

**VILNIAUS UNIVERSITETAS
FIZIKOS FAKULTETAS
KVANTINĖS ELEKTRONIKOS KATEDRA**

Viktorija Plerpaitė

**LAZERINĘ PAŽAIDĄ SUKELIANČIŲ DEFEKTOŲ BEI JŲ ANSAMBLIŲ TYRIMAS PANAUDOJANT
RASTRINIO SKENAVIMO IR PAŽAIDOS TIKIMYBĖS METODUS**

Magistro studijų baigiamasis darbas
(Studijų programa – LAZERINĖ TECHNOLOGIJA)

Studentė	Viktorija Plerpaitė
Darbo vadovas	Doc. dr. Andrius Melninkaitis
Recenzentas	Dr. Kęstutis Juškevičius
Katedros vedėjas	Prof. habil. dr. Valdas Sirutkaitis

Vilnius 2016

TURINYS

ĮVADAS	3
1 LITERATŪROS APŽVALGA.....	4
1.1 OPTINĖ MEDŽIAGOS PAŽAIDA	4
1.2 DEFEKTO IR LAZERINĖS SPINDULIUOTĖS SĄVEIKA.....	4
1.3 OPTINĮ ATSPARUMĄ RIBOJANTYS DEFEKTAI	6
1.4 DEFEKTŲ ANSAMBLIAI IR JŲ SKIRSTINIAI.....	8
1.5 OPTINIŲ ELEMENTŲ TARŠA ABLIACIJOS PRODUKTAIS	12
2 DARBO METODIKA.....	15
2.1 BANDINIO PARUOŠIMAS.....	15
2.2 PAŽAIDOS TIKIMYBĖS METODAS.....	15
2.3 RASTRINIO SKENAVIMO METODAS	16
2.4 EKSPERIMENTINĖ ĮRANGA.....	18
2.5 DEFEKTŲ ANSAMBLIŲ TYRIMO METODIKA	19
3 PAGRINDINIAI REZULTATAI IR JŲ APTARIMAS.....	22
3.1 DEFEKTŲ TANKIO NUSTATYMAS IR ANSAMBLIŲ PALYGINIMAS.....	22
3.2 RASTRINIO SKENAVIMO PROCEDŪRĄ RIBOJANTYS VEIKSNIAI	26
3.2.1 PAVIRŠIAUS DEFEKTŲ INKUBACIJA	26
3.2.2 BANDINIO TARŠA ABLIACIJOS PRODUKTAIS	27
3.3 OPTINĖS PAŽAIDOS MORFOLOGIJA	30
4 PAGRINDINIAI REZULTATAI IR IŠVADOS	32
LITERATŪRA.....	33
SANTRAUKA.....	36
SUMMARY	37

ĮVADAS

Įvairūs optiniai komponentai: lęšiai, veidrodėliai, kristalai, pleištai, langeliai ir kt., yra neatsiejama šiuolaikinių lazerinių technologijų dalis. Sparčiai didėjant tiek mokslinių tyrimų, tiek lazerių pramonės apimtims specializuotų optinių elementų kokybei skiriamas vis didesnis dėmesys. Pasaulyje šiuo metu yra kuriamos itin galingos lazerinės sistemos, kuriose optika turi veikti nepriekaištingai net ir ekstremalios spinduliuotės sąlygomis. Bet koks atsitiktinis lokaliai sugeriantis defektas optikoje gali lemti viso optinio komponento pažaidą ir taip sukelti didelius nuostolius visai lazerinei sistemai. Taigi, kiekvienas optinis komponentas, naudojamas lazerinėje sistemoje, turi atitikti tam tikrus paviršiaus kokybės reikalavimus. Todėl svarbu optimizuoti kiekvieną optinio elemento paruošimo etapą.

Vienas iš kritinių tokių elementų gamybos etapų yra paviršiaus poliravimas. Šio sudėtingo technologinio proceso metu susiformuoja įvairūs paviršiniai ir popaviršiniai defektai, dažnai ribojantys komponento optinio atsparumo slenkstį. Norint optimizuoti gamybos procesus pirmiausia reikia išmokti atpažinti defektus ir kaip įmanoma geriau juos apibūdinti kiekybiškai. Mokslinėje literatūroje aptariami keletas matematinių modelių, aprašančių optinį atsparumą ribojančių defektų skirstinius: Dirako deltos (išsigimęs), laipsninės ir Gausinės funkcijos bei sudėtingesni jungtiniai modeliai, tačiau iki šiol nesutariama, kuris iš jų galėtų vienareikšmiškai aprašyti tikrąjį defektų skirstinį. Eksperimentiškai defektų tankis gali būti nustatomas pažaidos tikimybės ir rastrinio skenavimo metodais. Taikant šias dvi metodologijas galima charakterizuoti bandinio paviršiaus defektus ir vėliau šią informaciją pritaikyti optimizuojant gamybos procesus.

Taigi, pagrindinis šio mokslinio tiriamojo darbo **tikslas** – ištirti pažaidos tikimybės ir rastrinio skenavimo metodikų tinkamumą poliravimo defektų ansambliui apibūdinti.

Darbo uždaviniai:

1. Atlikti rastrinio skenavimo ir pažaidos tikimybės eksperimentus lydyto kvarco optinio padėklo defektams tirti.
2. Išanalizuoti gautus duomenis taikant skirtingus defektų ansamblių modelius, bei palyginti rezultatus.
3. Nustatyti, kuris iš rastrinį skenavimą ribojančių veiksnių daro lemiamą įtaką metodo tikslumui.
4. Esant prieštaravimui tarp skirtingų metodikų identifikuoti galimo neatitikimo priežastis.

1 LITERATŪROS APŽVALGA

1.1 OPTINĖ MEDŽIAGOS PAŽAIDA

Lazerinės spinduliuotės destruktinis poveikis įvairiems skaidriems optiniams komponentams buvo pastebėtas beveik iškart po pirmųjų lazerių sukūrimo, atsiradus galingiems moduluotos kokybės kietakūniams lazeriams [1]. Nuo pat tada optikos atsparumas intensyviai ir kryptingam šviesos srautui, ypač UV srityje, yra tikras galvos skausmas lazerinių sistemų kūrėjams. Todėl įvairūs lazerio spinduliuote indukuoti struktūriniai pakitimai, darantys tiesioginę įtaką medžiagos optiniam atsparumui, tyrinėjami jau keletą dešimtmečių. Vienas iš parametrų, nusakančių kaip gerai medžiaga sugeba priešintis per ją sklindančios lazerio spinduliuotės poveikiui, yra pažaidos lazerio spinduliuote slenkstis (sutrump. PLSS). Pažaidos slenkstis nusakomas kaip didžiausias lazerio spinduliuotės energijos ar galios tankis, kuriuo eksponuojant optinį paviršių, pažaidos tikimybė yra lygi nuliui [2]. Viršijus šią kritinę ribą, paveikta medžiaga lokaliai negrįžtamai pakinta – lydosi, lūžta, garuoja, keičiasi jos cheminė sudėtis. Taigi, bet koks vizualiai matomas lazeriu indukuotas struktūrinis medžiagos pokytis vadinamas optine medžiagos pažaida.

Optinė pažaida gali pasireikšti per optinį elementą sklindančio bangos fronto modifikacijomis, tačiau dažniausiai ji yra katastrofinio pobūdžio – medžiagos ir spinduliuotės sąveikos metu vyksta greitas lokalus medžiagos išilimas, slėgio padidėjimas, įtempių susidarymas, smūginių bangų formavimasis ir pan. Sukaupia energija relaksuoja, transformuojasi į kitas formas, dėl ko vyksta tam tikri pokyčiai gardelės struktūroje ir galiausiai medžiaga yra suardoma. Atitinkamai negrįžtamai keičiasi medžiagos charakteristikos ir jos optinė kokybė. Tokie liekamieji medžiagos pakitimai galimi tiek paviršiuje, tiek tūryje. Optinė pažaida ir jos slenkščio matavimo reikalavimai yra reglamentuoti tarptautiniuose optinio atsparumo matavimo standartuose ISO-21254-1 [2] ir ISO-21254-2 [3]. Juose pažaidos slenkstis apibrėžiamas kaip bet koks liekamas lazerio spinduliuotės poveikis optinio element paviršiuje, kurį galime detektuoti *Nomarski* tipo interferencinio kontrasto mikroskopu, kurio objektyvo didinimas yra ne mažesnis kaip 100x.

1.2 DEFEKTO IR LAZERINĖS SPINDULIUOTĖS SĄVEIKA

Pagrindinė lazeriu indukuotos pažaidos atsiradimo priežastis – veikimo metu šuoliškai kintanti medžiagos sugertis. Toks staigus medžiagos savybių pokytis, galintis sukelti optinę pažaidą, įmanomas dėl netiesinės sugerties mechanizmo, kai intensyviu išoriniu elektromagnetiniu lauku valentiniai elektronai sužadunami į laidumo juostą. Pasiėkus tam tikrą kritinį laisvųjų elektronų tankį (optiniame spektro ruože $10^{19} - 10^{21}$ el./cm³ [4]) ir vykstant efektyviems elektronų susidūrimams su gardele, sukaupiamas tam tikras šiluminės energijos kiekis, kurio pakanka gardelės ryšiams nutraukti. Išskiriami du pagrindiniai laisvųjų elektronų dauginimosi mechanizmai – griūtinė jonizacija ir

fotojonizacija. Priklausomai nuo lazerio spinduliuotės intensyvumo ir bangos ilgio fotojonizacija skirstoma į daugiafotonę ir tunelinę [5].

Nanosekundiniame lazerio veikos režime laisvųjų elektronų generacija yra efektyvi dėl smūginės jonizacijos, kuriai inicijuoti užtenka bent vieno laisvojo elektrono, jau esančio laidumo juostoje. Toks laisvasis elektronas, sugerdamas šviesos fotonus įgyja papildomos energijos, kurią, sąveikaudamas su medžiagos gardele, gali smūgiškai perduoti valentinėje juostoje esančiam elektronui ir taip jį jonizuoti į laidumo juostą, pats taip pat likdamas joje. Veikiant intensyviai elektromagnetinei spinduliuotei šie du laisvieji elektronai yra įgreitinami ir gali jonizuoti dar du elektronus į laidumo juostą. Tęsiantis šiam procesui, laidumo juostoje prasideda griūtinis laisvųjų elektronų skaičius augimas. Šio proceso metu laisvųjų elektronų skaičius laidumo juostoje daugėja eksponentiškai:

$$N(t) = N_0 e^{\beta t} , \quad (1.1)$$

kur N_0 – pradinis laisvųjų elektronų skaičius laidumo juostoje, β – griūtinės jonizacijos sparta. Tam, kad griūtinė jonizacija virstų dominuojančiu laisvųjų elektronų žadinimo mechanizmu, elektronų koncentracija turi būti didesnė nei 10^{19} cm^{-3} [4]. Tokia koncentracija gali būti pasiekta po daugiafotonės jonizacijos proceso, taip pat dėl medžiagos defektų ir priemaišų, sukuriančių lokalius defektų lygmenis draustiniame medžiagos tarpe ir padidinančių laisvųjų elektronų skaičių laidumo juostoje.

Mokslinėje literatūroje aptariami keli defektų ir priemaišų įtakos optiniam atsparumui modeliai. Pagal vieną iš pasiūlytų modelių pažeidimą inicijuoja elektromagnetinės spinduliuotės intensyvumo padidėjimas paviršinių trūkių ribose. Šį efektą nusako keletas parametrų, tokių kaip spinduliuotės poliarizacija, kritimo į paviršių kampas, tačiau labiausiai elektromagnetinio lauko intensyvumo pokyčius lemia defekto geometrija. Pavyzdžiui, Kalifornijos universiteto mokslininkai apskaičiavo, jog elektromagnetinio lauko amplitudė dėl konstruktyvios vidinių atspindžių interferencijos kūginės formos įtrūkio vietoje gali padidėti 2 ir daugiau kartų. Tuo tarpu plokštuminiuose įtrūkiuose gali susidaryti itin palankios sąlygos daugkartiniams atspindžiams nuo sienelių ir statmenai kritusi lazerio spinduliuotė gali tapti net iki 10 kartų intensyvesnė. Šių mokslininkų pasiūlytas modelis, plačiau aptiriamas straipsnyje [6], leidžia kiekybiškai įvertinti įvairios formos defektų daromą įtaką medžiagos optinio pažeidimo tikimybei.

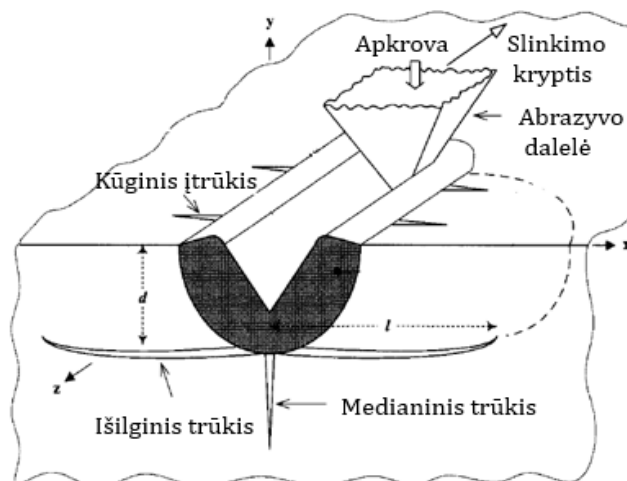
Dar teigiama, jog įtrūkimuose padidėja elektromagnetinės spinduliuotės sugertis, o ypač jei šios ertmės yra užpildytos optiškai aktyviomis poliravimo medžiagos liekanomis. Plačiai poliravimo procesuose naudojami cerio junginiai (dažniausiai – CeO_2 ir Ce_2O_3) pasižymi didele UV spinduliuotės sugertimi. Empiriniais duomenimis patvirtinta, jog cerio dalelės inicijuoja lokalių sugerties centrų kūrimąsi ir taip mažina lydyto kvarco optinio atsparumo slenkstį [7]. Prancūzų mokslininkas J. Neauport ir kiti pastebėjo, kad esant didesniems cerio dalelių kiekiams optinio padėkliuko paviršiuje, po lazerio ekspozicijos susidaro platus smulkių pažeidimų fonas, kuris mažėja ar visiškai pereina prie klasikinio mažų lokalių pažeidimų pasiskirstymo cerio kiekiui mažėjant [8].

Trečiasis modelis teigia, jog pažeidos išplinta dėl sumažėjusio medžiagos mechaninio atsparumo ir tolimesnių deformacijų defekto vietoje. Staigus sugeriančių dalelių išilimas sąlygoja

didelio lokalaus slėgio ir mechaninių įtampų atsiradimą medžiagoje. Būtent šie įtempimai lemia plastines deformacijas ir tolimesnį trūkio plitimą. Kaip matome, dėl vieningos teorijos kaip defektai ir priemaišos mažina optinį atsparumą lazerio spinduliuotei iki šiol nėra sutarta.

1.3 OPTINIŲ ATSPARUMĄ RIBOJANTYS DEFEKTAI

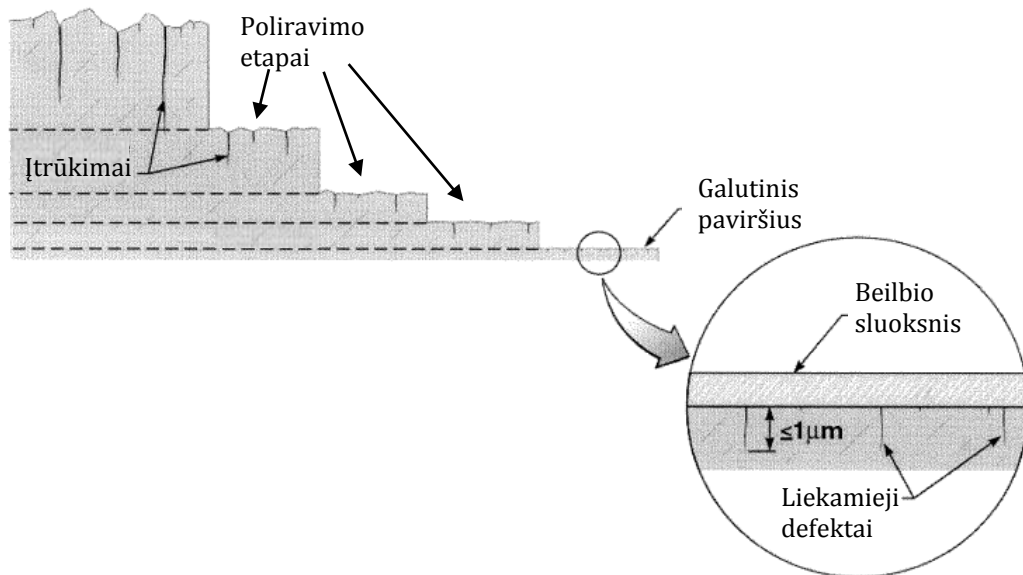
Optinių pažeidimų formavimosi ypatumai priklauso nuo lazerio spinduliuotės trukmės. Paprastai pagal pažaidos formavimosi pobūdį mokslinėje literatūroje jie skirstomi į du pagrindinius režimus: nanosekundinį ir femtosekundinį. Nanosekundžių srityje pagrindinė optinės pažaidos atsiradimo priežastis yra paviršiniai ir popaviršiniai defektai bei priemaišos [9], kurių lūžio rodiklis ir sugerties koeficientas ženkliai skiriasi nuo aplinkinės medžiagos. Veikiant intensyviai lazerio spinduliuotei, ypač UV bangų ruože, didelė lengvai jonizuojamų defektų koncentracija medžiagoje gali stipriai sumažinti jos optinį atsparumą.



