

VILNIAUS UNIVERSITETAS

Andrius Melninkaitis

**DIELEKTRINIŲ DANGŲ OPTINIS ATSPARUMAS PASIKARTOJANTIEMS
FEMTOSEKUNDINIAMS LAZERIO IMPULSAMS**

Daktaro disertacijos santrauka
Fiziniai mokslai, fizika (02P), optika (P200)

Vilnius, 2009

Disertacija rengta 2004 – 2008 metais Vilniaus universiteto Lazerinių tyrimų centre

Mokslinis vadovas:

Prof. habil. dr. Valdas Sirutkaitis
(*Vilniaus universitetas*, fiziniai mokslai, fizika – 02P, optika – P200)

Konsultantas:

Dr. Marco Jupé
(*Hanoverio lazerių centras*, fiziniai mokslai, fizika – 02P, optika – P200)

Disertacija ginama Vilniaus universiteto Fizikos mokslo krypties taryboje:

Doktorantūros komitetas:

Pirmininkas:

Prof. habil. dr. Algis Petras Piskarskas
(*Vilniaus universitetas*, fiziniai mokslai, fizika – 02P, optika – P200)

Nariai:

Prof. habil. dr. Arūnas Krotkus
(*Puslaidininkių fizikos institutas*, fiziniai mokslai, fizika – 02P, puslaidininkių fizika – P265)

Prof. dr. Valerijus Smilgevičius
(*Vilniaus universitetas*, fiziniai mokslai, fizika – 02P, optika – P200)

Dr. Arūnas Varanavičius
(*Vilniaus universitetas*, fiziniai mokslai, fizika – 02P, optika – P200)

Dr. Edmundas Širmulis
(*Puslaidininkių fizikos institutas*, fiziniai mokslai, fizika – 02P, puslaidininkių fizika – P265)

Oponentai:

Doc. dr. Valdas Girdauskas
(*Vytauto Didžiojo Universitetas*, fiziniai mokslai, fizika – 02P, optika – P200)

Dr. Rolandas Tomašiūnas
(*Vilniaus universitetas*, fiziniai mokslai, fizika – 02P, puslaidininkių fizika – P265)

Disertacija bus ginama viešame Fizikos mokslo krypties tarybos posėdyje 2009 m. kovo mėn. 25 d. 15 val. Vilniaus universiteto Fizikos fakulteto 401 auditorijoje.
Adresas: Saulėtekio 9, LT –10222, Vilnius, Lietuva

Disertacijos santrauka išsiuntinėta 2009 m. vasario mėn. 25 d.
Disertaciją galima peržiūrėti Vilniaus universiteto ir Fizikos instituto bibliotekose

VILNIUS UNIVERSITY

Andrius Melninkaitis

**OPTICAL RESISTANCE OF DIELECTRIC COATINGS TO
MULTI-PULSE FEMTOSECOND LASER RADIATION**

Summary of doctoral dissertation
Physical sciences, Physics (02 P), Optics (P200)

Vilnius, 2009

The research was performed in 2004-2008 at Vilnius University

Scientific supervisor:

Prof. Habil. Dr. Valdas Sirutkaitis
(*Vilnius University*, Physical sciences, Physics – 02P, Optics – P200)

Consultant:

Dr. Marco Jupé
(*Laser Zentrum Hannover e.V.*, Physical sciences, Physics – 02P, Optics – P200)

Doctoral committee:

Chairman:

1. *Prof. Habil. Dr. Algis Petras Piskarskas*
(*Vilnius University*, Physical sciences, Physics – 02P, Optics – P200)

Members:

2. *Prof. Habil. Dr. Arūnas Krotkus*
(*Semiconductor Physics Institute*, Physical sciences, Physics – 02P, Semiconductor Physics – P265)

3. *Prof. Dr. Valerijus Smilgevičius*
(*Vilnius University*, Physical sciences, Physics – 02P, Optics – P200)

4. *Dr. Arūnas Varanavičius*
(*Vilnius University*, Physical sciences, Physics – 02P, Optics – P200)

5. *Dr. Edmundas Širmulis*
(*Semiconductor Physics Institute*, Physical sciences, Physics – 02P, Semiconductor Physics – P265)

Opponents:

Doc. Dr. Valdas Girdauskas
(*Vytautas Magnus University*, Physical sciences, Physics – 02P, Optics – P200)

Dr. Rolandas Tomašiūnas
(*Vilnius University*, Physical sciences, Physics – 02P, Semiconductor Physics – P265)

The dissertation will be defended under open consideration in the Council of Physics on the 25th of March, 2009, 3 p.m. at the Faculty of Physics of Vilnius University, room 401.

Address: Saulėtekio ave. 9, LT –10222, Vilnius, Lithuania

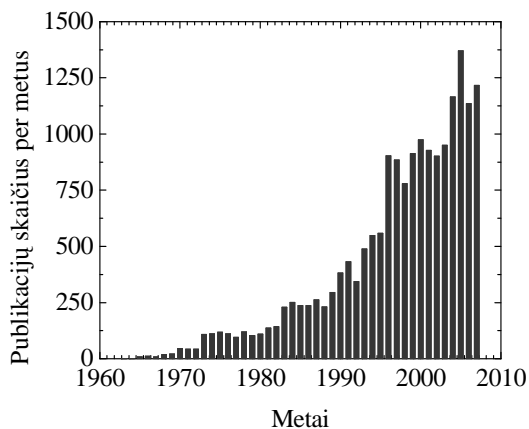
The summary of the dissertation was distributed on the 25th of February, 2009

The dissertation is available at Vilnius University Library and the library of the Institute of Physics

Ižanga

1960 m. gegužės 16 d. laikoma lazerio istorijos pradžia [1]. Būtent tą dieną T. Maimanas (*T. Maiman*) pirmą kartą pademonstravo lazerinę liuminescenciją šviesdamas galinga blykste į rubino strypą, kurio skersgaliai buvo padengti plonomis sidabro dangomis. Netrukus 1963 m. P.D. Meikeris (*P.D. Maker*) [2] publikavo pirmuosius lazerinio pažeidimo dielektrikuose ir sufokusuota lazerio spinduliuote gaunamos plazmos kibirkšties ore rezultatus. Šie du atradimai – *lazeris* ir *lazerinis pažeidimas* darė didelę įtaką tolesnei mokslo ir technologijų raidai atverdami visiškai naujas veiklos sritis. Net ir dabar, prabėgus beveik penkiasdešimčiai metų po lazerio išradimo, sąveika tarp medžiagos ir lazerinės spinduliuotės yra aktyvių mokslinių diskusijų objektas. Ypač daug dėmesio skiriama medžiagų optiniam atsparumui, kuris nustatomas matuojant pažeidimo slenkstį, t.y. kritinę spinduliuotės intensyvumo ribą, kurią viršijus įvyksta negrįžtami eksponuojamos medžiagos sandaros pokyčiai.

Susidomėjimas lazerinės spinduliuotės ir medžiagos sąveika išlieka ypač didelis dėl plačių taikymo galimybių, kurios toliau skatina galingų lazerinių šaltinių vystymąsi. Tai patvirtina ir mokslinių publikacijų, susijusių su raktiniais žodžiais *laser damage* (liet. *lazerinis pažeidimas*), gausumas: maždaug nuo 1960 m. publikacijų skaičius per metus kas dešimt metų beveik padvigubėja (1 pav.). Akivaizdu ir tai, kad bet kokia lazerinė technologija yra neatsiejama nuo paties lazerio. Lygiai taip pat, kaip ir bet kurio lazerio veikimas neatsiejamas nuo jo sudėtinių dalių. Pati svarbiausia lazerio dalis yra jo optinė schema, kurią sudaro daugybė plonasluoksnėmis dangomis padengtų komponentų. Kai kurie iš jų kritiniai – nuolat veikiami ypač galinga lazerine spinduliuote, todėl bėgant laikui gali pasikeisti jų optinės arba mechaninės savybės. Lazerio galia negali būti didesnė negu silpniausios jo grandies (kritinio komponento paviršius) optinis atsparumas, todėl tolesnis lazerių galios didinimas yra neatsiejamas nuo



1 pav. Publikacijų skaičius per metus pagal raktinius žodžius *laser damage* SCOPUS duomenų bazėje (iki 2008-01-01)

optinių dangų technologijų pažangos. Optinės dangos – tai ploni dielektriniai sluoksniai, kurių storis palyginamas su šviesos bangos ilgiu. Naudojant optines dangas galima iš esmės pakeisti optinių sistemų parametrus. Įvairūs garinimo metodai įgalina dengti daugiasluoksnes dangas, kontroliuojant jų sluoksnių skaičių, storius bei lūžio rodiklius: taip įprastus stiklus, kristalus ar puslaidininkius galima paversti aukštos kokybės optiniais filtrais, veidrodžiais ar pluošto dalikliais. Dėl šių priežasčių dangos naudojamos beveik visuose optiniuose prietaisuose: pradedant akiniais skaitymui, baigiant lazerių rezonatoriais. Tiek pramonėje, tiek ir moksle nuolat jaučiamas poreikis lazerinių komponentų, o kartu ir jų dangų, kurių parametrai yra aukščiausios įmanomos kokybės. Neretai būtent dangų savybės riboja visos

didelio spinduliuotės impulsų pasikartojimo dažnio ir mažo terminio poveikio medžiagai femtosekundiniai lazeriai ypač patrauklūs medžiagų mikroapdirbimui. Todėl šis darbas visų pirma skirtas dangų, naudojamų femtosekundiniuose didelio pasikartojimo dažnio lazeriuose, optiniam atsparumui tirti. Jau anksčiau buvo pademonstruota, kad sąveika tarp femtosekundinės trukmės impulsų ir medžiagos iš esmės kitokia, lyginant ją su ilgesnių nanosekundinių impulsų sąveika [3]. Sąveikos mechanizmai, dėl kurių vyksta lazerinis suardymas, iš esmės yra žinomi. Tai – daugiafotonė sugertis, tunelinė jonizacija, griūtinė jonizacija, tiesinė priemaišinė sugertis, tačiau optinio atsparumo prasme svarbiausia nustatyti, kuris iš jų yra ribojantis. Todėl šiame darbe eksperimentai buvo planuojami taip, kad būtų atskleista vieno ar kito veiksnio įtaka optiniam atsparumui. Taip pat svarbu tinkamai interpretuoti gautuosius rezultatus.

Pagrindinis darbo tikslas

- Eksperimentiškai ir teoriškai išnagrinėti technologinius veiksnius bei fundamentalius pažeidimo mechanizmus, ribojančius dielektrinių interferencinių dangų optinį atsparumą pasikartojantiems femtosekundiniams lazerio impulsams.

Pagrindiniai darbo uždaviniai

1. Sukurti automatizuotą matavimo sistemą, įgalinančią nustatyti lazeriu sukeliama pažeidimo slenkstį fiksuotam skaičiui vienodos energijos pasikartojančių lazerio impulsų (S -i-1 testas).
2. Nustatyti, kokia yra testavimui naudojamos pasikartojančios lazerinės spinduliuotės erdvinių ir energinių parametrų sklaidos įtaka eksperimentiškai išmatuotajai S -i-1 pažeidimo tikimybei.
3. Atlikti pažeidimo slenkščio matavimus su derinamo bangos ilgio femtosekundiniais impulsais siekiant išsiaiškinti daugiafotonės sugerties įtaką lazerinio pažeidimo mechanizmui dielektrinėse dangose.
4. Nustatyti optinių dangų konstrukcijos, keičiančios stovinčiųjų bangų pūpsnių padėtį, įtaką femtosekundinių impulsų sukulto pažeidimo slenkščiui.
5. Nustatyti ar standartinių pagrindų, ant kurių garinamos dangos, šiurkštumai gali įtakoti didelio atspindžio dielektrinių dangų optinį atsparumą pasikartojantiems femtosekundiniams impulsams.
6. Ištirti įvairių dangų, dengtų elektronpluoščio nusodinimo ir elektronpluoščio nusodinimo su jonų tankinimu būdais, pažeidimo slenkščius pasikartojantiems femtosekundiniams impulsams.

Sprendžiant visus šiuos uždavinius, buvo kuriama eksperimentinė įranga, atliekami būtinausi eksperimentai, kartu ir jų skaitmeninis modeliavimas. Ant įvairių padėklų buvo garinamos eksperimentinės dielektrinės dangos, kurios buvo charakterizuojamos įvairiais medžiagų analizės metodais. Charakterizavus dangas, buvo eksperimentiškai testuojamas jų optinis atsparumas pasikartojančiai lazerinei spinduliuotei. Gautieji eksperimentų rezultatai buvo lyginami su skaitmeninio modeliavimo rezultatais.

Ginamieji teiginiai

1. S - i -1 eksperimentuose, kai testuojamųjų skaidrių medžiagų optinis atsparumas yra ribojamas atsitiktinai išsidėsčiusiais defektais, dėl pasikartojančių lazerinių impulsų erdvinių-energetinių parametrų sklaidos stebima pseudoakumuliacinė pažeidimų statistika.
2. Tolydžiai keičiant eksponuojančių femtosekundinių impulsų bangos ilgį, iš spektro srities atitinkančios n -fotonę sugertį, į sritį, atitinkančią $(n-1)$ -fotonę sugertį, vienasluoksnių dielektrinių dangų pažeidimo slenkstis mažėja šuoliškai.
3. Tol kol didelio atspindžio koeficiento dangos, užgarintos elektronpluoščio nusodinimo arba elektronpluoščio nusodinimo su jonų tankinimu, paviršiaus šiukštumas kelis kartus viršija pagrindo šiurkštumą, jos optinis atsparumas femtosekundiniams impulsams nepriklauso nuo pagrindo šiurkštumo.
4. Iš tų pačių dielektrinių medžiagų pagamintų didelio atspindžio koeficiento optinių dangų pažeidimo slenkščiai pasikartojantiems femtosekundiniams impulsams yra artimi tiek dangoms, pagamintoms naudojant elektronpluoštį nusodinimą, tiek elektronpluoštį nusodinimą su jonų tankinimu.
5. Stovinčiosios bangos elektrinio lauko pūpsnio „perstūmimas“ iš didelio lūžio rodiklio medžiagos į mažesnio lūžio rodiklio medžiagą didina optinių dangų pažeidimo slenkščius femtosekundiniams impulsams.

