jukna

Centro direktorė

dr. Dalia Kaškelytė

Vilnius 2024

Turinys

1. Įvadas	3
2. Literatūros apžvalga	5
2.1. Optiniai stiklai	5
2.2. Optinės dangos	6
2.2.1. Paskirstyto Brego atspindžio dangos	7
2.3. Optinių dangų formavimas	7
2.3.1. Elektronpluoščio garinimo technologija	9
2.3.2. Jonapluoščio dulkinimo technologija	10
2.4. Nuostoliai optiniuose elementuose	11
2.4.1. Optinėmis dangomis padengto padėklo sklaidos sąlygoti nuostoliai	11
2.4.2. Optinėmis dangomis padengto padėklo sugerties sąlygoti nuostoliai.....	13
2.5. Defektai optinėse dielektrinėse dangose	13
2.5.1. Popviršiniai defektai	14
2.6. Optinių dangų paviršiaus šiurkštumas	15
2.6.1. Paviršiaus šiurkštumo matavimo metodai	16
2.7. Optinių elementų lazerinė pažaida	17
3. Tyrimo ir matavimų metodika	18
3.1. Optiniai pagrindukai	18
3.2. Optinių dangų procesai	18
4. Tyrimo rezultatai ir jų aptarimas	20
4.1. Vizualinė paviršiaus kokybės patikra	20
4.2. Spektro matavimai spektrofotometru	20
4.3. Sugerties matavimai	25
4.4. Sklaidos matavimai	27
4.5. Šiurkštumo matavimai interferometru	30
4.6. Šiurkštumo matavimai optiniu profilometru	31
4.7. SiO ₂ monosluoksnių šiurkštumo tyrimas	34
4.8. Atsparumo lazerinei spinduliutei tyrimas	37
4.9. Pakartotinis gamybos procesas	40
5. Pagrindiniai rezultatai ir išvados	43
6. Santrauka	44
7. Summary	45
8. Literatūros sąrašas	46
9. Padėka	49

1. Įvadas

Šiais laikais lazerių pramonė neįsivaizduojama be lazerinių optinių elementų, kurie naudojami lazerių aktyviosios terpės generuojamai spinduliuotei valdyti. Tokius optinius komponentus naudojančių vartotojų ratas yra platus – nuo akademinų institucijų: universitetų, institutų ir tyrimų centrų iki komercinių įmonių. Pasaulinėje fotonikos rinkoje vis didesnę dalį užima medicininiai lazeriai – šiai dienai naujausios kartos lazerinė įranga gydytojams gali atverti neįtikėtinas galimybes puoselėjant žmonių sveikatą ir grožį. Vis daugiau kadaise sudėtingų operacijų virsta tiesiog įprastomis procedūromis, po kurių pacientai gali būti iš karto paleidžiami į namus. [1] Medicininių lazerių gamintojai, ypač estetinėse ir chirurginėse medicinos srityse turi tendenciją kurti vis galingesnius spinduliuotės šaltinius, todėl optiniai elementai dažnai susiduria su itin dideliu spinduliuotės intensyvumu, dėl kurių gali atsirasti nepageidaujami reiškiniai. Šviesa, sklindanti per optinį elementą, gali būti atspindėta, sugerta, išsklaidyta arba sklusti niekaip nepaveikta. Realiose sistemose dažniausiai visi šie reiškiniai pasireiškia kartu, tačiau ne visi daro teigiamą įtaką elemento veikimui. Sklaida ir sugertis gali mažinti optinės sistemos efektyvumą – ši problema dažnai sutinkama medicininių lazerių gamintojams, kuomet reikalingi kuo mažesni atspindžio nuostoliai norint spinduliuotę perduoti į šarnynines rankas (angl. *articulated arms*). Gamybos technologijos bei optinių dangų medžiagų pasirinkimas gali lemti padidėjusią sklaidą ir sugertį, tuo tarpu sklaida gali priklausyti nuo pačios elementų paviršiaus kokybės: ruoželių, ar duobių defektų, bei kitų paviršiaus netolygumų. Parinkus netinkamus parametrus optinio elemento gamybai, šie taip pat gali daryti įtaką optinio elemento lazerinei pažaidai ir ilgaamžiškumui. [2]

Interferencinėmis dangomis padengus optinius pagrindukus, jie įgyja savybes, leidžiančias juos panaudoti tam tikriems optiniams tikslams ir sukonkretinti jų optines charakteristikas. Optinės interferencinės dangos yra nuo kelių iki kelių tūkstančių dielektrinių sluoksnių sistemos, kuriose vyksta per jas sklindančios šviesos konstruktyvi arba destruktivi interferencija, kuria manipuluojant galima gauti norimas optines savybes – elemento gebėjimą atspindėti ar praleisti tam tikrą lazerinę spinduliuotę. [3]

Metalų oksidų rinkiniai, tokie kaip Al_2O_3 , Nb_2O_5 , TiO_2 , ZrO_2 , HfO_2 , Ta_2O_5 ir SiO_2 , yra dažnai naudojami gaminti tokias dangas. Kadangi metalų oksidų rinkinys yra platus, o interferencinei dangai pagaminti reikia naudoti dvejus – aukštą ir žemą lūžio rodiklį turinčias medžiagas, jos dažniausiai yra pasirenkamos pagal elementų panaudojimą tam tikrai sistemai. Minėti metalų oksidų mišiniai HfO_2 ir Ta_2O_5 turi aukščiausius atsparumus lazerinei spinduliuotei regimųjų (angl. *visible* - VIS) ir artimųjų infraraudonųjų (angl. *near-infrared* - NIR) bangų ilgio srityje ir yra komerciškai gerai žinomi, todėl

jei lazerinėje sistemoje elementui naudojama intensyvi lazerinė spinduliuotė, tinkamų medžiagų pasirinkimas yra neatsiejama dalis gaminant optinę dangą. [2]

Pastaruoju metu medicinos rinkoje vyraujančioms tendencijoms keliami vis didesni reikalavimai mažinti atspindžio nuostolius ir didinti atsparumą lazerio spinduliuotei, o svarbiausia, kad optinis elementas turi tenkinti šiuos visus reikalavimus vienu metu. Pavyzdžiui, medicininių lazerių gamintojai, matydami rinkos poreikį siekia aukštesnį atspindį turinčių optikos komponentų, kurie galėtų atspindėti bent dvi bangas vienu metu, tuo pačiu metu išlaikant aukštas lazerinių pažaidų vertes. Optinių komponentų gamintojai dažnai susiduria su iššūkiais tokių veidrodžių gamyboje, kadangi daugeliu atvejų geri rezultatai būna pasiekiami tik daliai parametrų, tuo pačiu metu pabloginant kitas charakteristikas. Todėl, siekiant pilnai pagerinti optinio elemento veikimo savybes, svarbu gilintis į esminį visų optinio komponento gamybos grandinės dalių tobulinimą. Metodas tai pasiekti – preciziškas optinių pagrindukų paruošimas, optimalių dangų modelių ir medžiagų parinkimas, bei nuolatus plonųjų sluoksnių dengimo technologijų vystymas ir tobulinimas. [3] Siekiant kurti optinius komponentus su geresnėmis savybėmis, yra vienodai svarbus visų šių minėtų technologinės grandinės dalių veikimo supratimas ir jų tarpusavio sąveikos tobulinimas, siekiant suprasti ribojančius veiksnius ir juos pašalinti.

Darbo tikslas

Šio mokslo tiriamojo darbo tikslas yra nustatyti tinkamiausią gamybos technologiją aukšto atspindžio dvibangių veidrodžių gamybai, ištiriant paviršiaus šiurkštumo įtaką optinių dangų sklaidos nuostoliams bei įvertinant atsparumą lazerinei spinduliuotei ties 532 nm bangos ilgiu nanosekundinių impulsų atveju.

Užduotys

1. Panaudojant metalų oksidų sluoksnius aukšto atspindžio dangų gamyboje ant lydyto kvarco pagrindukų įvertinti nuostolius.
2. Iširti plonaksluoksnėmis dangomis dengtų komerciškai poliruotų optinių pagrindukų paviršiaus šiurkštumo įtaką sklaidai.
3. Įvertinti ir palyginti plonaksluoksnėmis dangomis dengtų komerciškai poliruotų optinių pagrindukų lazerinės spinduliuotės atsparumą.
4. Nustatyti tinkamiausią technologiją ir jos parametrus dvibangių aukšto atspindžio veidrodžių gamybai.

2. Literatūros apžvalga

2.1 Optiniai stiklai

Optinis stiklas yra labai svarbus lazerinio optinio elemento pagrindas, nes galutinio produkto kokybė labai priklauso nuo apdorojimo kokybės. Pasaulyje yra daug stiklo gamintojų, įskaitant *Schott* (Vokietija), *Corning* (JAV), *Ohara* (Japonija), *Heraeus* (Vokietija) bei *CDGM* (Kinija), kurie dabartinėje rinkoje yra didžiausi. Dažnai jų gaminiai yra labai panašūs, tačiau gamybos technologija ir naudojamos medžiagos skiriasi. Šiuo atveju gaminiai gali būti vienas kito pakaitalai, tačiau esant ribinėms sąlygoms, ypač ties medžiagų pažeidimo slenksčiais, galima įžvelgti jų skirtumus.

Ypač kritinėmis sąlygomis, kai tam tikra sistema veikia ties ribiniais parametrais (reikalingi mažiausi sklaidos nuostoliai, minimali sugertis, aukščiausias pažeidimo slenkstis) tinkamas stiklo pasirinkimas gali būti lemiamas veiksnys. Vienas iš dažniausiai sutinkamų stiklų optinių dangų gamyboje yra Corning 7980 0F. Skaičius 7980 neturi tiesioginio susijusio su stiklo savybėmis, jis rodo „recepto“ numerį, kurio metu stiklo gamintojui pavyko išlydyti norimas savybes turintį stiklą. Tada gamybos parametrai yra užfiksuojami ir stiklui priskiriamas unikalus skaičius, sutampantis su recepto numeriu. Tokia numeracija taikoma tik *Corning* gaminamiems stiklams, o *Corning* optinių stiklų indeksų reikšmės pateikiamos 1 lentelėje. Corning 7980 0F stiklo intarpų (kitai vadinamų oro burbuliukų) klasė yra "0". Ši klasė nurodo, jog visų 100 mm³ intarpų skerspjūvio plotų suma negali viršyti 0.03 mm³, o joks intarpas negali viršyti 0.1 mm skersmens. Homogeniškumo klasė žymima raide "F" ir parodo, jog lūžio rodiklio variacijos 450 mm skersmens švarioje apertūroje, iš kurios buvo išpjauta medžiaga, indeksas neviršija ar yra lygus 5.

1 lentelė. Corning optinių stiklų indeksų reikšmės [4]

Intarpų klasė			Homogeniškumo rūšis						
Klasė	Intarpų skerspjūviu plotų suma (mm ³)	Didžiausio intarpo diametras (mm)	AA ≤ 0,5	A ≤ 0,1	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	0,5			■	■	■	■	■
3	≤ 0,50	0,76				■	■	■	■
4	≤ 1,00	1,00				■	■	■	■
5	≤ 2,00	1,27				■	■	■	■

Gamintojų specifikacijų lapuose yra nurodomi ne visi optinių stiklų parametrai, todėl dažnai tenka tiesiog pasirinkti stiklą ir įsivertinti, ar jis tinkamas naudoti tam tikroje sistemoje. Specifikacijų lapuose galima rasti:

- optinio stiklo pralaidumo kreives, skirtas stiklo skaidrumui įsivertinti
- lūžio rodiklį
- Abės skaičių
- mechanines savybes - tankį, šiluminio plėtimosi koeficientą,

tačiau tiksli skirtingų stiklų sudėtis ir gamybos receptūra laikomi komercine paslaptimi, todėl tampa sudėtinga įvertinti be eksperimento tokius parametrus kaip lazerio pažeidimo slenksčiai ant paviršiaus ar tūrio (kurie priklauso ne tik nuo paties stiklo, bet ir nuo jo apdirbimo bei aplinkos sąlygų).

2.2 Optinės dangos

Lazeriniuose taikymuose poliruotus optinius elementus įprasta padengti optinėmis interferencinėmis dangomis, kurios būna optimizuotos konkrečiam taikymui, pavyzdžiui atspindžių maksimizavimui tam tikram bangos ilgių diapazone. Šių plonasluoksnių dangų veikimo principas paremtas šviesos interferencijos reiškiniu plonose plėvelėse. [5]

Siekiant padidinti optinių elementų pralaidumą, ant poliruoto paviršiaus dažniausiai nusodinami mažiausiai du sluoksniai su skirtingais lūžio rodikliais ir tiksliai suderintu storiu. Kitais atvejais gali būti naudojamas vienas sluoksnis, kurio lūžio rodiklis vis tiek turi skirtis nuo pagrindo, arba keli sluoksniai ir daugiau. Paprastai, norint suformuoti veidrodį, sluoksnio storis yra $\lambda/4$ kartotinis, kur λ reiškia spinduliuotės, kuriai optimizuotas optinis elementas, bangos ilgį – ši struktūra, kai optinis sluoksnių storis yra tiksliai ketvirtadalis centrinio bangos ilgio ($\lambda/4$), vadinama ketvirčio bangos optinio storio (angl. *quarter-wave optical thickness* - QWOT). Tokiu atveju tarp dviejų skirtingų lūžio rodiklį turinčių sluoksnių pasireiškia šviesos interferencija. Taip, priklausomai nuo tam tikros panaudojimo srities, gali būti keičiamas sluoksnių skaičius, jų storis, medžiagų lūžio rodikliai ir taip pat gali būti naudojama konstruktyvi arba destruktivi interferencija plonųjų plėvelių sistemoje siekiant optimizuoti optinio elemento veikimą. Pavyzdžiui, įprasti vienos bangos sferiniai lęšiai, sukurti taip, kad sumažintų atspindžius nuo kiekvieno paviršiaus, yra padengti optinėmis dangomis, kurios naudoja destruktivią interferenciją, kad slopintų atspindėtą spinduliuotę ir didintų sistemos pralaidumą. O įprasti vienbangiai veidrodžiai, kurie yra pritaikyti turėti maksimalų atspindį nuo paviršiaus, yra padengti optinėmis dangomis, kuriose interferencija yra konstruktyvi atspindyje ir destruktivi pralaidume [3], [7], [8]. Tobulėjant lazerinėms sistemoms, optinių komponentų gamybai

reikalavimai vis aukštėja. Neretai yra gaminami kelių bangų veidrodžiai, kurie skirti atspindėti dvi ar daugiau bangų vienu metu, ar dichroiniai veidrodžiai, kurie būna optimizuoti vienos bangos atspindėjimui, kitą praleidžiant. Tokie veidrodžiai būna storesni, sudaryti iš keliasdešimt sluoksnių ir sudėtingesnių dangos dizainų.

2.2.1 Paskirstyto Brego atspindžio dangos

Pasirinkus konkretų dielektrinių plėvelių storį, tampa įmanoma suformuoti interferencinio maksimumo arba minimumo sritis, pradedant nuo vakuuminio ultravioletinio (VUV) iki tolimesios infraraudonos srities (angl. *far-infrared* - FIR) [9].

Paskirstyto Brego atspindžio dangomis vadinamos tokios optinių sluoksnių struktūros, kuriose didelio n_H ir mažo n_L lūžio rodiklio poros periodiškai auginamos ant skaidraus padėklo, suformuodamos mažo pralaidumo (didelio atspindžio) zoną ties centriniu bangos ilgiu $\lambda_0 = 2(n_H d_H + n_L d_L)$ ir aukštesnėmis harmonikomis λ_0/m , kur $m > 1$. Jei tenkinama sąlyga $n_H d_H = n_L d_L$ ($\lambda_0/4$ optinio storio sluoksnių poros), bus suformuotas efektyviausias veidrodis ties λ_0 ir visomis nelyginėmis harmonikomis $\lambda_0/3, \lambda_0/5..$ [10]

Didelio atspindžio (mažo pralaidumo) zonos plotis ir maksimali vertė ties centriniu bangos ilgiu priklauso nuo didelio n_H ir mažo n_L lūžio rodiklio porų skaičiaus ir jų santykio. Kuo didesnis šis santykis ir porų skaičius, tuo didesnis formuojasi atspindys ir zonos plotis ties λ_0 [10]:

$$Atspindys = \left(\frac{1-p}{1+p}\right)^2, \text{ kur } p = \left(\frac{n_H}{n_L}\right)^{N-1} \times \frac{n_H^2}{n_S}, \quad (1)$$

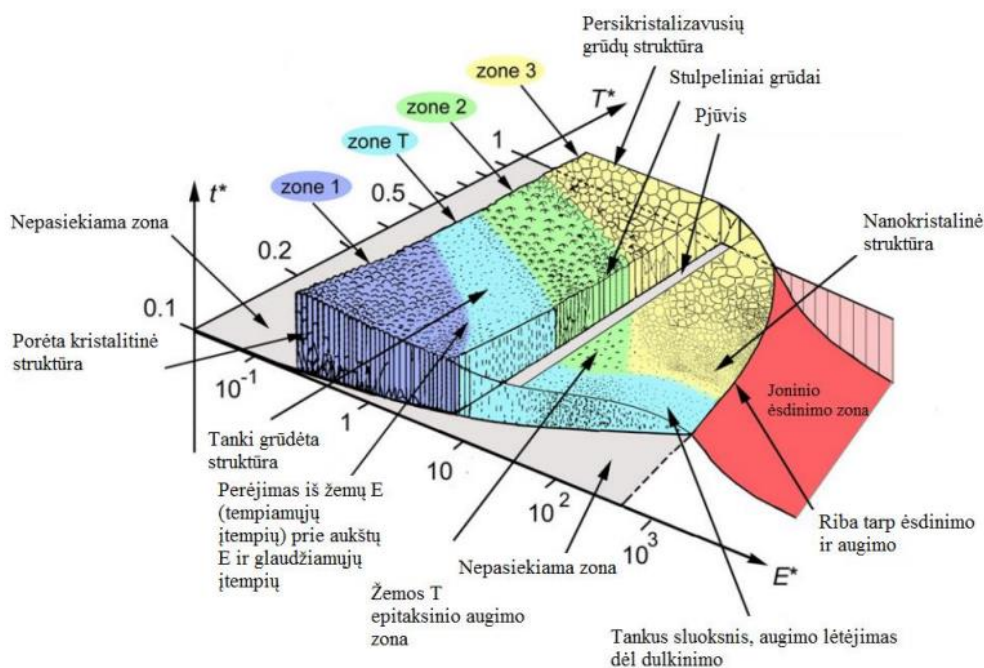
čia n_S – padėklo ant kurio formuojama danga lūžio rodiklis, N – bendras n_H ir n_L sluoksnių skaičius.

2.3 Optinių dangų formavimo technologijos

Optinių dangų formavimo technologijos yra būtinos lazerių gamintojams, nes optinės dangos gali žymiai pagerinti optinių sistemų veikimą. Optinės dangos gali būti suformuojamos įvairiais plonų sluoksnių auginimo metodais. Priklausomai nuo optinių dangų savybių pasirenkama tinkamiausia dengimo technologija. Naudojami daugelis nusodinimo procesų, žinomų kaip fizinis nusodinimas iš garų (angl. *physical vapor deposition* - PVD), kai medžiaga išskiriama iš šaltinio ir perkeliama ant pagrindo paviršiaus. Pagrindinės šio tipo optinių dangų formavimo technologijos yra elektronpluoštis garinimas (angl. *electron beam evaporation* - e-beam), jonapluoštis dulkinimas (angl. *ion beam sputtering* - IBS) ir magnetroninis dulkinimas (angl. *magnetron sputtering* - MS). Taip pat neretai naudojama elektronpluoščio garinimo technologija su jonų tankinimu (angl. *ion*

assisted deposition - IAD). Sekančiuose poskyriuose bus orientuojamasi į pirmąsias dvi minėtas dangų technologijas.