1 pav. Popaviršinių defektų formavimasis paviršiaus šlifavimo metu [4]

Įvairūs optinio elemento netobulumai: įbrėžimai, lūžiai, duobelės, įtrūkimai, sugeriantys intarpai ir kt., dažniausiai susidaro gamybos procesų ir eksploatacijos metu [10]. Tokie paviršiniai ir popaviršiniai defektai visais atvejais lemia paviršiaus atsparumo sumažėjimą. Jie taip pat gali tapti lazerio spinduliuotę sugeriančių defektų ir poliravimo medžiagos liekanų „talpyklomis“, lemiančiomis pažaidos lazerio spinduliuote slenksčio pokytį ar inicijuojančiomis patį optinį pažeidimą. Taigi, kaip optinis komponentas veiks ir kokia bus jo tarnavimo trukmė, tiesiogiai priklauso nuo defektų, todėl pirminiams optinių medžiagų apdirbimo (šlifavimo ir poliravimo) procesams yra skiriamas labai didelis dėmesys. Jų metu reikia pasiekti ne tik tam tikrus kokybiško optinio komponento reikalavimus, tokius kaip mažas paviršiaus šiurkštumas, aukštas plokštiškumo ir paralelizmo lygis, maža optinė sugertis, bet ir kaip įmanoma mažiau „užteršti“ jį įvairiais defektais.

Įvairios geometrijos optinių komponentų gamyba yra sudėtingas technologinis procesas, susidedantis iš kelių gamybos etapų. Kiekvieno iš etapų pagrindinis tikslas – naudojant vis mažesnes abrazyvo daleles pašalinti tam tikrą pažeistą medžiagos sluoksnį, likusį iš praėjusio etapo, ir kiek įmanoma labiau sumažinti atsirandančius defektus. Pirmiausia, kristalo ar stiklo bulės yra supjaustomos į atitinkamo dydžio ruošinius, jiems suteikiama norima forma. Paprastai pjovimo siūlė yra iki 1 mm pločio. Šiame gamybos etape gaunamas optinis paviršius yra šiurkštus ir nelygus, todėl po



2 pav. Optinių paviršių apdirbimo etapai nuo formavimo iki poliravimo; kiekvienas iš šlifavimo etapų sukelia liekamuosius popaviršinius defektus, o poliravimo metu ant paviršiaus susidaro hidratuota plėvelė [33]

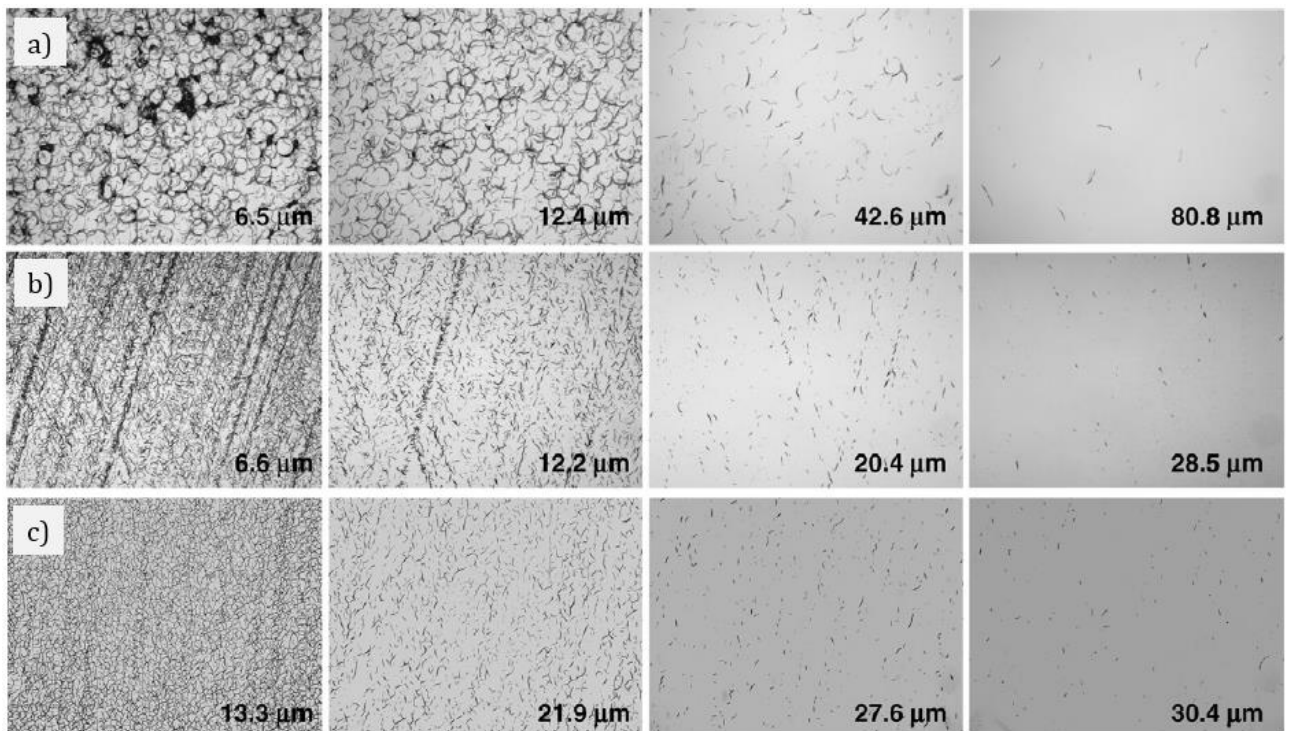
jo atliekamas paviršiaus šlifavimas. Šio proceso metu paviršius yra apdorojamas stambiomis abrazyvo dalelėmis, siekiant pašalinti pažeisto stiklo sluoksnį ir palyginti nuolaužas, atsiradusias pjovimo metu. Šlifavimo įrankiai ir dalelės spaudžia optinį paviršių ir plastiškai jį deformuoja. Iš deformuotų regionų formuojasi horizontalūs išilginiai ir medianiniai trūkiai (1 pav.) Jei paviršiaus šoniniai įtrūkiai susikerta su trapios medžiagos paviršiumi, medžiaga iš tos vietos yra pašalinama. Medianiniai įtrūkiai gali išplisti į gilesnius apdirbamos medžiagos sluoksnius, taip suformuodami tūrinius popaviršinius defektus [11]. Siekiant sumažinti šių defektų tankį ir gylį elemento paviršiuje atliekami keli šlifavimo etapai ir galiausiai paviršius yra poliruojamas.

Paviršiaus poliravimas lemia galutinę optinio komponento paviršiaus kokybę. Komerciniam poliravimui dažniausiai naudojamos įvairios frakcijos abrazyvinės medžiagos: CeO_2 , Ce_2O_3 , Al_2O_3 , $FeSiO_2$ ir kt [12]. Šios aštrios dalelės yra vertikalios spaudžiamos į optinį komponentą ir tam tikru pasikartojančiu logaritmu horizontaliai sukant poliravimo padą pasiekiamas norimas paviršiaus šiurkštumas. Norint pasiekti itin aukštą optinio paviršiaus kokybę ir lygumą atliekami keli poliravimo etapai, kaskart naudojant suspensiją su vis mažesnėmis abrazyvinėmis dalelėmis (2 pav.) Tačiau net ir smulkausios poliravimo dalelės sukelia naujus, tiesiog mažesnius įbrėžimus [13]. Indukuojamų mikroįtrūkimų gylis priklauso nuo naudojamų abrazyvinių dalelių diametro d :

$$0,3d^{0,68} < L < 2d^{0,85} , \quad (1.2)$$

kur L – įtrūkimo gylis (μm) [14].

Kadangi dauguma optinių komponentų yra gaminami iš tvirtų, tačiau trapių medžiagų dažnai poliravimo metu atsiranda įtrūkimų ir nišų, kuriose neretai ir susikaupia poliravimo medžiagos ir liekanos. Iš jų komponento paviršiuje yra suformuojamas taip vadinamas Beilbio (angl. *Beilby layer*)



3 pav. Pleištu ir chemiškai ėsdinant atverti įvairių poliravimo technikų sukelti liekamieji defektai. Nuotraukų kampuose nurodytas gylis, kuriame buvo padaryta nuotrauka (skaičiuojant nuo pradinio paviršiaus) [15]

sluoksniu, paslepiančiam ir užlyginančiam paviršinius defektus, tačiau jų nepašalinantis [16]. Amerikos mokslininkų grupė savo straipsnyje pristatė rezultatus, parodančius, kad įvairiomis šlifavimo ir poliravimo technikomis apdirbamame optiniame komponente įtrūkimus ir kitus defektus galima aptikti iki ~100 μm gylyje nuo bandinio paviršiaus (3 pav.) [15]. Įprasta optinė mikroskopija yra akla tokiems defektams, tačiau juos įmanoma aptikti kaip cheminio ėsdinimo ar ekspozicijos lazerio spinduliuote liekamąjį rezultatą. Nematomi trūkiai, užpildyti abrazyvine suspensija, yra vieni pavojingiausių optiškai aktyvių defektų, pasižyminčių stipria sugertimi (ypač UV srityje) ir labiausiai ribojančių elemento optinį atsparumą. Todėl poliravimo kokybė yra vienas didžiausių iššūkių kokybiškų optinių komponentų gamyboje. Apibendrinti defektų, susidaranciu optikos apdirbimo procesuose, tipai, jų šaltiniai, fizikinės ir cheminės savybės yra pateikiami 1 lentelėje.

1.4 DEFEKTŲ ANSAMBLIAI IR JŲ SKIRSTINIAI

Taigi, kaip buvo aptarta ankstesniuose skyriuose, paviršiniai ir popaviršiniai defektai, jų tankis ir pasiskirstymas yra optinių elementų gamybos technologijų pasekmė. Bendru atveju šie defektai yra skirtingi ir gali turėti nevienodus pažeidimo slenksčius. Skirtingi defektų tipai yra aprašomi defektų ansamblio funkcija – defektų tankio priklausomybe nuo kritusios energijos tam tikrame paviršiaus plote (energijos įtėkio). Kartu su defektų pasiskirstymu ansamblinė funkcija nusako ir skirtingų defektų pažeidimo slenksčių pasiskirstymą.

1 lentelė. Įvairūs defektai, susidarantys optikos apdirbimo procesuose, jų šaltiniai, fizikinės bei cheminės savybės

Defekto tipas	Šaltinis	Fizikinės / cheminės savybės
Duobelė	Abrazyvinė medžiaga arba apdirbimo įrankiai	Keičia atspindį, sukelia sklaidą
Lūžis	Paviršiaus įtempimai	Sukuria dvejetainę šviesos lūžį
Įbrėžimas (ilgis, gylis, plotis $> \lambda/10$)	Paviršiaus nešvarumai, valymas, poliravimas	Sąlygoja sklaidos atsiradimą
Popaviršiniai defektai	Poliravimas	Sąlygoja sklaidos atsiradimą nedideliais kampais
Dalelės	Dulkės, dalelės, atsiradusios dengimo ir poliravimo metu	Sąlygoja sklaidos atsiradimą, sugertį, mažina optinio pažeidimo slenkstį
Įtrūkiai ant dangos	Dangos įtempimai	Sąlygoja sklaidos atsiradimą, mažina atspindžio koeficientą, optinio pažeidimo slenkstį
Dėmės	Chemikalų ir abrazyvo sugertis, optiniai kliejai, organiniai junginiai	Didina sugertį
Tūriniai defektai	Nehomogeniškumas, tuštumos	Sąlygoja tūrinės sklaidos atsiradimą
Įskilimai	Terminiai ir lazerio indukuoti pažeidimai	Sąlygoja sklaidos dideliais kampais atsiradimą, sukelia lazeriu indukuotą pažeidimą, dvejetainę šviesos lūžį

Mokslinėje literatūroje galima aptikti keletą defektų ansamblio modelių: Dirako delta funkcijos (išsigimęs modelis), laipsninės funkcijos [17], Gauso funkcijos [18] ir kt. Kai kuriuose moksliniuose darbuose norint tiksliausiai aprašyti defektų ansamblį šie modeliai yra apjungiami [19]. Paprasčiausias iš jų teigia, jog defektai yra išsigimę, turi tą patį pažeidimo slenkstį ir yra pasiskirstę tolygiai [17]. Išsigimusio modelio (angl. *degenerate*) ansamblinė funkcija $f(I)$ matematiškai yra aprašoma delta funkcija, kurios argumentas yra energijos įtėkis $I = I_0$:

$$f(I) = N\delta(I - I_0), \quad (1.3)$$

čia normalinė konstanta N atitinka paviršinių defektų tankį tam tikrame ploto vienetė. Pagal šį modelį tolygaus skirstinio (angl. *top hat*) pluoštui tikimybė $P(I_a, I_0, N)$ sukelti paviršiaus pažeidimą aprašoma:

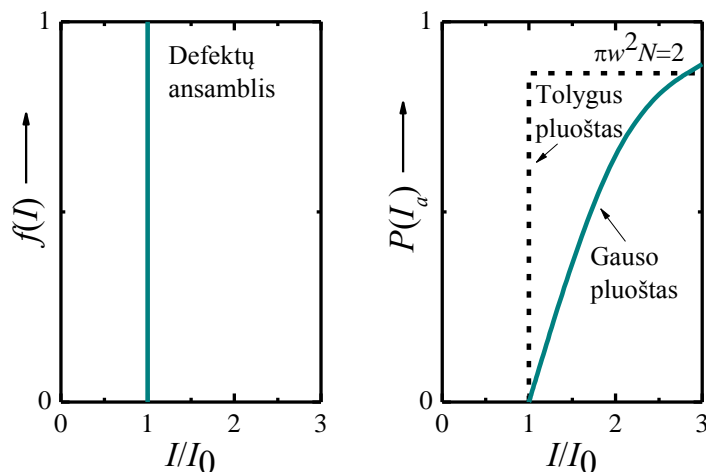
$$P(I_a, I_0, N) = \begin{cases} 0 & ; I_a < I_0 \\ 1 - e^{(-\pi w^2 N)} & ; I_a \geq I_0 \end{cases}, \quad (1.4)$$

kur w – pluošto diametras, I_0 – defektų ansamblio pažeidimo slenkstis, I_a – pluošto intensyvumas. Taigi, tikimybė įvykti pažeidimui yra konstanta, priklausanti tik nuo pluošto diametro ir defektų tankio. Jei turime Gausinio intensyvumo pluošto skirstinį, tikimybės išraiška šiek tiek pakinta:

$$P(I_a, I_0, N) = \begin{cases} 0 & ; I_a < I_0 \\ 1 - \left(\frac{I_a}{I_0}\right)^{(-\pi w^2 N)} & ; I_a \geq I_0 \end{cases}. \quad (1.5)$$

Šiuo atveju, tik tam tikrose skirstinio vietose pluošto intensyvumas viršija defektų ansamblio slenkstinę vertę ($I_a < I_0$). Šios zonos, kuri didėja intensyvėjant pluoštui, spindulys

$$r < w \sqrt{\ln \frac{I_a}{I_0}} \quad (1.6)$$



4 pav. Kairėje – išsigimusio defektų ansamblio pasiskirstymas, dešinėje – tolygaus ir Gauso pluoštų pažaidos tikimybės kreivių palyginimas [17]

Taigi, didinant impulso energijos įtekį, plotas, viršijantis defektų pažaidos slenkstį, didėja. Kartu didėja tame plote išsidėsčiusių defektų skaičius ir tikimybė indukuoti pažeidimą [17].

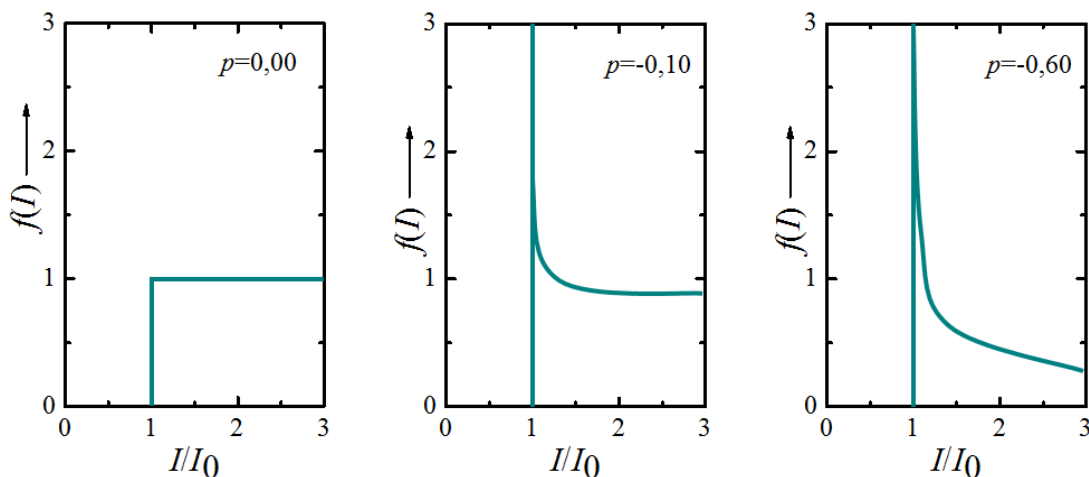
Tačiau realybėje ne visi defektai yra pažeidžiami esant vienodam pluošto intensyvumui. Tokių bandinių defektams aprašyti naudojamos sudėtingesnės ansamblinės funkcijos. Laipsninio ansamblio modelyje (angl. *Power law*) defektų ansamblio formą nusako parametras p . Tolygaus pasiskirstymo pluoštui pažaidos tikimybė aprašoma

$$P(I_a, I_0, N_w, p) = \begin{cases} 0 & ; \quad I_a < I_0 \\ 1 - \exp \left[-N_w \left(\frac{I_a}{I_0} - 1 \right)^{p+1} \right] & ; \quad I_a \geq I_0 \end{cases} \quad (1.7)$$

kur

$$N_w = \frac{\pi w^2 N(I_n)}{\left(\frac{I_n}{I_0} - 1 \right)^{p+1}} \quad (1.8)$$

Čia $N(I_n)$ atitinka defektų tankio funkciją nuo ekspozicijos intensyvumo, neviršijančio normalinio intensyvumo $I_n > I_0$. Kai p parametras artėja prie -1, defektų tankis N vis mažiau priklauso nuo I_n , funkcija auga ir artėja prie išsigimusio modelio. Taigi, išsigimęs ansamblis yra kraštinis bendresnio laipsninės funkcijos modelio atvejis [17].