Asmeninis autoriaus indėlis:

- Eksperimentinės aparatūros ir programinės įrangos kūrimas.
- Eksperimentų metodikos kūrimas ir optinio atsparumo eksperimentų atlikimas.
- Bandinių charakterizavimas.
- Gautųjų duomenų analizė, interpretacija bei viešinimas.
- Teorinio pseudoakumuliacinio modelio kūrimas ir kompiuterinis modeliavimas.

Pagrindiniai disertacijoje aprašytų mokslinių tyrimų bendraautoriai yra:

Prof. habil. dr. V. Sirutkaitis, dr. Marco Jupé, G. Abromavičius, dr. R. Buzelis, D. Mikšys ir J. Mirauskas.

Prof. habil. dr. V. Sirutkaitis įkūrė optinių komponentų testavimo laboratoriją Vilniaus universiteto lazerinių tyrimų centre, kartu sudarydamas puikias darbo sąlygas visiems šioje disertacijoje aprašytiems darbams atlikti. Jis dalyvavo formuluojant bendras darbo užduotis, interpretuojant ir pristatant gautus rezultatus.

Dr. Marco Jupé konsultavo įvairiais klausimais, dalyvavo mokslinėse diskusijose, atliko trečioje darbo dalyje aprašytą su daugiafotonės sugerties tyrimais susijusios dalies kompiuterinį modeliavimą, prisidėjo atliekant eksperimentą ir rezultatų interpretaciją.

Giedrius Abromavičius projektavo, gamino ir spektriškai charakterizavo didžiąją dalį šiame darbe tirtų optinių dangų, prisidėjo prie duomenų analizės.

Dr. Rytis Buzelis prisidėjo planuojant eksperimentus (ypač stovinčiųjų bangų interferencijos), charakterizuojant bandinius AJM ir interpretuojant gautuosius rezultatus.

D. Mikšys atliko dalį eksperimento automatizavimo darbų, dalyvavo vykdant eksperimentus.
J. Mirauskas prisidėjo prie kompiuterinio programavimo, modeliuojant pseudoakumuliacinį efektą.

Diskusijos su prof. Algiu Petru Piskarsku ir dr. Detlev Ristau apie pažeidimo slenksčio sąvoką taip pat buvo labai naudingos.

Mokslinis naujumas

1. Teoriškai išnagrinėtas vadinamojo S - i -1 pažeidimo tikimybės matavimo atvejis, kai lazerinės spinduliuotės erdviniai ir energetiniai parametrai neatsikartoja. Parodyta, kad šių nestabilumų įskaitymas pažeidimo slenksčio matavimuose gali pasireikšti taip pat kaip akumuliacinis reiškinys.
2. Pasiūlytos asimptotinės formulės, kurios susieja nestabilios lazerinės spinduliuotės ir bandinio parametrus su išmatuotąja S - i -1 pažeidimo tikimybe tam tikrame pasiklovimo intervale.
3. Pirmą kartą eksperimentiškai pademonstruota, kad dėl daugiafotonės sugerties įtakos dielektrinių dangų pažeidimo slenkstis, tolydžiai keičiant femtosekundinių impulsų bangos ilgį, kinta šuoliškai. Kartu pademonstruotos ir teorinės šio rezultato prielaidos.
4. Eksperimentiškai pademonstruota, kad stovinčiosios elektromagnetinės bangos pūpsnius „perstūmus“ į žemesnio lūžio rodiklio sluoksnius padidėja optinis atsparumas ir femtosekundinei lazerinei spinduliuotei.
5. Eksperimentiškai nustatyti įvairių dangų, dengtų jonapluoščio dulkinimo, elektronpluoščio nusodinimo su papildomu jonų tankinimu ir be jo technologijomis, pažeidimo slenksčiai įvairios trukmės ir įvairių bangos ilgių femtosekundiniams impulsams.

Praktinė nauda

1. Pademonstruota, kad S - i -1 matavimų pažeidimo tikimybė didėja didinant kritusių į bandinį impulsų skaičių dėl lazerinių impulsų energijos ir jų sklidimo krypties neatsikartojamumo. Šie rezultatai paaiškino kai kuriuos dėsningumus akumuliacinių reiškinų tyrimuose, o kartu pademonstravo ir mechaninių vibracijų (kurios gali padidinti eksponuojamą paviršiaus plotą) įtaką eksperimento rezultatams. Supratimas apie šiuos reiškinus padeda išvengti neteisingos duomenų interpretacijos ir galimų matavimo paklaidų.
2. Gautas šuoliškai kintantis pažeidimo slenkstis tolydžiai keičiant lazerio spinduliuotės bangos ilgį įrodė daugiafotonės sugerties dielektrinėse dangose įtaką. Šios žinios ypač svarbios plačiame bangų ilgių ruože derinamų didelės galios lazerinių sistemų projektuotojams. Tai padės geriau išsirinkti medžiagas, skirtas dangoms, konkretaus taikymo atveju.
3. Eksperimentiškai pademonstruota, jog optimizuojant dielektrinių dangų sluoksnių storius elektrinio lauko skirstinį dangoje galima pakeisti taip, kad interferenciniai pūpsniai būtų lokalizuoti didesnio optinio atsparumo (SiO_2) medžiagos sluoksniuose ir kartu būtų tenkinama didelio atspindžio koeficiento sąlyga. Panaudojus šią technologiją, galima be papildomų investicijų sukurti optiškai atsparesnes dangas femtosekundiniams taikymams.
4. Parodyta, kad naudojamos standartinės padėklų poliravimo technologijos yra priimtinos optinio atsparumo prasme gaminant didelio atspindžio koeficiento dangas

femtosekundiniams lazeriams. Pademonstruota, kad spektrines savybes gerinantis papildomas dangų tankinimas garinimo metu didelės energijos Ar⁺ jonais neturi ženklios įtakos dangų optiniam atsparumui femtosekundinėje srityje. Taigi, jei esminis dangos kokybės kriterijus yra optinis atsparumas, galima rinktis pigesnes poliravimo ir garinimo technologijas.

5. Sukurta nauja automatizuota pažeidimo slenksčio testavimo stotis, kuria šiuo metu naudojamosi tiek Lietuvos lazerinių bendrovių, tiek ir užsienio partnerių kuriamoms dangoms charakterizuoti ir dengimo technologijoms tobulinti.

Darbo struktūra ir turinys

Disertacijos apimtis — 124 puslapiai. Joje yra 55 iliustracijos. Disertacijos medžiaga suskirstyta į tokias pagrindines sudedamąsias dalis: įvadas, literatūros apžvalga ir darbo metodika, keturios dalys, aprašančios gautuosius rezultatus, išvados ir literatūros, kuria buvo naudotasi, sąrašas. Pirmoje dalyje apibūdinami dielektrinių dangų veikimo principai, medžiagos ir pagrindinės jų dengimo technologijos. Taip pat aptariama darbe naudotoji optinio atsparumo testavimo metodika, pristatoma darbo metu sukurta eksperimentinė aparatūra ir apibrėžiama lazeriu indukuoto pažeidimo slenksčio sąvoka. Antroje dalyje yra nagrinėjamas šiuo metu egzistuojančio pažeidimo slenksčio nustatymo standarto nevienareikšmiškumas. Pagrindinis dėmesys buvo skiriamas realaus eksperimento modeliavimui *Monte Carlo* metodu: nagrinėjama erdviškai ir energetiškai neatsikartojančios lazerinės spinduliuotės įtaka pažeidimo tikimybės matavimų rezultatams. Trečioje dalyje nagrinėjama daugiafotonės sugerties įtaka dielektrinių medžiagų optiniam atsparumui, o taip pat trumpai aprašomi pagrindiniai fizikiniai procesai, vykstantys medžiagos ir spinduliuotės sąveikos metu. Pateikiami elektronų kaupimosi laidumo juostoje skaitmeninio modeliavimo rezultatai. Ketvirtoje dalyje aprašomi optinių dangų technologiniai gamybos ypatumai ir jų įtaka komponento optiniam atsparumui. Atlikti palyginamieji eksperimentiniai tyrimai. Paskutinėje penktoje dalyje pateikti rezultatai, kurie gauti nagrinėjant stovinčiųjų elektromagnetinių bangų įtaką daugiasluoksnių dielektrinių dangų optiniam atsparumui.

Darbo aprobacija

Autorius iš viso publikavo periodinėje mokslinėje spaudoje 28 straipsnius, iš jų 22 susiję su disertacijos tema [A1–A22]. Taip pat paruošė ir 41 pranešimą įvairiose konferencijose [C1–C41], iš jų [C1–C3, C7–C15, C17–C25, C27] – tarptautinėse konferencijose Europoje ir Amerikoje. Didžioji dalis mokslinių pranešimų paskelbta pagrindinėse su optinio atsparumo tematika susijusiose konferencijose: „Boulder damage symposium“, kurios kasmet organizuojamos Kolorado valstijoje JAV.

Straipsniai, kurie yra tiesiogiai susiję su disertacijos tema

[A1] Valdas Sirutkaitis, Robert C. Eckardt, Ona Balachninaite, Rimantas Grigonis, **A. Melninkaitis** and T. Rakickas. *Optical characterization in wide spectral range by a coherent spectrophotometer*, Proc. of SPIE **5188**, p.19 - 34, (2003)

- [A2] Andrius Zukauskas, **Andrius Melninkaitis**, Valdas Sirutkaitis, Kai Starke and Detlev Ristau. *Nonlinear absorption of ultrashort pulses in HR dielectric mirrors*, Proc. of SPIE **5991**, p.599111 - 10, (2005)
- [A3] **Andrius Melninkaitis**, Tomas Rakickas, Darius Miksys, Rimantas Grigonis, Valdas Sirutkaitis, Alfridas Skrebutenas, Rytis Buzelis, Ramutis Drazdys, Giedrius Abromavicius, Remigijus Juskenas and Algirdas Selskis. *Effect of deposition method and substrate surface quality on laser-induced damage threshold for repetitive 13-ns and 130-fs pulses*, Proc. of SPIE **5647**, p.43 - 52, (2005)
- [A4] Marco Jupé, L. Jensen, Kai Starke, Detlev Ristau, **Andrius Melninkaitis**, Rimantas Grigonis and Valdas Sirutkaitis. *Quantized behavior of fs-LIDT in dielectric layers*, Proc. of SPIE **5647**, p.53 - 60, (2005)
- [A5] G. Abromavicius, R. Buzelis, R. Drazdys, R. Grigonis, **A. Melninkaitis**, D. Miksys, T. Rakickas, V. Sirutkaitis, A. Skrebutenas, R. Juskenas and A. Selskis. *Influence of ion-assisted deposition on laser-induced damage threshold and microstructure of optical coatings*, Proc. of SPIE **5991**, p.59911F - 7, (2005)
- [A6] **A. Melninkaitis**, D. Miksys, R. Grigonis, V. Sirutkaitis, D. Tumosa, G. Skokov and D. Kuzma. *Laser-induced damage thresholds of ion beam sputtered and magnetron sputtered AR-coatings on lithium borate*, Proc. of SPIE **5991**, p.59911C - 11, (2005)
- [A7] **A. Melninkaitis**, D. Miksys, T. Balciunas, V. Sirutkaitis, A. Skrebutenas, R. Buzelis, R. Drazdys and G. Abromavicius. *Effect of substrate temperature and ion assistance on nanosecond laser-induced damage threshold in high reflection dielectric coatings*, Proc. of SPIE **5991**, p.59911B - 9, (2005)
- [A8] **A. Melninkaitis**, D. Miksys, R. Grigonis, V. Sirutkaitis, D. Tumosa, G. Skokov and D. Kuzma, *Multiple pulse laser-induced damage of antireflection coated lithium triborate*, Proc. of SPIE **5963**, p.59631I - 8, (2005)
- [A9] **A. Melninkaitis**, M. Maciulevicius, T. Rakickas, D. Miksys, R. Grigonis, V. Sirutkaitis, A. Skrebutenas, R. Buzelis, R. Drazdys and G. Abromavicius. *Comparison of optical resistance of ion assisted deposition and standard electron beam deposition methods for high reflectance dielectric coatings*, Proc. of SPIE **5963**, p.59631H - 9, (2005)
- [A10] **Andrius Melninkaitis**, Darius Miksys, Valdas Sirutkaitis, Giedrius Abromavičius, Rytis Buzelis and Ramutis Drazdys. *Laser-induced damage threshold measurements of high reflecting dielectric layers*, Proc. of SPIE **6596**, p.65961I - 6, (2006)
- [A11] Giedrius Abromavičius, Rytis Buzelis, Ramutis Drazdys, **Andrius Melninkaitis**, Darius Miksys, Valdas Sirutkaitis and Alfridas Skrebutenas. *Improvement of optical properties and radiation resistance of optical coatings based on Nb₂O₅ and Ta₂O₅*, Proc. of SPIE **6596**, p.65961O - 6, (2006)
- [A12] **A. Melninkaitis**, D. Miksys, M. Maciulevičius, V. Sirutkaitis, G. Slekyš and A. V. Samoylov. *Laser-induced damage thresholds of starched PMMA waveplates*, Proc. of SPIE **6403**, p.640325 - 640328, (2006)
- [A13] **A. Melninkaitis**, K. Juškevičius, M. Maciulevičius, V. Sirutkaitis, A. Beganskienė, I. Kazadojev, A. Kareiva and D. Perednis. *Optical characterization of antireflective sol-gel coatings fabricated using dip coating method*, Proc. of SPIE **6403**, p.64031C - 8, (2006)
- [A14] A. Beganskiene, S. Sakirzanovas, A. Melninkaitis, V. Sirutkaitis, and A. Kareiva. *Sol-gel derived optical coating with controlled parameters*, Materials Science (Medžiagotyra) **12**, 283-286, (2006)