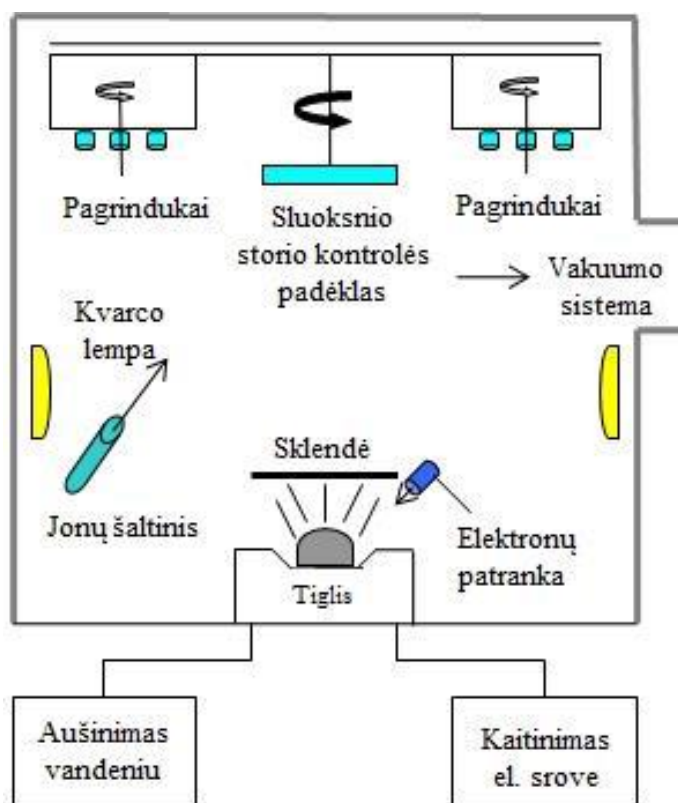
Vienas iš svarbiausių dangų dengimo technologinių parametru yra medžiagos dalelei perduodama energija, proceso temperatūra ir iš jų sekantis paviršinės dalelės paviršinis mobilumas. [11] Sluoksnio morfologija, bendru atveju, priklauso nuo padėklo temperatūros, medžiagos dalelių ir jonų energijos, joninės srovės tankio asistavimo metu, vakuumo sąlygų. 1 pav. pavaizduotas apibendrintas sluoksnių morfologijos formavimo modelis, kuriame apibrėžti parametrai: temperatūra T^* , energija E^* , storis t^* (skalės logaritminės). Didėjant pagrinduko temperatūrai, stebimas perėjimas iš porėtos struktūros (“zone 1”) prie tankiai supakuotų pailgų granulių (“zone T”), stulpelių pavidalo granulių (“zone 2”) ir perkristalizuotos zonos (“zone 3”). Joninis sutankinimas leidžia pasiekti panašią morfologiją tik su kitais parametru (temperatūros ir energijos) rinkiniais. Apibendrintame modelyje zonos yra atskirtos įstrižų lygiagrečių linijų. Toliau didinant E^* prasideda santykinis sluoksnio augimo lėtėjimas dėl dulkinimo proceso. [12]



1 pav. Dangos struktūrų apibendrintas zonų modelis [12]

2.3.1 Elektronpluoštis garinimas

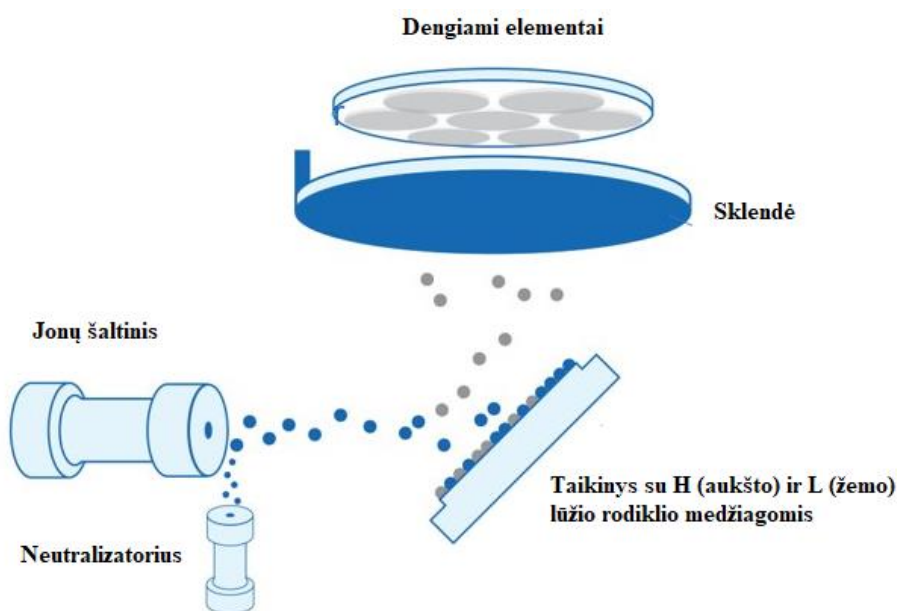
Elektroninio pluošto garinimas yra metodas, naudojamas plonasluoksnėms dangoms, sudarytomis iš metalo, oksido ar fluoro junginių, sukurti. Iš pradžių pasirinkta medžiaga yra kaitinama elektronais, kol pasiekia garavimo tašką. Elektronų srautas generuojamas naudojant šildomą volframo siūlą, o nuolatinis magnetas naudojamas tiksliai reguliuoti elektronų srautą. Sąveikaujant magnetiniams ir elektriniams laukams, elektronai nukreipiami į numatytą paviršių, todėl jis garuoja. Pagrindinis šios procedūros principas yra elektronų kinetinės energijos pavertimas šilumine energija. Tada išgaravusi medžiaga kondensuojasi ant aplinkinių paviršių, įskaitant optinio elemento pagrinduką, sudarydama optinę dangą. Šis procesas vyksta elektronpluoščio garinimo kameroje, kur susidaro vakuuminė aplinka. Vakuumo buvimas yra labai svarbus norint, kad nepageidaujamos priemaišos nepakenktų optinės dangos kokybei. Be to, jis palengvina greitesnio ir tikslesnio garų pluošto sukūrimą, vienu metu išgarinant kelias medžiagas. Vėliau visas procesas kartojamas naudojant kiekvieną iš turimų šaltinių. [13] Šioje garinimo technologijoje tiek elektronai, tiek pačios dalelės, tiek garuojanti medžiaga neturi didelių energijų, lyginant su kitais PVD procesais (dalelių energija yra ~ 0.1 eV), todėl gaunamos porėtos dangos struktūros. Poringumas gali skirtis priklausomai nuo medžiagos, pagrindo temperatūros, liekamojo slėgio nusodinimo kameroje, nusodinimo greičio ir garų kritimo ant pagrindo kampo.



2 pav. Elektronpluoščio garinimo veikimo schema [3]

2.3.2 Jonapluoštis dulkinimas

Medžiagos dulkinimas yra vienas iš įvairių procesų, vykstančių medžiagoje, kai ją veikia didelės energijos jonai arba neutralūs atomai [14]. Šis reiškinys – didelės energijos jonų ar neutralių atomų judesio kiekio momento perdavimas medžiagos (kuri vadinama taikiniu) paviršiniams atomams. Jei jonų ar atomų kinetinė energija didesnė už taikinio medžiagos atomų ryšio energiją, jie yra išmušami ir vyksta dulkinimo procesas. 3 paveiksle parodyta jonų pluošto dulkinimo proceso schema. Jonų šaltinis yra nukreiptas į taikinį, padėtą maždaug 45 laipsnių kampu, kad išstumti medžiagos atomai galėtų nusėsti ant optinio stiklo. Norėdami padidinti dangos tankį, papildomi jonai, paprastai Ar arba Xe jonai, dulkinimo proceso metu bombarduoja besiformuojančią dangą. Nuolatinis taikinio bombardavimas teigiamais jonais sukelia teigiamo elektros krūvio kaupimąsi, todėl jonams neutralizuoti reikia naudoti elektronų šaltinį. Šis dengimo metodas plačiai naudojamas formuojant plonus sluoksnius, turinčius palankias optines savybes įvairioms optinėms dangoms [15].



3 pav. Jonapluoščio dulkinimo schema

Lyginant su e-beam garinimo technologijomis, IBS technologija gaunama danga yra itin lygi, o savo savybėmis beveik identiška grynai medžiagai. Taip pat yra ir kitų IBS technologijos privalumų – galimybė padengti dangas ant temperatūrai jautrių pagrindų, gaunamos dangos yra itin mažo poringumo, dėl kurių beveik nėra vandens adsorbcijos ir spektrinio poslinkio. [16]

Ši technologija taip pat turi ir savo minusų, lyginant su elektronpluoščiu garinimu. IBS technologija yra sunkiau pritaikoma didelių komponentų dengimui bei taip pat yra brangesnė komerciškai, lyginant su e-beam technologija dėl kelis kartus lėtesnio nusodinimo tempo.

2.4 Nuostoliai optiniuose elementuose

Nuo pat lazerinės technologijos atsiradimo optinių komponentų galios valdymo apribojimai visada buvo kliūtis kuriant lazerines sistemas ir taikomas programas, veikiančias dideliu galios lygiu ir norint geresnės lazerio pluošto kokybės. Idealiu atveju elemento veikimas yra aprašomas (2) išraiška. Veidrodys, padengtas interferencinėmis dangomis turi artėti į 100% atspindžio vertę, tačiau dėl optinių savybių niekada nepasiektų 100% - jis būtų papildomai apribotas sklaidos, sugerties bei pralaidumo:

$$R + T + S + A = 100\%, \quad (2)$$

čia R – atspindys, T – pralaidumas, S – sklaida, A – sugertis.

Įprastai lazerinėje sistemoje talpiname ne vieną ir ne kelis optinius komponentus. Kadangi visi jie būna apriboti tam tikros sklaidos ir sugerties parametru – tai prisideda prie visos sistemos efektyvumo mažėjimo ir gali paveikti naudojamų optinių komponentų ilgaamžiškumą. Tobulėjant lazerinėms sistemoms, dažnai siekiama apibrėžti kiekvieną jų sudarančio optinio komponento veikimą. Tokiais atvejais privaloma suprasti, kada kiekvienas parametras yra svarbus, kad būtų kiek įmanoma tikslingiau optimizuoti lazerinę sistemą.

2.4.1 Optinėmis dangomis padengto padėklo sklaidos sąlygoti nuostoliai

Yra žinoma, kad optinių dangų sklaidos šaltinis yra nelygumai kiekvienoje daugiasluoksnėje interferencinėje dangoje [17]. Egzistuojant sklaidos nuostoliams, realus pavienių optinių paviršių atspindžio koeficientas R_s yra mažesnis negu idealiu atveju R_0 . Atspindys aprašomas tokia išraiška ir priklauso nuo paviršiaus šiurkštumo σ [18]:

$$R_s = R_0 \exp \left[- \left(\frac{4\pi\sigma}{\lambda} \right)^2 \right], \quad (3)$$

$$\text{čia } \sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Z_i - \bar{Z})^2}. \quad (4)$$

Čia Z_i – i -ojo nelygumo aukštis, \bar{Z} – vidutinis aukštis, N – matavimo sričių skaičius.

Tuomet visuminės sklaidos vertė S gali būti užrašyta:

$$S = R_0 - R_0 \exp \left[- \left(\frac{4\pi\sigma}{\lambda} \right)^2 \right] \approx R_0 \left(\frac{4\pi\sigma}{\lambda} \right)^2. \quad (5)$$

Didinant optinių dangų sluoksnių skaičių, didėja viso optinio elemento sklaidos nuostoliai ir tokių dangų sklaidos nuostolių nagrinėjimas yra sudėtingesnė problema, nes šiuo atveju visuminiai integruoti nuostoliai yra visų sluoksnių kryžminė koreliacija. [18] Tipiškos didelio atspindžio dielektrinių vienbangių veidrodžių sklaidos nuostolių vertės siekia 0.2%. [18] Veidrodžių, kurie pritaikyti vienu metu atspindėti daugiau nei vieno bangos ilgio lazerinę spinduliuotę būna storesni ir sudaryti iš sudėtingesnių dangos dizainų. Tokiu atveju interferencinių dangų sklaidos savybės yra daug sudėtingesnės, pagrindiniai veiksniai yra šie:

- visų sluoksnių nuo pagrindo iki viršutinio paviršiaus šiurkštumas
- elektrinio lauko pasiskirstymas optinėje dangoje
- defektai, esantys ant pagrinduko, optinės dangos viduje ar viršutiniame dangos sluoksnyje

Stebima sklaida optiniuose komponentuose yra šių efektų derinio ir sąveikos rezultatas ir paprastai labai priklauso nuo šviesos bangos ilgio ir daugiasluoksnio dizaino. Dėl šios priežasties neretai susiduriama su iššūkiais, kaip optimizuoti sklaidos nuostolius, kuomet optinės dangos yra daugiasluoksnės. Daugelyje teorinių darbų neatsižvelgiama į daugkartinę sklaidą pačiuose dangos sluoksniuose, todėl dėl daugybės galimų sklaidos šaltinių ir jų tarpusavio ryšių daugiasluoksnės sklaidos praktiškai neįmanoma numatyti be išsamių žinių apie visus šiuos įtakos veiksnius. [18] Sprendžiant šią problemą svarbu tiesiogiai išmatuoti dangų sklaidą atitinkamuose spektro diapazonuose. Tada sklaidos teorijos gali būti naudojamos analizuojant pastebėtą sklaidą, nustatyti atitinkamus sklaidos modelius nagrinėjamai problemai ir, remiantis šiais modeliais, numatyti kitų parametrų rinkinių sklaidos savybes. [17]

Šviesos sklaida ne tik riboja lazerinių sistemų generuojamos spinduliuotės galią, bet ir yra triukšmo šaltinis optinėse sistemose, nes sklaida skirtinguose sklaidos kampų diapazonuose pablogina vaizdo kokybę [17]. Be to, kadangi lazerinės dangos retai naudojamos idealioje aplinkoje, jos bus veikiamos įvairiausių aplinkos trikdžių – nuo vakuumo iki aukštos temperatūros ir drėgmės, net ir esant dideliam dilimui. Taigi, eksploatacinių savybių patvarumas taip pat yra gyvybiškai svarbus. Sklaidos matavimai atliekami naudojant sklaidos matuoklius, prietaisus, kuriuose naudojami lazeriniai šaltiniai ir integruojančios sferos. Kadangi sklaida priklauso nuo bangos ilgio, matavimai

taikomi tik naudojant lazerį, kuris veikia tuo pačiu bangos ilgiu kaip ir bandomasis lazeris, ir atidžiai įvertinus pluošto savybes ir reikalavimus tiek lazeriams, tiek bandymo sąlygoms.

2.4.2. Optinėmis dangomis padengto padėklo sugerties sąlygoti nuostoliai

Sugerties nuostoliai mažina lazerio našumą ir gali neigiamai paveikti lazerio patikimumą, bei eksploataavimo laiką. Kadangi krentanti lazerio spinduliuotė sąveikauja su optiniais komponentais, dalis spinduliuotės sugeriama ir paverčiama šiluma. Jei optiniuose elementuose susikaupia pakankamai šiluminės energijos, ji gali deformuoti elementus, pakeisti jų lūžio rodiklį (sukurti terminio lęšio efektą) - tai gali bloginti pluošto kokybę. Tinkamai neįvertinus, šiluminis sugerties poveikis gali paspartinti optikos degradaciją ir gali sukelti komponentų ar visos sistemos gedimą. [19]

Tokiose sistemose kaip medicininiai lazeriai, absorbcijos metu sukuriama šiluma gali būti pagrindinis veikimo apribojimas. Kadangi šių sistemų galia ir ilgaamžiškumas priklauso apribojant ir valdant šilumos šaltinius, optikos gamintojų ir vartotojų atliekami sugerties matavimai yra viena esminių metrologijos galimybių. [20] Fototerminė bendrojo kelio interferometrija (angl. Photothermal Common Path Interferometry - PCI) yra lankstus ir labai jautrus metodas tiek nedengtų pagrindukų, tiek optinėmis dangomis padengtų elementų sugerčiai matuoti. Šis metodas gali išmatuoti sugerties lygį nuo 10 procentų iki mažesnio nei 0.1 ppm (0.00001%). PCI matavimai yra pagrįsti vietinio šilimo poveikiu, atsirandančiu dėl sugerties plonose plėvelėse arba pagrindukuose, pvz., tūrio plėtra arba lūžio rodiklio pasikeitimais priklausomai nuo temperatūros. Šio matavimo metu kaupinimo ir zondavimo spinduliai yra sukertami ant mėginio paviršiaus. Kaupinimo spindulys yra moduluojamas tam tikru dažniu, sukuriant periodiškai kintantį terminį lęšį, kurio zondinis spindulys yra veikiamas. Iškraipytas bangos frontas centrinėje zondo pluošto dalyje sklidimo metu trukdo jo nepaveiktai daliai ir tada pasiekia vaizdavimo įrenginį, kuriame jis įrašomas naudojant užrakinimo stiprintuvą. Bandinio sugertis apskaičiuojama naudojant sukalibruotus duomenis iš etaloninio mėginio, kurio sugertis būna jau žinoma. [21]

2.5. Defektai optinėse dielektrinėse dangose

Optinių dangų garinimo proceso metu dažniausiai generuojami taškiniai arba kitaip vadinami mazginiai defektai. Jų užuomazga gali tapti ir padėklo paviršiuje esantis defektas ar po paviršiaus valymo paliktas nešvarumas bei dulkės - ant padėklo nusėdusios įvairios priemaišos ar net stambesnės dielektrinės dalelės gali sukelti įvairių tipų dangos defektus. Net ir viename sluoksnyje gali susidaryti defektai, atsirandantys nuo mažų, bet didesnių už dielektriko molekules priemaišų arba net nuo tos pačios dielektrinės medžiagos lašelio. [18] Dėl to aplink priemaišą gali susidaryti iškilimai, o vėliau

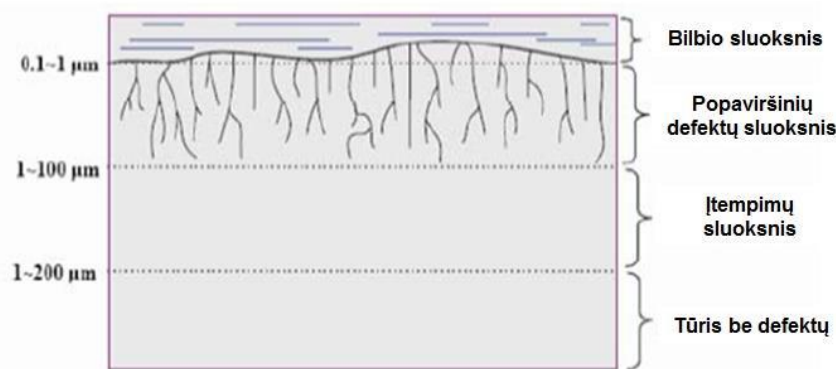
– ir grioveliai, kuriame kai kurios molekulės, kurios turėjo užimti griovelį, nusėda ant priemaišos. Tęsiant dengimo procesą, su kiekvienu papildomu sluoksniu, jau esantys defektai gali inicijuoti naujų defektų susidarymą, dar labiau iškraipydami dangos paviršių. Vadinasi, dengiant vėlesnius sluoksnius, šie iškraipymai plinta visoje dangoje. Panašūs defektai gali būti sukurti dėl taršos proceso metu (W ar kitų metalinių elementų priemaišos iš asistavimo šaltinių ar elektronų patrankų). Šie defektai gali neigiamai veikti veidrodžio parametrus - fokusuoti lazerio spinduliuotę, didinti spinduliuotės sklaidą, skatinti drėgmės prasiskverbimą, bei mažinti šilumos laidumą. Šių defektų atsiradimas dažniausiai pastebimas e-beam garinimo technologijoje, o IBS technologijos dangos gali sušvelninti jų atsiradimą dėl esančios didesnės molekulių energijos ir jų tankumo proceso metu.

2.5.1. Popaviršiniai defektai

Šiuolaikinėse lazerinėse technologijose būtini aukštos kokybės optiniai elementai, turintys minimalius sugerties ir sklaidos nuostolius, bei didelį atsparumą lazerio spinduliuotei. Norint pasiekti optinę kokybę, optiniai stiklai turi atitikti specifinius kriterijus, įskaitant mažą paviršiaus šiurkštumą, mažą optinę sugertį, didelį plokštiškumą ($<\lambda/10$ ar geriau), bei mažą defektų tankį. Norint pasiekti šias savybes, dažnai reikia apdoroti optinę medžiagą, dažniausiai stiklus ir kristalus juos šlifuojant bei poliruojant. [3] Kai optinės dangos yra dengiamos ant skaidrių padėklų iš garų fazės, pagrindo paviršiaus kokybė ir švara tampa kritiniais parametrais. Bet kokie nešvarumai, poliravimo netikslumai, rėželiai, duobelės ar kiti defektai, kurių nepavyko pašalinti ar išvalyti prieš optinės dangos dengimo procesą, lieka po ja. Šios liekanos ir gali sudaryti lazerinės pažaidos formavimosi centrus, didinti sklaidą bei sugertį [7].

Poliruojant optinius elementus, neišvengiama daugybės rėžių bei įtrūkimų, kurie gali veikti kaip sklaidos centrai. Šie trūkumai atsiranda dėl poliravimo judesių, poliravimo mišinio bei poliruojamos medžiagos abrazyvinių dalelių. Šios dalelės tvirtai prisitvirtina prie elemento paviršiaus, sudarydamos tai, kas paprastai žinoma kaip Bilbio sluoksnis, kaip aprašyta literatūroje [3]. Paprastai šie netobulumai, kurie lieka paslėpti po elemento paviršiumi, yra vadinami popaviršiniais defektais (angl. *sub-surface damage* - SSD).