5 pav. Laipsninės funkcijos defektų ansamblio modelis. Kai $p \rightarrow -1$, pasiskirstymas artėja prie išsigimusio (delta funkcijos) modelio [17]

Trečiasis modelis, taip pat įskaitantis defektų dydį ir pasiskirstymą, yra Gausinės funkcijos modelis. Taikant šį modelį kiekvienas defektas pasižymi atitinkamu pažaidos slenkščiu T , t.y. defektų pasiskirstymas yra neišsigimęs. Laikoma, kad defektai yra pasiskirstę pagal Gauso dėsnį

$$g(T) = \frac{2d}{T\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{T-T_0}{\Delta T/2}\right)^2\right], \quad (1.9)$$

$$\int_0^{\infty} g(T)dT = d, \quad (1.10)$$

čia T_0 – energijos įtekio vertė, atitinkanti vidutinę PLSS vertę, ΔT – standartinis tos vertės nuokrypis, d – defektų tankis. Pagal Gausinį modelį defektų, kurių PLSS vertė atitinka T_0 , yra daugiausia [18]. Pluošto, kurio intensyvumas F ir kurio skirstinys yra Gausinis, plotas, viršijantis defektų pažaidos slenkštį T lygus $S_T(F) = (\pi w^2 / 2)(\ln(F/T))$, kur w – pluošto radiusas. Tuomet defektų, tenkančių tam plotui ir kurių pažaidos slenkstis yra mažesnis nei F , skaičius $N(F)$ apskaičiuojamas pagal

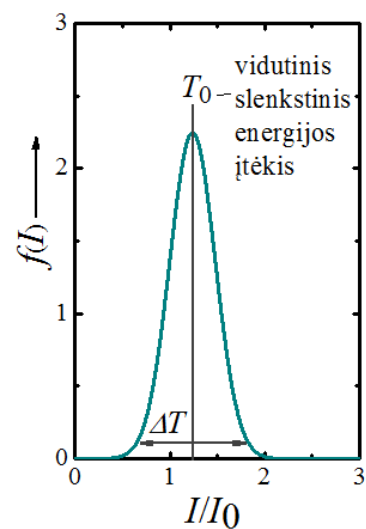
$$N(F) = \int_0^F g(T)S_T(F)dT. \quad (1.11)$$

Tikimybė pažeisti paviršių eksponuojant Gausinio skirstinio pluoštu išvedama iš Puasono statistikos:

$$P(F) = 1 - \exp(-N(F)). \quad (1.12)$$

Taikant Gauso funkcijos modelį absoliuti optinės pažaidos slenkščio tikimybė matematiškai niekada negali būti lygi nuliui. Šiuo atveju rekomenduojama PLSS laikyti vertę, kurios tikimybė lygi 0,001 [18].

Defektų ansamblis paprastai yra nustatomas dviem būdais. Pirmasis – tai statistinis pažaidos tikimybės metodas. Taikant jį tam

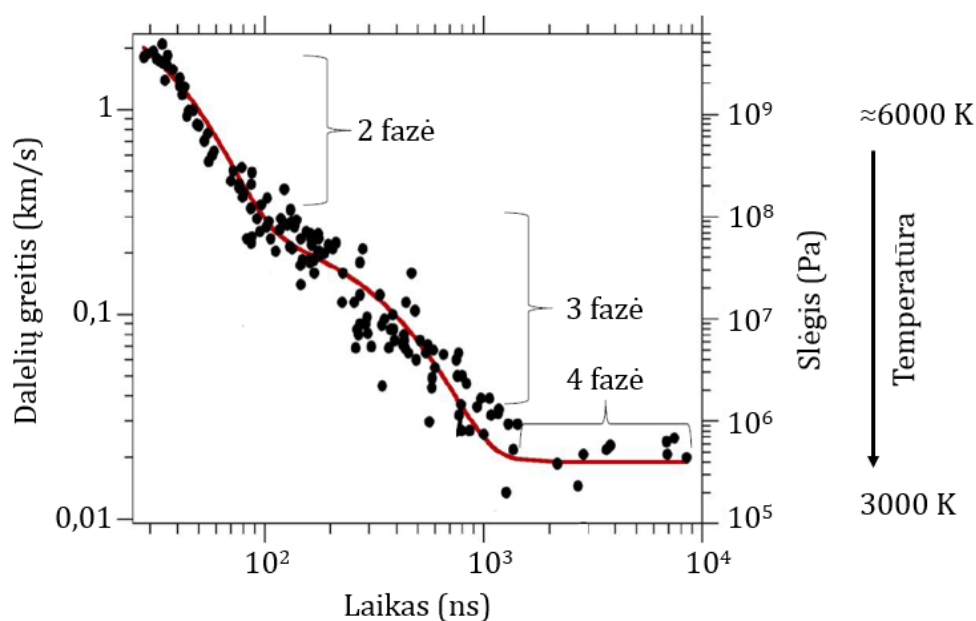


6 pav. Gausinio defektų ansamblio skirstinys

tikras skaičius bandinio paviršiaus taškų yra eksponuojamas vienodo energijos įtėkio F lazerio spinduliuote. Po to pažeistų taškų skaičius yra padalinamas iš viso fiksuoto tirtų taškų skaičiaus ir apskaičiuojama pažaidos tikimybė. Tuomet energijos įtėkis yra padidinamas dydžiu $F + \Delta F$ ir vėl skaičiuojama pažaidos tikimybė. Galiausiai sudaroma pažaidos tikimybės kreivė, kurią galima aproksimuoti pasirinkto defekto ansamblio funkcija. Defektų ansamblui nustatyti dar gali būti naudojamas rastrinis skenavimas. Tai tiesioginis optinių defektų tankio priklausomybės nuo energijos įtėkio nustatymo metodas. Taikant šį metodą tam tikras bandinio paviršiaus plotas yra tolygiai eksponuojamas pavieniais fokusuotais lazerio impulsais. Po to naudojantis optiniu mikroskopu ir skaitmeniniais vaizdų analizės metodais identifikuojami ir suskaičiuojami visi defektai, kurie buvo indukuoti žinomo erdvinio skirstinio ir energijos įtėkio spinduliuote.

1.5 OPTINIŲ ELEMENTŲ TARŠA ABLIACIJOS PRODUKTAIS

Intensyvios lazerio spinduliuotės ir optinės medžiagos sąveikos metu, kai viršijamos medžiagos atsparumo ribos, medžiaga staiga tampa termodinamiškai nestabili. Sąveikos metu sukaupiamas didelis kiekis energijos, medžiaga lokaliai įkaitinama iki itin aukštos temperatūros (1 eV eilės), mažame medžiagos tūryje sukuriama ~ 10 GPa slėgis [20], [21]. Tokie procesai veda prie lokalaus mechaninio medžiagos pažeidimo ir medžiagos pašalinimo. Sukauptos energijos relaksacijos procesai gali būti įvairūs: garavimas, dalelių išmetimas, aušimas spinduliuojant ar fazinis virsmas. Nanosekundinių impulsų režime medžiagos suardymas dažniausiai vyksta sprogo sukkelto šoko bangos pavidalu.



7 pav. Iš lazerio ekspozicijos metu išlydytos medžiagos baseino bandinio paviršiuje išmetamų dalelių greitis skirtingų medžiagos relaksacijos fazių metu [23]

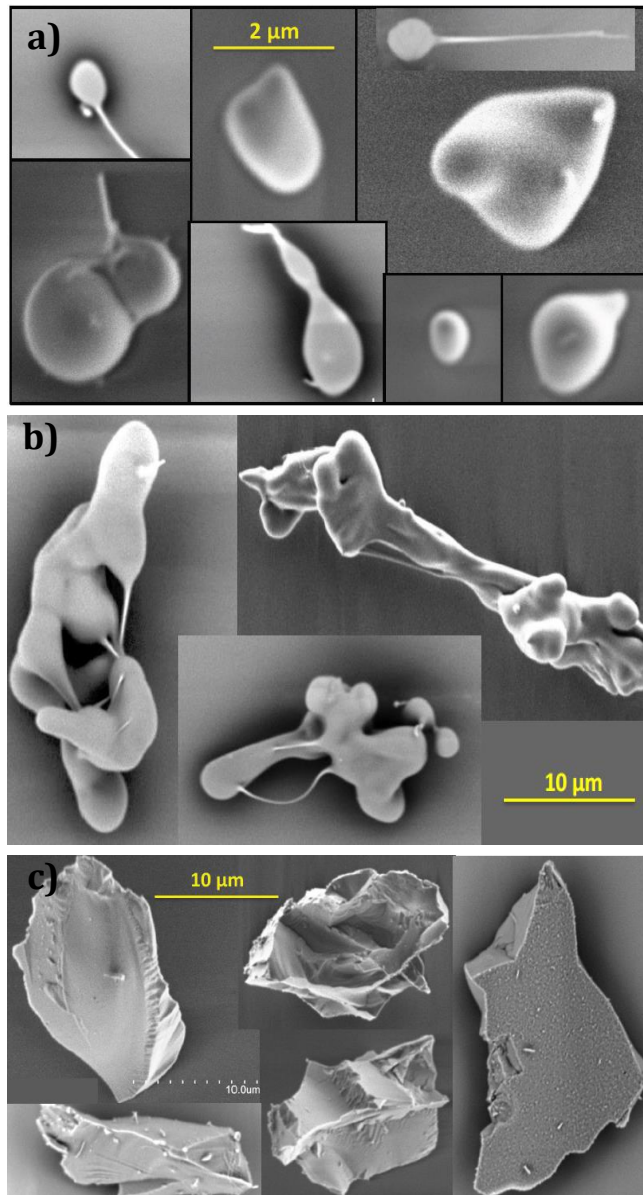
Jungtinių Amerikos Valstijų mokslininkų darbuose [22], [23] aptariamas modelis išskiria keturias medžiagos relaksacijos fazes, kurių metu išmetamos dalelės pasižymi savita morfologija. Šios fazės yra klasifikuojamos remiantis slėgio P medžiagoje kitimu ir charakteringa vėlinimo trukme τ_d po lazerio impulso:

- 1) Paviršinis medžiagos sprogimas, sukeltas šoko bangą ir medžiagos pašalinimą garų pavidalu ($P \approx 10 \rightarrow 4$ GPa, $\tau_d: 0 \rightarrow \approx 30$ ns);
- 2) Užvėlintas perkaitintos medžiagos išsiveržimas iš bandinio paviršiaus ir popaviršinių sluoksnių ($P \approx 4 \rightarrow 0,09$ GPa, $\tau_d: \approx 30 \rightarrow 80$ ns);
- 3) Skystos medžiagos išmetimas iki kol pasiekama termodinamiškai stabili skystos fazės būseną ($P \approx 90 \rightarrow 0,4$ MPa, $\tau_d: \approx 80 \rightarrow 1000$ ns);
- 4) Mechaninių įtempių sukeltų nuolaužų pašalinimas ($P < \approx 0,6$ MPa $\rightarrow 0,09$ GPa, $\tau_d: > 1000$ ns).

Šaltiniuose pažymima, jog mikroskopinės dalelės išmetamos tik 2 – 4 fazių metu, o jų skriejimo greitis mažėja mažėjant įkaitintos masės temperatūrai ir slėgiui medžiagoje (6 pav.). Taip pat, vykstant šiems procesams kinta įkaitintos medžiagos klampumas, todėl kartu keičiasi ir išmestų abliacijos produktų morfologija.

Štai, pavyzdžiui, antrosios fazės metu išmetamos dalelės yra skystų lašelių, kurių diametras tesiekia keletą mikrometrų, pavidalo (8 pav. a). Šios fazės metu medžiaga yra stipriai įkaitusi ir mažiausiai klampi, todėl išmestos dalelės yra beveik tvarkingos sferinės formos. Šios dalelės iš paveiktos zonos skrieja didžiuliu greičiu – nuo 2,5 km/s iki 300 m/s. Būdinga, jog joms atsiskiriant nuo perkaitintos medžiagos „baseino“ ir lėkimo metu išoriniam sluoksniui staigiai vėstant susiformuoja kelių šimtų nanometrų storio medžiagos uodegėlės. Trečios fazės metu medžiagos temperatūros gradientas yra didžiausias. Straipsnio [22] autoriai teigia, jog todėl dalelės labiausiai modifikuojasi skriejimo metu veikiamos pasipriešinimo jėgų. Išmestos medžiagos dalelės yra netaisyklingos formos ir palyginamai didesnės (kelių dešimčių mikronų skersmens, 8 pav. b), todėl skrieja kur kas lėčiau nei antros fazės metu išmesti lašiukai. Taip pat didelės dalelės išmetamos paskutiniosios fazės metu, šoko bangai ardant medžiagą aplinkinėse šaltesnėse zonose aplink įkaitintą tašką. Dalelių forma primena nuolaužas, kurių kraštai yra mažiau apsilydę, o struktūra vientisesnė (8 pav. c).

S. G. Demos ir kiti mokslininkai taip pat pastebėjo, jog medžiagos nuolaužų ir lašukų debesis, priklausomai nuo lazerio spinduliuotės intensyvumo ir pagrinduko medžiagos gali skrieti iki ~15 cm nuo pažeistos zonos [22]. Taigi, egzistuoja didelė tikimybė, jog lazerinėse sistemose, kurių apimtis dabar kaip tik dažnai stengiamasi sumažinti, įvykus elemento pažaidai abliacijos taršos produktais bus užteršti kiti sistemoje patalpinti optiniai komponentai, skirti spinduliuotės optinėms savybėms ar sklaidimo kryptčiai valdyti. Ant optinių elementų nusėdusios medžiagos dalelės prikimba, nes elemento paviršių dažniausiai pasiekia būdamos dar ganėtinai įkaitusios. Maža to, skriedamos dideliu greičiu ir savo kelyje sutikusios kliūtį, pavyzdžiui, kitą optinį komponentą, ir skrydžio metu spėjusios kiek atvėsti dalelės dideliu greičiu gali rėžtis į elemento paviršių ir taip jį mechaniškai pažeisti. Labai tikėtina, jog šios antrinės taršos produktai veikiant intensyviai lazerio spinduliuotei vėl taps naujais sugerties taš –



8 pav. 2-osios relaksacijos fazės metu išmetamos mikroninių lašelių pavidalo dalelės (a); 3-iosis – perlydytos netaisyklingos formos dalelės; 4-osios – palyginti vėsesnio paviršiaus nuolaužos [22]

kais, kuriuose inicijuojamas optinis pažeidimas. Taigi, lazerinėse sistemose labai svarbu naudoti švarius, aukštos paviršiaus kokybės komponentus, nes kitaip ilginiui lazeris taps pats save teršiančiu ir naikinančiu prietaisu. Taip pat būtina pastebėti, optinių elementų paviršių tarša abliacijos produktais gerokai apsunkina defektų tankio ir pasiskirstymo tyrimus, nes įprastais optiniais metodais neįmanoma atskirti pažeistų defektų nuo šalutinių abliacijos teršalų.

2 DARBO METODIKA

Šioje dalyje plačiau aptarsiu pasiruošimo tyrimui etapus, eksperimentinę įrangą bei duomenų analizės principus. Pirmiausia tyrimuose naudotam bandiniui buvo atlikta įprasta optinių padėklų paruošimo prieš garinimą procedūra – valymas ultragarsinėje vonelėje. Tuomet tomis pačiomis sąlygomis buvo atlikti du – rastrinio skenavimo ir pažaidos tikimybės – matavimai. Vėliau, siekiant patikrinti pirmas išvadas, buvo atliktas antras eksperimentas. Bandinio defektų analizę sudarė du etapai, kurių rezultatai palyginti tarpusavyje. Toliau plačiau aptarsiu kiekvieną iš šių eksperimento dalių.