- [A15] G. Abromavicius, R. Buzelis, R. Drazdys, **A. Melninkaitis**, D. Miksys, V. Sirutkaitis, A. Skrebutenas, R. Juskenas and A. Selskis, *The microstructure and LIDT of Nb₂O₅ and Ta₂O₅ optical coatings*, Proc. of SPIE **6403**, p.640315 - 640317, (2006)
- [A16] **A. Melninkaitis**, D. Miksys, T. Balciunas, O. Balachninaite, T. Rakickas, R. Grigonis and V. Sirutkaitis, *Automated test station for laser-induced damage threshold measurements according to ISO 11254-2 standard*, Proc. of SPIE **6101**, p.61011J - 10, (2006)
- [A17] A. Beganskiene, S. Sakirzanovas, I. Kazadojev, **A. Melninkaitis**, V. Sirutkaitis and A. Kareiva. *Sol-gel derived antireflective coating with controlled thickness and reflective index*, Materials Science (Poland) **25**, p.817 - 824, (2007)
- [A18] **Andrius Melninkaitis**, Darius Miksys, Rimantas Grigonis, Valdas Sirutkaitis, Marco Jupé and Detlev Ristau. *Comparative studies of laser-induced damage threshold measurements in highly reflecting mirrors*, Proc. of SPIE **6720**, p.672012 - 672018, (2007)
- [A19] G. Abromavicius, R. Buzelis, R. Drazdys, **A. Melninkaitis** and V. Sirutkaitis. *Influence of electric field distribution on laser induced damage threshold and morphology of high reflectance optical coatings*, Proc. of SPIE **6720**, p.67200Y - 8, (2007)
- [A20] M. Jupé, M. Lappschies, L. Jensen, K. Starke, D. Ristau, **A. Melninkaitis**, V. Sirutkaitis, I. Cravetchi and W. Rudolph. *Mixed oxide coatings for advanced fs-laser applications*, Proc. of SPIE **6720**, p.67200U - 672013, (2007)
- [A21] **A. Melninkaitis**, J. Mirauskas, M. Jupé, D. Ristau, J. W. Arenberg and V. Sirutkaitis. *The effect of pseudo-accumulation in the measurement of fatigue laser-induced damage threshold*, Proc. of SPIE **7132**, p. 713203, (2008)
- [A22] J.Pilipavičius, I. Kazadojev, A. Beganskiene, A. Melninkaitis, V.Sirutkaitis, A. Kareiva. *Hydrophobic Antireflective Silica Coatings via Sol-gel Process*, Material science (Medžiagotyra), **14** (4), 283-287, (2008)

Kiti straipsniai

- [A23] Ona Balachninaite, M. Barkauskas, Robert C. Eckardt, Rimantas Grigonis, M. Maciulevicius, **A. Melninkaitis** and Valdas Sirutkaitis. *Absorptance measurement of nonlinear crystals by calorimetric method at 1064 and 532 nm*, Proc. of SPIE **4751**, p.291 - 296, (2002)
- [A24] Martynas Barkauskas, **Andrius Melninkaitis**, Modestas Sinkevicius, Arunas Ciburyš, Roaldas Gadonas, Valdas Sirutkaitis, Herve Bercegol and Laurent Lamaignere. *Linear and nonlinear absorption and defects formation in KDP crystals used for large aperture doublers and triplers*, Proc. of SPIE **5949**, p.59491T - 9, (2005)
- [A25] **Andrius Melninkaitis**, Modestas Sinkevicius, Tadas Lipinskas, Nerijus Slavinskis, Valdas Sirutkaitis, Herve Bercegol and Laurent Lamaignere *Characterization of the KDP crystals used in large-aperture doublers and triplers*, Proc. of SPIE **5647**, p.298 - 305, (2005)
- [A26] Martynas Barkauskas, **Andrius Melninkaitis**, Darius Miksys, Loreta Meslinaite, Rimantas Grigonis, Valdas Sirutkaitis, Herve Bercegol and Laurent Lamaignere. *Characterization of KDP crystals used in large aperture doublers and triplers*, Proc. of SPIE **6403**, p.64031V - 10, (2006)
- [A27] T. Balciunas, **A. Melninkaitis**, G. Tamosauskas and V. Sirutkaitis. *Time-resolved off-axis digital holography for characterization of ultrafast phenomena in water*, Optics Letters **33**, p.58 - 60, (2008)

[A28] **Andrius Melninkaitis**, Valdemaras Juzumas, Tadas Balciunas, Valdas Sirutkaitis, Julius Janušonis, Gintas Šlekys. *Formation of grooves in SiO₂ coated silicon using femtosecond Ytterbium DPSS laser*, Proc. of SPIE **7005**, p. 70050L, (2008)

Pranešimai konferencijose, kurie tiesiogiai susiję su disertacijos tema

[C1] **A. Melninkaitis**, *Real-Time Detection of Laser-Induced Damage in Dielectric Optics*. ICPS 2003, Conference Handbook, – Odense, Denmark. 44 p. 2003

[C2] Valdas Sirutkaitis, Robert C. Eckardt, Ona Balachninaite, Rimantas Grigonis, **A. Melninkaitis**, and T. Rakickas, *Optical characterization in wide spectral range by a coherent spectrophotometer*, “Advanced characterization techniques for optics, semiconductors and nanotechnologies”, 3 – 5 August, San Diego, California USA, 2003

[C3] O. Balachninaite, M. Maciulevičius, **A. Melninkaitis**, R. Grigonis, V. Sirutkaitis, R. Eckardt. *A coherent spectrophotometer based on a periodically poled lithium niobate optical parametric oscillator for optical characterization*, “Optical parametric processes and periodical structures: international workshop”, p. 71-73., Vilnius, Lithuania, September 26-29, 2004

[C4] **Melninkaitis A.**, Mikšys D., Šinkevičius M., Maciulevičius M., Grigonis R., Sirutkaitis V. *Optinių lazerinių elementų parametrų standartizuoti matavimai*, Konferencija “Techninių sistemų diagnostavimas, neardomieji fizikiniai kokybės kontrolės ir skaitiniai metodai - 2004” Vilnius, Lithuania, 2004

[C5] Mikšys D., **Melninkaitis A.**, Grigonis R., *Lasero indukuoto pažeidimo slenksčio matavimo sistema*, Konferencija “Techninių sistemų diagnostavimas, neardomieji fizikiniai kokybės kontrolės ir skaitiniai metodai - 2004”, Vilnius, Lithuania, 2004

[C6] D. Mikšys, **A. Melninkaitis**, *Lasериu indukuotieji pažeidimai optinėse dangose*, Konferencijos “Laisvieji skaitymai 2004” pranešimų tezės. 77 p. Vilnius, Lithuania, 2004

[C7] **Andrius Melninkaitis**, Tomas Rakickas, Darius Miksys, Rimantas Grigonis, Valdas Sirutkaitis, Alfridas Skrebutenas, Rytis Buzelis, Ramutis Drazdys, Giedrius Abromavicius, Remigijus Juskenas, Algirdas Selskis, *Effect of deposition method and substrate surface quality on laser-induced damage threshold for repetitive 13-ns and 130-fs pulses*, Boulder Damage Symposium XXXVI, National Institute of Standards and Technology, Boulder, Colorado, USA, 20–22 September, 2005

[C8] Marco Jupé, L. Jensen, Kai Starke, Detlev Ristau, **Andrius Melninkaitis**, Rimantas Grigonis, Valdas Sirutkaitis, *Quantized behavior of fs-LIDT in dielectric layers*, Boulder Damage Symposium XXXVI, National Institute of Standards and Technology, Boulder, Colorado, USA, 20–22 September, 2005

[C9] **A. Melninkaitis**, M. Maciulevičius, T. Rakickas, D. Miksys, R. Grigonis, V. Sirutkaitis, A. Skrebutenas, R. Buzelis, R. Drazdys, G. Abromavicius, R. Juskenas, A. Selskis, *Comparison optical resistance of ion-assisted deposition and standard electron-beam deposition methods for high-reflectance dielectric coatings*, “Optical Systems Design 2005”, Friedrich-Schiller-Universitaet, Jena, Germany, 12-16 September, 2005

[C10] **A. Melninkaitis**, D. Miksys, R. Grigonis, V. Sirutkaitis, D. Tumosa, G. Skokov, D. Kuzma, *Multiple pulse laser-induced damage of AR-coated lithium borate*, “Optical Systems Design 2005, Friedrich-Schiller-Universitaet, Jena, Germany, 12-16 September, 2005

- [C11] M. Jupé, L. S. Jensen, K. Starke, D. Ristau, **A. Melninkaitis**, V. Sirutkaitis, *High-resolution video-based inspection method for LIDT investigations of thin-disc laser crystals*, “Optical Systems Design 2005”, Friedrich-Schiller-Universitaet, Jena, Germany, 12-16 September, 2005
- [C12] A. Zukauskas, **A. Melninkaitis**, V. Sirutkaitis, K. Starke, D. Ristau, *Nonlinear absorption of ultrashort pulses in HR dielectric mirrors*, Boulder Damage Symposium XXXVII, National Institute of Standards and Technology, Boulder, Colorado, USA, 19–21 September, 2005
- [C13] **A. Melninkaitis**, D. Mikšys, T. Balciunas, V. Sirutkaitis, A. Skrebutenas, R. Buzelis, G. Abromavicius, R. Drazdys, *Effect of substrate temperature and ion assistance on nanosecond laser induced damage threshold in high reflection dielectric coatings*, Boulder Damage Symposium XXXVII, National Institute of Standards and Technology, Boulder, Colorado, USA, 19–21 September, 2005
- [C14] **A. Melninkaitis**, D. Mikšys, R. Grigonis, V. Sirutkaitis, D. Tumosa, G. Skokov, D. Kuzma, *Laser-induced damage thresholds of ion beam sputtered and magnetron sputtered AR-coatings on lithium borate*, Boulder Damage Symposium XXXVII, National Institute of Standards and Technology, Boulder, Colorado, USA, 19–21 September, 2005
- [C15] R. Buzelis, G. Abromavicius, R. Drazdys, R. Grigonis, **A. Melninkaitis**, D. Mikšys, V. Sirutkaitis, A. Skrebutenas, R. Juskenas, A. Selskis, *Influence of ion-assisted deposition on laser-induced damage threshold and microstructure of optical coatings*, Boulder Damage Symposium XXXVII, National Institute of Standards and Technology, Boulder, Colorado, USA, 19–21 September, 2005
- [C16] D. Mikšys, **A. Melninkaitis**, *Lazeriu indukuotų pažeidimo slenksčių tyrimai termiškai padengtose ir papildomai sutankintose jonų srautu dielektrinėse dangose*, “Laisvieji skaitymai 2005”, Vilnius, Lithuania, April 22 d., 2005
- [C17] D. Mikšys, **A. Melninkaitis**, *Effect of deposition method on optical Resistance for Repetitive Laser Pulses*, “Advanced materials and technologies”, Palanga, Lithuania, 27 – 31 August, 2005
- [C18] T. Balčiūnas, **A. Melninkaitis**, M. Jupé, *Laser-induced damage detection method of Digital video microscopy*, “Advanced materials and technologies“, Palanga, Lithuania, 27 – 31 August, 2005
- [C19] **A. Melninkaitis**, D. Mikšys, T. Balciunas, O. Balachninaite, T. Rakickas, R. Grigonis, and V. Sirutkaitis, *Automated test station for laser-induced damage threshold measurements according ISO 11254-2 standard*, 8th International Workshop on Laser Beam and Optics Characterization, 6101B-34 at the San Jose Convention Center, in San Jose, California, USA, 21–26 January, 2006
- [C20] **Andrius Melninkaitis**, Darius Mikšys, Tadas Balčiūnas, Valdas Sirutkaitis, *Automated test station for laser-induced damage threshold measurements of novel laser optics*, XII Conference on Laser Optics 2006, III International Conference for Young Scientists on Laser Optics (LOYS), St. Petersburg, Russia, June 26-30, ThS7-04, 2006
- [C21] **A. Melninkaitis**, D. Mikšys, V. Sirutkaitis, G. Abromavičius, R. Buzelis, R. Drazdys, *Laser induced damage threshold measurements of high reflecting dielectric layers*, P2-10, 5th International Conference “ADVANCED OPTICAL MATERIALS AND DEVICES - AOMD5” Vilnius, Lithuania, 27-30 August, 2006
- [C22] G. Abromavičius, R. Buzelis, R. Drazdys, D. Perednis, **A. Melninkaitis**, V. Sirutkaitis, A. Skrebutėnas, *Improvement of optical properties and radiation resistance of optical coatings based on Nb₂O₅ and Ta₂O₅*, P2-22, 5th International Conference “ADVANCED OPTICAL MATERIALS AND DEVICES - AOMD5” Vilnius, Lithuania, 27-30 August, 2006