Popaviršinių defektų, besitęsiančių iki 200 μm gylio, topografija buvo išsiaiškinta tyrimų metu Nacionalinėje Lorencio Livermoro Laboratorijoje (*Lawrence Livermore National Laboratory*). Ant optinio elemento poliruoto paviršiaus iki 1 μm yra Bilbio sluoksnis, sudarytas iš poliravimo likučių. Iki 100 μm - įtrūkimai ir gilūs rėžiai, kurie daliniai užpildyti poliravimo medžiaga, iki 200 μm – įtrūkių ir rėžių masyvų sukeltas įtempių sluoksnis. Gilesniuose nei 200 μm sluoksniuose medžiaga yra be defektų ir pasižymi visomis įprastomis tūrinėmis savybėmis [6], o principinė šio pasiskirstymo schema 4 paveikslėlyje.



4 pav. Poliruoto optinio elemento skerspjūvis [3]

2.6. Optinių dangų paviršiaus šiurkštumas

Paviršiaus šiurkštumas – tai didelio tankio ir ne didesnis kaip nuo kelių angstromų iki kelių dešimčių nanometrų nuokrypis nuo idealios paviršiaus formos. Paviršiaus šiurkštumas gali būti naudinga metrika stebint elementų paviršiaus pasikeitimą jų gamybos metu – tiek poliravimo etape, tiek po optinių dangų, kaip įprasta optinių komponentų kokybės užtikrinimo priemonė. Vienas iš šviesos sklaidos šaltinių optinėse plonose plėvelėse paprastai yra paviršiaus šiurkštumas. Jis priklauso nuo daugybės parametru, kurie gali atsirasti nuo optinio komponento paviršiaus arba uždengtos optinės dangos – poliravimo žymės ir dėmės, defektai, dulkės, įbrėžimai bei įdubimai. Net itin preciziškai nupoliruoti paviršiai turi tam tikrų įbrėžimų ir įdubimų, kurie gali turėti reikšmės optinio komponento sklaidos nuostoliams. Kitas potencialiai reikšmingas sklaidos šaltinis yra optinės dangos šiurkštumas. Tai gali būti nelygumai tarp pagrindo ir dangos, taip pat tarp sluoksnių dielektrinėje dangoje. Galima tikėtis, kad kiekvienas dangos sluoksnis veiks nepriklausomai ir išsklaidys panašų kiekį šviesos. Atsižvelgiant į tai, kad šiurkštumas keičiasi nuo vieno paviršiaus iki kito, tai rodo, kad kelių sluoksnių pluoštai išsklaidytų daug didesnę šviesos dalį nei pavieniai sluoksniai, tačiau tai nėra tiesa. Atskiri sluoksniai veikia kartu, o ne nepriklausomai, o koreliacijos tarp sluoksnių laipsnis yra svarbesnis nei tikrasis atskirų dangos sluoksnių šiurkštumas. Danga, kurioje visi sluoksniai tarpusavyje puikiai koreliuoja, gali būti modeliuojama kaip vienas paviršius. Jei sluoksniai nėra idealiai koreliuojami, kaip paprastai, sklaidos vertė yra didesnė, nei kitaip prognozuojama pagal interferencijos aproksimaciją. [22]

2.6.1. Paviršiaus šiurkštumo matavimo metodai

Paviršiaus šiurkštumo matavimus atlikti galima su daugeliu prietaisų, kurie pagrinde gali veikti nekontaktiniu ar kontaktiniu metodu. Naudojant nekontaktinį metodą, prietaisas neliečia išmatuoto paviršiaus, todėl jo negadina ir nebraižo. Šiam metodui naudojami įvairūs optiniai prietaisai – optiniai profilometrai, interferometrai, ar atominės jėgos mikroskopai. Matavimo prietaisai, naudojantys kontaktinį metodą, liečia išmatuotą paviršių antgaliu (lietuku arba adata).

Dėl išstobulintų procesų paviršiai gali tapti ypač mažo šiurkštumo, kuriuos sunku arba neįmanoma apibūdinti naudojant tradicinius interferometrų ar šiurkštomačius, kadangi jie gali fiksuoti nelygumus tik mikronų lygmenyje, todėl vis dažniau rinkoje yra naudojami atominių jėgų mikroskopai (angl. *atomic force microscopy* - AFM) ar optiniai profilometrai. Šie matavimo metodai suteikia 2D ar 3D paviršiaus aukščių žemėlapi, kurie duoda informaciją apie paviršiaus topografiją.

Paviršiaus profilometrija yra metodas, naudojamas topografiniams duomenims iš paviršių gauti ir yra pagrįstas nekontaktine paviršiaus analizės technika. Duomenų gavimas naudojant šią techniką yra greitas, palyginti su kontaktiniu režimu, taip pat jį galima gauti didesniuose plotuose. Šis metodas yra neardomasis, kuris nepažeidžia mėginio, todėl mėginys gali būti naudojamas tolesnei analizei. Optinis profilometras yra tam tikro tipo mikroskopas, kuris naudoja šviesos šaltinį paviršiaus topografijai analizuoti. Pluošto skirstytuvas padalija šviesą iš profiliavimo lempos į du takus, kur vienas kelias nukreipiamas į paviršių, o kitas į atskaitos veidrodį. Šių dviejų takų atspindžiai sujungiami ir projektuojami į matricinį detektorių, o rekombinuotų pluoštų kelio skirtumas yra maždaug keli bangos ilgiai. Zygo kompanijos profilometru vertikalią skiriamąją gebą galima gauti kelių angstromų eilės, o šoninė skiriamoji geba priklauso nuo objektyvo ir paprastai svyruoja nuo 0,3 iki 8 mikronų. [23]

Tuo tarpu atominės jėgos mikroskopija yra metodas, leidžiantis gauti itin didelės raiškos bandinio paviršiaus vaizdą. Pagrindiniai darbo režimai gali būti kontaktinis, nekontaktinis ir dinaminis kontaktinis (vibruojantis zondas). Atominės jėgos mikroskopas yra universaliausias prietaisas tarp įrenginių su skenuojančio zondo technologija. Šių prietaisų veikimo principas pagrįstas pastovios zondo ir mėginio paviršiaus sąveikos jėgos užtikrinimu. Veikimo metu atominės jėgos mikroskopas labai aštriu galu (zondų) paliečia bandomąjį paviršių ir pradeda judėti išilgai jo paviršiaus. Skenuojančio zondo judėjimo vertikalia kryptimi trajektorija atitinka tiriamo paviršiaus formą. Skenavimo metu stengiamasi užtikrinti minimalią sąveikos jėgą tarp zondo ir tiriamo paviršiaus. Pastovi sąveikos jėga užtikrinama matuojant zondo poslinkį ir grįžtamojo ryšio pagalba valdant pjezoelektrines pavaras, kurios naudojamos bandinio padėties nustatymui. Jei sąveikos jėgos didėja, mėginys nuleidžiamas, jei mažėja – pakeliamas. [24]

2.7. Optinių elementų lazerinė pažaida

Lazerio sukeltos pažaidos slenkstis (angl. *Laser Induced Damage Treshold* – LIDT) susijęs su riba, kurią pasiekus įvyksta negrįžtami medžiagos pakitimai, yra medžiagos fizinė charakteristika. Tai reiškia kritinį energijos intensyvumą tam tikram ploto vienetui, kuris inicijuoja tokius pokyčius. Šis slenkstis nustato viršutinę ribą, kurią viršijus, veikiant lazerio spinduliuotei, keičiasi medžiagos optinės savybės [25]. Lazerinės spinduliuotės pažeidimo slenkstis yra aprašomas formule:

$$H = \frac{E_{maks}}{A_{eff}}, \quad (6)$$

kur E_{maks} – impulso energija kritusi į paviršių, kuri dar nesukelia pažeidimo, o A_{eff} – efektyvusis pluošto plotas.

Kuo didesnė fotono energija, tuo stipriau jis veiks medžiagą, o šiuo atveju – dielektrikus. Pastarieji turi baigtinį draustinių energijų juostos plotį. Jei vieno ar kelių fotonų, krentančių į dielektriką, energija viršija baigtinį draustinės energijos plotį, elektronas persikels į laidumo juostą ir medžiaga tampa sužadinta.

Eksperimentiškai medžiagos pažeidimo slenkstį galima aprašyti įvairias standartuose nurodytomis procedūromis. Šie standartai nurodo, kad esant toms pačioms lazerio spinduliuotės sąlygomis bandinys turi būti paveiktas ne mažiau kaip dešimtyje skirtingų sričių. Kadangi optinio komponento paviršiuje gali būti defektų skirtingose vietose, matavimai yra kartojami didinant ar mažinant lazerio spinduliuotės energijos intensyvumą ir kai kurios sritys gali būti pažeidžiamos, o kitos ne. Pažeidimo tikimybė gali būti įvertinama tik atlikus keletą šių matavimų – ji apskaičiuojama padalinus pažeistų sričių skaičių iš bendrų matavimų skaičiaus. Pažeistos sritys yra dažniausiai nustatomos Nomarskio mikroskopu, naudojant tamsaus lauko režimą. Standartuose nurodyta, kad mikroskopo didinimas turi būti ne mažesnis nei 100-150 kartų. Jei esant tokiems didinimams lazeriu paveiktose srityse joks pakitimas nestebimas, sakoma, kad pažeidimas neįvyko. Dažniausiai optinių komponentų naudojime lazerinė spinduliuotė yra veikiamą viename taške, todėl vienas iš standartų plačiausiai naudojamas fotonikos rinkoje yra vadinamas S-į-1 slenkščiu (ISO 11254-1) – kai kiekviena bandinio vieta yra eksponuojama serija iš S identiškų pasikartojančių lazerio impulsų dozių.

Medžiagos lazerinė pažaida turi didelę reikšmę kaip bet kurio optinio komponento specifikacija. Renkantis optinės sistemos elementus, labai svarbu atsižvelgti į tai, kad jų atsparumas pažeidimams laikui bėgant palaipsniui mažėja dėl ilgesnio spinduliuotės ar aplinkos veiksnių poveikio. Ilgalaikis lazerio spinduliuotės poveikis, ypač esant ilgoms impulsų trukmėms

(nanosekundžių skalėje), sukelia vietinį kaitinimą, priskiriamą spinduliuotės absorbcijai ir yra laikomas pagrindiniu mechanizmu, lemiančiu lazerio sukeltą medžiagos pažeidimą [26].

3. Tyrimo ir matavimų metodika

3.1. Optiniai pagrindukai

Šiam tyrimui atlikti buvo naudojami 6.35 mm storio ir 25.4 mm diametro Corning 7980 0F rūšies lydyto kvarco optiniai pagrindukai iš UAB Altechna. Visi eksperimente naudoti bandiniai buvo poliruojami tokiomis pačiomis sąlygomis, kontaktinio poliravimo metodu. Poliravimo metu naudota abrazyvinė medžiaga - CeO₂. Atlikus poliravimo ir pirminio plovimo procedūras, elementai buvo vertinami vizualiai, bei taip pat buvo matuojamas elementų paviršiaus šiurkštumas (RMS), naudojantis *Verifire (Zygo)* interferometru bei optiniu profilometru *Zegage (Zygo)*.

Pagrindo paviršių švarumas prieš dengimą yra lemiamas jo sėkmei, kadangi bet koks paviršiaus užteršimas turi įtakos dangos sukibimui ir sukelia defektus. Tokio tipo problemų sprendimui reikalingos gerai išbandytos proceso technologijos patogioje, saugioje ir ekonomiškai veikiančioje įrangoje. Tad šie pagrindukai buvo valomi cheminiais tirpalais, plaunami ultragarsinėje vonelėje bei džiovinami po jos - pilna plovimo procedūra yra aprašyta [27] straipsnyje.

3.2 Optinių dangų procesai

Šių dvibangių aukšto atspindžio veidrodžių dangos buvo projektuojamos komerciniam medicininių lazerių gamintojui ir dengimo procesai atliekami įmonėje Altechna. Kadangi darbas buvo orientuotas į komerciškai įgyvendinamo ir santykinai ekonomišką metodo pritaikymą masinės gamybos linijoje, todėl optinių dangų procesams viena iš technologijų buvo pasirinkta garinimo elektronų pluoštu technologija. Ši technologija yra plačiai taikoma optinių dangų dengimui ir santykinai nebrangi. Antroji pasirinkta technologija buvo IBS – ši yra brangesnė lyginant su e-beam technologija dėl kelis kartus lėtesnio nusodinimo tempo, bei taip pat keletą kartų mažesnės talpos. Kadangi talpa priklauso nuo įrangos dydžio, o ne nuo pačios technologijos, tad šiuo atveju talpų skirtumas yra labiau specifinis naudotoje įrangoje. Pagal kliento reikalavimus, dangos formulė buvo apibrėžta:

HR (R_{sp}>99%) @ 1064 + 532 nm, R>70% @ 635 nm, AOI 45°, kur HR – aukštas atspindys, R – atspindys, o AOI – kritimo kampas.

Šie veidrodžiai tuo pačiu metu turėjo tenkinti tam tikrą atsparumą lazerinei spinduliutei:

- LIDT: $> 20 \text{ J/cm}^2$ (6 ns) @ 1064 nm, 100 Hz
- LIDT: $> 10 \text{ J/cm}^2$ (6 ns) @ 532 nm, 100 Hz.

Kadangi reikalavimai šioms veidrodžiams buvo aukšti tiek atspindžio vertėms, tiek LIDT – buvo siekiama įvertinti, kuri technologija ir koks dangų dizainas būtų tinkamiausias šių veidrodžių gamybai - naujo produkto išdirbimui medicininių lazerių gamintojų rinkai.

Prieš atliekant dengimo procesus buvo pasirinkti du skirtingi dizainai: pirmasis dizainas buvo paruoštas HfO₂ ir SiO₂ sluoksnių pagrindu, o antrasis su Ta₂O₅ ir SiO₂ medžiagomis, kartu suformuojant papildomus viršutinius dangų sluoksnius su HfO₂. Šios dvi dangos ir dengimo technologijos darbe buvo lyginamos tarpusavyje. Svarbu paminėti, jog tyrime buvo orientuojamasi tik į atliktus matavimus ir rezultatus, susijusius su 532 nm bangos ilgiu.

Ta₂O₅ pasižymi itin dideliu lūžio rodikliu ($n=2,13\pm 0,1$, kai $\lambda=587.6 \text{ nm}$) [28] ir turi geriausią santykį tarp lūžio rodiklio kontrasto bei lazerinio atsparumo. Ši optinė medžiaga naudojama optinėms dangoms formuoti nuo 0,3 μm iki 4 μm spektriniame diapazone. Hafnio oksidas pasižymi dideliu lūžio rodikliu ($n=1,89\pm 0,1$, kai $\lambda=587.6 \text{ nm}$) [29] ir ši medžiaga dažnai renkama skaidrinančioms, didelio atspindžio bei poliarizuojančioms optinėms dangoms formuoti. Šios dvi medžiagos yra vienos populiariausių formuojant įvairaus tipo dangas kaip aukšto rodiklio medžiagos, kadangi yra ištirtos dangos gamintojų plačiausiai. Šios medžiagos yra dažnai lyginamos tarpusavyje dėl savo panašių charakteristikų, nors ir skiriasi medžiagos elektronų draustinės energijos juosta. SiO₂ dėl savo fizinių savybių ir mažos kainos plačiai naudojamas beveik visose daugiasluoksnėse dangose kaip mažo lūžio rodiklio medžiaga ($n=1,45\pm 0,02$, kai $\lambda=587.6 \text{ nm}$) [30]. Ši optinė medžiaga naudojama optinėms dangoms formuoti nuo 0,2 μm iki 5 μm spektriniame diapazone.

Po elementų dengimo procesų, veidrodžiai buvo pakartotinai vertinami vizualinėje patikroje pagal MIL-PRF-13830B standartą, siekiant įvertinti kaip optinės dangos paveikia elementų švarą ir kokybę. Toliau buvo atliekami spektro matavimai atspindyje ir pralaidume *Photon RT* spektrometru, siekiant išsiaiškinti ar spektriniai reikalavimai buvo pasiekti. Veidrodžiams taip pat buvo atliekamas optinio rezonatoriaus gesimo spektroskopijos (angl. cavity ring down spectroscopy – CRD) matavimas pakartotiniam atspindžiui įvertinti, sugerties bei sklaidos matavimai. Toliau gauti rezultatai buvo analizuojami tiriant optinių komponentų bei monosluoksnių šurkštumus, bei vertinamas pagrindukų atsparumas lazerinei spinduliutei įmonėje Lidaris.

4. Tyrimo rezultatai ir jų aptarimas

4.1. Vizualinė paviršiaus kokybės patikra

Viena iš pagrindinių optinių elementų savybių, lemiančių jų kokybę ir ilgaamžiškumą yra paviršiaus kokybė bei švara. Visų optinių langelių paviršiaus kokybė prieš dangas buvo įvertinta 20-10 S-D pagal MIL-PRF-13830B standartą, kuris nusako rėžių (angl. scratch – S) ir duobučių (angl. dig – D) kiekį bei dydį poliruotame paviršiuje. Pirmasis skaičius nurodo didžiausią leistiną įbrėžimo plotį mikronais, o antrasis skaičius – didžiausią duobutės skersmenį šimtosiomis milimetro dalimis. Prieš kiekvieną matavimą optinis elementas yra mechaniškai nuvalomas, naudojant specialius optikos valymo reikmenis. Pilnas elementų vertinimas prieš ir po dangų procesų pateiktas 2 lentelėje:

2 lentelė. Kokybės vertinimas prieš ir po skirtingų dengimo procesų

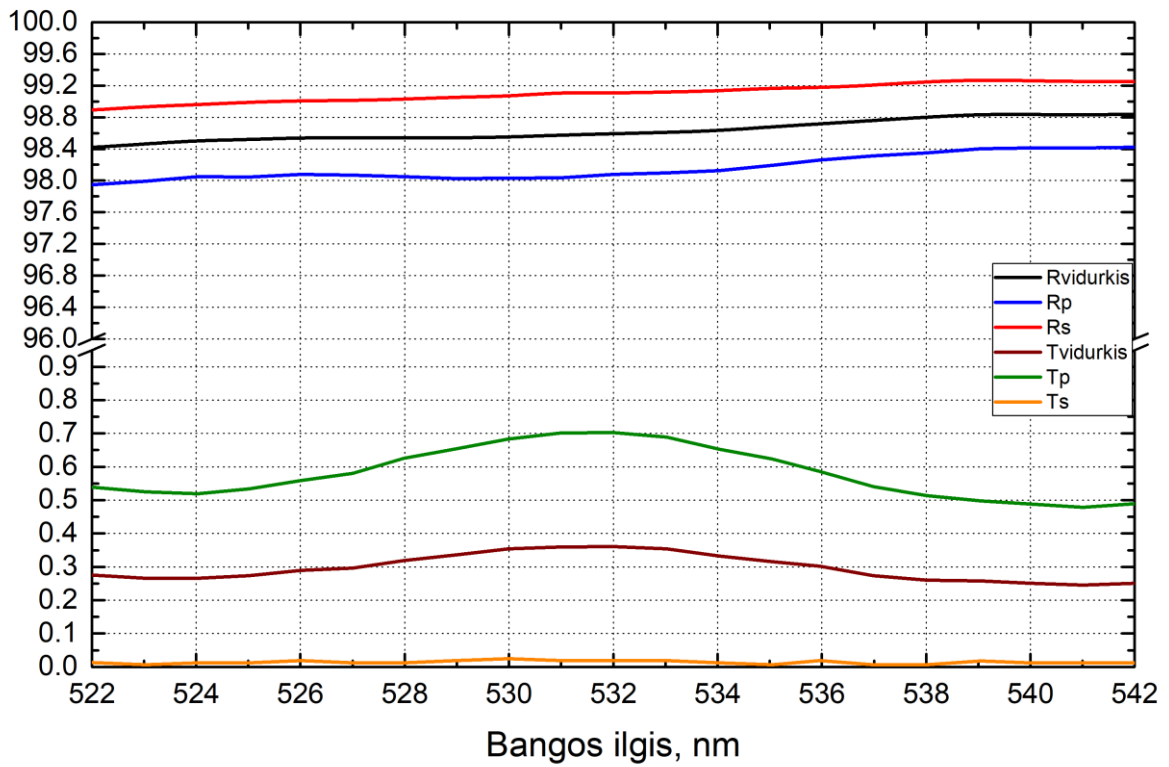
Technologija	S-D prieš dangą	S-D po dangos
e-beam (HfO ₂ /SiO ₂)	20-10	20-10
e-beam (Ta ₂ O ₅ +HfO ₂ /SiO ₂)	20-10	40-20
IBS (Ta ₂ O ₅ +HfO ₂ /SiO ₂)	20-10	20-10
IBS (HfO ₂ +SiO ₂)	20-10	20-10

Iš gautų rezultatų galima teigti, jog IBS technologijos procesai neturėjo įtakos elementų švarumui, kadangi kokybė prieš ir po dangų procesų buvo nepakitusi. Tuo tarpu e-beam technologijos uždengtų vieno iš procesų elementai turėjo prastesnę kokybės klasę – 40-20 S-D. Tai gali indikuoti, jog e-beam proceso metu ant padėklo galėjo nusėsti įvairios priemonės ar net stambesnės dielektrinės dalelės, kurios galėjo sukelti duobutes ar išryškinti rėžius.