2.1 BANDINIO PARUOŠIMAS

Defektų ansamblių tyrimams pasirinktas komercinis lydyto kvarco optinis padėklas. Dėl savo gerų optinių bei fizikinių savybių lydytas kvarcas yra viena iš plačiausiai naudojamų medžiagų lazerinėje technologijoje. Ši amorfinė silicio oksido forma pasižymi dideliu atsparumu intensyviai lazerio spinduliuotei, mažu terminiu plėtimosi koeficientu, bei ypač dideliu pralaidumu plačiame spektro ruože (180 nm – 2,1 μm). Priklausomai nuo gamybos technologijos egzistuoja keletas skirtingų lydyto kvarco rūšių, tarpusavyje besiskiriančių optinėmis savybėmis ir priemaišų kiekiu. Tyrimuose naudotas pagrindukas yra pagamintas iš sintetinio Corning 7980 0F stiklo, amorfizuojamo silicio oksido ruošinius kaitinant liepsna. Šis lydyto kvarco tipas pasižymi maža lūžio rodiklio dispersija ir itin dideliu pralaidumu UV srityje. Bandinio matmenys: diametras – 38,1 mm, storis – 5mm.

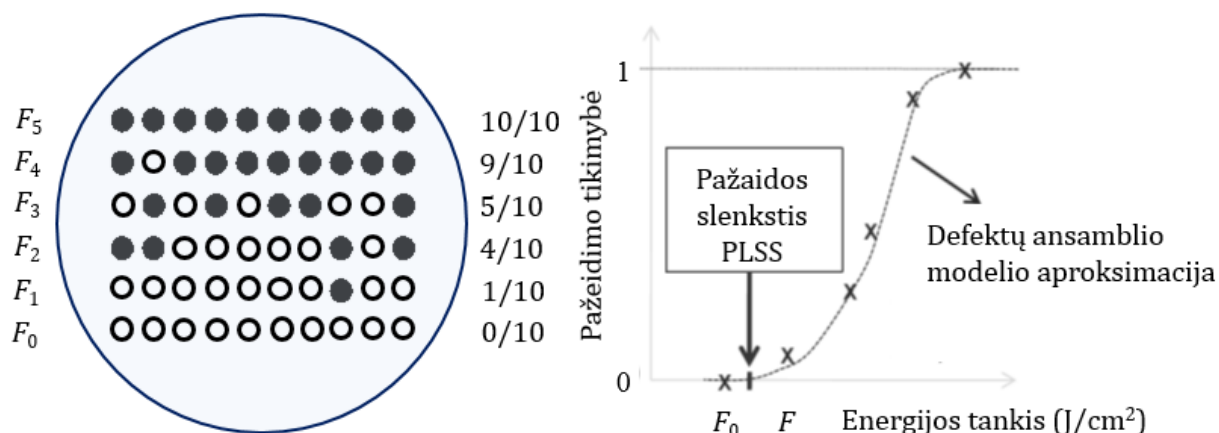
Prieš matavimus bandinys buvo papildomai valomas automatizuota plovimo mašina UCS-40MF (*Optimal Technologies*), siekiant pašalinti po poliravimo susikaupusias priemaišas bei galimus naujai atsiradusius teršalus iš aplinkos. Pirmiausia poliruotas optinio stiklo padėklas 5 minutes buvo valomas ultragarsinėje vonelėje (temperatūra 50 °C), kurioje kaip valomoji medžiaga naudojamas kalio šarmas. Tuomet padėklas skalaujamas dviejose dejonizuoto valymo vandens vonelėse. Pirmojoje bandinys laikomas 250 sekundžių, antrojoje – 5 minutes. Temperatūra dejonizuoto vandens vonelėse yra 17 °C ir 39 °C, atitinkamai. Galiausiai bandinys buvo džiovinamas infraraudonųjų spindulių krosnelėje, kurioje palaikoma 90 °C temperatūra.

Bandinys ultragarso vonelėje buvo plaunamas kiekvieną kartą prieš eksponuojant jį lazerio spinduliuote. Pakartotinis paviršiaus valymas taip pat buvo atliekamas prieš analizuojant defektus optiniu mikroskopu.

2.2 PAŽAIDOS TIKIMYBĖS METODAS

Šiame darbe optinio padėklo defektų ansambliai ir atsparumas lazerio spinduliuotei buvo tirti dviem skirtingais būdais – statistiniu pažaidos tikimybės ir rastrinio skenavimo metodais. Eksperimentiškai optinės pažaidos slenkstis yra nustatomas pagal standartuose ISO 11254-1 [2] ir ISO

11254-2 [3] aprašytas procedūras. Darbe pateikiami rezultatai buvo gauti taikant 1-į-1 procedūrą. Jos metu nustatant pažeidimo tikimybę skirtingos bandinio vietos yra paveikiamos pavieniais fiksuoto energijos įtėkio impulsais. Standartuose nurodyta, jog esant tam pačiam lazerinės spinduliuotės įtėkiui bandinys turi būti eksponuojamas ne mažiau kaip dešimtyje skirtingų vietų, tarp kurių atstumas yra ne



9 pav. Pažaidos lazerio spinduliuote slenksčio nustatymas iš eksperimentinių duomenų

mažesnis kaip $3d$ (čia d – pluošto diametras $1/e^2$ lygyje). Padidinus spinduliuotės energijos įtėkį ekspozicijos ciklas yra kartojamas ir atlikus seriją tokių matavimų įvertinama pažaidos tikimybė. Tikimybė yra apskaičiuojama pažeistų vietų skaičių k_i padalinus iš bendro sričių, eksponuotų tam tikro energijos įtėkio spinduliuote F_i , skaičiaus n_i :

$$P_i(F_p) = \frac{k_i}{n_i}. \quad (2.1)$$

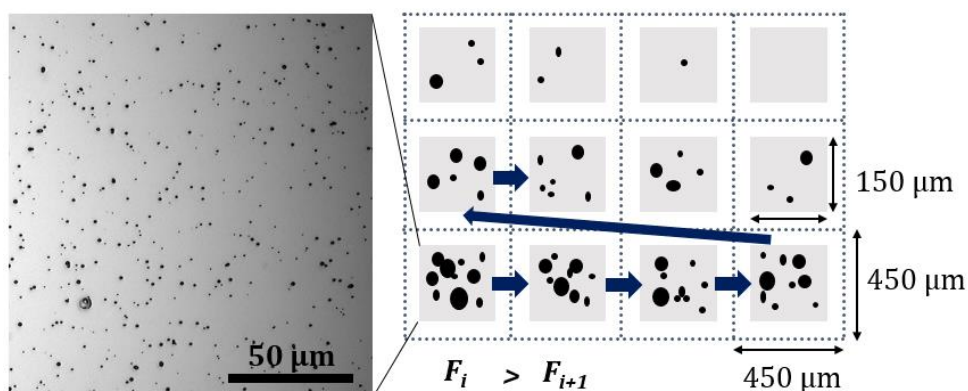
Visos tikimybės yra atidedamos energijos įtėkio skalėje ir tinkamos pritaikius pasirinkto defektų ansamblio pasiskirstymą. Energijos tankio vertė, kuriai nustatyta pažaidos tikimybės kreivė atitinka nulinę tikimybės vertę, vadinama pažaidos slenksčiu (9 pav.). Defektų ansamblio nustatymas iš pažaidos tikimybės duomenų plačiau aprašytas darbuose [24], [25].

Šiame darbe pažaidos tikimybės matavimai buvo atlikti rastrinio skenavimo sistema, tačiau laikantis standartuose nurodytų rekomendacijų. Tiriami tik 1-į-1 pažaidos slenksčiai – kiekviena analizuojamo optinio padėklo sritis eksponuojama vienu lazerio impulsu. Bandinio paviršiuje matrica buvo sudaryta taip, kad tarp atskirų eksponuojamų vietų tilptų nemažiau kaip trys pilni lazerio pluošto skirstiniai. Taigi, šiame darbe pažeidimo tikimybės eksperimentas yra tas pats rastrinis skenavimas su neigiamu pluošto persiklojimu.

2.3 RASTRINIO SKENAVIMO METODAS

Rastrinis skenavimas – tai tolygus didelio paviršiaus ploto skenavimas, taikant nedidelio pluošto diametro lazerinę spinduliuotę. Jau kurį laiką šis metodas yra naudojamas kaip pažangi technologija, įdarbinanti atitinkamo bangos ilgio lazerinę spinduliuotę optinių komponentų ir netiesinių kristalų, tokių kaip KDP ir DKDP, paviršių grūdinimui [26]. Nustatyta, jog kondicionavimas – rastrinio skenavimo kombinavimas su nuolat didinamu lazerinės spinduliuotės įtėkiu – padidina optinio

elemento atsparumą, pašalina sugeriančias poliravimo taršos daleles nuo jo paviršiaus [27]. Pastaruoju metu tiriamos šio metodo pritaikymo galimybės paviršinių defektų ansamblių apibūdinimui [28]. Pagrindinis rastrinio skenavimo tikslas – mažo diametro pluoštu tolygiai apšviesti visą bandinio paviršių ir jame esančius defektus, galinčius inicijuoti pažaidą. Kai toks tyrimas atliekamas skirtingose bandinio vietose keičiant maksimalų smailinį įtėkį – galima nustatyti jų tankio priklausomybę, kaip funkciją nuo lazerio spinduliuotės energijos įtėkio. Svarbiausias privalumas – greitas didelio paviršiaus ploto skenavimas, kai naudojami mažo diametro pluoštai bei galimybė išnaudoti kiekvieną lazerio impulsą. Dėl šių savybių metodas yra labai patrauklus defektų tankio tyrimams. Kadangi nanosekundiniame lazerio veikos režime beveik be išimties optinę pažaidą lemia paviršiniai defektai, todėl optinių pažaidų tankį galima tiesiogiai susieti su defektų tankiu, nustatyti skirtingus jų ansamblius ir įvertinti pasiskirstymą. Be to, tuo pačiu galima įvertinti 1-į-1 optinės pažaidos slenkstį. Tiesa, optinės pažaidos ISO standartuose rastrinio skenavimo procedūra, leidžianti tiesiogiai išmatuoti defektų tankį, nėra pilnai aprašyta, taigi modelio patikimumas dar nėra iki galo patikrintas.



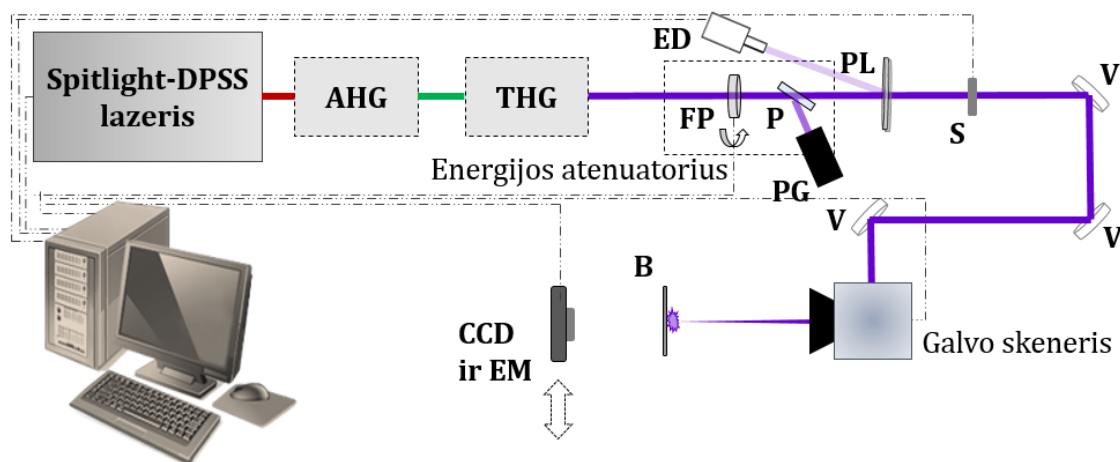
10 pav. Rastrinio bandinio paviršiaus skenavimo principinė schema

Paprastai yra naudojamos dviejų tipų rastrinio skenavimo taškų gardelės – kvadratinė ir heksagoninė. Remiantis mokslinėje literatūroje pateiktais autorių darbais [29], rastrinio skenavimo eksperimentams pasirinktas heksagoninis taškų išdėstymas, nes būtent taip efektyviausiai išnaudojamas bandinio paviršiaus plotas.

Bandinio paviršius buvo virtualiai padalintas į $150 \times 150 \mu\text{m}$ plotelius, kurie buvo nuskenuoti kas kartą keliant lazerio spinduliuotės energijos įtėkį (10 pav.) Rastrinio skenavimo metodas yra tinkamas defektų tankio matavimams, kai pluošto persiklojimas yra 31 – 95%. Viršijus 95% ribą indukuojamos katastrofinio pobūdžio pažaidos ir jų morfologijų nebeįmanoma susieti su atskirais defektais [30]. Taigi, remiantis mokslinė literatūra eksperimente buvo taikyti keletas pluošto persiklojimo lygių: 20%, 40%, 60%, 80%. Atlikus rastrinį skenavimą papildomai buvo sudarytas orientacinis atskirų taškų tinklėlis, eksponuotas keletą kartų didesniu energijos įtėkiu nei 1-į-1 pažaidos slenkstis.

2.4 EKSPERIMENTINĖ ĮRANGA

Matavimų principinė schema pateikta 11 pav. Ši matavimų sistema yra pilnai automatizuota ir visas valdymas eksperimento metu vyksta kompiuteriu. Tyrimuose naudotas kompanijos Innolass „Spitlight-DPSS“ lazeriniai diodais kaupinamas Nd:YAG lazeris, generuojantis vienos išilginės modos impulsus. Naudojant netiesinius kristalus pagrindinis lazerio spinduliuotės dažnis buvo patrigubintas ir matavimuose naudota UV srities spinduliuotė ($\lambda = 355$ nm). Matavimų metu impulso energija yra reguliuojama optiniu atenuatoriumi, kurį sudaro motorizuota pusės bangos fazinė plokštelė (FP) bei du

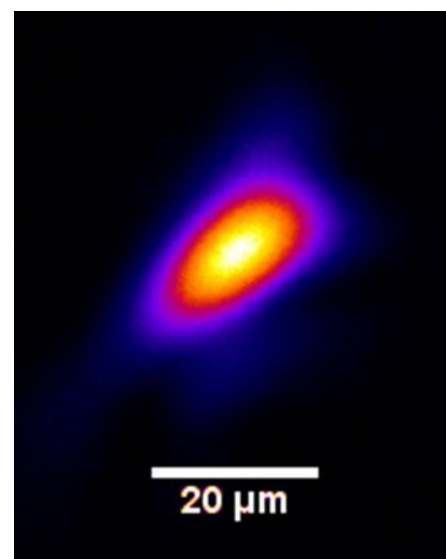


11 pav. Eksperimento schemą sudaro: FP – fazinė $\lambda/2$ plokštelė, P – poliarizatorius, PG – pluošto gaudyklė, PL – pleištas, S – automatinė sklendė, V – dielektriniai veidrodžiai, ED – energijos detektorius, EM – sukalibruotas energijos matuoklis, B – bandinys, CCD – surištųjų krūvininkų kamera

poliarizatoriai (P), veikiantys atspindžio režimu. Prieš atliekant eksperimentus, naudojant galios matuoklį (GM) ir energijos detektorių (ED), sukalibruojamas atenuatorius ir surandama impulso energijos priklausomybė nuo fazinės plokštelės pasukimo kampo. Eksponavimo proceso reguliavimui kompiuteriu yra naudojama optoelektroninė sklendė (S). Pluoštas bandinio plokštumoje yra pozicionuojamas išoriniu būdu valdomų skenuojančių veidrodėlių įrenginiu – galvonoskeneriu, su $F = 160$ mm židinio nuotolio f-theta telecentrinio objektyvu. Būtent ši aštriai fokusuojanti telecentrinė sistema, kurioje skenuojant pluoštą visi spinduliai bandinio plokštumą pasiekia statmenai jai, užtikrina aukštą erdvinę skyrą ir didelius spinduliuotės energijos tankius. Pluošto diametras įvertintas nufotografavus jį surištųjų krūvių kamera (CCD).

Matavimo metu naudoti lazerio parametrai:

- Lazerio impulsų pasikartojimo dažnis $f = 1$ kHz;

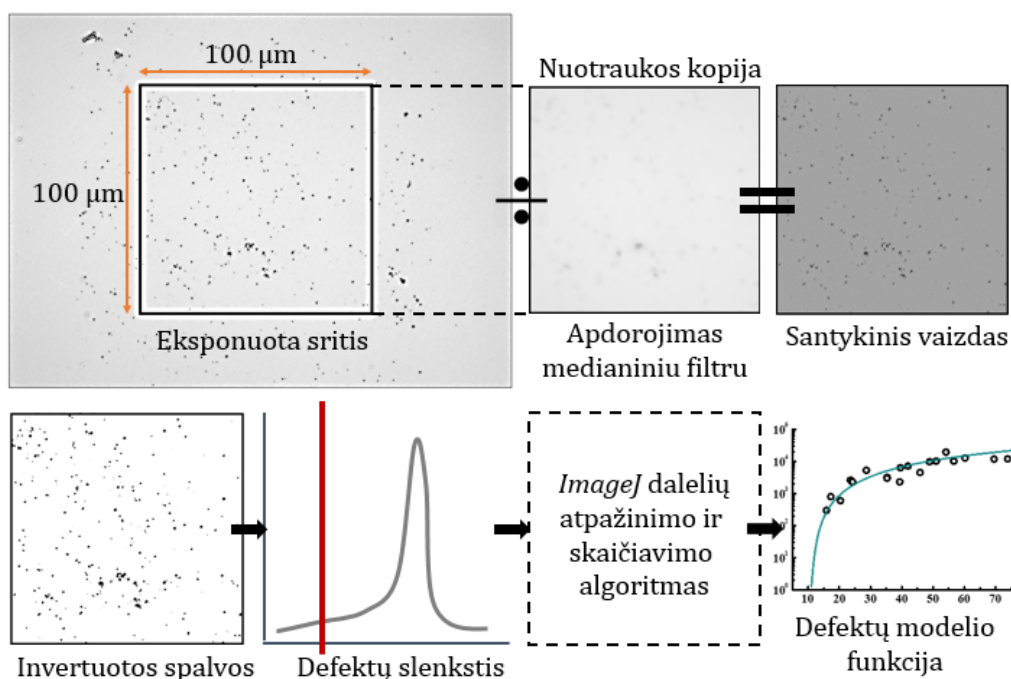


12 pav. Fokusuoto pluošto erdvinis skirstinys

- III harmonikos lazerio impulsų trukmė $\tau = (7,86 \pm 0,3)$ ns;
- Pluošto diametras ($1/e^2$) $d = (20,28 \pm 1,46)$ μm .