- [C23] M. Jupé, L. Jensen, K. Starke, D. Ristau, **A. Melninkaitis**, V. Sirutkaitis, *Mixed oxide coatings for advanced fs-laser applications*, Boulder Damage Symposium XXXIX, National Institute of Standards and Technology, Boulder, Colorado, USA, 6720-32, 24–27 September, 2007
- [C24] R. Buzelis, G. Abromavicius, R. Drazdys, **A. Melninkaitis**, V. Sirutkaitis, *Influence of electric-field distribution on laser-induced damage threshold and morphology of high-reflectance optical coatings*, 6720-36, Boulder Damage Symposium XXXIX, National Institute of Standards and Technology, Boulder, Colorado, USA, 24–27 September, 2007
- [C25] **A. Melninkaitis**, D. Mikšys, R. Grigonis, M. Jupé, D. Ristau, V. Sirutkaitis, *Comparative studies of laser-induced damage threshold measurements in highly reflecting mirrors*, 6720-45, Boulder Damage Symposium XXXIX, National Institute of Standards and Technology, Boulder, Colorado, USA, 24–27 September, 2007
- [C26] J. Mirauskas, G. Batavičiūtė, **A. Melninkaitis**, *Lažeriu-indukuotojo pažeidimo slenkščio pseudo-akumuliacinis efektas optinėse dangose su nanodefektais*, S-24, Laisvieji Skaitymai 2008, Vilnius, Lithuania, 4 April, 2008 (*Geriausias stendinis pranešimas*)
- [C27] **A. Melninkaitis**, J. Mirauskas, M. Jupé, D. Ristau, J. W. Arenberg, V. Sirutkaitis *The effect of pseudo-accumulation in the measurement of fatigue laser-induced damage threshold*, 7132-2, Boulder Damage Symposium XL, National Institute of Standards and Technology, Boulder, Colorado, USA, 22-24 September, 2008

Kiti pranešimai

- [C28] O. Balachninaite, M. Barkauskas, M. Maciulevičius, **A. Melninkaitis**, G. Šlekys, R. Grigonis, V. Sirutkaitis, *Didelio tikslumo sugerties matavimai netiesiniuose optiniuose kristaluose*, Lietuvos nacionalinė fizikos konferencija 34, Vilnius, Lithuania, 14-16 June, 2001
- [C29] O. Balachninaite, M. Barkauskas, R. Grigonis, M. Maciulevičius, **A. Melninkaitis**, Sirutkaitis V., Eckardt R.C., *Calorimetric absorptance measurements of nonlinear crystals*, In Abstracts 6th International Workshop on Laser Beam and Optics Characterization (WLT/IFSW-Conference “LBOC6”, Sub conference of “Lasers in Manufacturing”, edited by WLT-German Scientific Laser Society, p. 62-64, Munich, Germany 18-22 June, 2001
- [C30] O. Balachninaite, M. Barkauskas, R. Grigonis, M. Maciulevičius, **A. Melninkaitis**, V. Sirutkaitis, *Absorptance measurements of nonlinear crystals by calorimetric method* P. 247 (FP13), In Technical Digest of XVII International Conference on Coherent and Nonlinear Optics (ICONO 2001, Minsk, Belarus, June 26-July 1, 2001), Published by B.I. Stepanov Institute of Physics, NASB, Minsk, 2001.
- [C31] M. Barkauskas, **A. Melninkaitis**, M. Maciulevičius *Didelio Tikslumo Sugerties Matavimai Lažeriniuose Optiniuose Elementuose*, Conference “Laisvieji skaitymai“, Vilnius, Lithuania, 2001
- [C32] **Melninkaitis A.**, Barkauskas M., Sirutkaitis V., *Netiesinių kristalų sugerties matavimai 532 nm ir 1064 nm bangos ilgių ruožuose*, Conference “Metrologija ir matavimai”, Kaunas, 22-23 April, 2002 .
- [C33] V. Kudriašov, E. Gaižauskas, M. Staponkus, V. Sirutkaitis, **A. Melninkaitis**, *Investigation of self-trapped propagation of femtosecond pulses in fused silica*, Solid-state and fiber coherent light sources: EPS-QEOD Europhoton conference, Lausanne, Switzerland, 29 August - 3 September, 2004
- [C34] M. Jupé, L. Jensen, D. Ristau, **A. Melninkaitis**, M. Šinkevičius, V. Sirutkaitis. *Wavelength dependent high resolution calorimetric measurement - using an OPO system*, p. 99-100, Optical parametric

processes and periodical structures: international workshop, Vilnius, Lithuania, 26-29 September, 2004

[C35] L. Jensen, M. Jupé, D. Ristau, **A. Melninkaitis**, M. Šinkevičius, V. Sirutkaitis, *Wavelength dependent high resolution calorimetric measurement - using an OPO system*, XVI Lithuanian – Belarusian seminar “Lasers and optical nonlinearity” 27 – 29 October, Vilnius, 2004

[C36] M. Šinkevičius, **A. Melninkaitis**, *Optinių komponentų sugerties matavimai*, Conference “Laisvieji skaitymai 2004”, 80 p. Vilnius, Lithuania, 2004

[C37] **Andrius Melninkaitis**, Modestas Sinkevicius, Tadas Lipinskas, Nerijus Slavinskis, Valdas Sirutkaitis, Herve Bercegol, Laurent Lamaignere, *Characterization of the KDP crystals used in large-aperture doublers and triplers*, Boulder Damage Symposium XXXVI, National Institute of Standards and Technology, Boulder, Colorado, USA, 20–22 September, 2005

[C38] T. Balčiūnas, **A. Melninkaitis**, *Skaitmeninė video mikroskopija: lazeriu indukuotų pažeidimų detekcija*, “Laisvieji skaitymai 2005”, Vilnius, Lithuania, 22 April, 2005

[C39] M. Šinkevičius, **A. Melninkaitis**, *Greitojo auginimo KDP kristalų sugerties matavimai*, “Laisvieji skaitymai 2005”, Vilnius, Lithuania, 22 April, 2005

[C40] **Melninkaitis A.**, Balčiūnas T., *Digital holographic microscope application for quantitative phase-contrast imaging*, WeS7-P03, XII Conference on Laser Optics 2006 and III International Conference for Young Scientists on Laser Optics (LOYS), St. Petersburg, 26-30 June, 2006

[C41] **Andrius Melninkaitis**, Valdemaras Juzumas, Tadas Balciunas, Valdas Sirutkaitis, Julius Janušonis, Gintas Šlekys, *Formation of grooves in SiO₂ coated silicon using femtosecond Ytterbium DPSS laser*, 7005-21, High-Power Laser Ablation 2008, Taos, New Mexico USA, 20–24 April, 2008

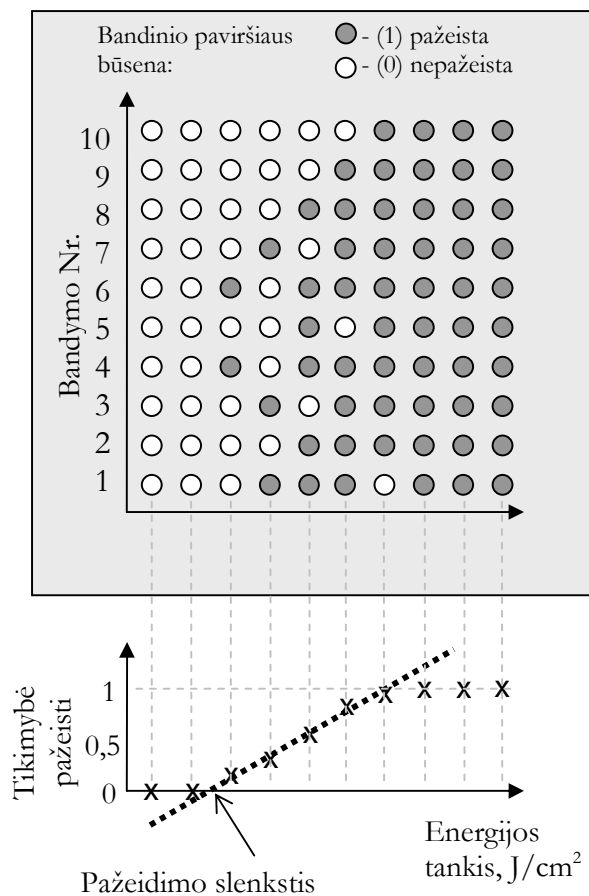
1. Literatūros apžvalga ir darbo metodika

Straipsniais [A1–A22] publikuojama tiek pati matavimų sistema, kuri aptariama žemiau, tiek ir naudojantis ja gauti eksperimentiniai rezultatai, kurie skelbti ir konferencijų pranešimuose [C1–C27].

Skyriai, kurie apima pirmąją dalį, yra sudaryti iš dviejų poskyrių. Pirmame aprašomi fundamentalieji dielektrinių dangų veikimo principai, medžiagos ir pagrindinės jų dengimo technologijos bei garinimo defektai. Antrajame aptariama darbe naudojama optinio atsparumo testavimo metodika ir sukurtoji eksperimentinė aparatūra su programine įranga, apibrėžiamos lazeriu indukuoto pažeidimo bei jo slenksčio sąvokos. Taigi šiame darbe naudojama optinio pažeidimo sąvoka yra apibrėžiama ISO 11254-1 ir -2 standartuose [4, 5]:

optinis pažeidimas – bet koks lazerio spinduliuote sukeltas liekamas optinio paviršiaus savybių pokytis, kuris gali būti stebimas Nomarski tipo interferencinio kontrasto mikroskopu, kai objektyvo didinimas ne mažesnis negu 100x.

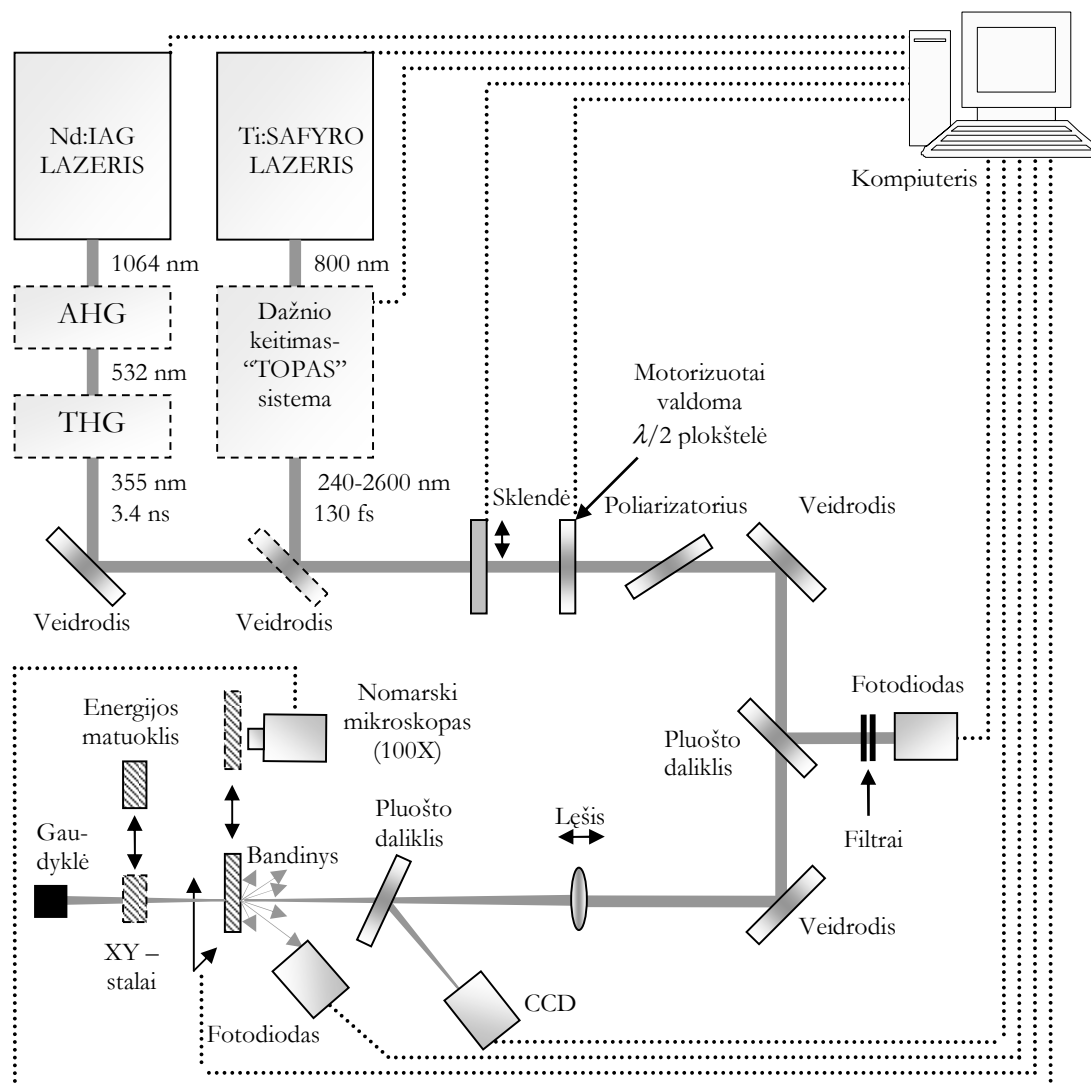
Bendru atveju šis apibrėžimas nėra absoliutus, nes optinio mikroskopo skyra yra ribota ir juo negalima išskirti mažesnių negu ~100 nm [6, 7] pažeidimų. Tačiau nepaisant šio apribojimo toks pažeidimo apibrėžimas yra gana paprastas ir greitas, todėl pakankamas daugybei optinio