4.2. Spektro matavimai spektrofotometru

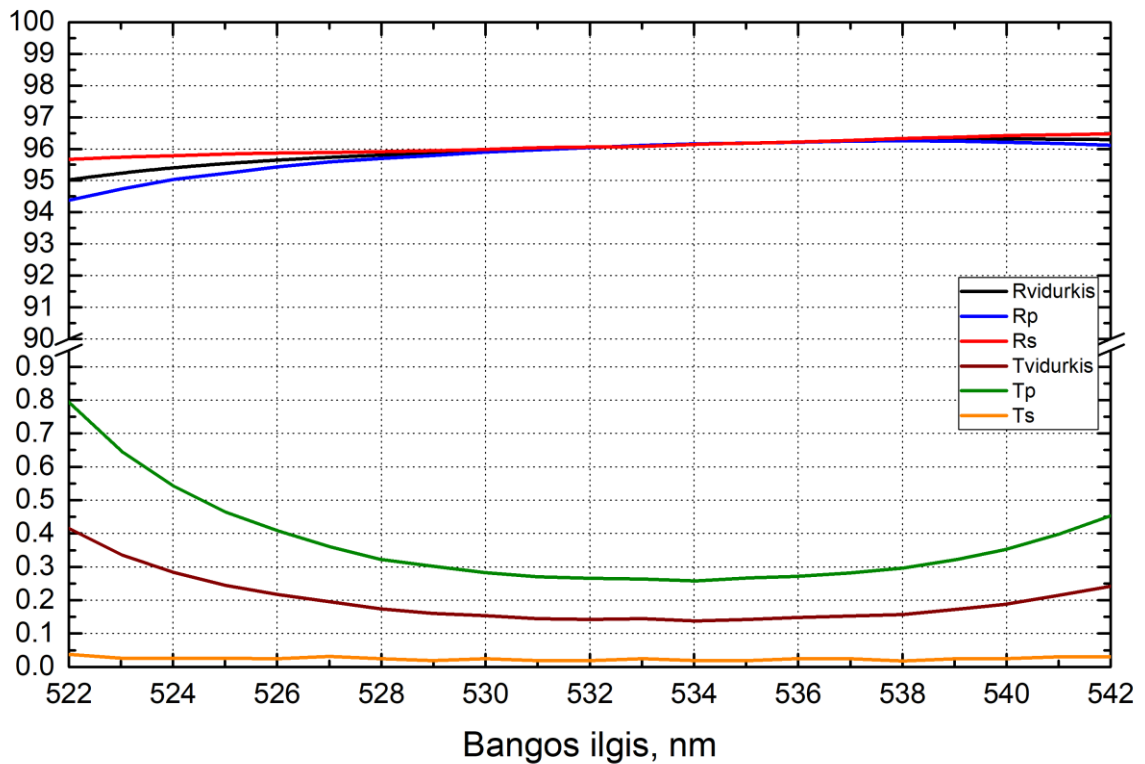
Po dengimo procesų buvo išmatuoti veidrodžių atspindžiai ir pralaidumai ties 532 nm bangos ilgiu, naudojantis Photon RT (*EssentOptics*) spektrofotometru, matuojant 45° kritimo kampu. Kiekvieno atlikto dangos proceso matavimų rezultatai yra pavaizduoti 5, 6, 7 ir 8 paveiksluose.

Atspindys ir pralaidumas, %



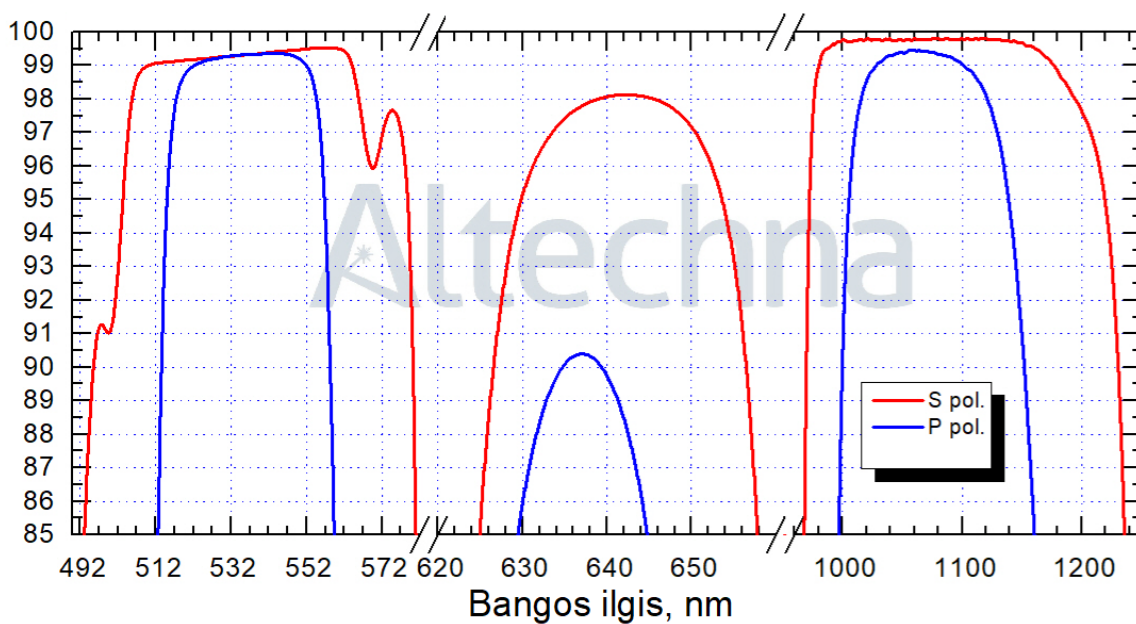
5 pav. Veidrodžių atspindys ir pralaidumas (e-beam technologija, HfO₂/SiO₂ dengimo medžiagos)

Atspindys ir pralaidumas, %



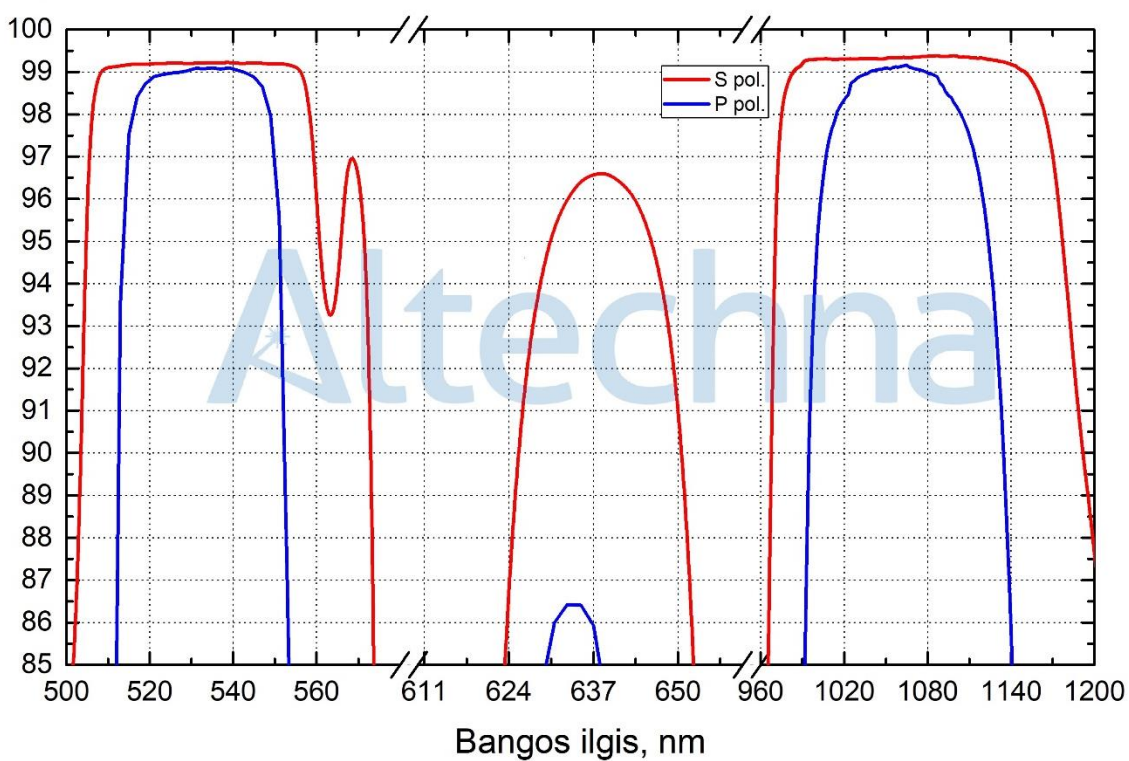
6 pav. Veidrodžių atspindys ir pralaidumas (IBS technologija, HfO₂/SiO₂ dengimo medžiagos)

Atspindys, %



7 pav. Veidrodžių atspindys (e-beam technologija, $Ta_2O_5+HfO_2/SiO_2$ dengimo medžiagos)

Atspindys, %



8 pav. Veidrodžių atspindys (IBS technologija, $Ta_2O_5+HfO_2/SiO_2$ dengimo medžiagos)

Lyginant gautus rezultatus akivaizdu, jog HfO_2 ir SiO_2 dengimo medžiagų pasirinkimas parodė žymesnius nuostolius ties 532 nm bangos ilgiu abiejomis technologijomis lyginant su Ta_2O_5 ir $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$ dengimo medžiagomis. E-beam technologijos atveju gautas atspindys siekė apie 98.6% poliarizacijų vidurkiui, o veidrodžių, gamintų su IBS technologija atspindys siekė tik 96.0%, kuomet danga abiejais atvejais buvo projektuota atspindėti >99%. Nors ir e-beam uždengtų veidrodžių gauti nuostoliai yra mažesni, nei veidrodžių, kurie buvo gaminti su IBS technologija, vis tik nuostolių problema kartojasi per abi skirtingas optinių dangų garinimo technologijas. Šiame žingsnyje gauti rezultatai gali indikuoti, jog parinktas optinis dangų dizainas šioms veidrodžiams buvo neoptimalus, kas galėjo inicijuoti atsiradusius nuostolius. Kadangi abiem procesams buvo naudotos HfO_2 ir SiO_2 medžiagos, galima daryti prielaidą, jog būtent dėl šių medžiagų pasirinkimo turime spektrines neatiktis, tačiau tam pagrįsti reikia atlikti tolimesnius tyrimus. (2) išraiška aprašo, kad šviesos sklaidimas per elementą bendru atveju yra lygus 100% įskaitant visus parametrus - atspindį, pralaidumą, sklaidą bei sugertį. Tad siekiant įvertinti gautus nuostolius buvo išmatuoti e-beam ir IBS technologijos HfO_2 ir SiO_2 veidrodžiai spektrometru pralaidumo režime. Gauti rezultatai taip pat atvaizduoti 5 ir 6 paveiksluose. E-beam technologijos atveju pralaidumas poliarizacijų vidurkiui siekė 0.35%, IBS atveju – 0.18%. Vadinasi, prarasti 1.10% e-beam technologijos ir 3.85% IBS technologijos atvejais indikuoja nuostolius – atsiradusią sklaidą ar elemento sugertį.

Kadangi matavimai su spektrofotometru gali ne visada būti pakankamai tikslūs dėl esamų paklaidų, pagamintų veidrodžių su HfO_2 ir SiO_2 dengimo medžiagomis atspindžiai buvo dar kartą matuojami CRD metodu. Šis matavimas yra patikimas būdas įvertinti didelio atspindžio veidrodžių atspindį su didesniu nei 0.01% tikslumu. Spektrofotometru išmatuotų veidrodžių atspindžio tikslumas įprastu atveju ribojamas iki 1%, o galios matuokliais gali siekti iki 3%. Kitas privalumas yra jo atsparumas lazerio šaltinio intensyvumo svyravimams, nes matavimas priklauso nuo santykinio impulso intensyvumo pokyčio. Norint gauti gerą matavimo tikslumą ir išmatuojamą ertmės gesimo trukmę (τ), CRD metodas reikalauja taikyti tik didelio atspindžio ($HR > 96\%$) veidrodžius. Spektrinė sritis, kurioje galima taikyti CRD, neturi esminių apribojimų, jei veidrodžiai atspindi dominančioje bangos ilgio srityje ir yra suderinamas lazerio šaltinis. Lazerio spindulys ertmėje, kurią sudaro du ar daugiau veidrodžių, nyksta dėl įvairių atspindžio ir sugerties nuostolių kiekviename atspindyje pirmyn ir atgal. Dėl minimalios sugerties ($\alpha \gg 0$) nuostoliai plikoje ertmėje iš esmės atsiranda dėl veidrodžio atspindžio nuostolių. Kadangi veidrodžio atspindys nėra lygus 100%, ertmėje paleidžiamo lazerio spindulio intensyvumas mažėja su kiekvienu atspindžiu nuo veidrodžių. Šviesos intensyvumas ertmės viduje mažėja kaip laiko funkcija, nes su kiekvienu veidrodžio atspindžiu iš ertmės išeina nedidelė šviesos dalis. Ertmės viduje esančio intensyvumo priklausomybė nuo laiko yra lengvai stebima matuojant iš ertmės išeinančios šviesos intensyvumo mažėjimą. Tuomet analizuojant gautus duomenis skaičiuojamas veidrodžių atspindys pagal etaloninį

bandinį. [33] CRD matavimai buvo atlikti Nd:YAG Q-Spark A10PS lazeriu, esančiu Altechnoje. Matavimai atlikti naudojant 532 nm bangos ilgį, bandinius matuojant 45° kampu ir rezultatai yra pateikti 3 lentelėje:

3 lentelė. Veidrodžių su HfO₂/SiO₂ dengimo medžiagomis CRD matavimų rezultatai

R, %	τ, μs	Bandiniai
99.9899	6.604	Etalonas
99.1263	0.0714	e-beam technologija, Rs
98.3071	0.0369	e-beam technologija, Rp
96.4126	0.0173	IBS technologija, Rs
95.9259	0.0152	IBS technologija, Rp

Atlikti papildomi CRD matavimai leidžia patvirtinti hipotezę, jog veidrodžiai patiria sugerties ar sklaidos nuostolius, kurie buvo aptikti bandinius matuojant spektrofotometru. Lyginant su matavimais, atliktais spektrofotometru, CRD matavimų vertės siekė 0.1-0.3% aukštesnes atspindžio vertes. Kaip ir buvo aprašyta literatūroje [33], spektrofotometro paklaidos gali siekti iki 1%, kuomet CRD matavimo principas leidžia tiksliau nustatyti bandinių atspindžius. Kadangi nuostolių priklausomybė nuo bangos ilgio aktuali tiek sugerties, tiek sklaidos nuostoliams - be papildomų matavimų ir testavimų yra sudėtinga spręsti, kas daro didžiausią įtaką šiems nuostoliams. Siekiant suprasti, kaip optimizuoti šių veidrodžių atspindį ir priartėti prie atsiradusių nuostolių mažinimo, tam toliau buvo atliekami papildomi sugerties ir sklaidos matavimai, kurie toliau aptariami 4.3 ir 4.4. skyriuose.

Antrasis dizainas su Ta₂O₅+HfO₂/SiO₂ dengimo medžiagomis (6 ir 7 paveikslai) parodė geresnius rezultatus abiejomis technologijomis – e-beam atveju išmatuotas atspindys poliarizacijų vidurkiui siekė 99.20%, IBS atveju 99.05% ties 532 nm bangos ilgiu. Abiejais atvejais galima teigti, jog pokytis pakeičiant dengimo medžiagas iš HfO₂ į Ta₂O₅ ir išlaikant tik viršutinius HfO₂ sluoksnius turėjo teigiamą poveikį – spektrai tenkino užsibrėžtus reikalavimus. Tad apibendrinus šiuos rezultatus galima teigti, jog dizainas su Ta₂O₅+HfO₂/SiO₂ dengimo medžiagomis yra tinkamesnis šių veidrodžių gamybai, siekiant užtikrinti užsibrėžtas spektrines charakteristikas.

Šių veidrodžių panaudojimas medicininiuose lazeriuose yra neatsiejamas, kadangi jie sudaro esminę šarnyninių rankų dalį. Šarnyninės rankos - sistemos, kurios nukreipia spindulį iš lazerio šaltinio į paciento gydymo vietą (9 pav). Šių šarnyninių rankų poreikis auga dėl populiarėjančių ir vis dažniau atliekamų estetiškos medicinos procedūrų – plaukelių, kapiliarų, tatuiruočių ar odos dėmių šalinimo. Į šarnynines rankas gamintojai dažniausiai talpina po 5 ar 7 vienetus veidrodžių, kurie būna įmontuojami laikikliuose 45° kampu vienas nuo kito. Šios rankos dažniausiai būna gaminamos iki 2-3 metrų ilgio, todėl bet koks papildomas atspindžio nuostolis gali

sukelti problemas šių lazerių gamintojams. Imant pavyzdį, kai šarnybinė ranka yra sudaryta iš 7 veidrodžių, o kiekvieno iš jo atspindys yra apie 98.8%, vadinasi, lazerio pluoštui sklidant po 7 veidrodžių išeigos jau turėsime mažiausiai 8.4% nuostolių, kas gali sukelti ryškesnius pokyčius lazerio efektyvumui. Verta paminėti, jog 3 skyriuje nurodytos veidrodžių spektrinės vertės yra ribinės, kurias dar galima pritaikyti šiai aplikacijai, todėl darbe siekiama ne tik užtikrinti pateiktas vertes, bet tuo pačiu ir jas pagerinti (>99.5%).



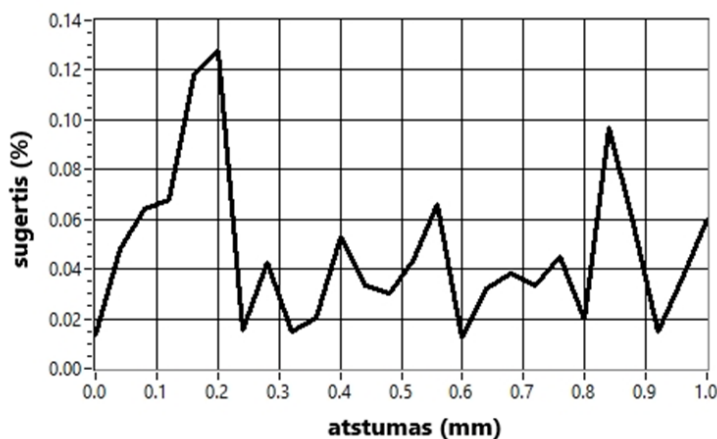
9 pav. Šarnybinės rankos pavyzdys [31]

4.3. Sugerties matavimai

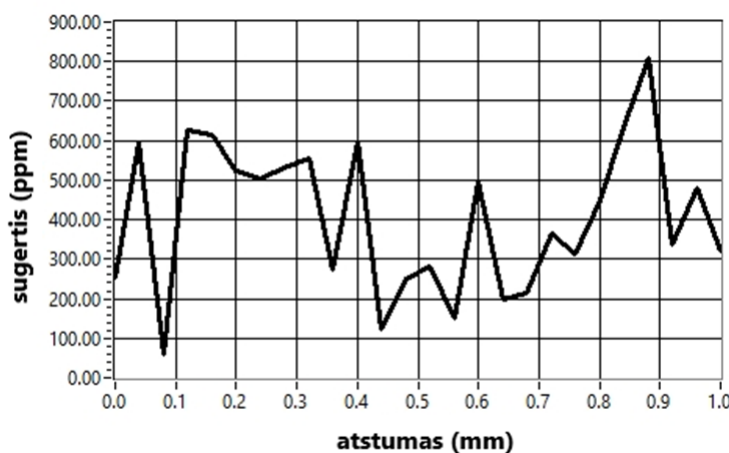
Sugerties tyrimui atlikti buvo naudojama Lidaris įmonės matavimų įranga, esanti Lazerinių tyrimų centre. Sugerties matavimams buvo pasirinkti du bandiniai – IBS ir e-beam technologijomis padengti veidrodžiai, kurie buvo gaminti su HfO_2 ir SiO_2 dengimo medžiagomis, siekiant pilnai įvertinti veidrodžių veikimą.

Eksperimentai buvo atlikti pasitelkiant PCI metodą ir panaudojant skersinį (angl. transverse scan - T-scan) protokolą. T-scan yra vienas iš paviršiaus sugerties matavimų, gaunamas ant judančio mėginio. Šiuo atveju elemento sugertis matuojama 1 mm ilgio linijoje be reikšmingos dangos degradacijos. Kiekviena nauja vieta yra veikama lazerio spinduliuote 100 ms (greičiausias sistemos integravimo greitis), persidengiant 50% spindulio skersmens. Šis bandymas parodo

sugėriantio paviršiaus homogeniškumą. Sugėrtis buvo matuojama kaip lazerio spinduliuotės intensyvumo funkcija. Kiekvienam naujam nuskaitymui buvo pasirinkta anksčiau neeksponuota sritis. Šio tyrimo metu kaupinimo šaltiniui buvo naudojamas Ekspla Atlantic 80 lazeris ties 532 nm bangos ilgiu, su 1 MHz pasikartojimo dažniu, 10 ps režime ir pluošto diametru iki 67 μm $1/e^2$ lygyje. Zondavimo spinduliui buvo naudotas nuolatinės veikos (angl. continuous wave - CW) He-Ne lazeris ties 633 nm bangos ilgiu, su 200 μm pluoštu $1/e^2$ lygyje. Bandinių sugėrtis buvo matuojama 45° kampu. Rezultatai e-beam technologijos veidrodžiams pateikti 10 paveiksle, IBS technologijos veidrodžiams – 11 paveiksle.