2.5 DEFEKTŲ ANSAMBLIŲ TYRIMO METODIKA

Tolimesnis optiškai sugeriančių defektų tyrimas atliekamas naudojantis optine mikroskopija ir skaitmeniniais vaizdų analizės metodais. Rastriškai nuskenuotos sritys buvo tirtos Nomarski tipo mikroskopu *Olympus BX51RF* kartu su *MicroPublisher 5.0MP* CCD kamera. Nuotraukų analizė buvo atliekama naudojantis laisvos prieigos programine įranga *ImageJ*. Principinis defektų atpažinimo algoritmas vaizduojamas 13 pav. Pirmiausia, visų nuotraukų spalvinė skalė buvo pakeista į pilką. Siekiant išvengti elektromagnetinio lauko skirstinio netolygumų kraštuose skaičiavimuose buvo panaudota tik centrinė 100×100 μm skenuoto plotelio sritis. Tuomet sukuriama kiekvienos nuotraukos kopija, kurioje, panaudojant medianinio filtro funkciją, yra panaikinami triukšmai. Taikant šį filtrą per kelias iteracijas kiekvienas pikselis yra pakeičiamas šalia esančių 3×3 pikselių plotelio medianine verte. Taip koreguota nuotrauka yra naudojama kaip fonas, kuris yra atimamas iš pirminės nuotraukos siekiant gauti ryškesnį defektų vaizdą ir panaikinti aplink juos matomus halus. Tuomet vaizdas yra in -



13 pav. Lazerio spinduliuote indukuotų pažeidimų analizavimo ImageJ programine įranga žingsniai

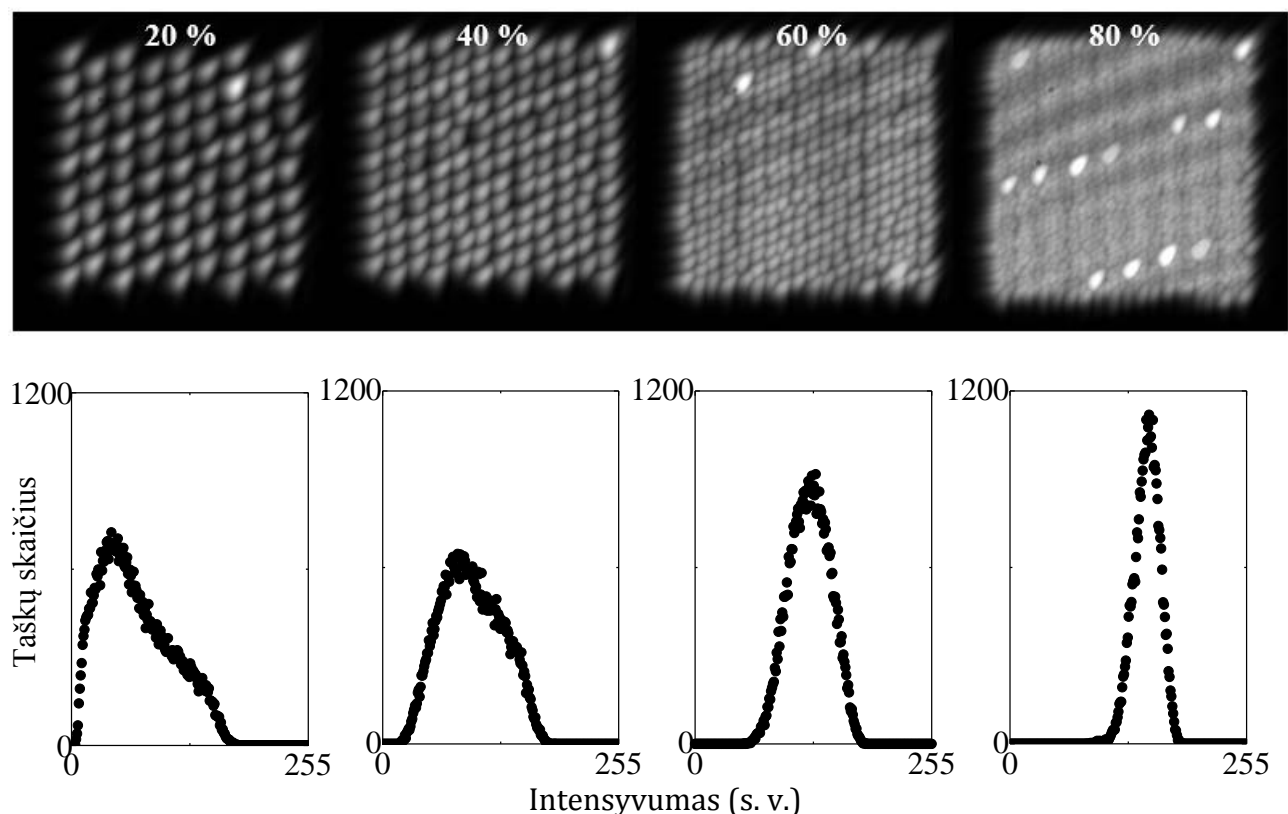
vertuojamas. Tam, kad atsitiktiniai kameros triukšmai nebūtų palaikyti atskiromis dalelėmis buvo nustatytas minimali intensyvumo vertė ir pažaidos dydis, kuriuos viršijantys nuotraukų taškeliai yra įtraukiami į dalelių atpažinimo algoritmą. Atlikus skaitmeninę analizę buvo nustatytas defektų skaičius kiekvienoje srityje, o jį padalinus iš tos srities ploto A įvertintas defektų tankis:

$$m(F_p) = \frac{N(F_p)}{A}. \quad (2.1)$$

Surinkus duomenis iš visų plotelių, eksponuotų skirtingu energijos įtėkiu, sudaroma defektų tankio funkcija kiekvienam iš pluošto persiklojimo atvejų.

Nors tyrimuose naudojamas lazeris pasižymi geru erdviųjų ir energetinių pluošto parametrų atsikartojamumu, šio toks šių parametrų nenuostovumas vis dėl to išlieka. Siekiant nustatyti realų lazerio spinduliuotės energijos tankio pasiskirstymą bandinio plokštumoje buvo nuskenuotas analogiškas rastrinio skenavimo plotelis CCD kameros sensoriaus paviršiuje ir užfiksuotas pluošto erdvinis skirstinys kiekvienoje iš eksponuojamų vietų. Taip buvo užfiksuotos ir pluošto formos bei intensyvumo variacijos. Tuomet visos nuotraukos, įtraukiant tik didžiausio intensyvumo taškus, buvo apjungtos į vieną, iš kurios buvo nustatyta intensyvumui proporcingų pilkos skalės lygių histograma (14 pav.). Tiesa, gautose nuotraukose matyti, jog kameros su lazeriniu šaltiniu pilnai sinchronizuoti nepavyko ir vietomis buvo užfiksuoti du impulsai. Taip nutiko dėl to, kad kameros integravimo laikas neatitinka lazerio spinduliuotės pasikartojimo dažnio. Taip pat matyti, jog vietomis spinduliuotės laukas yra netolygus. Šviesesnės ir tamsesnės sritys susidaro dėl spinduliuotės interferencijos tarp plokščių matricos ir jos apsauginio stikliuko paviršių.

Histogramoje didžiausia pikselio vertė atitinka maksimalią energijos įtėkio vertę. Jei plotas po kreive yra sunormuotas į 1, šis elektromagnetinės spinduliuotės lauko pasiskirstymas atitinka tikimybinę energijos įtėkio funkciją (angl. *probability function of fluence density, PDF*), nusakančią rea -



14 pav. Viršutinėje eilėje – eksperimentiškai užfiksuotas elektromagnetinės spinduliuotės lauko pasiskirstymas esant skirtingiems pluošto persiklojimo lygiams, apačioje – lazerinės spinduliuotės intensyvumo erdvinio pasiskirstymo histograma

liū lokaliū energijos tankiū, kuriais iš tikrųjų eksponuojamas bandinio paviršius, diapazoną. Integruojant šią funkciją gauname atsitiktinio energijos įtėkio F kumuliacinę pasiskirstymo funkciją (angl. *cumulative distribution function, CDF*), atitinkančią tikimybę, kad atsitiktinė dalelė bus paveikta mažesniu ar lygiu pasirinktam energijos įtėkiui F tankiu, neviršijančiu vertės F_p . Atvirkštinė CDF funkcija (angl. *complementary cumulative distribution function, CCDF*), nusakanti, kaip dažnai atsitiktinis energijos tankis F viršija vertę F_p , aprašoma

$$CCDF(F_p) = 1 - CDF(F_p). \quad (2.2)$$

Ši funkcija apibrėžia lokaliū energijos tankiū pasiskirstymą, o jos forma priklauso nuo pluoštū persiklojimo ant skenuojamo plotelio. Eksperimentiškai nustatomas defektū tankis $m(F_p)$ yra defektū ansamblio $D(F)$ ir energijos tankiū skirstinio, apibrėžiamo $CCDF$ funkcija, sąsūka. Sumodeliuotas defektū tankis tuomet lygus

$$m^*(F_p) = \int_0^{F_p} CCDF(F_p, F) \cdot D(F) dF. \quad (2.3)$$

Dydis $D(F)$ yra mūsū ieškomas defektū ansamblis. Atliekant aproksimavimo procedūrą jo parametrai keičiami tol, kol $m^*(F_p)$ geriausiai atitinka $m(F_p)$. Tai, kaip gerai defektū ansamblio modelio aproksimacija atitinka realius eksperimentinius defektū tankius, buvo įvertinta pagal vidutinį mažiausią kvadratinę paklaidą (angl. *mean square error*):

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} (\log(m^*(F_p)) - \log(m(F_p)))^2. \quad (2.4)$$

Kuo labiau MSE artėja į nulį, tuo geriau sumodeliuotas defektū tankis $m^*(F_p)$ atitinka eksperimentinius duomenis ir tuo tiksliau defektū pasiskirstymą bandinio paviršiuje aprašo ansamblinė funkcija [31].

3 PAGRINDINIAI REZULTATAI IR JŲ APTARIMAS

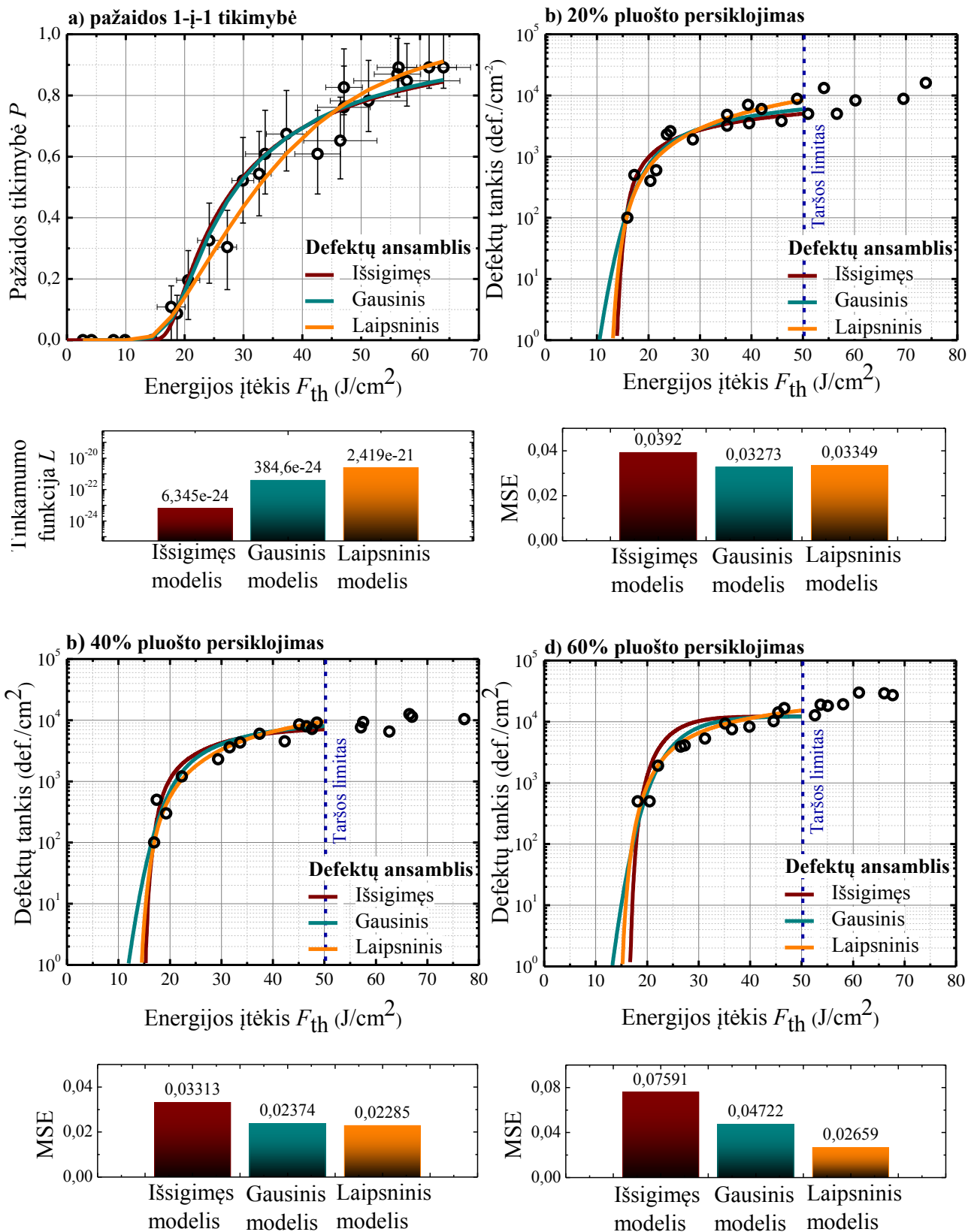
3.1 DEFEKTŲ TANKIO NUSTATYMAS IR ANSAMBLIŲ PALYGINIMAS

Gerai elektromagnetinę spinduliuotę sugeriantys nanometrų eilės dydžio defektai yra pagrindiniai optinės pažaidos iniciatoriai UV srityje. Būtent juose pirmiausia yra generuojami laisvieji elektronai, tada jonizuojama aplinkinė medžiaga, kuri besiplėsdama sukelia slėgio bangas, lemiančias mechaninį optinio komponento pažeidimą. Šiuose tyrimuose defektų tankis buvo nustatomas tiek iš pažaidos tikimybės, tiek iš rastrinio skenavimo duomenų. Siekiant išlaikyti kuo vienodesnes sąlygas abu matavimai buvo atliekami naudojant tą pačią optinę schemą. Optinės pažaidos tikimybės atveju kiekvienas bandinio taškas buvo paveikiamas vienu lazerio spinduliuotės impulsu ir stebima, ar įvyko pažaida, ar ne. Tuomet eksperimentiškai nustatyta optinės pažaidos tikimybės kreivė aproksimuojama tam tikru modeliu, kurio pagrindiniai parametrai yra defektų ansamblis ir optinės pažaidos slenkstis. Tuo tarpu atlikus rastrinį pagrinduko paviršiaus skenavimą tolimesnei analizei, naudojantis *Nomarski* tipo mikroskopu su 40x objektyvu ir *MicroPublisher* CCD kamera, buvo padarytos atskirų plotelių nuotraukos ir tam tikru algoritmu (žr. 13 pav.) atlikta jų analizė bei sudaryta defektų tankio funkcija.

Kadangi tikrasis bandinio paviršinių defektų ansamblis nėra žinomas, eksperimentinius rezultatus aproksimuoti trimis (išsigimusio, Gausinio ir laipsninio) defektų ansamblio funkcijomis. Pažeidimo tikimybės matavimuose, tai, kaip gerai defektų ansamblio modelis atitinka eksperimentinius rezultatus buvo įvertintas pagal tikėtumo funkciją L (angl. *maximum-likelihood estimation*) [24]. Šis metodas įvertina, kokie turėtų būti modelio parametrai, kad aproksimacijos vertės atitiktų realiąsias vertes su tam tikra pasitikėjimo intervalo tikimybe. Taigi, kuo didesnė L vertė, tuo geriau sumodeliuota kreivė atitinka absoliučiuosius eksperimentinius duomenis. Kaip gerai defektų ansamblio modelis atitinka eksperimentinius rezultatus rastrinio skenavimo atveju, įvertinama taikant netiesinės regresijos metodą. Šis metodas parodo tai, kiek tiksliai aproksimacijos kreivė kiekvienu atveju atkartoja realius defektų tankio taškus. Taigi, kuo mažesnė vidutinio kvadratinio nuokrypio MSE vertė, tuo geriau sumodeliuota kreivė atitinka eksperimento vertes.