1.1 pav. Santykinio pažeidimų dažnio metodas: slenkščio nustatymas iš eksperimentinių duomenų.

tankio skalėje: vertės, kurios nelygios 0 ir 1 ekstrapoliuojamos tiese. Energijos tankį, kur tiesė kertasi su 0 tikimybės lygiu, vadiname *pažeidimo slenkščiu*. Jei kiekviena paviršiaus vieta eksponuojama viso labo vienu lazeriniu impulsu, pažeidimo slenkstis vadinamas 1-į-1 slenkščiu. Jeigu kiekviena testuojama vieta eksponuojama skaičiumi S identišku pasikartojančių impulsų dozėmis, tai eksperimentiškai nustatytas pažeidimo slenkstis vadinamas S -į-1 slenkščiu. Šiame darbe daugiausiai buvo tiriama S -į-1 pažeidimo slenkščiai. Šiems tyrimams specialiai buvo sukurta originali testavimo įranga, kuri atitinka ISO standartus ir leidžia automatizuotai nustatyti S -į-1 pažeidimo slenkščį. Sukurtosios testavimo stoties optinė schema pateikta 1.2 paveiksle. Šiai stotčiai valdyti LabView™ aplinkoje buvo sukurta originali programinė įranga, kuria galima kontroliuoti visą S -į-1 eksperimento eigą. Tuo buvo siekiama sumažinti neobjektyvumo ir žmogiškojo faktoriaus įtaką pažeidimo slenkščio matavimuose, taip pat pagreitinti matavimų eigą. Matavimų programa galima automatizuotai kontroliuoti lazerio energijos parametrus: impulsų energijos tankį, impulsų kiekį. Išsklaidytosios šviesos pokyčio detektoriumi automatiškai buvo registruojamas pažeidimo faktas, po kurio mechanine sklende blokuojama krintanti į bandinį spinduliuotė.

atsparumo uždavinių spresti. Taigi pagal ISO 11254-1 ir -2 standartuose nurodytą procedūrą, pažeidimo slenkščiu nustatyti naudojamas statistinis santykinio pažeidimo dažnio (pažeidimo tikimybės) metodas [4, 5, 8, 9]. Šio metodo esmė yra tokia: tegul turime bandinį, kuriam reikia nustatyti pažeidimo slenkščį. Sudalykime jo paviršių, pvz., į 10 x 10 vietų, kurios viena nuo kitos yra nutolusios ne mažiau kaip $3 \cdot d$ atstumu, čia d – yra lazerio pluošto diametras $1/e^2$ maksimalaus intensyvumo lygyje. Kaip parodyta 1.1 paveikslėlyje, pirmąjį stulpelį eksponuojame lazerio spinduliuote mažiausiai 10 kartų: kas kartą vis kitoje vietoje tomis pačiomis sąlygomis (su tuo pačiu impulsų energijos tankiu). Pažeidimų kūrimasis dėl spinduliuotės poveikio yra sąlygojamas atsitiktinių veiksnių, todėl identiškomis ekspozicijos sąlygomis veikiant paviršių, kai kurios vietos pažeidžiamos, o kai kurios ne. Atlikus seriją bandymų, apskaičiuojama pažeidimo tikimybė: pažeistų vietų skaičius stulpelyje dalijamas iš bendro stulpelyje esančių vietų skaičiaus. Pakeitus lazerinių impulsų energijos tankį, procedūra pakartojama kitame stulpelyje. Galiausiai pažeidimo tikimybės atidedamos energijos



1.2. pav. 5-į-1 pažeidimo slenkščio testavimo stoties principinė schema.

2. Pseudoakumuliacinis reiškiny: teorija ir eksperimentas

Šiame skyriuje pateikta medžiaga buvo publikuota straipsnyje [A21] ir konferencijų pranešimuose [C26, C27].

Norint eksperimentiškai nustatyti tiriamosios dangos optinį atsparumą – pažeidimo slenkštį, neišvengiamai daug kartų tenka optiškai pažeisti testuojamąją dangą (siekiant surinkti statistinius duomenis). Taigi dangų atsparumo testavimui naudojama intensyvi pasikartojanti lazerinė spinduliuotė, kurios energija, kryptis, diametras ir trukmė bendru atveju atsikartoja tik iš dalies (su tam tikra atsikartojimo tikimybe). Šiuo metu egzistuojančiuose pažeidimo testavimo standartuose [4, 5] yra nurodytos maksimalios leistinos spinduliuotės parametrų neapibrėžties verčių ribos, t.y. reikalavimai testuojančiosios spinduliuotės nuostovumui. Deja iki šiol nebuvo

tiksliai žinoma, kokią įtaką šių parametru sklaida turi galutiniam matavimo rezultatui – pažeidimo tikimybei, o kartu ir išmatuotajam pažeidimo slenksčiui (ypač S_{i-1} atveju) bei jo atsikartojamumui. Šiame disertacijos skyriuje tiek analiziškai, tiek statistiškai *Monte Carlo* metodu yra nagrinėjamas metrologinis uždavinys, kai optinio atsparumo testavimui naudojama nestabili lazerinė spinduliuotė. Kartu pateikiami ir eksperimentiniai duomenys, iliustruojantys gautuosius rezultatus.

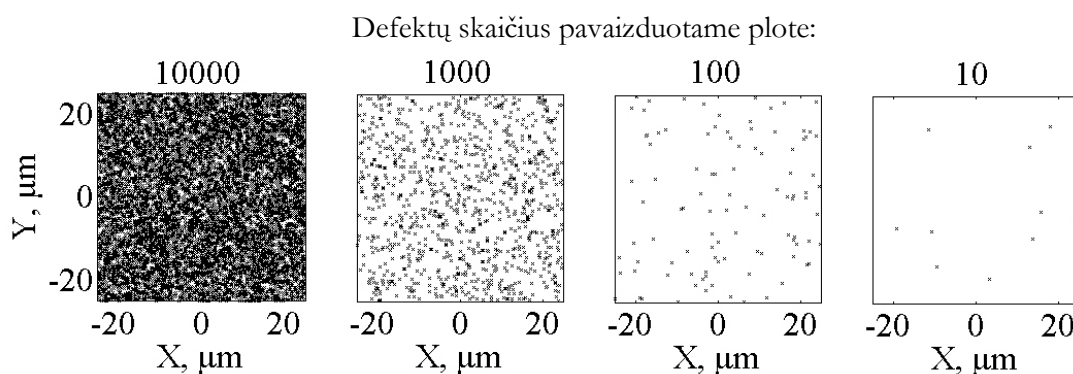
Lazerinės metrologijos bendruomenėje yra gerai žinoma: medžiagos yra daug atsparesnės vienkartei lazerinei ekspozicijai ($1-i-1$ atvejis) nei pasikartojantiems impulsams (S_{i-1} atvejis). Paprastai kalbant, kartojant lazerinę ekspoziciją (t.y. šviečiant į tą pačią medžiagos paviršiaus sritį vėl ir vėl), po kurio laiko stebimi pažeidimai, kurių nestebime, jeigu ekspozicija nutraukiama po vieno lazerinio impulso. Tokiu atveju sakoma, kad S_{i-1} pažeidimo slenkstis yra žemesnis už $1-i-1$ slenkstį. Taigi optinio pažeidimo slenksčio „žemėjimas“ priklausomai nuo pasikartojančių impulsų skaičiaus yra įdomus moksliniu, o jo išmatavimas svarbus praktiniu požiūriu. Šis reiškinys dažnai vadinamas akumuliaciniu, o kartais inkubaciniu reiškiniu. Iki šiol yra žinomos dvi tokio reiškinio priežastys:

Lokalioji šilumos akumuliacija, t.y. kiekvieno lazerinio impulso energija iš dalies sugerama medžiagoje ir vėliau virsta šiluma. Jei medžiaga nespėja atvėsti iki tol, kol tą pačią vietą pasiekia kitas lazerio impulsas, tai šiluma kaupiasi. Kiekvienas lazerinis impulsas jau įkaitusią medžiagą dar labiau įkaitina, kol galiausiai pasiekiamą lydymosi temperatūra ir įvyksta vadinamasis terminis pažeidimas.

Defektų inkubacija – tai kaupiamasis medžiagos cheminės struktūros pakitimas dėl lazerinės spinduliuotės poveikio. Jis pasireiškia naujų gardelės defektų ir eksitonų kūrimusi, o šie atitinkamai gali sugerti vis daugiau šviesos, t.y. padidinti sugerties koeficientą.

Taigi, veikiant pasikartojančia lazerine spinduliuote, dėl abiejų minėtų reiškinių lazerinio komponento pažeidimas gali būti stebimas po daugiau negu vieno impulso ekspozicijos, t.y. net ir tuo atveju, kai lazerio impulsų energetiniai parametrai visiškai atsikartoja. Taigi, kai optinio testavimo eksperimentuose stebimas pažeidimas, po daugiau negu vienos ekspozicijos dažniausiai daroma nebūtinai teisinga išvada, kad bandiniams būdinga šilumos akumuliacija arba defektų inkubacija. Šiame skyriuje gauti rezultatai atskleidžia dar vieną atvejį, kai greta tikrosios akumuliacijos ar inkubacijos gali būti stebimas dar vienas labai panašus reiškinys. Parodysime, kad jo kilmė – lazerinės spinduliuotės nenuostovumo pasekmė, todėl šis reiškinys vadinamas pseudoakumuliaciniu reiškiniu. Nežinant šio reiškinio, galima lengvai suklysti interpretuojant eksperimentinius pažeidimo testavimo rezultatus ir nustatant pažeidimo prigimtį. Taip pat norima atkreipti dėmesį į tai, kad pseudoakumuliacija gali būti stebima greta su kitais akumuliacijos mechanizmais, todėl yra sunkiai nuo jų atskiriama. Siekiant pademonstruoti pseudoakumuliacinio efekto įtaką optinio atsparumo matavimams, buvo atliktas šis reiškinį iliustruojantis eksperimentas, jo kompiuterinis modeliavimas, taip pat išvestos ribinės (blogiausio atvejo) pažeidimo tikimybės formulės, įskaitančios statistinės akumuliacijos poveikį. Norėdami pademonstruoti tik statistinio pseudoakumuliacinio efekto įtaką matavimams, tarkime, kad tiriamuoju atveju nėra „tikrųjų“ akumuliacinių reiškinių. Visi aprašyti atvejai toliau modeliuojami remiantis fenomenologiniu *Porteus* ir *Seitel* pažeidimo modeliu [10], t.y. pažeidimas medžiagoje įvyksta dėl šviesą sugeriančių defektų, kurių kiekis ir padėtis erdvėje laikui bėgant nesikeičia. Esminiai šio modelio elementai yra tokie:

- nanodefektai yra atsitiktinai išsidėstę bandinio paviršiuje, o jų matmenys – nykstamai maži, palyginti su skersiniu lazerinio pluošto intensyvumo skirstinio diametru $1/e^2$ smailinio intensyvumo lygyje;
- optinis pažeidimas įvyksta, kai defektas yra eksponuojamas elektromagnetiniu lauku, kurio lokalus energijos tankis lygus arba didesnis negu defekto pažeidimo slenkstis T_{defect} ;
- paviršius visiškai atvėsta iki tol, kol jį pasiekia sekantis lazerinis impulsas (nėra jokių šilumos kaupimosi efektų tarp impulsų);
- apšvietus medžiagą, nesukuriami jokie papildomi defektai dėl lazerinės spinduliuotės poveikio (nėra defektų inkubacijos reiškinio).



2.1 pav. Kompiuterinė vizualizacija: atsitiktinai išsidėstę paviršiniai defektai.

Submikroninių matmenų defektai ir jų tankis optinių komponentų dangose yra įvairių jų gamybos technologinių procesų pasekmė [11, 12]. Būtent defektai dažniausiai riboja optinių dangų atsparumą lazerinei spinduliuotei: jie efektyviau sugeria [13] lazerinę spinduliuotę, todėl jų pažeidimo slenkstis yra žemesnis negu aplinkui esančios medžiagos. Pagrindinės šių defektų rūšys ir kilmė yra detaliau aprašytos disertacijos tekste. Jų egzistavimą galima nustatyti įvairiais eksperimentiniais metodais, pavyzdžiui: fluorescencine spektroskopija [14], koherentine optine tomografija [15], lazerio pažeidimo morfologijos analize [16], taip pat rastriniais plėtimosi dėl sugerties metodais [17-20]. Tačiau visų išvardytų metodų skyra yra apribota zonduojančios spinduliuotės bangos ilgiu. Taigi lazerinės spinduliuotės sugertis defektuose pradeda patį slenkstinį pažeidimo procesą: pirmiausia defektuose sugeneruojami laisvieji elektronai, tada jonizuojama aplinkui esanti medžiaga, kuri plečiasi išsiskiriant šilumai kartu sukeldama slėgio bangas. Visi šie efektai sąlygoja mechaninius dangos pažeidimus.