10 pav. E-beam technologijos veidrodžių ($\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$) sugėrtis



12 pav. IBS technologijos veidrodžių ($\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$) sugėrtis

Tyrimas atskleidė, jog tiek e-beam, tiek IBS technologijų atvejais veidrodžiai reikšmingos sugėrties rezultatų neparodė. T-scan matavimų e-beam technologijos veidrodžių sugėrtis siekė apie 450 ppm (0.045%), o IBS technologijos apie 400 ppm (0.04%). Gaminant panašaus optinio dizaino veidrodžius medicininių lazerių gamintojų rinkai sugėrtis dažniausiai yra specifikuojama $>0.1\%$, tad išmatuotos

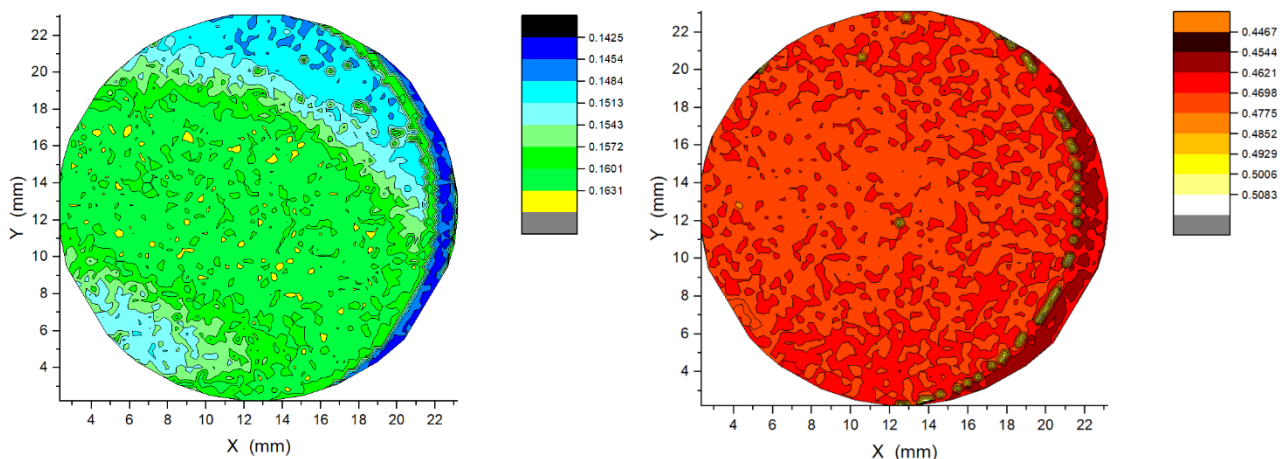
vertės, gaminant aukšto atspindžio daugiasluoksnius dielektrinius veidrodžius yra laikomos įprastomis šiems lazeriniams taikymams ir neindikuoja jokių galimų neigiamų veiksnių elementų veikimui. Grįžtant prie atliktų spektrinių matavimų šiems veidrodžiams ir prie (2) išraiškos, kuri pilnai aprašo šviesos sklaidimą per optinį elementą, atlikti sugerties matavimai leidžia atskleisti dar vieną narį. E-beam technologijos atveju, laikant, jog sugertis yra apie 0.045% sumoje gauname 98.94%. Kadangi išraiškoje lieka tik vienas neatskleistas narys, t.y. sklaida, galima teigti, jog likę 1.06% atitinka turimą sklaidą. IBS atveju atliekant tuos pačius skaičiavimus gauname, jog sklaida atitinka 3.81%. Lyginant šias dvi technologijas matome, jog IBS atveju sklaida yra ženkliai didesnė, nei e-beam technologijos atveju. Siekiant išsiaiškinti padidėjusios sklaidos priežastis, buvo atliekami papildomi tyrimai, kurie toliau aprašomi 4.5 skyriuje.

4.4. Sklaidos matavimai

Tie patys bandiniai buvo naudojami ir sklaidos matavimams, pasitelkiant visuminės integruotos sklaidos matavimo stotį su nanosekundiniu Nd:YAG Ekspla NL202 lazeriu, esančiu Lazerinių tyrimų centre. Naudojant antros harmonikos generatorių ir antros harmonikos atskyrklį buvo gauti 532 nm bangos ilgio impulsai su energija >0.9 mJ. Lazerio pasikartojimo dažnis 1 kHz, pluošto diametras ~ 0.4 mm, o impulso trukmė 9 ns. Pilnutinės integruotos sklaidos matavimai pagrįsti optinio paviršiaus išsklaidytos šviesos surinkimu ir integravimu. Šių matavimų metu surenkama visa išsklaidyta šviesa, todėl pilnutinė integruota sklaida apibrėžiama, kaip išsklaidytos ir kritusios šviesos intensyvumų santykis. Pilnutinei sklaidai registruoti naudojama Ulbrichto sfera, kuri naudojama integruoti difuziškai išsklaidytą lazerio spinduliuotę. Šios sferos vidinis paviršius padengiamas didelio atspindžio difuzine danga (teflono ar BaSO₄ miltelių sluoksniu). Patekusi į sferos vidų spinduliuotė po daugelio atspindžių visoje sferoje sukuria tam tikro lygio homogeninį šviesos foną, kurio intensyvumas priklauso nuo bandinio išsklaidytos spinduliuotės kiekio. Bandiniai statomi kuo arčiau sferos, kad išsklaidyta šviesa būtų surenkama plačiame kampų diapazone (nuo 5° iki 85° kampais). Pluoštas į bandinį krinta 1 – 2° kampu, kad grįžtantis atspindėtas pluoštas nepatektų atgal į lazerį. Šis fonas registruojamas virš sferos esančiu detektoriumi. [32]

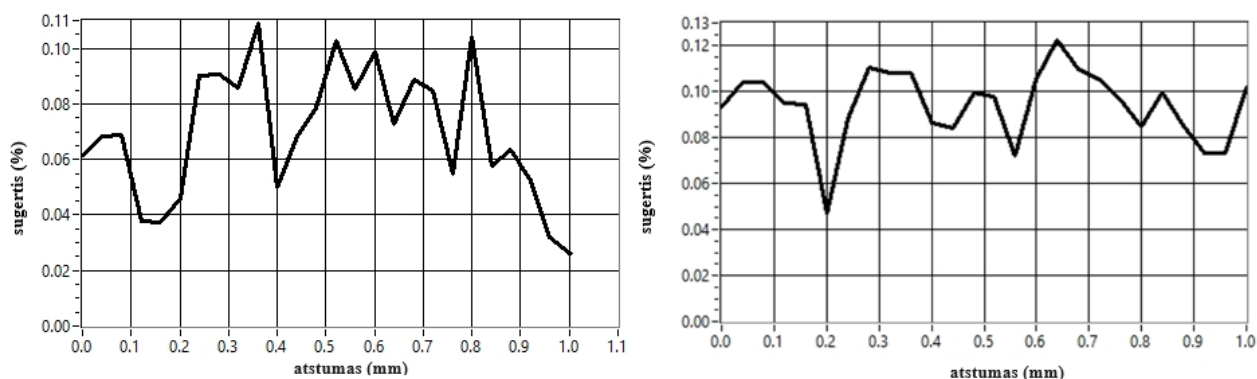
Svarbu paminėti, jog ši stotis pritaikyta bandinių sklaidos matavimams registruoti tik 0° kampu. Kadangi šių tiriamų veidrodžių dangos dizainas optimizuotas veikimui ties 45° kampu, šis matavimas negali pilnai atskleisti informacijos apie egzistuojančią sklaidą, kuri atsiranda veidrodį naudojant 45° kampu. Atlikti sklaidos matavimai grafiškai atvaizduoti 12 paveiksle. Kaip matome iš rezultatų, e-beam technologijos atveju išmatuota sklaida siekė apie 0.15%, kuomet IBS technologijos veidrodis parodė aukštesnes vertes – 0.46%. Nors šie rezultatai ir negali būti interpretuojami kaip reali šių veidrodžių sklaida vien dėl kitokio optimizuoto kritimo kampo, tačiau lyginant matavimus

tarpusavyje galima teigti, jog IBS technologijos veidrodys turi tendenciją į aukštesnes sklaidos vertes, nei e-beam technologijos atveju. Tai koreliuoja ir su gautais spektro matavimais, kuomet e-beam technologijos nuostoliai buvo įvertinti apie 1%, o IBS technologijos atveju siekė beveik 4%. Tarp šių matavimų turime 3 kartus didesnę sklaidą IBS technologijos atveju, kas beveik prilygsta ir skirtumui tarp spektro matavimų.

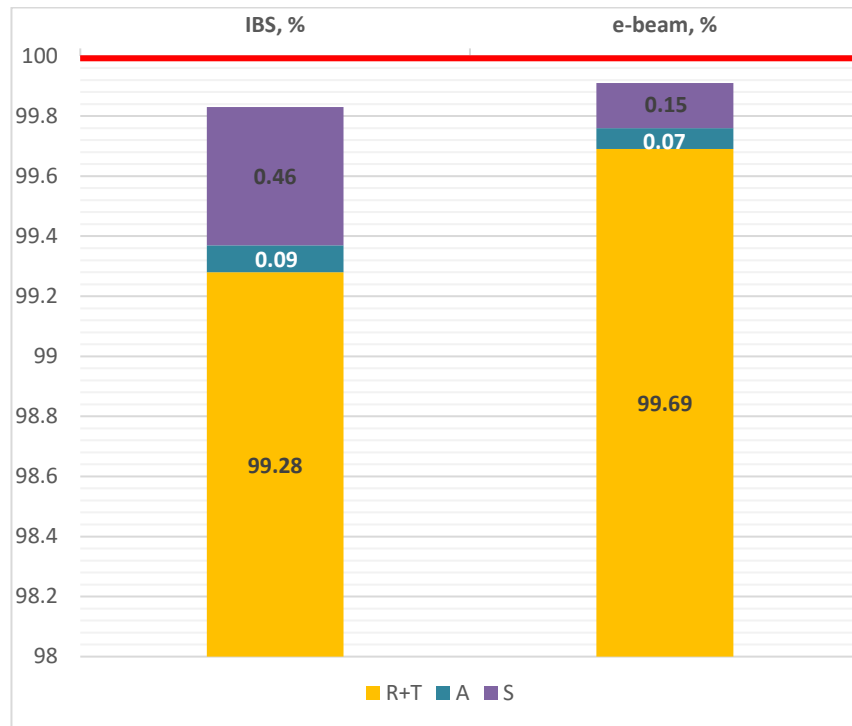


12 pav. Veidrodžių su $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$ dengimo medžiagomis sklaida: e-beam technologija (kairėje) ir IBS technologija (dešinėje)

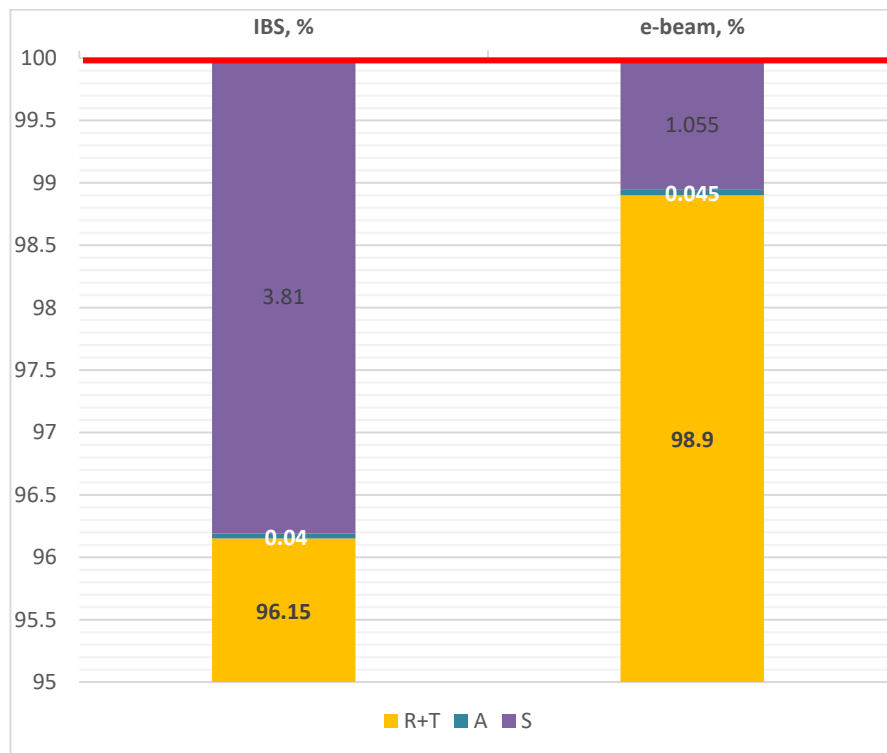
Kadangi sklaidos atlikti matavimai buvo tik 0° kampu, siekiant pagrįsti egzistuojančią sklaidą ties 45° kampu buvo vertinamas tų pačių veidrodžių atspindys, pralaidumas bei sugertis matuojant 0° kampu. Sugerties matavimai pavaizduoti 13 paveiksle, o bendri išmatuoti šviesos sklaidimo rezultatai per veidrodžius, kurie buvo gaminti su HfO_2 ir SiO_2 dengimo medžiagomis, pateikti 14 paveiksle (matuojant 0° kampu) ir 15 paveiksle (matuojant 45° kampu).



13 pav. Sugerties matavimai T-scan metodu: e-beam technologija (kairėje) ir IBS technologija (dešinėje)



14 pav. Šviesos sklidimas per veidrodį matuojant 0° kampu



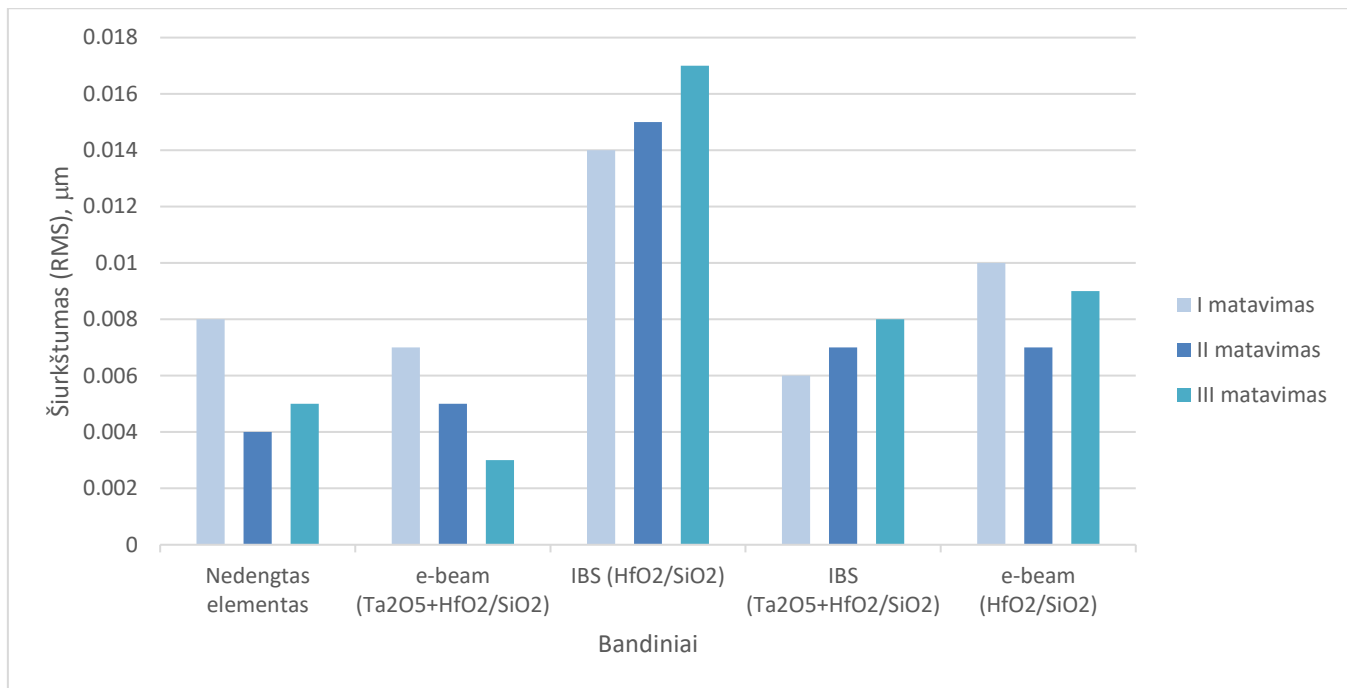
15 pav. Šviesos sklidimas per veidrodį matuojant 45° kampu

(2) išraiška aprašo, jog idealiu atveju susumavus šviesos sklidimo per elementą parametrus vertės turi siekti 100%. 14 paveiksle atvaizduoti visi išmatuoti parametrai – matome, jog informacija yra prarandama apie likusius 0.17% IBS technologijos bei 0.09% e-beam technologijos atveju. Tačiau

atsižvelgiant į paklaidas, kurios galėjo atsirasti kiekvieno matavimo metu galima teigti, jog tiek e-beam technologijos, tiek IBS technologijos atvejais šie rezultatai yra pakankamai tikslūs ir bendras šviesos sklaidimas artėja į 100%, kaip ir aprašo teorija. Tai leidžia ir pagrįsti iškeltą hipotezę, jog sklaida tiesiogiai priklauso nuo optimizuoto dangos veikimo kampo, kadangi išmatuotos vertės tiek atspindžio su pralaidumu, tiek pačios sugerties skirtingais matavimo kampais (0° ir 45°) yra nesutampančios tarpusavyje. Matome, jog IBS atveju atspindžio ir pralaidumo bendras rezultatas 0° kampu siekia kiek daugiau nei 99%, kai tuo tarpu 45° matavimu rezultatas siekia tik 96%. Lyginant sugertį galime pastebėti, jog 0° kampu veidrodžiams ji yra didesnė apie 2 kartus, nei išmatuota sugertis 45° kampu. 15 paveiksle yra pateikti apibendrinti šviesos sklaidimo parametrai ir jų vertės, išmatuotos 45° kampu. Verta pabrėžti, jog šiuo atveju sklaida nebuvo matuota vien dėl matavimų sistemos apribojimo bandinius matuoti 0° kampu – tačiau kadangi tai yra vienintelis nežinomas narys, jo vertę galima prilyginti sklaidai (15 paveiksle pažymėta violetine spalva). Šie atlikti matavimai leidžia daryti prielaidą, jog norint tiksliai įvertinti sklaidą veidrodžiams, kurių optinis dizainas būna optimizuotas 45° veikimo kampui, privaloma ir pačius matavimus atlikti tuo pačiu kampu, kad sklaida būtų įvertinta teisingai, kadangi rezultatai gali skirtis net keliais kartais.

4.5. Šiurkštumo matavimai interferometru

Kadangi vienas pagrindinių veiksnių, sukeliantis sklaidą yra šiurkštumas, tam po atliktų spektro, sugerties bei sklaidos matavimų toliau buvo tiriamas paviršiaus šiurkštumas, naudojantis *Verifire* (Zygo) interferometru Altechna įmonėje. Paviršiaus šiurkštumas dažniausiai nusakomas vidutiniu kvadratinu nuokrypiu RMS (angl. root mean square) nuo reljefo vidurkio ir aprašomas (4) išraiška. Elementų RMS vertės buvo matuojamos paviršiaus plote, kurio diametras atitinka 85% pagrinduko diametro (25.4 mm). Matavimai buvo atlikti prieš ir po dengimų procesų ir lyginami tarpusavyje. Rezultatai pateikti 16 paveiksle.