Analizuojant pažaidos tikimybės matavimo duomenis nustatyta, jog išsigimęs modelis mažiausiai sutampa su eksperimentinėmis vertėmis. Taigi peršasi išvada, jog lydyto kvarco padėklo paviršiuje pasiskirstę defektai skiriasi savo slenkstiniu pažaidos slenkščiu. Tuo tarpu lyginant Gausinį ir laipsninį modelius matyti, jog pastarasis kur kas geriau atitinka defektų tankį ir jų pasiskirstymą.

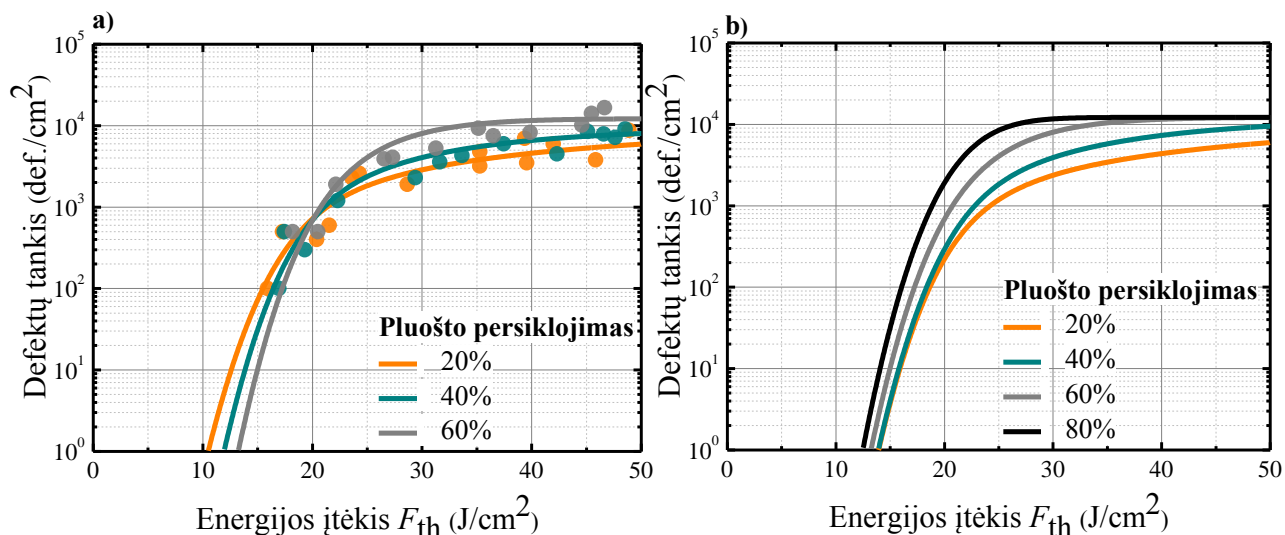
Kaip ir pažaidos tikimybės atveju nustatyta, jog išsigimęs modelis neatspindi rastrinio skenavimo eksperimentinių duomenų ir yra mažiausiai tinkamas kiekybiniam defektų tankio įvertinimui (15 pav. b, c, d). Kai pluošto persiklojimas yra mažas tiek Gauso, tiek laipsninės funkcijos ansamblis apytiksliai vienodai gerai sutampa su eksperimentiniais duomenimis. Taigi, rastriskai skenuojant bandinio paviršių su mažu pluošto persiklojimu negalima nustatyti tikrojo defektų ansamblio. Tuo tarpu eksponuojant defektus tolygesniu lauku (15 pav. d) jų tankio pasiskirstymas



15 pav. Pažaidos tikimybės kreivės, gautos raistriškai atlikus 1-į-1 matavimus (a), defektų tankiai, kai pluošto persiklojimas yra 20% (b), 40% (c) ir 60% (d). Žemiau po grafikais – absoliutinės tinkamumo funkcijos L ir mažiausio vidutinio kvadratinio nuokrypio MSE vertės kiekvienam iš defektų ansamblių modelių

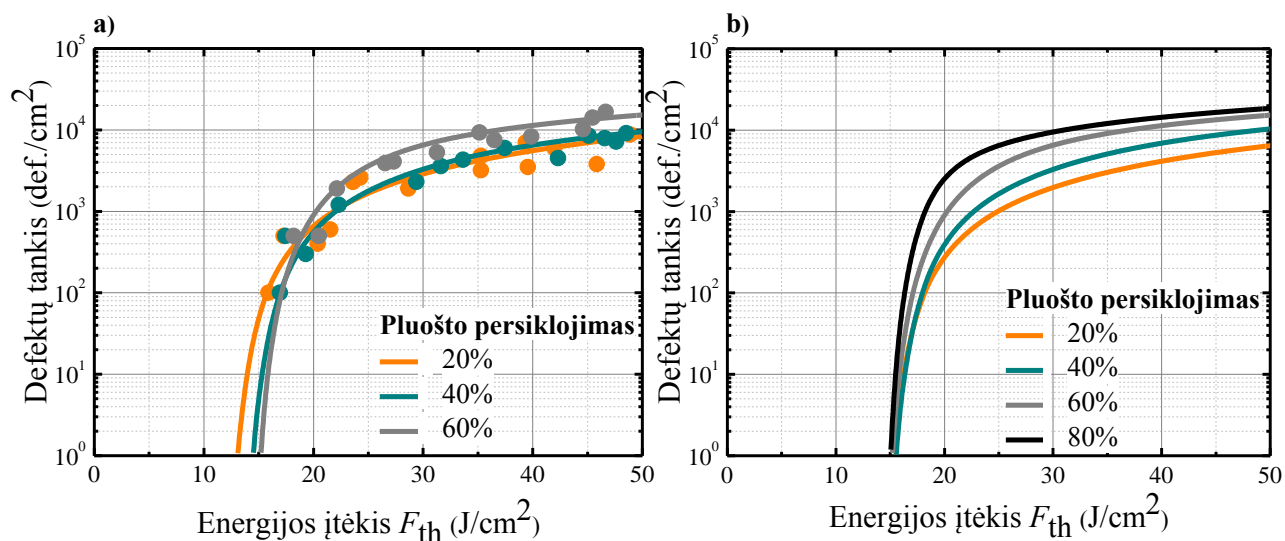
tampa artimiausias laipsniam modeliui. Kaip matome, vienintelio teisingo būdo nustatyti tikrąjį defektų tankį nėra, o rezultatas priklausys nuo matavimo sistemai užduotų parametrų.

Todėl eksperimentiniai duomenys buvo palyginti su teoriniu defektų ansamblių modeliui. Teorinis modeliavimas pasako daugiau informacijos apie defektų tankio evoliuciją didėjant pluošto persiklojimui. Pagal Gausinį modelį didinant lazerio spinduliuotės lauko tolygumą komponento pažaidos slenkstis pamažu mažėja (16 pav. b). Tai gali vykti dėl to, kad didinant pluošto persiklojimą bandinio paviršius yra veikiamas vis labiau išlygintu lazerio spinduliuotės lauku, kurio intensyvumo



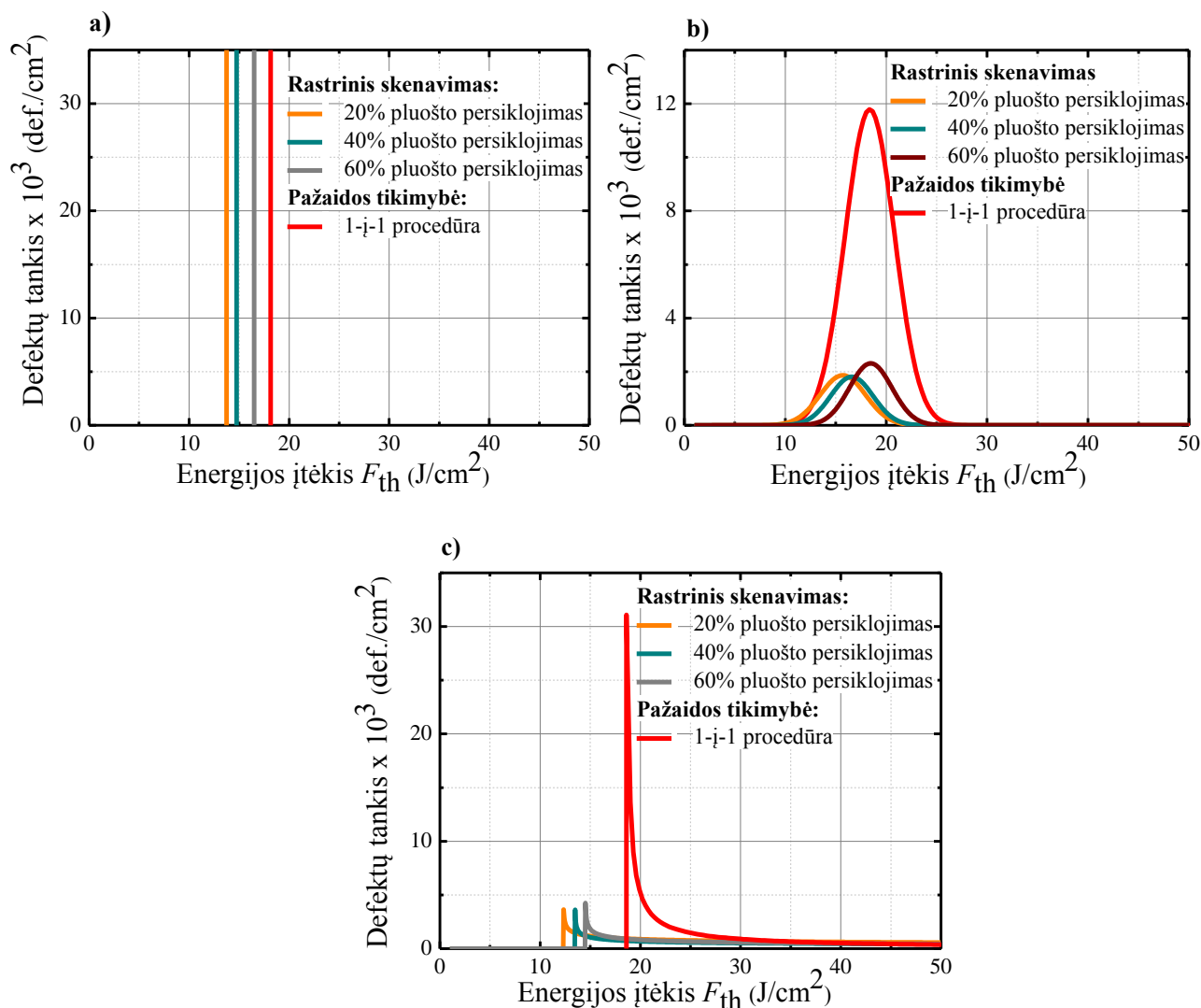
17 pav. Eksperimentinių duomenų, aproksimuotų Gausiniu ansambliu (a) ir teorinio modelio (b) palyginimas

pakanka mažiausiai atspariems defektams pažeisti. Laipsninio ansamblio atveju defektų su mažiausiu pažaidos slenkščiu skaičius yra stabilus ir didėjant pluošto persiklojimui beveik nekinta. Taigi, pagal šį modelį didinant spinduliuotės lauko tolygumą, nauji ir mažiau atsparesni defektai nėra „ištraukiami“.



16 pav. Eksperimentinių duomenų, aproksimuotų laipsniniu ansambliu (a) ir teorinio modelio (b) palyginimas

16 pav. matyti, jog prie didelių energijų įtėkių nustatyti defektų tankiai esant įvairiems pluoštų persiklojimams gana gerai atitinka teorinį Gausinės funkcijos pasiskirstymą. Eksperimentiniai duomenys taip pat neblogai atitinka laipsninės funkcijos teorinį modelį (17 pav. a ir b). Tačiau eksperimentiniai rezultatai neatitinka tiek gausinio, tiek laipsninio modelio $< 20 \text{ J/cm}^2$ energijos įtėkių srityje. Vadinasi, egzistuoja tam tikri veiksniai, ribojantys defektų tankio nustatymą optinės pažaidos slenksčio ribose.



18 pav. Defektų ansamblių palyginimas iš rastrinio skenavimo ir pažaidos tikimybės duomenų

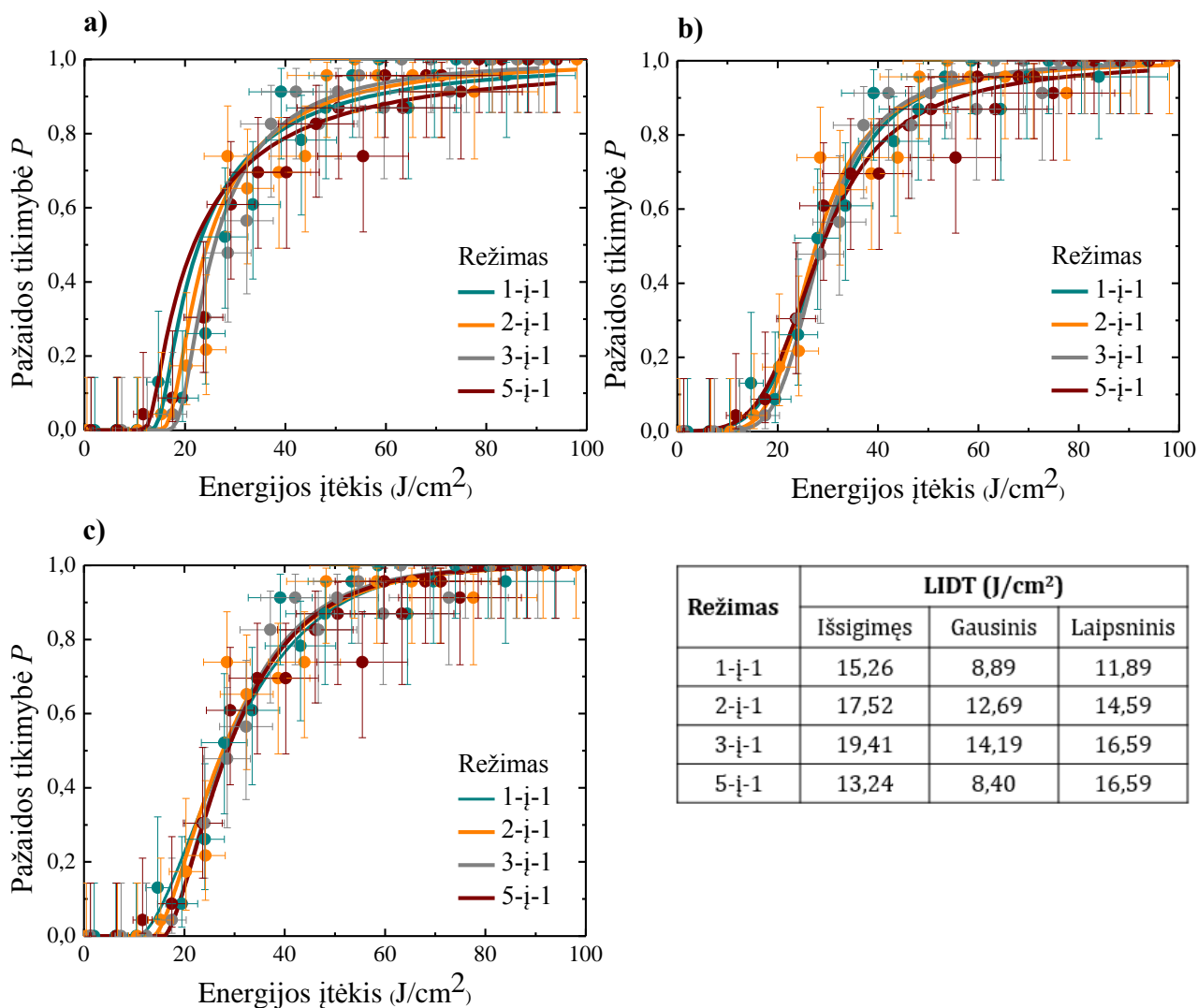
Defektų ansamblių pasiskirstymo palyginimas iš pažaidos tikimybės ir rastrinio skenavimo duomenų vaizduojamas 18 pav. Ansamblinė funkcija parodo koks yra defektų, kurie pasižeistų prie tam tikro energijos tankio, skaičius. Be to, išsigimusio ir laipsninio ansamblių atveju galima nustatyti elemento tikslų pažaidos slenksčių. Rezultatuose matyti, jog rastrinio skenavimo pažaidos slenksčiai, palyginus su pažaidos tikimybės duomenimis, yra mažesni. Taip pat, nustatyta, kad skenuojant rastriskai pažaidos slenksstis auga didinant pluošto persiklojimo lygį. Taip greičiausiai yra dėl to, jog pasireiškia grūdinimo efektas. Skenavimo metu ne visas paviršius yra paveikiamas vienodu lazerio

spinduliuotės intensyvumo lauku. Eksperimentinės vietos, į kurias iš pradžių krito periferinė pluošto zona, kurioje intensyvumas mažesnis, yra pakaitinamos, o pluoštus perklojant vėliau dar kartą eksponuojamos jau didesniu šviesos srautu. Didinant pluošto persiklojimą tokių keletą kartų apšvitintų vietų daugėja, todėl efektyviau gali pasireikšti ir kondicionavimo efektas. Eksperimentiškai nustatyta, kad pažaidos tikimybės ir rastrinio skenavimo atvejais defektų ansambliai nesutampa. Vadinasi, rezultatams įtaką daro matavimo metodologija, kurių kiekybinis palyginimas yra sunkiai įmanomas dėl keleto priežasčių. Pirmiausia, pažaidos tikimybės atveju, defektų ansamblio nustatymo tikslumas gali būti apribotas mažu eksperimentinių taškų skaičiumi. Antra, rastrinio skenavimo atveju defektų skaičius gali būti pervertintas dėl pakartotinio tos pačios vietos eksponavimo persiklojant pluoštams bei taršos abliacijos produktais. Taigi, norint išsiaiškinti tikrąsias šių neatitikimų tarp skirtingų metodologijų priežastis buvo atlikti papildomi tyrimai.