Bendruoju atveju defektai gali būti skirtingi ir turėti nevienodus pažeidimo slenkščius. Tada defektų populiacija aprašoma ansambline funkcija $f(I)$, kuri, padauginta iš mažo energijos tankio pokyčio dI , nusako vidutinį skaičių defektų pažeidžiamam ploto vienetui tarp I ir $I + dI$. Pats paprasčiausias defektų ansamblio atvejis – išsigimęs ansamblis, kai visi defektai turi tą patį pažeidimo slenkstį – T_{defect} . Toks defektų ansamblis matematiškai yra aprašomas (2.1) delta funkcija, kai argumentas yra energijos tankis $I = T_{\text{defect}}$. Tariama, kad visi defektai yra pasiskirstę paviršiuje tolygiai (2.1 pav.):

$$f_{\text{degenerate}}(I) = M\delta(I - T_{\text{defect}}); \quad (2.1)$$

čia M yra normuojanti konstanta, atitinkanti paviršinių defektų tankį (pločio vienetui). Šis defektų ansamblio modelis tinka daugeliui tiriamųjų bandinių, todėl naudojamas šiame skyriuje atliktuose kompiuteriniuose modeliavimuose. Paminėtina ir tai, jog egzistuoja ir kiti labiau sudėtingi (neišsigimę) defektų ansamblių modeliai, pavyzdžiui, laipsninis modelis [10] arba Gauso modelis [16]. Tačiau jie nekeičia pseudoakumuliacinio reiškimo esmės, todėl čia detaliau nenagrinėjami. Kitas svarbus defektus apibūdinantis parametras yra vidutinis atstumas tarp dviejų greta esančių defektų $d(M)$. Žinant defektų paviršinių tankį, grubiai galima įvertinti šio parametro reikšmę. Tarus, kad defektai išsidėstę kvadratinės paviršinės gardelės mazguose vienodais atstumais vienas nuo kito, galima užrašyti formulę

$$d(M) = \sqrt{\frac{1}{M}}. \quad (2.2)$$

Pažeidimo tikimybė ir jos matavimo metodika detaliau aptartos pačioje disertacijoje. Patį paprasčiausią modelį siejantį 1-į-1 pažeidimo tikimybę, defektų tankį ir lazerinio impulso energijos tankį, aštuntajame dešimtmetyje pasiūlė J.O. Porteus ir S.C. Seitel [10]. Autoriai pademonstravo, kad esant fiksuotam pluošto diametrai vidutiniškai į apšviestą zoną patenkančių išsigimusių defektų skaičiui galioja Puasono statistika. Pasinaudoję šia prielaida, autoriai gavo pažeidimo tikimybės (santykinio pažeidimo dažnio) funkcijos išraišką. Būtent ši *Porteus* ir *Seitel* tikimybės formulė dažniausiai naudojama eksperimentinių duomenų ekstrapoliavimui. Tarkime, kad turime bandinį, kurio paviršiuje atsitiktinai išsidėstę šviesą sugeriantys nanodefektai, o jų optinis atsparumas aprašomas išsigimusiuoju ansambliu. Eksponuojame šį bandinį Gauso skirstinį atitinkančiu lazerio pluoštu (2.2 pav.):

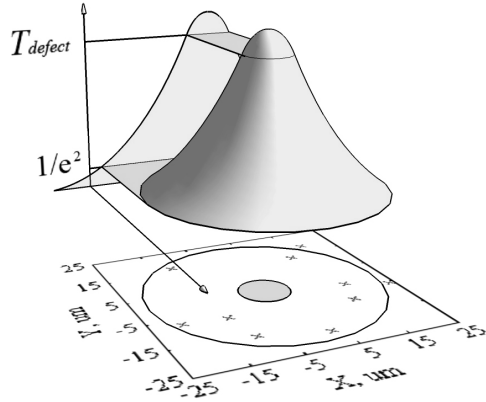
$$I(r) = I_0 \exp\left(-\frac{2r^2}{w^2}\right); \quad (2.3)$$

čia I_0 yra maksimalus lazerinio impulso energijos tankis, r – spindulys (cilindrinėje koordinačių sistemoje), w – pluošto diametras I_0/e^2 lygyje.

Taigi pasinaudoję (2.3) formule galime nustatyti, koks yra zonos, kur pluošto intensyvumas

viršija T_{defect} vertę, spindulys $r_a = w\sqrt{\frac{1}{2} \ln\left(\frac{I_0}{T_{\text{defect}}}\right)}$ ir plotas [21]:

$$a(I_0, w, T_{\text{defect}}) = 0,5 \cdot \pi w^2 \ln\left(\frac{I_0}{T_{\text{defect}}}\right) \quad (2.4)$$



2.2 pav. Paviršiaus su atsitiktinai išsidėsčiusiais defektais eksponavimas Gauso pluoštu (TEM₀₀ moda). Išorinis apskritimas atitinka Gauso pluošto radiusą w intensyvumo $I_0 \cdot (1/e^2)$ lygyje; pilnaviduris apskritimas centre vaizduoja plotą, viršijantį defektų pažeidimo slenkstį T_{defect} .

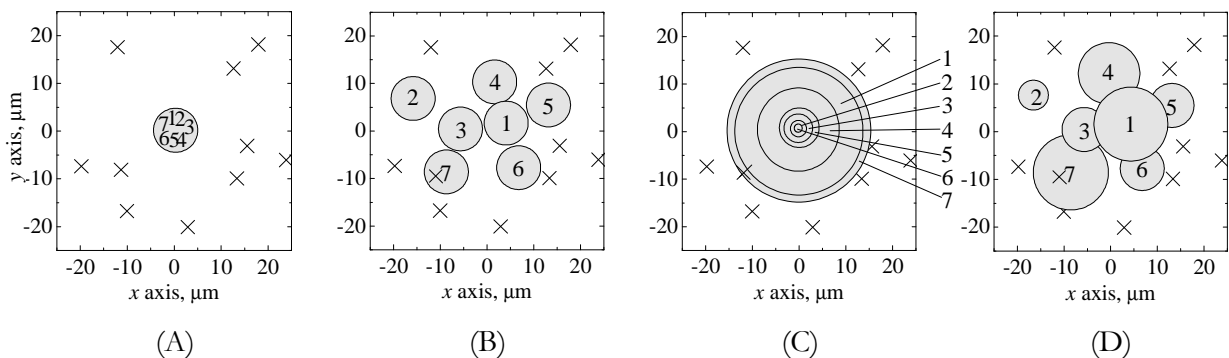
Didinant impulso energijos tankį, plotas $a(I_0, w, T_{\text{defect}})$ didėja kartu su juo didėja vidutinis tenkantis šiam plotui defektų skaičius n . Vadovaujantis *Porteus* ir *Seitel* modeliu, tikimybė $P(I_0)$ pažeisti paviršių (vadinamasis santykinis (statistinis) pažeidimo dažnis) eksponuojant vienu Gauso intensyvumo skirstinį atitinkančiu impulsu yra išvedama iš Puasono statistikos:

$$P = \begin{cases} 0, & I_0 < T_{\text{defect}} \\ 1 - \exp(-n), & I_0 \geq T_{\text{defect}} \end{cases} \quad (2.5)$$

čia

$$n = a(I_0, w, T_{\text{defect}}) \cdot M \quad (2.6)$$

yra vidutinis skaičius defektų, kurie yra pažeidžiami lazeriu apšviestame plote a . Tikimybė 1-į-1 (2.5) formulėje apibrėžia aukščiausią įmanomą bandinio pažeidimo slenkstį – aukščiausią energijos tankio ribą, kur pažeidimo tikimybė yra lygi nuliui. Jei bandinį veikia bent vienas iš akumuliacinių mechanizmų pažeidimo tikimybė, papildomai eksponuojant gali tik didėti, atitinkamai pažeidimo slenkstis – mažėti (akumuliacija arba inkubacija). Jei nėra akumuliacijos S -į-1, pažeidimo tikimybė sutampa su 1-į-1 atveju išvesta (2.5) formule.



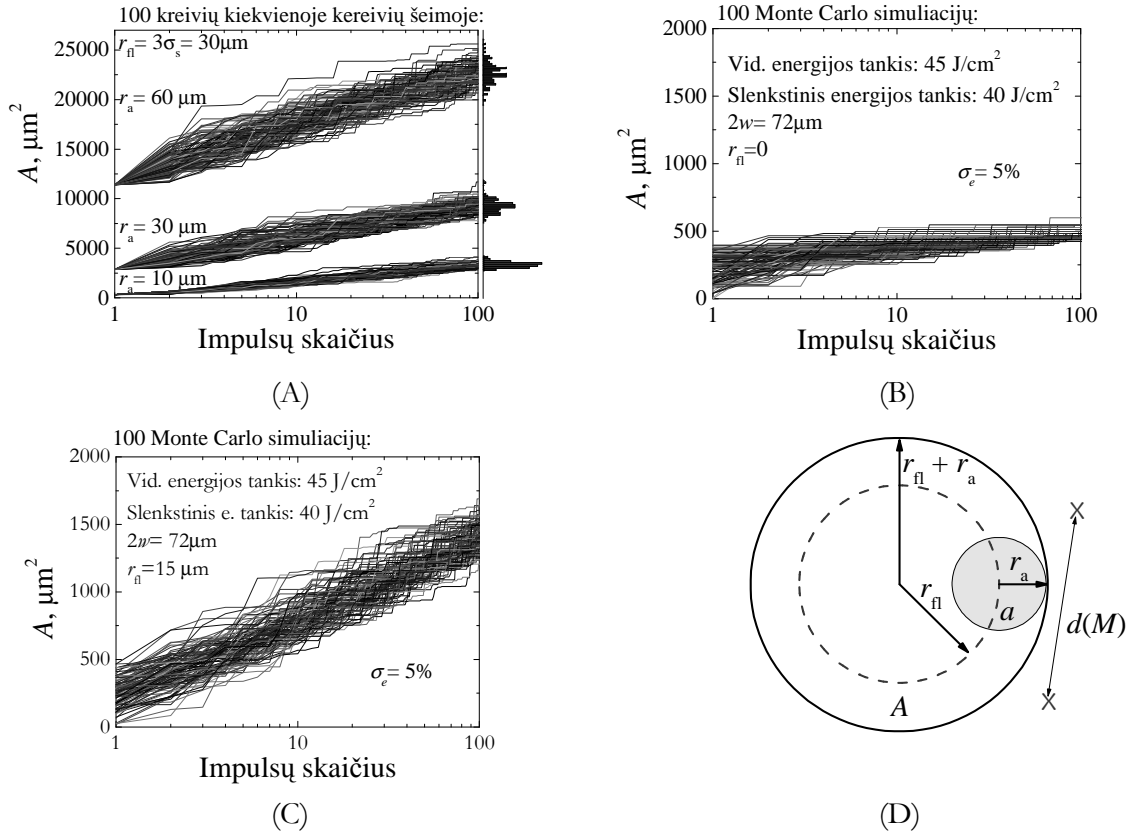
2.3 pav. Testuojamo paviršiaus pavyzdžiai: \times – defektai, kurie pažeidžiami esant T_{defect} energijos tankiui; pilnaviduris apskritimas yra plotas kuriame energijos tankis viršija T_{defect} . A – atsikartojantys impulsai, B – erdviškai „krypuojantis“ pluoštas: septintasis impulsas eksponuoja defektą (pažeidimas), C – energetiškai nenuostovus pluoštas, D – ir kryptiškai ir energetiškai neatsikartojanti spinduliuotė.

Kaip buvo parodyta, paviršiaus pažeidimo tikimybė vienai ekspozicijai yra proporcinga plotui, kur energijos tankis viršija (defektų) pažeidimo slenkstį. Kai pasikartojančių lazerio impulsų erdvinė forma, energija, sklaidimo kryptis ir trukmė visiškai atsikartoja kiekvienam lazerio impulsui (2.3 pav., A), tuomet pažeidimo slenkstį gali sumažinti nebent šilumos arba defektų kaupimasis. Tačiau, kai šių efektų nėra (mūsų nagrinėjamas atvejis), pažeidimo tikimybė nekinta. Taip yra todėl, kad defektų tankis (pagal apibrėžimą) yra pastovus, o a apibrėžiamas (2.4) formule plotas, kuris eksponuojamas lazerio spinduliuote, yra identiškas visiems impulsams. Taigi bendras plotas papildomai eksponuojant nedidėja. Vadinasi, atsikartojančios spinduliuotės atveju S - i -1 pažeidimo tikimybė yra identiška 1- i -1, išvestai pagal *Porteus* ir *Seitel* (2.5) modelį.

Jeigu pasikartojančioji spinduliuotė yra kryptiškai nenuostovi (krypuojanti), tuomet lęšio židinio (XY) plokštumoje tokie krypavimai virsta atsitiktiniais pluošto pozicijos „šokinėjimais“. Taigi, esant nepastovios krypties spinduliuotei S - i -1 režimu apšviečiamas papildomas plotas – a_i (2.3 pav., B). Kaip ir 1- i -1 atveju, S - i -1 pažeidimo tikimybė didėja jau vien dėl to, kad didėja bendras eksponuojamas plotas A , net kai nėra šilumos akumuliacijos ar defektų inkubacijos. Tai – erdvinis pseudoakumuliacinis reiškinys.

Panašus efektas gaunamas ir tada, kai impulsinė spinduliuotė kryptiškai pastovi, bet jos impulsinė energija nėra atsikartojanti, t.y. kiekvienas impulsas turi šiek tiek kitokią energiją. Tokiu atveju kiekvieno impulso plotas židinio plokštumoje, viršijantis kritinį (defektų slenksčio) energijos tankį, šiek tiek skiriasi (2.3 pav., C). Taigi, kaip ir kryptinio nenuostovumo atveju, bendras eksponuojamas plotas statistiškai didėja, didėjant impulsų skaičiui. Todėl didėja ir S - i -1 pažeidimo tikimybė. Tai – energetinis pseudoakumuliacinis reiškinys.