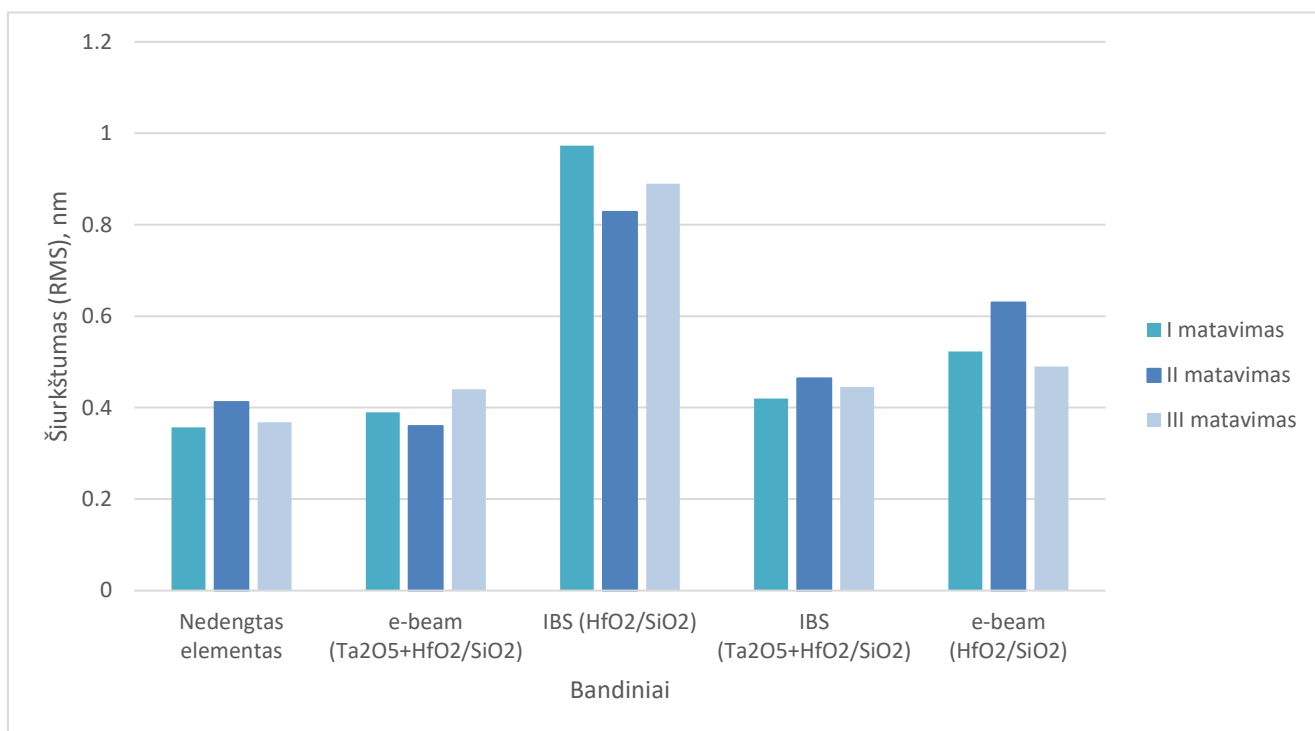


16 pav. Skirtingų bandinių ir technologijų šiurkštumo palyginimas interferometru

Įvertinus elementų šiurkštumą abiejais atvejais – nedengtų pagrindukų ir pagrindukų, kurie buvo uždengti optinėmis dangomis, matavimai parodė, jog paviršiaus šiurkštumas, kuomet buvo naudojamos HfO₂ ir SiO₂ dengimo medžiagos vidutiniškai padidėja nuo $\sim 0,005 \pm 0,003 \mu\text{m}$ iki $\sim 0,012 \pm 0,005 \mu\text{m}$, kai tuo tarpu dangų šiurkštumas, kuomet Ta₂O₅ buvo naudojamas kaip pagrindinė aukšto lūžio rodiklio medžiaga, išliko artimesnis nedengtam paviršiui ($\sim 0,006 \pm 0,003 \mu\text{m}$). HfO₂ ir SiO₂ dizaino atveju galima teigti, jog šiurkštumo padidėjimas atsirado dėl nelygumų tarp nedengto elemento paviršiaus ir dangos, arba tarp sluoksnių pačioje dielektrinėje dangoje. Ta₂O₅+ HfO₂ ir SiO₂ atveju išmatuotas šiurkštumas gali indikuoti, jog susidėję atskiri aukšto ir žemo lūžio rodiklio medžiagų sluoksniai vienas ant kito elementą paveikė į teigiamą pusę ir iškompensavo ar padėjo išlaikyti panašų šiurkštumą į nedengto pagrinduko. Atsižvelgiant, jog interferometras neregistruoja nanometrų lygio šiurkštumų, sunku įvertinti, ar šie matavimai yra pakankamai tikslūs daryti išvadas, todėl tęsiant šį darbą šiurkštumas buvo analizuojamas pasitelkiant optinį profilometrą.

4.6. Šiurkštumo matavimai optiniu profilometru

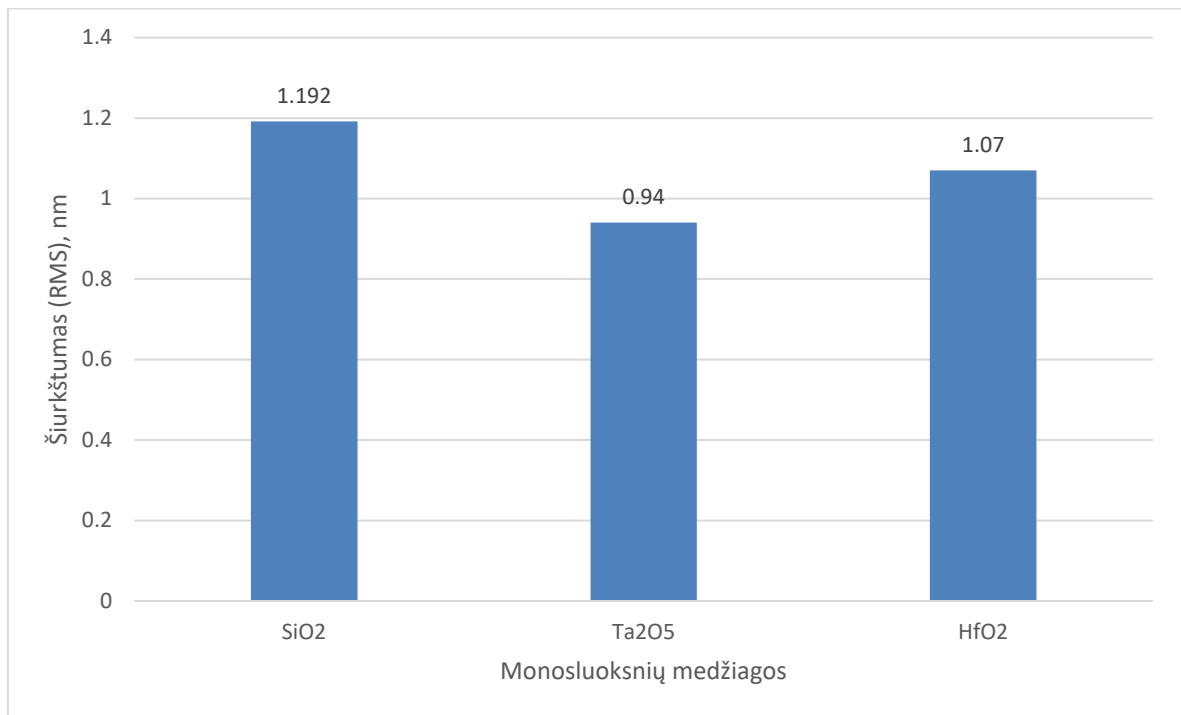
17 paveiksle pateiktas tų pačių bandinių paviršiaus šiurkštumo palyginimas optiniu profilometru ZeGage. Paviršiaus šiurkštumo vertės buvo matuojamos 0.8 mm x 0.8 mm paviršiaus plote (maksimalus optinio profilometro matavimo plotas) ir matavimai kartojami per 3 skirtingas bandinio vietas.



17 pav. Skirtingų bandinių ir technologijų šiurkštumo palyginimas optiniu profilometru

Lyginant 16 ir 17 paveikslus galime teigti, jog tirtų bandinių paviršiaus šiurkštumo rezultatai atsikartoja. Nors ir tiriamieji paviršiaus plotai skiriasi, tačiau tendencija išlieka ta pati – bandiniai, kuriems buvo naudotas HfO₂ ir SiO₂ dengimo medžiagų dizainas, parodė didžiausias šiurkštumo vertes ($\sim 0.78 \pm 0.18$ nm), kuomet veidrodžiai, pagaminti Ta₂O₅+HfO₂ ir SiO₂ dengimo medžiagų pagrindu paviršiaus šiurkštumo vertėmis buvo artimesni nedengto paviršiaus šiurkštumui (~ 0.44 (-0/+0.1)) nm. Lyginant tas pačias technologijas tarp skirtingų dangos dizainų, šiurkštumo vertės skiriasi apie 2 kartus. Galima teigti, jog šie matavimai koreliuoja su išmatuotais bandinių spektrais, kuomet nuostoliai buvo prilyginti sklaidai - didžiausios šiurkštumo vertės atspindi išmatuotus sklaidos nuostolius.

Siekiant išspręsti atsiradusią sklaidos nuostolių problemą toliau buvo siekiama išsiaiškinti kurios dengimo medžiagos galutiniam optiniam elementui turi didžiausią įtaką šiurkštumo atsiradimui. Tam buvo matuojami HfO₂, Ta₂O₅ ir SiO₂ medžiagų monosluoksniai optiniu profilometru. Monosluoksnių šiurkštumo vertės buvo matuojamos 0.8 mm x 0.8 mm paviršiaus plote, o pačių pagrindukų diametras siekė 25.4 mm. Visų monosluoksnių dangos storis buvo 800 nm, dengimo procesai buvo atlikti e-beam technologija, o patys pagrindukai buvo iš tos pačios gamybinės partijos, kaip ir tiriamieji veidrodžiai. Rezultatai pateikti 18 paveiksle.



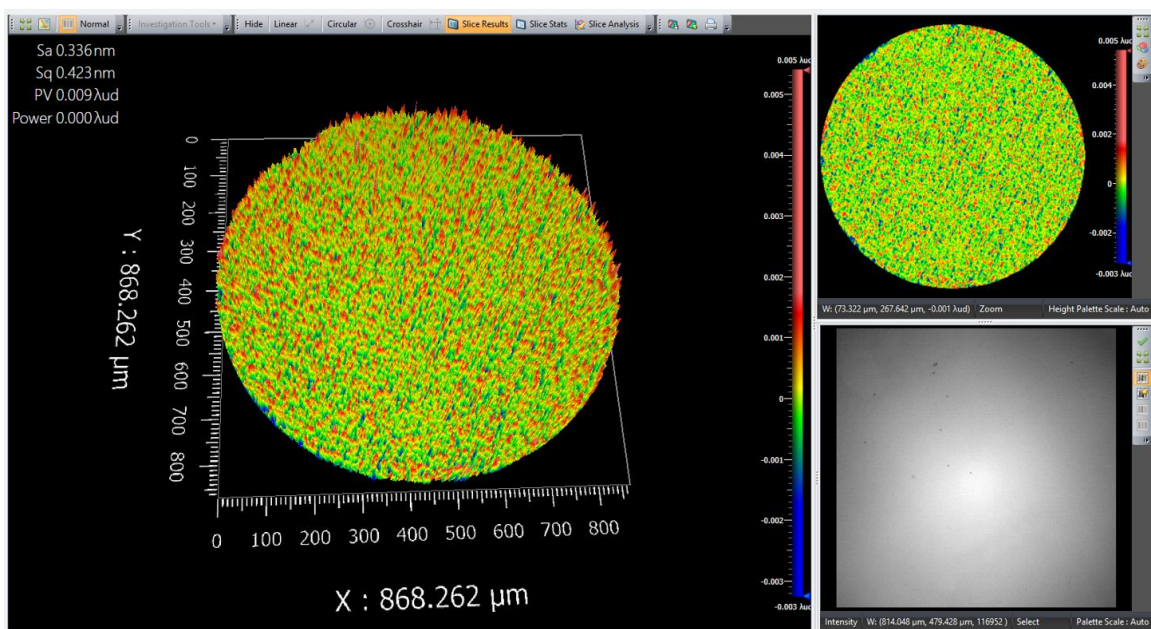
18 pav. Palyginimas tarp skirtingų monosluoksnių paviršiaus šiurkštumų

Silicio oksido išmatuoti šiurkštumai pasiekė didžiausias vertes – 1.192 nm, kai tuo tarpu Ta₂O₅ parodė žemiausias vertes – 0.94 nm. HfO₂ pasiektos vertės buvo tarp jau minėtų medžiagų – 1.07 nm. Svarbu atkreipti dėmesį, jog 18 paveiksle analizuojamų monosluoksnių storis siekė tik 800 nm, kai tuo tarpu gaminant daugiasluoksnius dvibangius veidrodžius bendras dangos storis buvo 5-7 kartais didesnis. Kadangi žemo lūžio rodiklio medžiagos daugiasluoksnių dangų dizaine buvo naudojama daugiausiai, tad analizuojant šiuos rezultatus galima teigti, jog daugiasluoksniame veidrodyje didžiausią įtaką šiurkštumui galėjo daryti SiO₂ medžiaga. Veidrodžiai, kurie buvo gaminami su HfO₂ ir SiO₂ medžiagomis turėjo didesnę tikimybę šiurkštumo aukštesnėms vertėms, kadangi abi šios medžiagos turi aukščiausius monosluoksnių šiurkštumus, kas galėjo daryti įtaką padidėjusiems atspindžio nuostoliams ir šiuo atveju atsiradusiai sklaidai. Tuo tarpu veidrodžiai, kuriems buvo pasirinktas dangos dizainas keičiant medžiagas iš HfO₂ į Ta₂O₅, suformuojant tik paskutinius HfO₂ sluoksnius parodė žemiausias šiurkštumo vertes, kas koreliuoja su gautais atspindžio rezultatais, kuomet buvo pasiektos reikiamos vertės šių veidrodžių gamyboje.

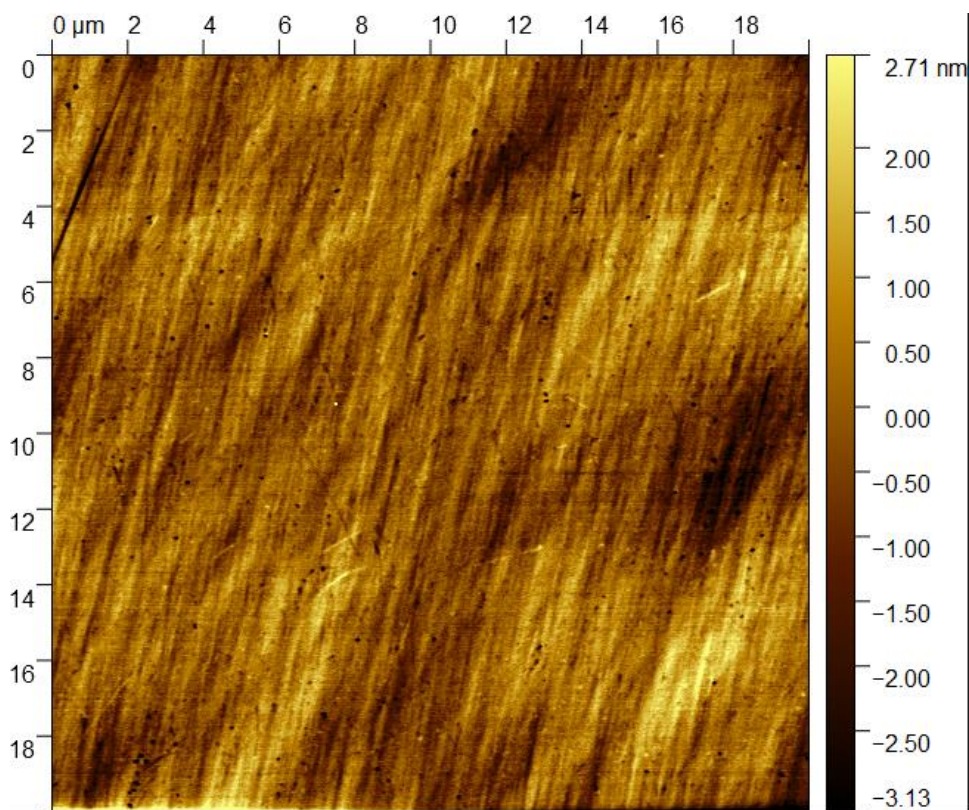
Svarbu paminėti, jog siekiant sumažinti bendrus dangos šiurkštumus būtina tobulinti kiekvieną jos komponentą atskirai. Atsižvelgiant į skirtingų monosluoksnių šiurkštumo rezultatus buvo pasirinkta toliau tirti SiO₂ šiurkštumą, kadangi silicio oksidas parodė didžiausias šiurkštumo vertes. Tam buvo atliktas SiO₂ monosluoksnių šiurkštumo tyrimas optiniu profilometru bei atominės jėgos mikroskopija keičiant dengimo proceso metu tam tikrus parametrus, kuris aprašytas 4.7 skyrelyje.

4.7. SiO₂ monosluoksnių šiurkštumo tyrimas

Paviršiaus šiurkštumo matavimai buvo atliekami Fizinių technologijų ir mokslo institute naudojantis *Bruker* kompanijos atominių jėgų mikroskopu Dimension Edge, dirbančiu tapšnojimo (angl. *tapping*) režimu. Taip pat paviršiaus šiurkštumo lyginamoji analizė buvo atliekama Altechoje, naudojantis *Zygo* kompanijos optiniu profilometru ZeGage. Šiuo atveju AFM ir optinis profilometras galėjo fiksuoti nanometrų lygio šiurkštumą, priešingai nei interferometro atveju, kuomet fiksuoti šiurkštumai buvo mikronų lygmenyje. Paviršiaus šiurkštumas buvo nusakomas vidutiniu kvadratinu nuokrypiu RMS nuo reljefo vidurkio ir vertinamas (4) išraiška, kaip ir 4.5 ir 4.6 skyriuose. Monosluoksnių šiurkštumo vertės buvo matuojamos 0.8 mm x 0.8 mm paviršiaus plote optinio profilometro atveju, o AFM atveju 0.02 x 0.02 mm paviršiaus plote. Kadangi dangos šiurkštumas gali priklausyti ir nuo dengimo proceso metu parinktų įvairių parametru: dalelių greičio, temperatūros, foninių dujų kiekio ir kt. - šiuo atveju buvo pasirinkta tirti šiurkštumą keičiant fono dujų kiekį dengimo proceso metu tikintis, jog šis tyrimas suteiks daugiausiai informacijos apie monosluoksnių šiurkštumą ir leis atrasti optimaliausius parametrus mažesniai šiurkštumai pasiekti. [34] 19 paveiksle pateiktas pavyzdys, kaip atrodo tiriamasis bandinys matuojant optiniu profilometru, o 20 paveiksle pavaizduota skenograma, gauta matuojant bandinio šiurkštumą su AFM.

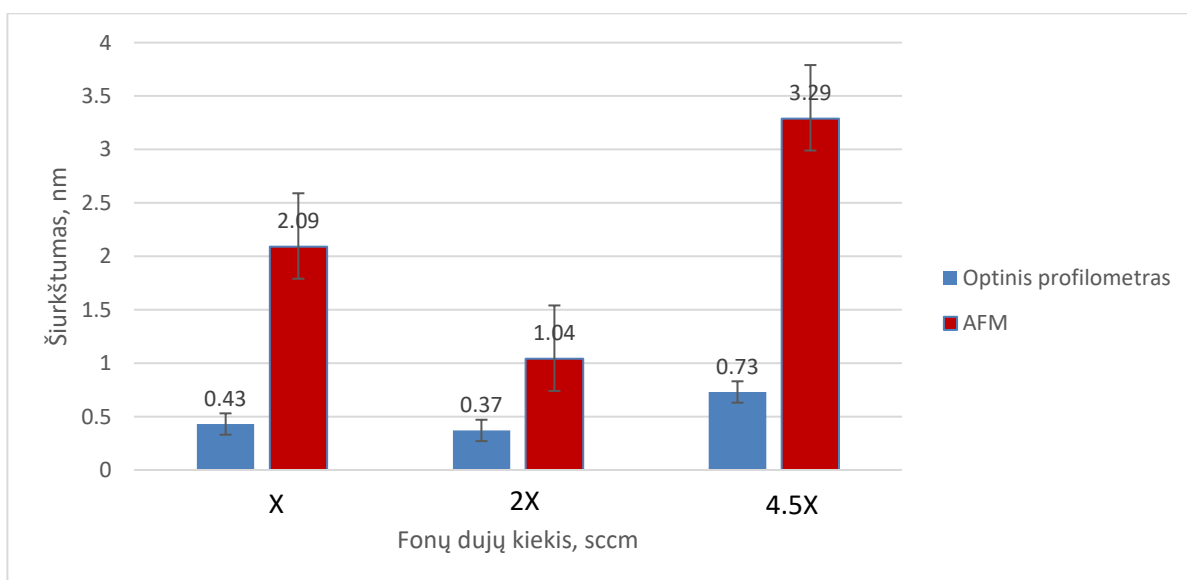


19 pav. Bandinio paviršiaus profilio rezultatai su optinio profilometru



20 pav. Bandinio paviršiaus AFM skenogramos pavyzdys

Visų tiriamųjų monosluoksnių dangos storis buvo 300 nm, dengimo procesai buvo atlikti e-beam technologija, o patys pagrindukai buvo iš tos pačios medžiagos, kaip ir tiriamieji veidrodžiai - Corning 7980 0F. Rezultatai pateikti 21 paveiksle.