3.2 RASTRINIO SKENAVIMO PROCEDŪRĄ RIBOJANTYS VEIKSNIAI

3.2.1 PAVIRŠIAUS DEFEKTŲ INKUBACIJA

Kaip jau buvo aptarta ankstesniame skyriuje, defektų ansambliai, išskirti iš pažaidos tikimybės ir rastrinio skenavimo duomenų, nesutampa. Todėl buvo pabandyta išsiaiškinti šių metodologijų neatitikimo priežastis. Pirmiausia, buvo iškelta mintis, jog eksperimentiškai rastrinio skenavimo metodu nustatyti defektų skirstiniai galėjo neatitikti realaus defektų pasiskirstymo dėl sukeltos defektų inkubacijos, kurią galėjo lemti pakartotinė bandinio paviršiaus ekspozicija dėl lazerio pluoštų sanklotos. Defektų inkubacija – tai kaupiamasis medžiagos struktūros pakitimas dėl lazerio spinduliuotės poveikio. Konkrečiai šio tyrimo kontekste tai galėtų būti naujų defektų sukūrimas papildomai apšvietus medžiagą. Buvo iškelta hipotezė, jog rastriskai perklojant tam tikro intensyvumo lazerio pluoštą bandinio paviršiuje, jis degraduoja ir tampa mažiau optiškai atsparus. Tokia mintis peršaši intuityviai, nes yra gerai žinoma ir eksperimentiškai patvirtinta, jog medžiaga yra atsparesnė vienkartiniai lazerio ekspozicijai (1-į-1), nei pasikartojantiems impulsams (s-į-1). Defektų inkubacijos efektas turėtų būti ryškesnis didėjant lazerio impulsų energijos įtėkiui, nes kartu didėja pluošto skirstinio dalis, kur energijos įtėkis F viršija defektų optinio atsparumo slenkstį T . Taip pat, kartu didėtų ir vidutinis tam plotui tenkantis defektų skaičius. Siekiant patikrinti šį spėjimą buvo įvykdytas bandinio degradavimo testas. Šio eksperimento metu atliktos keturios lazerio ekspozicijų serijos pamažu didinant pluošto energijos įtėkį: pavieniais impulsais (1-į-1), bei šaunant du (2-į-1), tris (3-į-1) ir penkis (5-į-1) kartus į tą pačią bandinio paviršiaus vietą. Testo metu buvo laikomasi ISO standartuose pateikiamų rekomendacijų pavienių impulsų procedūrai – atstumas tarp gretimų šūvių buvo ne mažesnis kaip 5 efektyvaus pluošto diametrai. Tai leido visiškai eliminuoti paviršiaus taršos įtaką matavimo rezultatams. Tuomet sudarytos ir analizuotos pažaidos tikimybės kreivės.

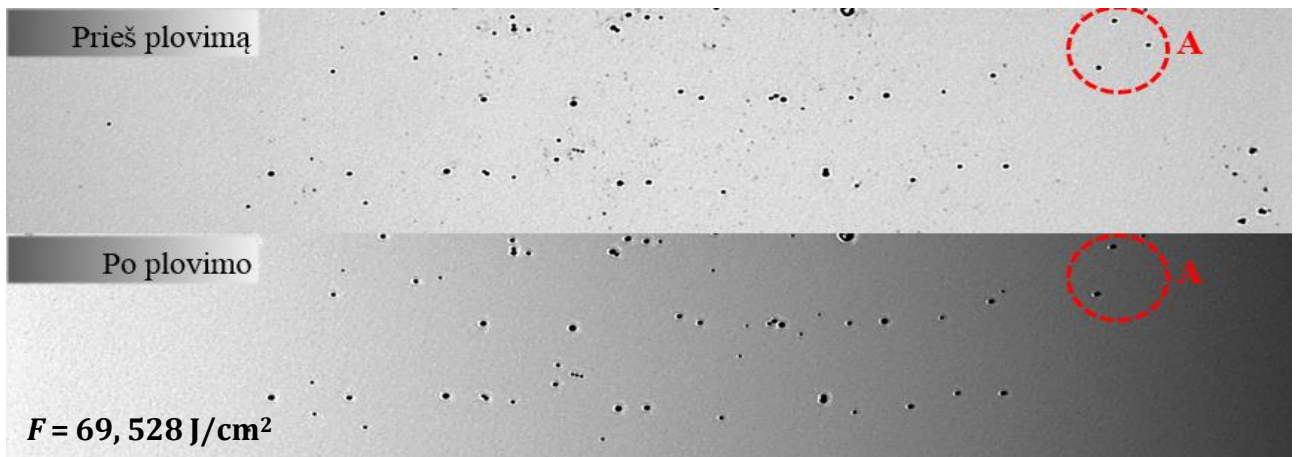


19 pav. Pažaidos tikimybės kreivės esant skirtingiems ekspozicijos režimams išsigimusio (a), gausinio (b) ir laipsninio (c) defektų ansamblio atvejais. Lentelėje – eksperimentiškai nustatyti optinės pažaidos slenksčiai

Buvo tikėtasi, jog didinant impulsų skaičių, bandinio optinis atsparumas kris. Tačiau rezultatai rodo kiek netikėtą priešingą efektą – optinio pažaidos slenksčio įvertis nežymiai didėja didinant į bandinio paviršių krentančių impulsų skaičių (paklaidų ribose yra toks pat). Eksperimentines pažaidos tikimybės vertes aproksimuojant išsigimusio, laipsninio ir gausinio defektų ansamblio modeliais nustatyta, jog bendru atveju didinant impulsų skaičių pažaidos slenkstis paklaidų ribose sutampa (žr. 19 pav.). Iš šio rezultato išplaukia išvada, jog pluošto persiklojimas neturi neigiamos įtakos defektų ansamblio nustatymui iš rastrinio skenavimo duomenų.

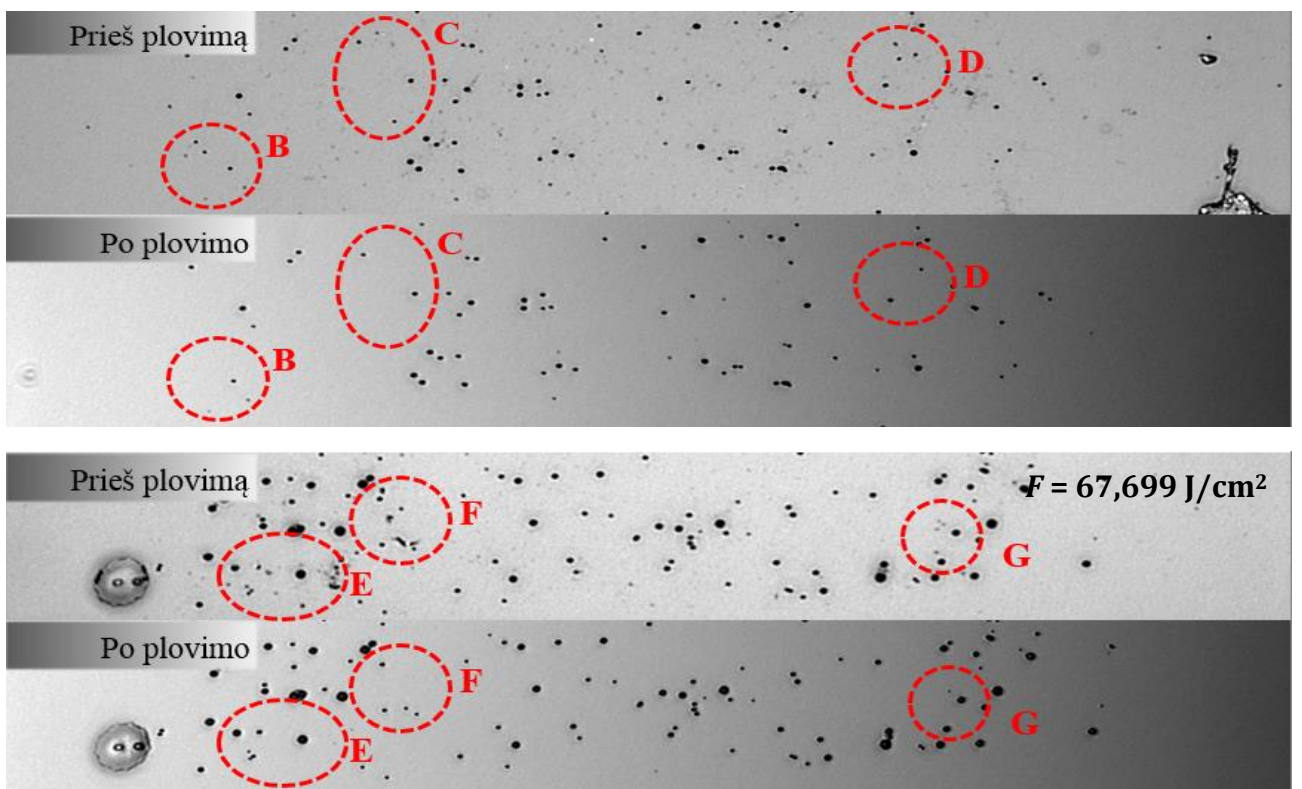
3.2.2 BANDINIO TARŠA ABLIACIJOS PRODUKTAIS

Atlikus pirminę duomenų analizę kilo įtarimas, jog rastrinio skenavimo metu bandinio paviršius galėjo būti užterštas abliacijos produktais. Tokia proceso „savitarša“ turėtų būti minimali prie



20 pav. Paviršiaus defektai po rastrinio skenavimo su 20 % pluošto persiklojimu. Viršuje bandinio paviršiaus vaizdas prieš plovimą ultragarsinėje vonelėje, apačioje - po procedūros

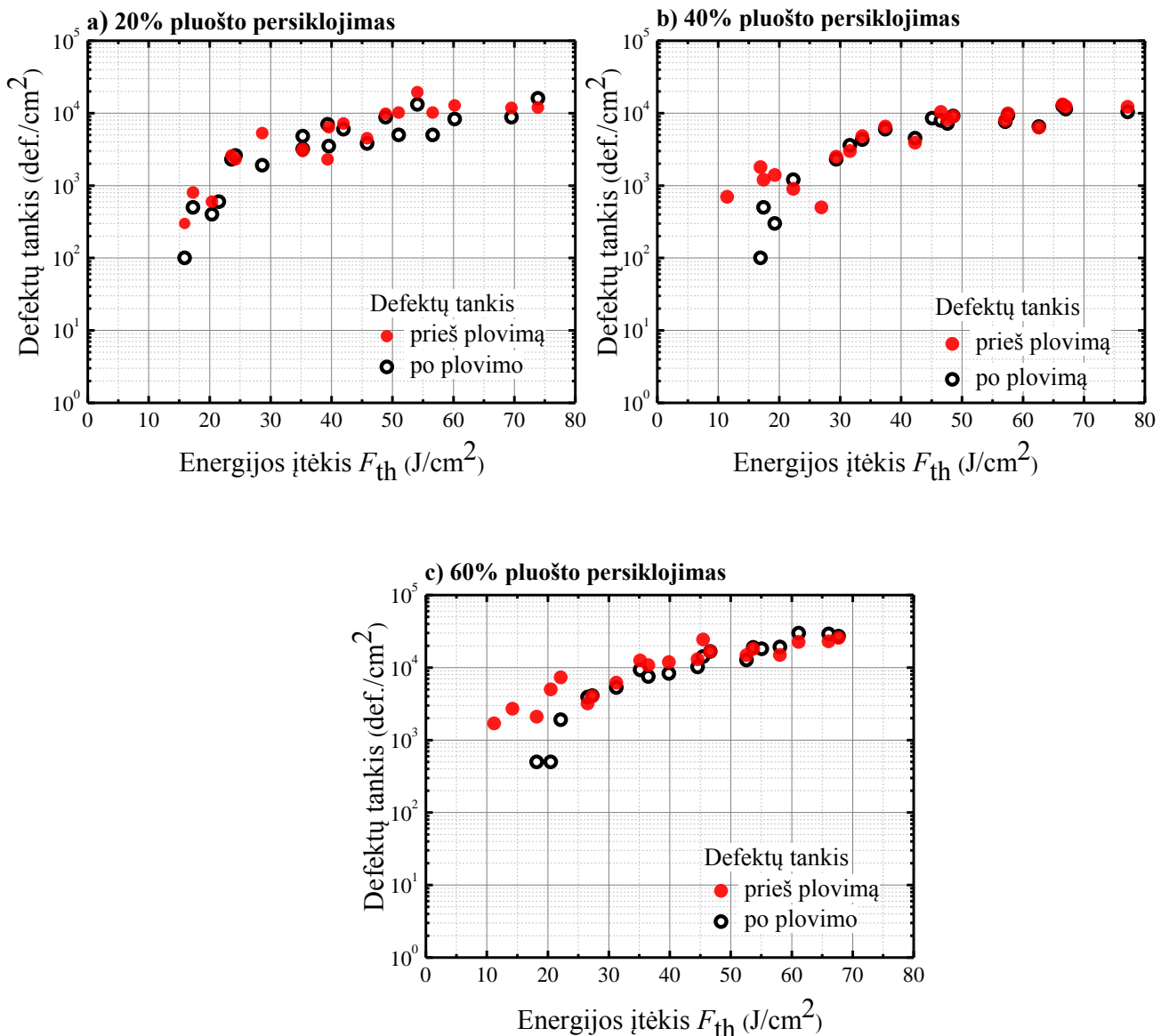
mažų energijos įtėkių, tačiau pastebimai augti didinant lazerio pluošto persiklojimo lygį ir spinduliuotės intensyvumą. Nusėdusių ant bandinio paviršiaus ypač mažų abliacijos dalelių optiniu mikroskopu atskirti nuo lokalių pažeidimų yra beveik neįmanoma, todėl dalelių atpažinimo algoritmas gali priskaičiuoti jų daugiau, nei yra iš tikrųjų. Siekiant patikrinti šią prielaidą eksperimento metu bandinys buvo analizuojamas du kartus: iš karto po lazerio ekspozicijos ir pakartojus valymo ultragarso vonelėje procedūrą. 20 ir 21 pav. matyti, jog šis spėjimas pasitvirtino – po plovimo dalis padėklo paviršiuje prikibusių abliacijos šiukšlių tiek skenuotame plote (21 pav. B, C, D sritys), tiek šalia jo (20 pav. A sritys) buvo pašalinta. Nuotraukose matyti, jog daugiausia nešvarumų nusėda šalia santykinai didelių pažei –



21 pav. Lydyto kvarco padėklo paviršius prieš ir po valymo ultragarsinėje vonelėje; viršuje – 40% pluošto persiklojimas, apačioje – 60%. Rastrinio skenavimo tarša auga didinant pluošto persiklojimą ir energijos

dimų (E ir F sritys). Iš didelių kraterių išmetama daugiau medžiagos, taigi kuo didesni pažeidimų matmenys, tuo galimai didesnė bus ir abliacijos produktų tarša.

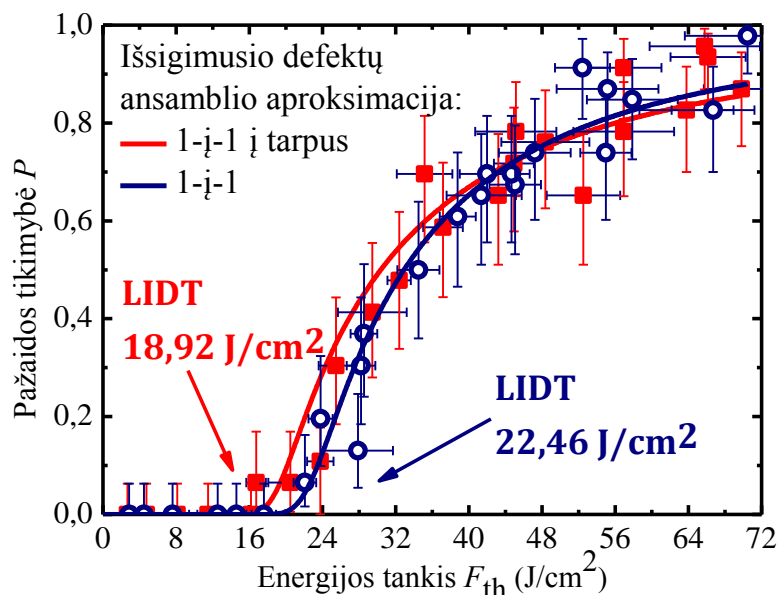
Rastrinio skenavimo metu bandinio paviršius yra tolygiai eksponuojamas intensyvia lazerio spinduliuote. Tai reiškia, jog tikimybė eksponuoti vietą, kurioje yra nusėdusi sugerianti šiukšlė, stipriai išauga. 22 pav. matyti, jog labiausiai abliacijos produktai iškreipia dalelių, kurių pažeidimo slenkstis yra artimas pažaidos slenksčiui, skaičių. Taip greičiausiai yra dėl to, kad esant mažesniai energijos įtėkiai šiukšlės dar nėra prilipusios ir plovimo ultragarsinėje vonelėje metu gali būti pašalintos. Didėjant energijos įtėkiai, vis mažiau dalelių nusiplauna, tačiau tai nereiškia, kad taršos didelių energijų srityje nebuvo. Optiniu mikroskopu analizuojant defektus nėra aišku, kiek iš jų yra antrinės pažaidos, indukuotos lazerio spinduliuotei pataikius į nešvarumą bandinio paviršiuje. Taigi, eksperimentiškai nustatytas optinį atsparumą ribojančių defektų tankis gali būti didesnis nei „savis“ bandinio defektų tankis. Dėl šios priežasties analizuojant defektų tankio rezultatus į aproksimavimo sritį nebuvo įtraukti taškai, viršijantys tam tikrą energijos įtėkio ribą (šiuos tyrimuose – 50 J/cm^2), virš kurios defektų tankio



22 pav. Eksperimentiškai nustatytas defektų tankis prieš ir po valymo ultragarsinėje vonelėje

rezultatai gali būti pervertinami dėl padidėjusios abliacijos produktų taršos.