Egzistuojant tiek kryptiniam, tiek ir energetiniam impulsų nenuostovumui, kritinis plotas didėja dėl abiejų anksčiau minėtų priežasčių (2.3 pav., D). Kartu su plotu didėja ir S - i -1 pažeidimo tikimybė. Ploto didėjimas tuo spartesnis, kuo didesnės kampinių krypavimų ir energijos nenuostovumo amplitudės. Eksperimentą atitinkančios simuliacinės kreivės, iliustruojančios ploto didėjimą aukščiau aptartais atvejais, pavaizduotos 2.4 paveiksle.



2.4 pav. Monte Carlo simuliacija – atsitiktinis suminio ekspozicijos ploto A , kuriame energijos tankis viršija T_{defect} didėjimas: A – dėl pluošto sklidimo krypties nenuostovumo, B – dėl impulsų energijos nenuostovumo, C – dėl sklidimo krypties ir impulsų energijos nenuostovumo, D – asimptotinio ploto $A = \pi[r_{fl} + r_a]^2$ suradimo iliustracija.

Apibendrinant galima išvesti formulę, tinkančią bet kokių impulsų pažeidimo tikimybei įvertinti:

$$P(N_i, M, I_0, \omega, T_{\text{defect}}) = \begin{cases} 0, & I_0 < T_{\text{defect}}, \\ 1 - \exp\left(-\sum_{i=1}^{N_i} a_i(I_0, \omega, T_{\text{defect}}) \cdot M\right), & I_0 \geq T_{\text{defect}}; \end{cases} \quad (2.7)$$

čia a_i – pavieniu impulsu i eksponuojamas naujas (papildomas) plotas, t.y. ploto a dalis, kuri nepersikloja su ankstesnių impulsų eksponuotu plotu (2.5 pav.). Indeksas i kinta nuo 1 iki N_{max} . Jeigu pavienių impulsų energija ir sklidimo kryptis yra Gauso funkcijos skirstinių atitinkantys atsitiktiniai dydžiai, juos galima apibūdinti standartiniais nuokrypiais: atitinkamai $\sigma_s > 0$ (standartinis smailinio intensyvumo pozicijos nuokrypis židinio plokštumoje) ir $\sigma_e > 0$ (standartinis pavienių impulsų energijos nuokrypis).

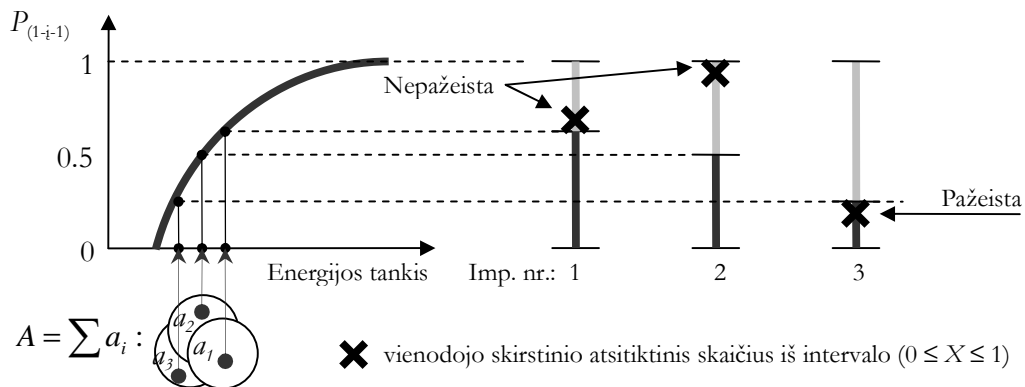
Tuomet su 99,73% pasiklovimo tikimybe, kad atsitiktiniai dydžiai yra intervaluose $\pm 3\sigma_s$ ir $\pm 3\sigma_e$, galime užrašyti asimptotines S - i -1 pažeidimo tikimybių nagrinėtai atvejais formules modifikuodami *Porteus* ir *Seitel* (2.5) formulę:

2.1 Lentelė. Asimptotinės S - i -1 pažeidimo tikimybių formulės

S - i -1 pažeidimo tikimybės formulė veikiant spinduliuotės trikdžiams, kai impulsų skaičius S labai didelis*	Nenuostovumo parametrai
$P = \begin{cases} 0, & I_0 < T_{\text{defect}}, \\ 1 - \exp(-\pi \cdot M \cdot [r_a(I_0, w, T_{\text{defect}})]^2), & I_0 \geq T_{\text{defect}} \end{cases}$	$\sigma_s = 0$ $\sigma_e = 0$
$P = \begin{cases} 0, & I_0 < T_{\text{defect}}, \\ 1 - \exp(-\pi \cdot M \cdot [r_{fl} + r_a(I_0, w, T_{\text{defect}})]^2), & I_0 \geq T_{\text{defect}} \end{cases}$	$\sigma_s > 0$ $\sigma_e = 0$
$P = \begin{cases} 0, & I_0 + 3\sigma_e < T_{\text{defect}}, \\ 1 - \exp(-\pi \cdot M \cdot [r_a(I_0 + 3\sigma_e, w, T_{\text{defect}})]^2), & I_0 + 3\sigma_e \geq T_{\text{defect}} \end{cases}$	$\sigma_s = 0$ $\sigma_e > 0$
$P = \begin{cases} 0, & I_0 + 3\sigma_e < T_{\text{defect}}, \\ 1 - \exp(-\pi \cdot M \cdot [r_{fl} + r_a(I_0 + 3\sigma_e, w, T_{\text{defect}})]^2), & I_0 + 3\sigma_e \geq T_{\text{defect}} \end{cases}$	$\sigma_s > 0$ $\sigma_e > 0$

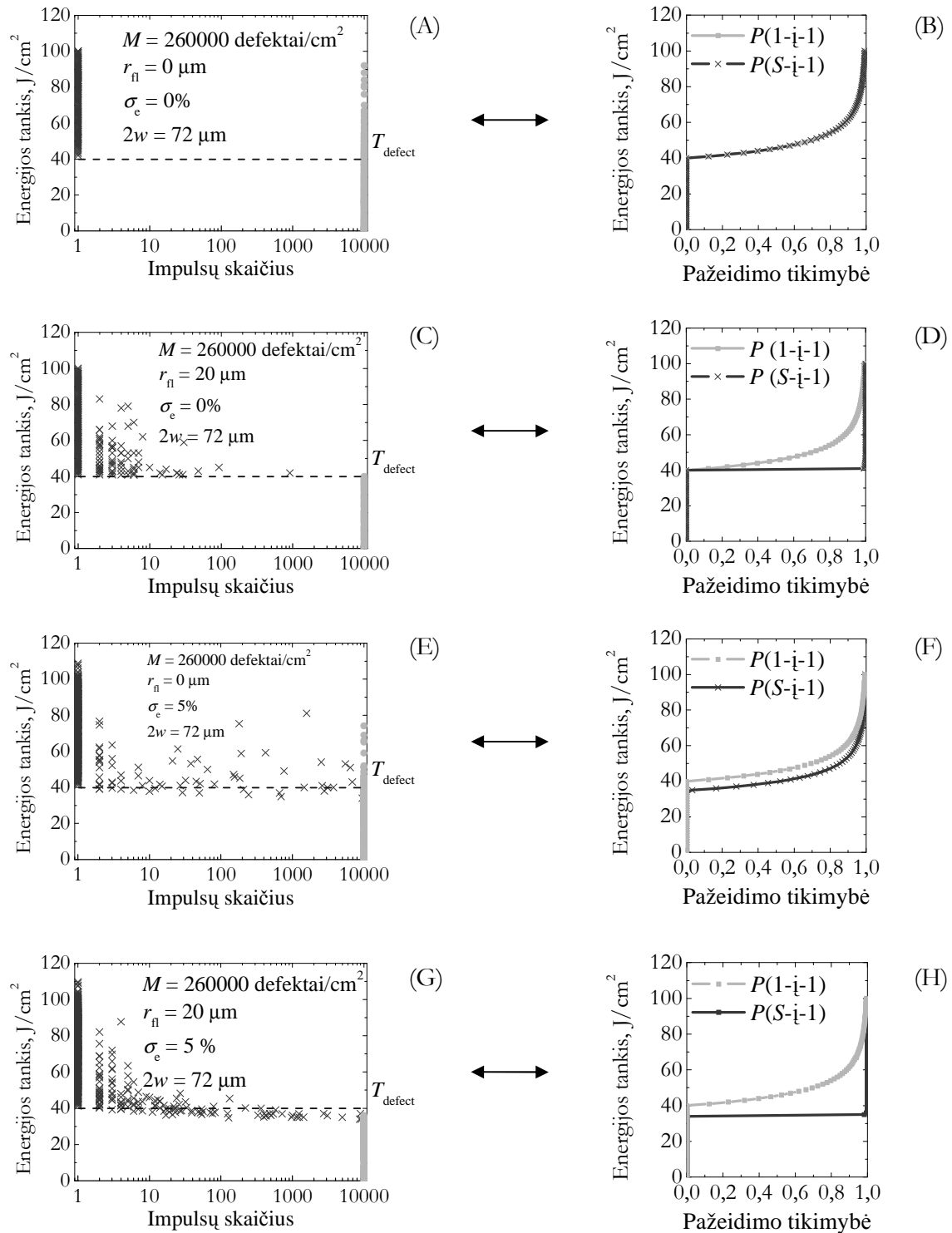
*čia σ_s ir σ_e – smailinio intensyvumo (XY) pozicijos ir energijos tankio standartinis nuokrypiai, o $r_{fl} = \sqrt{x^2 + y^2} = 3\sigma_s$.

S - i -1 Monte Carlo modeliavimas

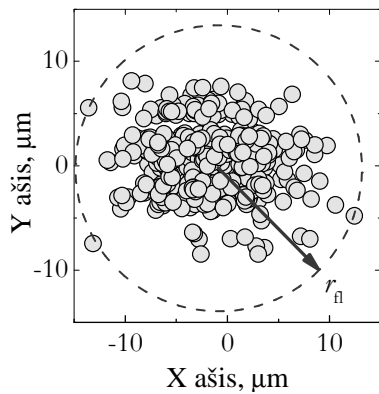


2.5 pav. S - i -1 matavimo modelis: atsitiktinių įvykių generavimo principas.

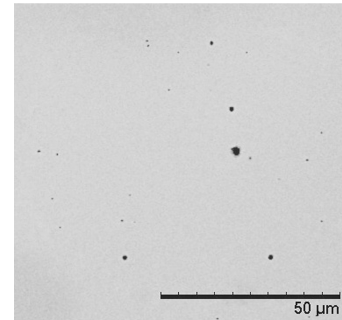
Siekiant kokybiškai palyginti eksperimentinius ir teorinius duomenis, buvo parašyta S - i -1 matavimus simuliuojanti kompiuterinė programa. Kaip ir realiame eksperimente, šios programos veikimo principas pagrįstas atsitiktinio įvykio „pažeista/nepažeista“ generavimu (2.5 pav.), kai iš anksto žinomas paviršiaus defektų tankis ir jų slenkstis. Kiekvienam atsitiktinės krypties lazerio impulsui simuliuojamas eksponuojamas naujas plotas. Visi statistiniai modelio parametrai paimti iš realaus eksperimento. Keturių nagrinėtų atvejų kompiuterinės simuliacijos pateiktos 2.6 paveikslo kairėje, o greta dešinėje palyginimui pateiktos asimptotinės pažeidimo tikimybės kreivės, nubraižytos remiantis 2.1 lentelėje pateiktomis formulėmis.



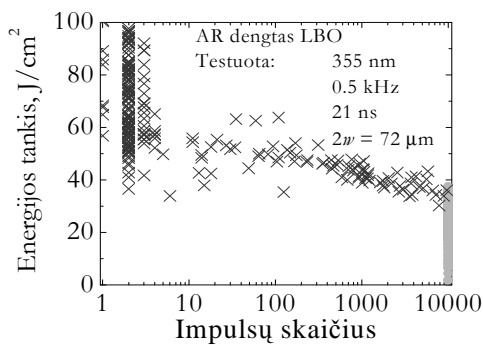
2.6 pav. (A, C, E ir G): S - i -1 eksperimento modeliavimo rezultatai (x – pažeista, ● – nepažeista). (B, D, F ir H): 1- i -1 ir asimptotinės S - i -1 pažeidimo tikimybės. Visais atvejais $2w = 72 \mu\text{m}$, $M = 260000$ defektai/ cm^2 , $T_{\text{defect}} = 40 \text{ J}/\text{cm}^2$.



2.7. pav. Gauso pluošto smailinio intensyvumo pozicijos nestabilumas židinio plokštumoje. Diodais kaupinamojo Nd:IAG lazerio spinduliuotė (trečioji harmonika) fokusuojama 0,6 m židinio nuotolio lęšiu.



2.8 pav. Dangos pažeidimo, indukuoto tuo pačiu lazeriu, morfologija: nuotrauka gauta skenuojančiu elektronų mikroskopu. Lazerio impulsų energija artima slenksčiui.