21 pav. SiO₂ šiurkštumo palyginimas keičiant fono dujų kiekį

Kaip galime matyti iš 21 paveiksle pateiktų rezultatų tiek optiniu profilometru, tiek AFM – mažiausi šiurkštumai buvo pasiekti naudojant „2X“ sccm (angl. *standard cubic centimeters per minute*) fono dujų kiekį. Mažinant ar didinant fono dujų kiekį, šiurkštumo vertės didėjo, tad galima teigti, jog šiuo atveju „2X“ sccm fono dujų kiekis yra optimaliausias siekiant gauti mažiausią SiO₂ medžiagų šiurkštumą. „X“ sccm atveju gautos didesnės šiurkštumo vertės gali indikuoti, jog buvo parinktas per mažas dujų kiekis – tokiu atveju esame arčiau prie metalinės garinamos medžiagos fazės, todėl sunku palaikyti stabilų procesą. Tačiau šiai hipotezei pagrįsti būtų reikalingi papildomi įvertinimai. „4.5X“ sccm atveju gautos didesnės šiurkštumo vertės indikuoja, jog esant didesniai slėgiui, aukštesnis dujų dalelių tankis padidina nusėdančių dalelių sklaidą. Dėl sklaidos nusėdančių dalelių energija yra mažesnė, todėl formuojamos mažiau tvarkingos struktūros. Šiurkštumas šiuo atveju padidina šviesos sklaidą.

Lyginant matavimus tarpusavyje tarp AFM ir optinio profilometro verčių matoma, jog AFM gautos vertės yra ženkliai didesnės nei optinio profilometro atveju. Optinis profilometras registruoja bandinio profilį per 0.8 x 0.8 mm paviršiaus plotą, kuris yra didesnis nei AFM atveju (0.02 x 0.02 mm) – tokiu būdu optinis profilometras negali fiksuoti itin mažų paviršiaus pasikeitimų – įdubų ir kalnelių, kurie gali būti matomi atominės jėgos mikroskopijos atveju.

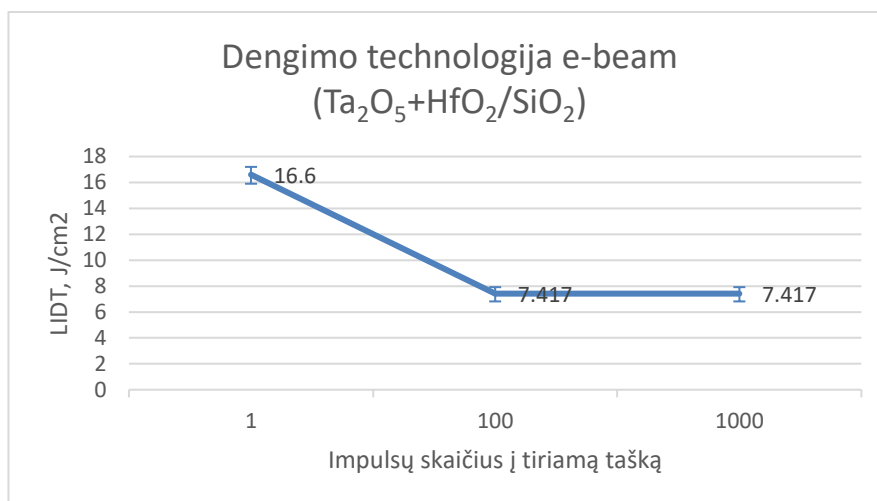
Gaminant komercinius veidrodžius, dengimo procesų metu fono dujų kiekis siekė „3.5X“ sccm, kas galėjo daryti įtaką gautam padidėjusiam šiurkštumui, o padidėjęs paviršiaus šiurkštumas galėjo lemti kritinį sklaidos nuostolių atsiradimą. Identifikuoti optimalūs mažesnio šiurkštumo parametrai buvo toliau naudojami pakartotiniam optinių dangų procesui optiniams veidrodžiams pagaminti. Taigi šis darbas buvo tęsiamas panaudojant išanalizuotus rezultatus pakartotiniams dangų procesams, su tikslu pasiekti komerciškai aktualias spektrines charakteristikas ir tuo pačiu metu pasiekiant reikiamas vertes lazerinės spinduliuotės atsparumui. Gauti rezultatai aprašyti 4.9 skyriuje.

4.8. Atsparumo lazerinei spinduliuotei tyrimas

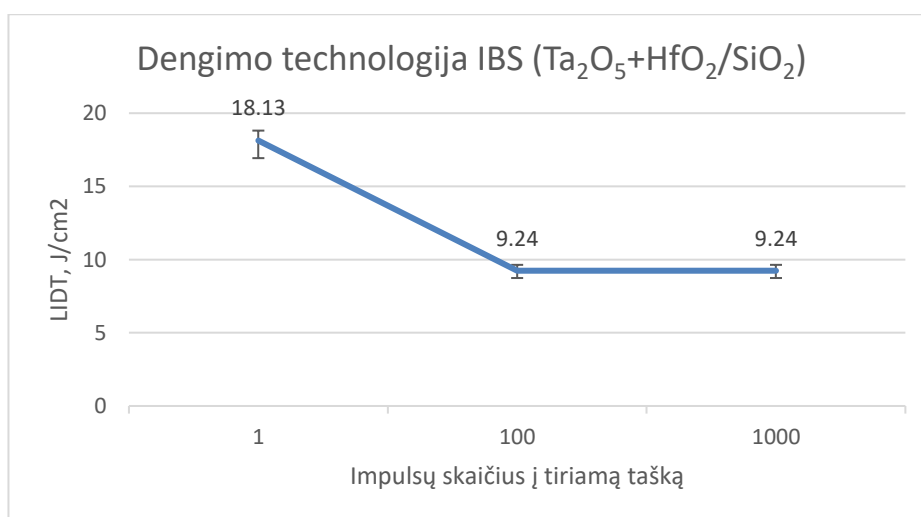
Paskutiniaisiais atliktais matavimais buvo tikrinamas elemento atsparumas lazerio spinduliuotei. Šiems matavimams atlikti buvo pasirinkta įmonės „InnoLas Laser II“ kompaktiška Nd:IAG lazerinė sistema, veikianti ties 532 nm bangos ilgiu. Matavimai buvo atlikti S-į-1000 metodu. Bandinys veiktas 222.8 ± 3.8 μm diametro spinduliu 100 Hz dažniu 45° kampu, atsparumas buvo vertintas nanosekundiniu režimu (6 ns). Šis lyginamasis eksperimentas buvo atliktas įmonėje *Lidaris*, kuri specializuojasi tokio tipo tyrimuose. Įprastai analizuojant optinių elementų lazerinę pažeidimą, tiriami pavieniai elementai, pluoštas fokusuojamas ant pirmojo, antrojo paviršiaus arba į elemento

tūrį, priklausomai nuo to, kurios dalies atsparumą siekiama įvertinti. Šių veidrodžių atveju buvo siekiama išsiaiškinti, koks atsparumas bus ant pirmojo padengto paviršiaus.

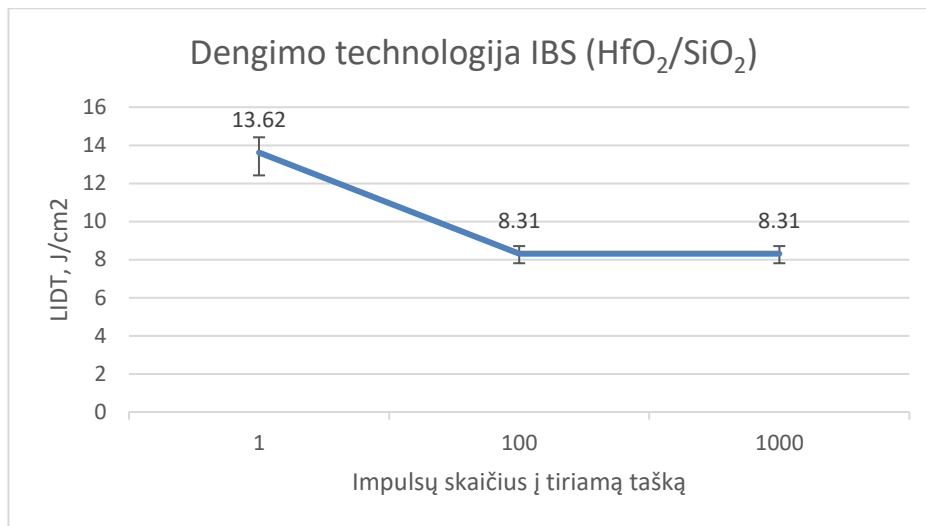
Gautos lazerinės pažaidos vertės pateikiamos 22, 23 ir 24 paveiksluose. Svarbu paminėti, jog atsparumas lazerinei spinduliutei tarpusavyje nebuvo lyginamas e-beam dangų su HfO₂/SiO₂ medžiagomis, kadangi atspindžio reikalavimai iš karto nebuvo pasiekti. IBS technologijos buvo pasirinktos tirti kartu – siekiant suprasti, ar dangos struktūros pakitimas turėjo teigiamą pokytį LIDT vertėms.



22 pav. E-beam technologijos dizaino su Ta₂O₅+HfO₂/SiO₂ dengimo medžiagomis lazerinės pažaidos vertės priklausomybė nuo impulsų skaičiaus į tiriamąjį tašką

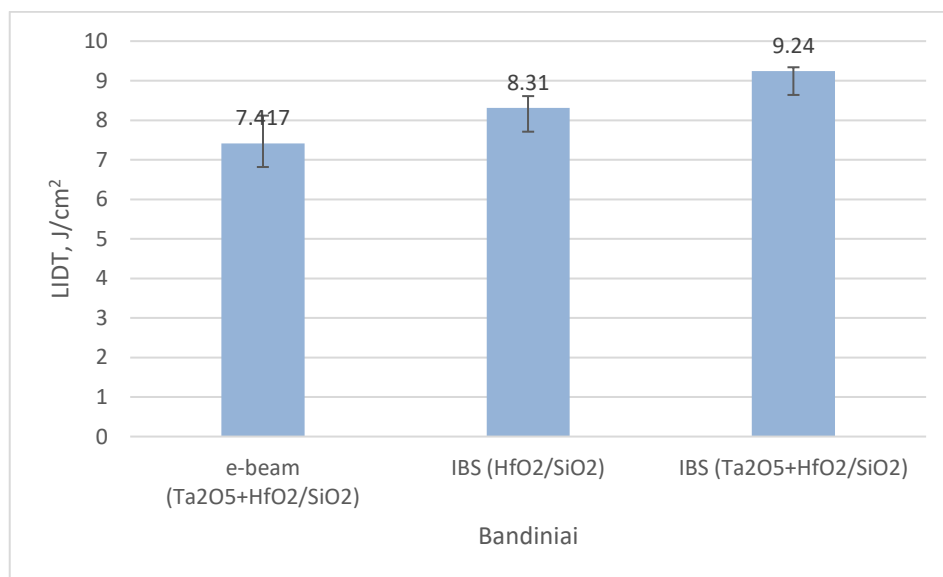


23 pav. IBS technologijos dizaino su Ta₂O₅+HfO₂/SiO₂ dengimo medžiagomis lazerinės pažaidos vertės priklausomybė nuo impulsų skaičiaus į tiriamąjį tašką



24 pav. IBS technologijos dizaino su $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$ dengimo medžiagomis lazerinės pažaidos vertės priklausomybė nuo impulsų skaičiaus į tiriamąjį tašką

Svarbu pastebėti, kad tiriant ir lyginant elementus toliau buvo naudojamas 1000-į-1 lazerinės pažaidos tyrimo protokolas, nes buvo matoma tendencija, jog LIDT mažėja didėjant impulsų skaičiui. Toks tyrimo metodas pasirinktas dėl to, jog geriau atspindi optinio elemento ilgaamžiškumą nei tyrimo protokolas 1-į-1. 25 paveiksle yra pateikiami apibendrinti rezultatai pasirinktiems dengimo dizainams.



25 pav. Skirtingų optinių dangų dizainų lazerinės pažaidos vertės, kai impulsų skaičius yra lygus 1000 į tiriamą tašką

E-beam technologija gaminti veidrodžiai su $\text{Ta}_2\text{O}_5+\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$ dengimo medžiagomis parodė žemiausias lazerinio atsparumo vertes - 7.417 (+0.7/-0.6) J/cm², nors pasiekė reikalingas

atspindžio vertės ties 532 nm bangos ilgiu. Matoma tendencija, jog šiame darbe gautos žemiausios LIDT vertės koreliuoja su paviršiaus kokybės rezultatais – šio e-beam proceso veidrodžiai turėjo prasčiausią paviršiaus kokybės klasę iš visų atliktų dangų procesų (40-20 S-D), todėl tikėtina, jog matavimo metu lazerinė spinduliuotė galėjo pataikyti tiesiai į defektų sancaupą ir pažeisti elementą prie mažesnių energijos intensyvumų. 26 paveiksle pavaizduota e-beam technologija uždengto veidrodžio tipinė pažeidimo morfologija, atlikta Nomarskio mikroskopu: kairėje prieš matavimą, dešinėje po matavimo. Matoma, jog prieš matavimus buvo stebimi vos keli defektai, kai po testavimo – jų kiekis išryškėjo, tankis padidėjo ir pluoštas pažeidė elemento paviršių.

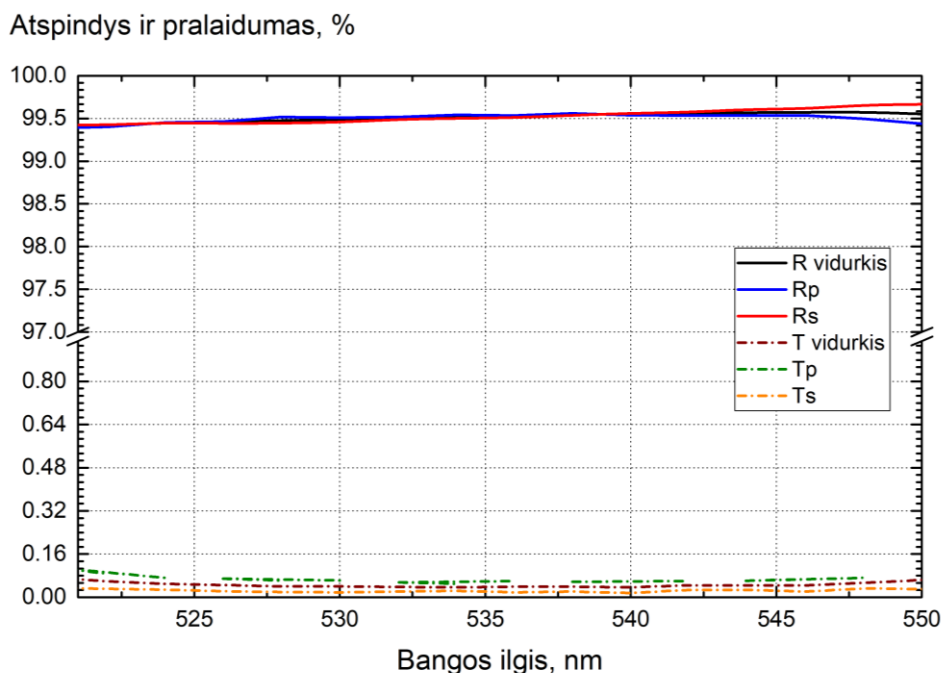


26 pav. E-beam technologija uždengto veidrodžio tipinė pažeidimo morfologija: prieš matavimus (kairėje), po matavimų (dešinėje)

Šio tyrimo metu taip pat buvo nustatyta, kad IBS dangos dizainas su Ta_2O_5 ir SiO_2 medžiagomis, suformuojant viršutinius HfO_2 sluoksnius leidžia pasiekti aukštesnes elementų paviršiaus lazerinės pažaidos slenksčio vertes. Lyginant su dangos dizainu, kuomet buvo naudojamos tik HfO_2 ir SiO_2 dengimo medžiagos, pažaidos slenksčio vertė padidėjo nuo $8.31 \text{ J/cm}^2 (+0.3/-0.6)$ iki $9.24 \text{ J/cm}^2 (+0.1/-0.6)$ ir šis dizainas parodė geriausią dengtų optinių pagrindukų atsparumą 532 nm bangos ilgio lazerio spinduliuotei. Taip pat galima daryti išvadą, jog IBS technologija padengtų elementų LIDT vertės buvo pasiektos aukštesnės dėl geresnės elementų kokybės nei e-beam technologijos atveju – kokybė buvo įvertinta kaip 20-10 S-D, kuomet vieno iš e-beam technologijos atveju paviršiaus kokybės klasė buvo apibrėžta kaip 40-20. Vadinasi, IBS technologija užgarinti veidrodžiai turėjo mažiau paviršiaus defektų. Tačiau kadangi visos gautos lazerinės pažaidos vertės paklaidų ribose sutampa, šiame etape tiksliai negalima pasakyti kuris iš pagamintų veidrodžių yra ryškiai pranašesnis. Verta paminėti, jog visi atlikti lazerinės spinduliuotės atsparumo matavimai vis dar neatspindėjo reikiamų apibrėžtų LIDT verčių komerciniam klientui – kaip minėta anksčiau, LIDT vertės, apibrėžtos kliento turėtų tenkinti $>10 \text{ J/cm}^2$ tirtame režime. Tad šis tyrimas ir toliau buvo tęsiamas, siekiant pilnai pagerinti optinio elemento veikimo savybes ir tenkinti reikiamas atspindžio bei lazerinės spinduliuotės atsparumo vertes, reikalingas efektyvinti generuojamo pluošto galią medicininių lazerių gamintojams.

4.9. Pakartotinis gamybos procesas

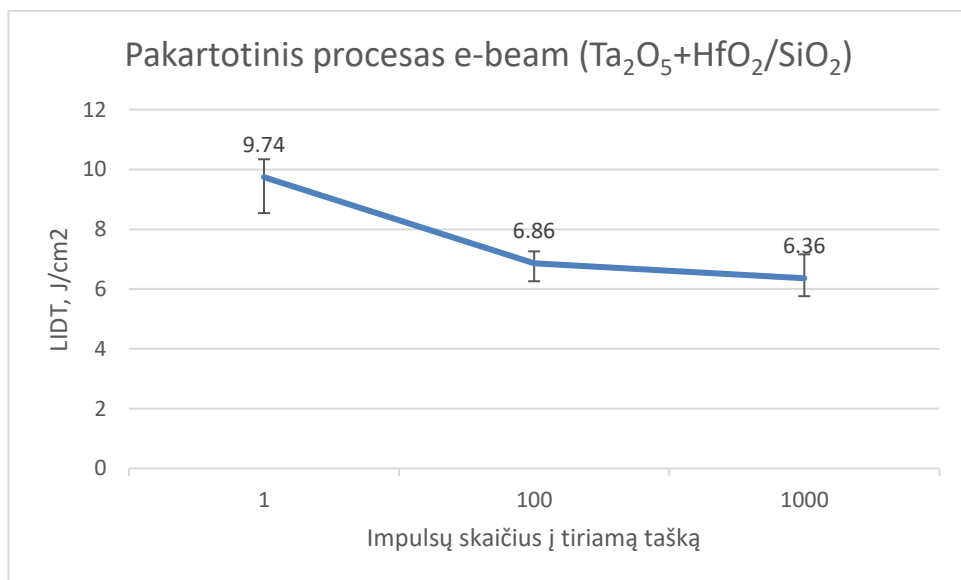
Atsižvelgiant į atliktus spektrinius, sugerties bei sklaidos, paviršiaus šiurkštumo tyrimus, kurie aprašyti 4.2-4.8 skyriuose, buvo siekiama uždengti pakartotinį dengimo procesą optimizuojant visus parametrus, kurie buvo atrasti kaip optimaliausi šio darbo metu. Buvo pasirinkta veidrodžius gaminti su e-beam technologija, kuri parodė mažesnes paviršiaus šiurkštumo vertes lyginant su IBS technologijos veidrodžiais. Veidrodžiams pagaminti dangos dizainui buvo pasirinkta naudoti SiO₂ kaip žemą lūžio rodiklio medžiagą bei Ta₂O₅ kaip aukštą lūžio rodiklio medžiagą. Atsižvelgiant į 25 paveikslą ir gautus rezultatus su IBS technologija, jog formuojant papildomus sluoksnius su HfO₂ įmanoma pagerinti lazerinės spinduliuotės atsparumo vertes, buvo pasirinkta šios medžiagos į dangos dizainą įtraukti keliais sluoksniais daugiau nei pirminiu variantu tikintis, jog šiuo atveju tiek spektriniai, tiek lazerinio atsparumo reikalavimai bus pasiekti. Iš papildomų šiurkštumo matavimų buvo identifikuota, jog SiO₂ turi didžiausią įtaką galutiniam optinio komponento paviršiaus šiurkštumui, todėl atradus optimalų fono dujų kiekį SiO₂ mažiausiam šiurkštumui pasiekti, jis buvo parinktas pakartotiniam dengimui. Įvertinti, ar pakartotinis gamybos procesas, optimizuojant šiuos visus paminėtus parametrus turės teigiamą įtaką minėtoms charakteristikoms, buvo pakartotinai atlikti spektriniai bei LIDT matavimai. 27 paveiksle pateikti naujai pagamintų veidrodžių atspindžio ir pralaidumo rezultatai, kurie buvo atlikti naudojantis Photon RT (*EssentOptics*) spektrofotometru, matuojant 45° kritimo kampu.