Siekiant patikrinti, kokią įtaką pažeidimo slenksčio nustatymui galimai daro optinio paviršiaus tarša abliacijos produktais, buvo atliktas papildomas eksperimentas. Pirmiausia, rastrinio skenavimo būdu, kai pluošto persiklojimas lygus -300%, buvo atliktas standartinis pavienių impulsų pažeidimo tikimybės matavimas. Tuomet skenavimo matrica atstumu $2d$ (čia d – pluošto diametras) buvo paslinkta į tarpą, ir vėl atlikta tokia pati pavienių šūvių serija. Taigi, pirmuoju atveju buvo atliktas švarus 1-į-1 matavimas, antruoju – šaudyta tarp pirmojo matavimo taškų. Nors ir antruoju atveju buvo šaudyta į nepažeistą paviršių, lydyto kvarco pažaidos slenkstis sumažėjo nuo $22,46 \text{ J/cm}^2$ iki $18,92 \text{ J/cm}^2$ (23 pav.). Reikia pažymėti, jog skaičiavimai buvo atlikti naudojant išsigimusio defektų ansamblio aproksimaciją. Toks rezultatas patvirtina anksčiau iškeltą prielaidą, jog ekspozicijos metu bandinio paviršius gali būti užteršiamas abliacijos produktais ir tai gali būti pagrindinis efektas, darantis neigiamą įtaką pažaidos slenksčio nustatymo tikslumui.



23 pav. Paviršiaus taršos efektas: dėl nusėdusių abliacijos produktų pažeidimo slenkstis sumažėjo 15,7 %

3.3 OPTINĖS PAŽAIDOS MORFOLOGIJA

Jau daugiau nei dešimtmetį, dėl galimybės tiksliau ir efektyviau atlikti lazerinį medžiagų modifikavimą, UV šviesa sukelti struktūriniai pakitimai optikos paviršiuje kelia didelį mokslinį susidomėjimą. Ypač šiuo metu aktualūs tyrimai ilgųjų impulsų srityje, nes galingi nanosekundiniai lazeriai užima didelę dalį visos lazerinio mikroapdirbimo rinkos. Kaip jau buvo minėta anksčiau, ns srityje pagrindinė optinės pažaidos atsiradimo priežastis yra mikrometrinių matmenų defektai bandinio paviršiuje ar artimuose jam sluoksniuose [32].



24 pav. Optinės pažeidimo morfologija bandinio paviršių ekspozuojant pavieniais nanosekundiniais UV spinduliuotės impulsais

24 pav. vaizduojama tipinė pavienių impulsų optinės pažeidimo evoliucijos morfologija. Matyti, jog didinant energijos įtaką pažeidimas plečiasi, keičiasi jos struktūrinis vaizdas. Pirmiausia, pažeidimas yra inicijuojamas viename ar keletame atsitiktinai išsidėsčiusių defektų. Įvyksta mažas mikro sproginas, defekto vietoje išmušdamas kraterį. Pastebėta, jog šiame inicijavimo etape kraterio diametrą galima būtų sieti su realiomis defekto dimensijomis. Didinant spinduliuotės intensyvumą jonizuojama vis daugiau defekto aplinkinės medžiagos, todėl mikro sproginas turi daugiau griaunamosios jėgos ir išmuša vis didesnę duobelę. Kai energijos įtėkis yra pakankamai didelis perlydoma ir perkaitinama vis daugiau periferinės medžiagos. Įdomu tai, kad šiame perkaitintos medžiagos baseine išlieka šoko bangos pėdsakai, matomi kaip koncentriniai raibuliai, sklindantys nuo defekto. Dar labiau didinant spinduliuotės intensyvumą pažeidimo matmenys didėja tol, kol neišlaikiusi įtempių medžiaga lūžta. Tokia morfologija dar kartą patvirtina minėtą mintį, jog defektai yra pagrindiniai lazeriu indukuotos pažeidimo kaltininkai nanosekundiniame režime, todėl būtina juos tirti ir išmokti kiekybiškai įvertinti norint praplėsti optinio atsparumo ribas UV spinduliuotės srityje.

4 PAGRINDINIAI REZULTATAI IR IŠVADOS

1. Nustatyta, jog iš tirtų defektų ansamblio modelių, eksperimentinius tiek rastrinio skenavimo, tiek pažaidos tikimybės defektų tankio skirstinius lydyto kvarco bandinyje geriausiai atitinka laipsninis modelis, tačiau gaunamų skirstinių parametrai priklauso nuo naudojamo matavimo metodo ir bandinio paruošimo būdo, todėl negalima tvirtinti, kad šis modelis vienareikšmiškai apibūdina pradinį defektų ansamblio skirstinį.
2. Nustatyta, jog pluoštų sanklota rastriskai skenuojant bandinio paviršių nėra metodą ribojantis veiksnys, nes optinės pažaidos slenkstis po truputį didinant pavienių impulsų skaičių paklaidų ribose sutampa.
3. Eksperimentiškai nustatyta, jog paviršiaus tarša abliacijos produktais riboja rastrinio skenavimo metodikos tinkamumą tikrajam defektų skirstiniui bandinio paviršiuje nustatyti, nes abliacijos produktais sukiamas pažaidos slenkstis yra 15.7% mažesnis nei paviršinių defektų PLSS.

LITERATŪRA

- [1] A. F. Turner, J. Becker, W. F. Coombs, Laser damage study of thin films (1965)
- [2] ISO 11254-1 Determination of laser-induced damage threshold of optical surfaces - Part 1: 1-on-1 test (2011)
- [3] ISO 11254-2 Determination of laser-induced damage threshold of optical surfaces - Part 2: S-on-1 test (2011)
- [4] C. B. Schaffer, A. Brodeur, E. Mazur, Laser-induced breakdown and damage in bulk transparent materials induced by tightly focused femtosecond laser pulses, *Meas. Sci. Technol.*, **12**(11), 1784 (2001)
- [5] L. V. Keldysh, Ionization in the field of a strong electromagnetic wave, *Sov. Phys. JEPT*, **20**(5), 1945–1957 (1965)
- [6] F. Y. Genin, A. Salleo, T. V. Pistor, L. L. Chase, Role of light intensification by cracks in optical breakdown on surfaces, *J. Opt. Soc. Am.*, **18**(10), 2607–2616 (2001)
- [7] P. E. Miller, T. I. Suratwala, J. D. Bude, T. A. Laurence, N. Shen, W. A. Steele, M. D. Feit, J. A. Menapace, L. L. Wong, Laser damage precursors in fused silica, *Boulder Damage Symposium* (2009)
- [8] J. Neauport, L. Lamaignere, H. Bercegol, Polishing-induced contamination of fused silica optics and laser induced damage density at 351 nm, *Opt. Express*, **13**(15), 10163–10169 (2005)
- [9] R. M. Wood, Laser-Induced Damage of Optical Materials. Optics and Optoelectronics, CRC Press (2003)
- [10] J. Wang, Y. Lee, J. Han, Q. Xu, Y. Guo, Evaluating subsurface damage in optical glasses," *J. Eur. Opt. Soc.*, **6**(11001) (2011)
- [11] Y. Ahn, N. G. Cho, S.-H. Lee, D. Lee, Lateral crack in abrasive wear of brittle materials, *JSME Int. J. Ser. A*, **46**(2), 140–144 (2003)
- [12] H. Bach, N. Neuroth, Eds., The properties of optical glass, Springer Science & Business Media (1998)
- [13] Y. Li, J. Hou, Q. Xu, J. Wang, W. Yang, Y. Guo, The characteristics of optics polished with a polyurethane pad, *Opt. Express*, **16**(14), 10285–10293 (2008)
- [14] J. Lambropoulos, From abrasive size to subsurface damage in grinding, *Opt. Soc. Am.*, OMA6 (2000)
- [15] T. I. Suratwala, L. L. Wong, P. E. Miller, M. D. Feit, J. A. Menapace, R. Steele, P. Davis, D. Walmer, Sub-surface mechanical damage distributions during grinding of fused silica, *J. Non. Cryst. Solids*, **352**, 5601–5617 (2006)
- [16] F. P. Bowden, T. P. Hughes, Physical properties of surfaces. IV polishing, surface Flow and the formation of the Beilby layer, *Proc. R. Soc. London. Ser. A, Math. Phys. Sci.*, **160**(903), 575–587 (1937)

- [17] J. O. Porteus, S. C. Seitel, Absolute onset of optical surface damage using distributed defect ensembles, *Appl. Opt.*, **23**(21), 3796–3805 (1984)
- [18] H. Krol, L. Gallais, C. Grezes-Besset, J.-Y. Natoli, M. Commandre, Investigation of nanoprecursors threshold distribution in laser-damage testing, *Opt. Commun.*, **256**, 184–189 (2005)
- [19] J. Y. Natoli, L. Gallais, H. Akhouayri, C. Amra, Laser-induced damage of materials in bulk, thin-film, and liquid forms, *Appl. Opt.*, **41**(16), 3156–3166 (2002)
- [20] C. W. Carr, H. B. Radousky, A. M. Rubenchik, M. D. Feit, S. G. Demos, Localized dynamics during laser-induced damage in optical materials, *Phys. Rev. Lett.*, **92**(8) (2004)
- [21] M. J. Matthews, C. W. Carr, H. A. Bechtel, R. N. Raman, Synchrotron radiation infrared microscopic study of non-bridging oxygen modes associated with laser-induced breakdown of fused silica, *Appl. Phys. Lett.*, **99**(151109) (2011)
- [22] S. G. Demos, R. A. Negres, R. N. Raman, M. D. Feit, K. R. Manes, A. M. Rubenchik, Morphology of ejected debris from laser super-heated fused silica following exit surface laser-induced damage, *Laser-Induced Damage in Optical Materials: 2015*, 96320S (2015)
- [23] S. G. Demos, R. A. Negres, R. N. Raman, M. D. Feit, K. R. Manes, A. M. Rubenchik, Relaxation dynamics of nanosecond laser superheated material in dielectrics, *Optica*, **2**(8), 765–772 (2015)
- [24] G. Batavičiūtė, P. Grigas, L. Smalakys, A. Melninkaitis, Revision of laser-induced damage threshold evaluation from damage probability data, *Rev. Sci. Instrum.*, **84**(4), 045108 (2013)
- [25] J. D. Bude, P. E. Miller, S. Baxamusa, N. Shen, T. Laurence, W. Steele, M. Monticelli, High fluence laser damage precursors and their mitigation in fused silica, *Opt. Express*, **22**(5), 5839–5851 (2014)
- [26] M. Runkel, M. C. Nostrand, An overview of raster scanning for ICF-class laser optics, *Laser-Induced Damage in Optical Materials: 2002 and 7th International Workshop on Laser Beam and Optics Characterization*, 136–146 (2003)
- [27] R. M. Brusasco, B. M. Penetrante, J. E. Peterson, S. M. Maricle, J. A. Menapace, UV laser conditioning for reduction of 351-nm damage initiation in fused silica, *33rd Annual Symposium on Optical Materials for High Power Lasers* (2001)
- [28] L. Lamaignère, M. Chambonneau, R. Diaz, R. Courchinoux, T. Donval, Laser damage resistance qualification of large optics for high power laser, *SPIE Proc.*, **9345**, 934508 (2015)
- [29] M. D. Feit, A. M. Rubenchik, Analysis of raster scanning damage and conditioning experiments, *Laser-Induced Damage in Optical Materials: 2002 and 7th International Workshop on Laser Beam and Optics Characterization*, 238–248 (2003)
- [30] L. Lamaignère, M. Balas, R. Courchinoux, T. Donval, J. C. Poncetta, C. Reyné, B. Bertussi, H. Bercegol, Parametric study of laser-induced surface damage density measurements: Toward reproducibility, *Appl. Phys.*, **107**(2), 023105 (2010)
- [31] G. Batavičiūtė, M. Ščiuka, A. Melninkaitis, Direct comparison of laser fluence limiting defect ensembles extracted from damage probability and raster scan measurements, *J. Appl. Phys.*, **118**(10), 105306 (2015)

- [32] J. Wong, J. L. Ferreira, E. F. Lindsey, D. L. Haupt, I. D. Hutcheon, J. H. Kinney, Morphology and microstructure in fused silica induced by high fluence ultraviolet 3ω (355 nm) laser pulses, *J. Non. Cryst. Solids*, **352**, 255–272 (2006)
- [33] J. K. Campbell, Damage resistant optical glasses for high power lasers: a continuing glass science and technology challenge, *ULRCLJC*, **149843** (2002)

SANTRAUKA

Viktorija Plerpaitė

LAZERINĘ PAŽAIDĄ SUKELIANČIŲ DEFEKTŲ BEI JŲ ANSAMBLIŲ TYRIMAS PANAUDOJANT RASTRINIO SKENAVIMO IR PAŽAIDOS TIKIMYBĖS METODUS

Vienas iš labiausiai optinio komponento kokybę nulemiančių gamybos procesų yra paviršiaus poliravimas, kurio metu susiformuoja įvairūs paviršiniai ir popaviršiniai defektai, dažnai ribojantys komponento optinio atsparumo slenkstį, ypač UV srityje. Defektų skirstiniai gali būti aprašomi matematiniais defektų ansamblio funkcijomis, kuriose pagrindiniai parametrai yra defektų tankis ir jų pažaidos slenkstis. Šiame darbe aptariamos dviejų paviršinių defektų tyrimo technikų – rastrinio skenavimo ir pažaidos tikimybės – tinkamumas tikrajam defektų skirstiniui aprašyti.

Darbo **tikslas** – ištirti pažaidos tikimybės ir rastrinio skenavimo metodikų tinkamumą poliravimo defektų ansamblui apibūdinti

Pademonstruota, jog iš tirtų modelių tiek rastrinio skenavimo, tiek pažaidos tikimybės defektų tankio skirstinius lydyto kvarco bandinyje geriausiai atitinka laipsninis modelis, tačiau gaunamų skirstinių parametrai priklauso nuo naudojamo matavimo metodo, todėl šis modelis vienareikšmiškai tikrojo defektų ansamblio neaprašo. Taip pat nustatyta, eksponuojamo paviršiaus tarša abliacijos produktais, o ne pluoštų sanklota, rastriskai skenuojant bandinio paviršių yra pagrindinis metodą ribojantis veiksnys. Todėl rastrinio skenavimo savitaršos mažinimo galimybėms tirti reikalingi tolimesni tyrimai.

SUMMARY

Viktorija Plerpaitė

INVESTIGATION OF LASER DAMAGE PRECURSORS AND THEIR ENSEMBLES USING DAMAGE PROBABILITY AND RASTER SCAN METHODS

Polishing and grinding induced contamination remains the key limitation for resistance against surface damage, particularly at UV range. Nano-defects and nano-absorbing particles near the surface of optic materials can initiate breakdown at fluencies and intensities far below the intrinsic damage threshold. Thus, careful characterization of defects properties and distribution is needed in order to improve any of manufacturing step. In this work, two techniques for determination of existing defect ensemble on fused silica sample were used, namely damage probability and raster scan. Several different mathematical models quantifying possible defect ensembles are analyzed – degenerate, power law and Gaussian law.

The **aim** – to investigate whether both techniques – damage probability and raster scan – are capable to describe and quantify true defect ensemble on fused silica sample exposed by UV light.

It was shown that power law is the most feasible model to reproduce experimental data in both raster scan and damage probability techniques. In contrast to degenerate and Gaussian models, power law reveals highest value of likelihood function in damage probability method and fits experimental data of damage density best in raster scan measurements. However, parameters of empirical function depend on measurement method, thus any of the models can tell what the true defect ensemble is. Also, it was shown that experimental defect ensembles differ when comparing different ensemble determination methods on the same sample. Results reveals that ablation caused contamination are the main factor limiting adequate comparison of both techniques.

MOKSLINIO TIRIAMOJO DARBO APROBACIJA

Dalis su moksliniu tiriamuoju darbu susijusių rezultatų publikuota moksliniame žurnale ir pristatyta mokslinėje konferencijoje:

1. G. Batavičiūtė, M. Ščiuka, V. Plerpaitė, A. Melninkaitis, Direct comparison of damage frequency method and raster scan procedure, Proc. SPIE 9632, 963261 (2015).
2. G. Batavičiūtė, M. Ščiuka, V. Plerpaitė, A. Melninkaitis, Direct comparison of damage frequency method and raster scan procedure, Boulder Damage Symposium 27–30 September 2015, Boulder, Colorado, USA [9632–61].