27 pav. Pakartotinio dangų proceso atspindys ir pralaidumas (e-beam technologija, Ta₂O₅+HfO₂/SiO₂ dengimo medžiagos)

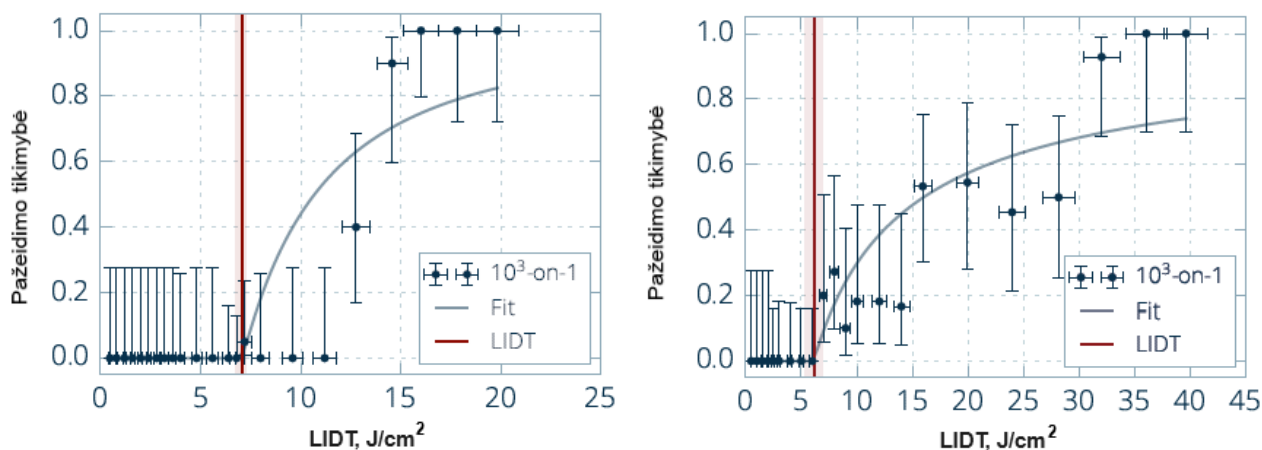
Kaip matome iš pateikto paveikslo, spektriniai reikalavimai ties 532 nm bangos ilgiu buvo pasiekti ir pagerinti – vertės siekia >99.5%. Lyginant su pirminiu šių veidrodžių dizainu, kuris buvo pavaizduotas 7 paveiksle, atspindį pavyko pagerinti nuo 99.2% iki 99.5%. Šie rezultatai leidžia teigti, jog identifikavus optimalų dengimo proceso metu fono dujų kiekį SiO₂ šiurkštumas sumažėjo, taip leisdamas sumažinti veidrodžių sklaidą ir padidinti atspindžio koeficientą. Norint šį teiginį pagrįsti, šis darbas turi būti tęsiamas pakartojant atitinkamus paviršiaus šiurkštumo, sugerties ir sklaidos matavimus.

Įvertinus pakartotinio dengimo veidrodžių spektrą, toliau buvo tikrinamas elemento atsparumas lazerio spinduliotei. Matavimai buvo atlikti įmonėje Lidaris identišku principu, kaip aprašyta 4.8 skyriuje. Gautos lazerinės pažaidos vertės pateiktos 28 paveiksle.



28 pav. E-beam technologijos pakartotinio proceso lazerinės pažaidos vertės priklausomybė nuo impulsų skaičiaus į tiriamąjį tašką

Šie rezultatai paklaidų ribose atsikartoja su 25 paveiksle pavaizduotais tyrimo rezultatais e-beam technologijos atveju. Kai rezultatai paklaidų ribose sutampa, tokiu atveju verta atsižvelgti į gautas pažeidimo tikimybes, kurios pavaizduotos 29 paveiksle.



29 pav. E-beam technologijos pirminio (kairėje) ir pakartotinio proceso (dešinėje) pažeidimo tikimybių palyginimas

Pažeidimo tikimybė buvo apskaičiuojama padalinus pažeistų sričių skaičių iš bendrų atliktų matavimų skaičiaus ir lazerinės spinduliuotės intensyvumas buvo keliamas tol, kol visos skirtingos bandinio vietos tapo pažeistos - tuomet pažeidimo tikimybė lygi 100%. Vertinant pirmojo proceso veidrodžių pažeidimo tikimybes galima pastebėti, jog ties 16-17 J/cm² riba pasiekiamė 100% tikimybę elemento pažeidimui, kuomet pakartotinio proceso matavimai rodo, jog ties tais pačiais intensyvumais veidrodžių pažeidimo tikimybės pasiekia tik 50%. Pakartotinio proceso 100% pažeidimo tikimybę pasiekiamė tik ties 35 J/cm² riba, kas leidžia teigti, jog veidrodžių atnaujintas dangos dizainas turi 2 kartus mažesnę tikimybę lazerinei pažeidai, nei pirminio proceso atveju. Tačiau šiame etape lazerinio atsparumo verčių šioms veidrodžiams stipriai pagerinti nepavyko ir gautos LIDT vertės vis dar nesiekė užsibrėžtų darbo pradžioje, todėl šis tyrimas reikalauja tolimesnio dangų proceso vystymo ir tobulinimo, tuo pačiu nesuprastinant parametru, rastų kaip optimaliausių šio darbo eigoje.

5. Pagrindiniai rezultatai ir išvados

1. Pagaminus ir įvertinus keturis aukšto atspindžio veidrodžius galima teigti, kad dangos su $Ta_2O_5+HfO_2$ ir SiO_2 dengimo medžiagomis leidžia gauti geresnius atspindžio koeficientus, ypač taikant e-beam technologiją. Gauti atspindžio koeficientai su $Ta_2O_5+HfO_2$ ir SiO_2 dengimo medžiagomis e-beam 99.20%, IBS 99.05%, o su HfO_2 ir SiO_2 dengimo medžiagomis e-beam 98.60%, IBS 96.0% atitinkamai.
2. Optimizavus dengimo proceso fono dujų kiekį mažiausiam SiO_2 paviršiaus šiurkštumui pasiekti, e-beam technologija gamintiems veidrodžiams su $Ta_2O_5+HfO_2$ ir SiO_2 dengimo medžiagomis pavyko padidinti atspindžio koeficientą nuo 99.2% iki 99.5%.
3. Įvertinus sugerties ir sklaidos nuostolius veidrodžiams, gamintiems su HfO_2 ir SiO_2 dengimo medžiagomis nustatyta, kad dėl sklaidos veidrodžiai praranda 1.06% (e-beam) bei 3.81% (IBS), o sugerties nuostoliai siekia iki 0.045% (e-beam) ir 0.040% (IBS).
4. Veidrodžių, pagamintų su $Ta_2O_5+HfO_2$ ir SiO_2 dengimo medžiagomis išmatuotas paviršiaus šiurkštumas yra 2 kartus mažesnis nei veidrodžių, gamintų su HfO_2 ir SiO_2 dengimo medžiagomis. Taigi, taikant mažesnio šiurkštumo monosluoksnius daugiasluoksnių dangų kombinacijoje, galima pasiekti geresnes spektrines charakteristikas.
5. Pagal pažaidų tikimybių matavimus nustatyta, jog padidinus HfO_2 sluoksnių skaičių $Ta_2O_5+HfO_2$ ir SiO_2 dangos dizaine lazerinės pažaidos tikimybė sumažėja 2 kartus.

6. Santrauka

Atėnė Gabrielė Valiulytė

AUKŠTO ATSPINDŽIO DAUGIASLUOKSNIŲ DIELEKTRINIŲ VEIDRODŽIŲ SKLAIDOS NUOSTOLIŲ IR ATSPARUMO LAZERINEI SPINDULIUOTEI TYRIMAS

Šiame darbe siekiama nustatyti tinkamiausią technologiją bei jos parametrus aukšto atspindžio daugiasluoksnių dielektrinių dvibangių veidrodžių gamybai, kurie būtų pritaikyti medicininių lazerių gamintojų rinkai. Tokių veidrodžių vystymo ir tobulinimo poreikis atsiranda iš pasaulinėje fotonikos rinkoje vyraujančių tendencijų, t.y. siekio užtikrinti spektrinius ir lazerinio atsparumo verčių reikalavimus bei jų atsikartojamumą masinės produkcijos atveju.

Tyrimo metu buvo gaminami 4 skirtingų dangos dizainų bei gamybos technologijų veidrodžiai, siekiant įvertinti visų nuostolius pagal atspindžio, pralaidumo, sugerties bei sklaidos matavimus ir parinkti tinkamiausius tolimesniam eksperimento plėtojimui. Buvo išsiaiškinta, jog geriausias rezultatas spektro atžvilgiu buvo pasiektas veidrodžiams, kurie buvo gaminti su Ta₂O₅ ir SiO₂ medžiagomis, suformuojant tik viršutinius HfO₂ sluoksnius e-beam technologija (99.2%), o didžiausius sklaidos nuostolius parodė IBS technologijos veidrodžiai, kurie buvo dengiami tik HfO₂ ir SiO₂ medžiagų pagrindu (3.81%).

Žinant, jog sklaida tiesiogiai priklauso nuo paviršiaus šiurkštumo, buvo vertinami visų pagrindukų šiurkštumai įvairiais metodais ir buvo siekiama atrasti pagrindinius veiksnius, kurie lemia padidėjusią sklaidą. Norint sumažinti sklaidos nuostolius, buvo tiriami ir monosluoksnių dangų šiurkštumai. Išsiaiškinta, jog monosluoksniuose didžiausią įtaką paviršiaus šiurkštumui daro SiO₂, tad sekančiame etape buvo ieškomi optimaliausi dengimo proceso parametrai mažiausiam šios medžiagos šiurkštumui užtikrinti.

Tolimesniame etape buvo tiriamas veidrodžių lazerinis atsparumas, tikintis, jog veidrodžiai tenkins vertes, reikalingas medicininių lazerių gamintojui. Geriausias vertes parodė IBS veidrodžiai, gaminti su Ta₂O₅, HfO₂ ir SiO₂ (9.24 (+0.1/-0.6) J/cm²), tačiau šioje tyrimo fazėje vis dar netenkino kliento pateiktų reikalavimų.

Paskutinėje tyrimo fazėje buvo atliktas pakartotinis veidrodžių gamybos procesas su optimaliausiaisiais parametrais, rastais šio tyrimo eigoje. Atspindžio koeficientas buvo pagerintas nuo 99.2% iki 99.5%, o pagal pažeidimų tikimybių matavimus dangos lazerinės pažaidos tikimybė sumažėjo daugiau nei 2 kartus lyginant su pirminiu dangos procesu. Kadangi užsibrėžtų lazerinių atsparumo verčių šiame žingsnyje pasiekti vis dar nepavyko, darbas reikalauja pratęsimo ir tolimesnio dangų proceso vystymo ir tobulinimo.

7. Summary

Atėnė Gabrielė Valiulytė

INVESTIGATION OF SCATTERING LOSS AND LASER RESISTANCE OF HIGH-REFLECTIVITY MULTILAYER DIELECTRIC MIRRORS

This work aims to determine the most suitable technology and its parameters for the production of high-reflectivity multilayer dual-wavelength dielectric mirrors, which would be adapted to the market of medical laser manufacturers. The need for the development and improvement of such mirrors arises from the prevailing trends in the global photonics market, i.e. in order to ensure the requirements of spectral and laser resistance values and their repeatability in the case of mass production.

During the research, 4 mirrors with different coating designs and technologies were produced to evaluate losses based on reflection, transmittance, absorption and scattering measurements to select the most suitable ones for further development of the experiment. It was found that the best result in terms of the spectrum was achieved for mirrors that were produced with Ta₂O₅ and SiO₂ materials, forming only the upper layers of HfO₂ by e-beam technology (99.2%), and the highest scattering losses were shown by IBS technology mirrors that were coated only with HfO₂ and SiO₂ materials (3.81%). Knowing that the scattering directly depends on the surface roughness, the roughness of all substrates was evaluated by various methods and the aim was to discover the main factors that lead to the increased scattering. In order to eliminate the resulting losses, the roughness of monolayer coatings was also studied. It was found that SiO₂ has the greatest influence on the surface roughness in monolayers, so in the next stage, the most optimal parameters of the coating process were searched to ensure the lowest roughness of this material.

In a further step, the laser resistance of the mirrors was investigated in the hope that the mirrors would meet the values required by the manufacturer of medical lasers. The best LIDT values were shown by IBS mirrors made with Ta₂O₅+HfO₂ and SiO₂ (9.24 +0.1/-0.6 J/cm²), but still did not meet the requirements given by the client in this research phase.

In the last phase of the research, the mirror manufacturing process was repeated with the most optimal parameters found in the course of this research. The reflection coefficient has been improved from 99.2% to 99.5%, and according to damage probability measurements, the probability of laser damage to the coating decreased by more than 2 times compared to the primary coating process. Since the targeted laser resistance values were still not achieved at this step, the work requires extension and further development and improvement of the coating process.

8. Literatūros sąrašas

- [1] A. Aleksandrova, Lazeris – medicinos ateitis, *Sveikas žmogus* (2011).
- [2] L. Gallais, M. Commandré, Laser-induced damage thresholds of bulk and coating optical materials at 1030 nm, 500 fs., *Applied Optics*, **53** (2014), <https://doi.org/10.1364/AO.53.00A186>.
- [3] K. Juškevičius, Plonųjų dielektrinių sluoksnių optinių ir fizinių savybių tyrimas bei jų formavimo technologijų optimizavimas, *Vilniaus Universitetas* (2014).
- [4] Corning LTD, HPFS 7979, 7980, 8655 Fused Silica (2015).
- [5] Optical Thin Films and Coatings, From materials to Applications, *Woodhead Publishing* (2018), <https://doi.org/10.1016/C2016-0-02583-4>.
- [6] J. H. Campbell, Damage resistant optical glasses for high power lasers: A continuing glass science and technology challenge, *University of California* (2002).
- [7] L. Gallais, M. Commandré, H. Krol, C. Grezes-Besset, D. Torricini and G. Lagies, Influence of polishing and cleaning on the laser-induced damage threshold of substrates and coatings at 1064 nm, *Optical Engineering*, **46** (2007), <https://doi.org/10.1117/1.2542122>.
- [8] L. Gallais, B. Mangote, M. Zerrad, M. Commandre, A. Melninkaitis, J. Mirauskas, M. Jeskevic and V. Sirutkaitis, Laser-induced damage of hafnia coatings as a function of pulse duration in the femtosecond to nanosecond range, *Applied Optics*, **50**, 178-187 (2011), <https://doi.org/10.1364/AO.50.00C178>.
- [9] A. Thelen, Design of optical interference coatings, *McGraw-Hill* (1989).
- [10] K. Juškevičius, S. Kičas, T. Tolenis, R. Buzelis and R. Drazdys, Metalų oksidų ir jų mišinių panaudojimas kintamo lūžio rodiklio optinėms dangoms formuoti, *Fizinių ir technologijos mokslų centras* (2011), <https://doi.org/10.3846/mla.2011.119>.
- [11] A. Anders, A structure zone diagram including plasma-based deposition and ion etching, *Thin Solid Films*, **518**, 4087-4090 (2010), <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2009.10.145>.
- [12] D. Manova, J. W. Gerlach, and S. Mändl, Thin film deposition using energetic ions, *Materials*, **3**, 4109-4141 (2010), <https://doi.org/10.3390/ma3084109>.

- [13] G. Abromavičius, Microstructural and optical properties of metal oxide optical coatings deposited by ion beam sputtering and their application in UV spectral range, *Vilniaus Universitetas* (2020).
- [14] D. M. Mattox, Handbook of Physical Vapor Deposition (PVD) Processing, *Cambridge University Press* (1998).
- [15] C.-J. Tang, C.-C. Jaing, K.-H. Lee and C.-C Lee, Effect of thermal annealing on the optical properties and residual stress of graded-index-like films deposited by radio-frequency ion-beam sputtering, *Applied Optics*, **50** (2011), <https://doi.org/10.1364/AO.50.000C62>.
- [16] M. Cevro, G. Carter, Ion-beam and dual-ion-beam sputter deposition of tantalum oxide films, *Optical Engineering*, **26** (1995), <https://doi.org/10.1117/12.188616>.
- [17] S. Schröder, M. Garrick, M. Duparré, M. Trost, X. Cheng, J. Zhang and Z. Wang, Origins of light scattering from thin film coatings, *Thin Solid Films* (2015), <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2015.02.077>.
- [18] M. Maciulevičius, Optinių dangų ir lazerinių elementų šviesos sklaidos tyrimai plačiame spektro ruože, *Vilniaus Universitetas* (2009).
- [19] Edmund Optics, A Guide to (Not Over) Specifying Losses in Laser Optics (2023), <https://www.edmundoptics.com/knowledge-center/application-notes/optics/a-guide-to-not-over-specifying-losses-in-laser-optics/> [žiūr. 2024-03-16].
- [20] A. Martin, Measurement of Absorption in Optical Components, *Research Electro-Optics*, (2016).
- [21] E. Atkočaitis, M. Keršys, S. Kičas, V. Grašytė and A. Melninkaitis, Nonlinear absorptance of single-layer HfO₂ coatings: investigating the impact of thermal and laser annealing, *Optics Express*, **31**, 38376-38387 (2023), <https://doi.org/10.1364/OE.502860>.
- [22] J. Tollerud, Scatter loss and surface roughness of hafnium oxide thin films, *Colorado State University* (2017).
- [23] R. Paschotta, Optical Profilometers, *RP Photonics Encyclopedia* (2024), <https://doi.org/10.61835/yvt>.

- [24] A. Dzedzickis, V. Bučinskas, Atominių jėgų mikroskopo jutiklio mechaninės struktūros analizė, *Vilniaus Gedimino technikos universitetas* (2014).
- [25] R. M. Wood, Laser-Induced Damage of Optical Materials, *CRC Press* (2013), <https://doi.org/10.1201/9781420034059>.
- [26] W. Nomura, T. Kawazoe, T. Yatsui, M. Naruse and 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*, **5** (2014), <https://doi.org/10.3762/bjnano.5.146>.
- [27] J. Strobel, Cleaning of parts for precision-optic and glass substrates before coating, *Proceedings of SPIE* (2003), <https://doi.org/10.1117/12.2284024>.
- [28] Refractiveindex.info, Refractive index of Ta2O5 (2013), <<https://refractiveindex.info/?shelf=main&book=Ta2O5&page=Bright-amorphous>> [žiūr. 2024-02-16].
- [29] Refractiveindex.info, Refractive index of HfO2 (2023) <<https://refractiveindex.info/?shelf=main&book=HfO2&page=Al-Kuhaili>> [žiūr. 2024-02-16].
- [30] Refractiveindex.info, Refractive index of SiO2 (2020), <<https://refractiveindex.info/?shelf=main&book=SiO2&page=Malitson>> [žiūr. 2024-02-16].
- [31] Laser Mechanisms, *Articulated Arms* (2017) <<https://www.lasermech.com/articulated-arms/>> [žiūr. 2024-04-04].
- [32] L. Mažulė, Visuminės integruotos sklaidos matavimai, naudojant moduluotos kokybės Nd:YAG lazerio harmonikas, ir jų taikymai įvairiuose lazerinių komponentų gamybos procesuose, *Vilniaus Universitetas* (2020).
- [33] G. Sridhar, S. Agarwalla, S. Singh and L. Gantayet, Cavity ring-down technique for measurement of reflectivity of high reflectivity mirrors with high accuracy, *Pramana - J Phys*, **75**, 1233–1239 (2010), <https://doi.org/10.1007/s12043-010-0211-8>.
- [34] B. Marzbanrad, E. Toyserkani and H. Jahed, Characterization of Single- and Multilayer Cold-Spray Coating of Zn on AZ31B, *Surface and Coatings Technology*, **416** (2021), <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.127155>.

9. Padėka

Ypatingai norėčiau padėkoti savo darbo vadovui dr. Laurynui Lukoševičiui už jo idėjas, pastabas, skirtą laiką, vadovavimą bei visokeriopą suteiktą pagalbą ruošiant šį darbą.

Dėkoju darbo konsultatui doc. Vytautui Juknai už konsultacijas ir patarimus rašant šį darbą.

Dėkoju doktorantui Erikui Atkočaičiui už pagalbą atliekant sklaidos bei sugerties tyrimus Lazerinių tyrimų centre.

Taip pat esu dėkinga tečiui Gintarui, mamai Irmai bei kitiems mano šeimos nariams ir draugams už palaikymą studijų metais.