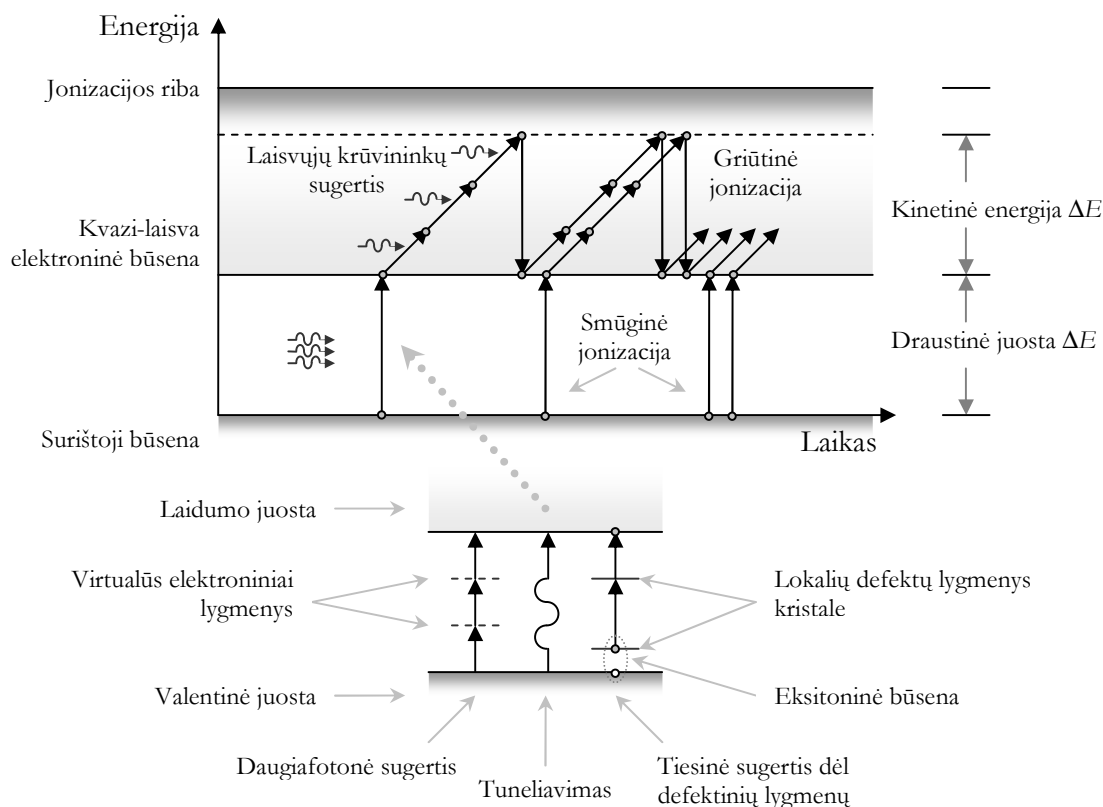
2.9. pav. Eksperimentiškai gauta S - i -1 optinio atsparumo matavimų statistika: \times – pažeista, \bullet – nepažeista. Bandinys yra skaidrinančia dielektrine danga padengtas ličio borato kristalas: statistiniai duomenys artimi gautiems Monte Carlo modeliavimu, kai $\sigma_s > 0$ ir $\sigma_e > 0$.

Siekiant patikrinti teorines prielaidas, buvo atliktas realus S - i -1 tikimybes matavimas naudojant moduluotos kokybės diodais kaupinamo Nd:IAG lazerio erdviškai ir energetiškai nestabilią lazerinę spinduliuotę. Pagal ISO 11254-2 standarte aprašytą algoritmą [5] buvo testuojamas LBO kristalas su skaidrinančia danga 355 nm spinduliuotei. Pagrindiniai testuojančios lazerinės spinduliuotės parametrai buvo tokie: 0,5 kHz impulsų pasikartojimo dažnis, $\lambda = 355$ nm bangos ilgis, $\tau = 25$ ns impulsų trukmė (FWHM) ir pluošto diametras (I_0/e^2) $2w = 72 \mu\text{m}$. (Pažeidimo slenksčio testavimo sistema detalčiau aprašyta disertacijos 1.2 skyriuje.) Pluošto smailinio intensyvumo pozicijos atsitiktiniai krypavimai židinio plokštumoje buvo charakterizuoti standartiniu nuokrypiu $\sigma_s \approx 4,2 \mu\text{m}$ (2.7 pav.). Lazerio impulsų energija buvo matuojama energijos matuokliu (*Nova II*, *Ophir*): $\sigma_e \approx 5\%$. Defektų sąlygotą pažeidimo kilmę patvirtina ir pažeidimo morfologija (2.8 pav.). Aiškiai erdviškai atskirti taškiniai pažeidimai indukuoti lazerio impulsais, kurių energijos tankis artimas slenksstiniam, leidžia daryti prielaidą, kad jie prasidėjo iš atskirų lokalių defektų. Kiekvieną taškinį pažeidimą priskyre pavieniam defektui, galime grubiai įvertinti defektų paviršinį tankį: $M \approx 260000$ defektų/cm². Tokiu atveju vidutinis atstumas tarp defektų $d \approx 19,6 \mu\text{m}$ yra artimas $r_{II} = 3\sigma_s = 12,6 \mu\text{m}$. Eksperimentiniai

duomenys pateikti 2.9 paveiksle. Akivaizdu, kad eksperimentiškai gauti duomenys yra artimi skaitmeninio modeliavimo rezultatams, pavaizduotiems 2.6 paveiksluose (C, E, G).

3. Daugiafotonės sugerties įtaka dielektrinių dangų optiniam atsparumui

Šiame skyriuje pateikta medžiaga buvo publikuota straipsniuose [A4, A18] ir konferencijų pranešimuose [C8, C25].



3.1. pav. Dangą sudarančių atomų elektronų posistemės ir galingos lazerinės spinduliuotės sąveika [22].

Pradėjus tyrinėti optinio atsparumo reiškinius įvairiuose stikluose, netiesiniuose kristaluose ir dangose, buvo pastebėta, kad jų pažeidimo slenksčiai priklauso nuo daugybės faktorių, kartu ir nuo spinduliuotės bangos ilgio bei impulsų trukmės. Beveik visi ankstyvieji tyrimai buvo atlikti nanosekundinės trukmės impulsais panaudojus fundamentaliąją (1064 nm), antrąją (532 nm), trečiąją (355 nm) ir ketvirtąją (266 nm) Nd:YAG lazerio harmonikas. Išskyrus faktą, kad trumpesniems bangos ilgiams stebimas pažeidimo slenksčio sumažėjimas, keturių diskrečiųjų bangos ilgių spektrinė skyra dažniausiai nepakankama, norint detaliau iširti kokius nors optinio atsparumo dėsningumus. Elektroniniai procesai, lemiantys laisvųjų krūvininkų generaciją medžiagoje veikiant ją impulsine lazerine spinduliuote, pavaizduoti 3.1 paveiksle. Spinduliuotė, kurios fotonų energija mažesnė negu draustinės juostos tarpas ir intensyvumas žemas, laisvai sklinda skaidria medžiaga, beveik nepatirdama nuostolių. Kai spinduliuotės intensyvumas yra pakankamai aukštas, medžiagoje stebimi netiesiniai procesai: daugiafotonė

sugertis ir elektronų tuneliavimas per potencialinį barjerą. Manoma, kad būtent šie reiškiniai inicijuoja optinio pažeidimo pradžią femtosekundinėje srityje. Taigi šios disertacijos dalies tikslas buvo teoriškai ir eksperimentiškai išnagrinėti, kokią įtaką dielektrinių dangų optiniam atsparumui femtosekundinėje srityje turi daugiafotonė sugertis. Titano dioksido draustinės juostos tarpas yra 2,8–3,65 eV (priklausomai nuo kristalinės fazės). Vadinasi, reikia iš karto trijų žemesnės energijos fotonų (raudona šviesa), norint sužadinti elektroną iš valentinės į laidumo juostą, o žaliai šviesai (aukštesnės energijos fotonams) pakanka ir dviejų. Daugiafotonės sugerties skerspjūvis priklauso nuo fotonų skaičiaus, būtino elektronams įveikti draustinės juostos tarpą konkrečioje medžiagoje. Taigi, tolydžiai keičiant bangos ilgį, kai pereinama nuo dvifotonės prie trifotonės sugerties, sugerties skerspjūvis (kartu ir elektronų sužadavimo greitis) kinta šuoliškai. Akivaizdu: jeigu daugiafotonė sugertis dalyvauja procesuose kur lazerinis pažeidimas vyksta skaidriose terpėse, tai pažeidimo slenkstis turi būti proporcingas daugiafotonės sugerties greičiui. Jeigu ši prielaida teisinga, tikėtina, kad šuoliškai keičiantis daugiafotonės sugerties greičiui, kai keičiamas bangos ilgis, šuoliškai turi pasikeisti ir pažeidimo slenkstis. Iš literatūros [23] žinoma, jei laisvųjų elektronų tankis medžiagoje pasiekia $\sim 10^{19} - 10^{21} \text{ cm}^{-3}$, medžiaga pradeda irti: inicijuojamas pažeidimo procesas. Laisvųjų elektronų tankio didėjimą medžiagoje, veikiant ją lazerine spinduliuote, galime aprašyti štai tokia lygtimi [24]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = W_{pi}(I(t)) + W_{Av}(I(t), \rho(t)) - W_r(\rho, t); \quad (3.1)$$

čia ρ yra elektronų tankis, t – laikas, W_{pi} – fotojonizacijos greitis, W_{Av} – griūtinės jonizacijos greitis, W_r – elektronų plazmos relaksacijos greitis ir $I(t)$ – elektromagnetinio lauko intensyvumas. W_{pi} – narys gali būti nagrinėjamas naudojantis L. V. Keldyšo (*Л. В. Келдыш*) formulėmis [25]. Jis vienu metu aprašo tiek daugiafotonę, tiek ir tunelinę sugertį:

$$W_{pi}(I(t)) = \frac{2\omega_0}{9\pi} \left(\frac{\omega_0 m}{\hbar \sqrt{\Gamma}} \right)^{3/2} Q(\gamma, x) \exp \left(-\pi \frac{K(\sqrt{\Gamma}) - E(\sqrt{\Gamma})}{E(\sqrt{\xi})} \right)]x + 1[; \quad (3.2)$$

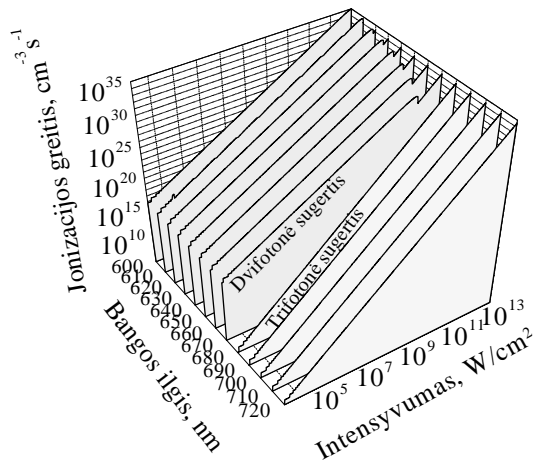
$$\text{čia:} \quad Q(\gamma, x) = \sqrt{\frac{\pi}{2K(\sqrt{\xi})}} \sum_{n=0}^{\infty} \left\{ \exp \left(-n\pi \frac{K(\sqrt{\Gamma}) - E(\sqrt{\Gamma})}{E(\sqrt{\xi})} \right) \Phi(\sqrt{\eta(n+2\mu)}) \right\},$$

$$\gamma = \frac{\omega_0}{e} \sqrt{\frac{mU_i c \epsilon_0 n_0}{2I}}, \quad \Gamma = \frac{\gamma^2}{\gamma^2 + 1}, \quad \xi = \frac{1}{\gamma^2 + 1},$$

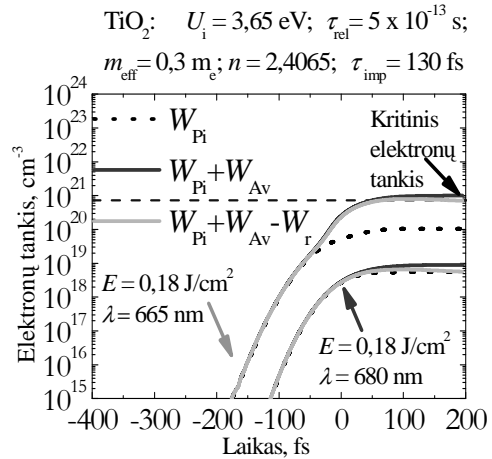
$$x = \frac{2U_i}{\pi \hbar \omega_0 \sqrt{\Gamma}} E(\sqrt{\xi}), \quad \mu =]x + 1[-x, \quad \eta = \frac{\pi^2}{2K(\xi)E(\xi)},$$

$$\Phi = \int_0^z \exp(y^2 - z^2) dy, \quad K(k) = \int_0^{\pi/2} \frac{1}{\sqrt{1 - k^2 \sin^2(\varphi)}} d\varphi, \quad E(k) = \int_0^{\pi/2} \sqrt{1 - k^2 \sin^2(\varphi)} d\varphi.$$

Šiose formulėse: γ yra adiabatinis *Keldyšo* parametras, ω_0 – nešantysis (centrinis) dažnis, e – elektrono krūvis, m – efektyvioji elektrono masė, U_i – draustinės juostos plotis, c – šviesos greitis vakuume, ϵ_0 – dielektrinė skvarba, n_0 – lūžio rodiklis, I – lokalus lazerinio impulso intensyvumas, \hbar – Planko konstanta, $]Z[$ – sveikoji Z skaičiaus dalis, Φ – Dausono (*Dawson's*) integralas ir K , E – elipsiniai pirmo ir antro tipo integralai.



3.2 pav. TiO₂ jonizacijos greičio priklausomybė nuo spinduliuotės intensyvumo ir bangos ilgio.



3.3 pav. Lokalus elektronų tankio didėjimas TiO₂ sluoksnyje sklindant skirtingo bangos ilgio 130 fs trukmės lazerinei spinduliotei.

Fotojonizacijos greitis W_{Pi} priklauso tiek nuo spinduliuotės intensyvumo, tiek nuo jos dažnio (bangos ilgio). Remiantis (3.2) formule apskaičiuota fotojonizacijos greičio TiO₂ medžiagoje išraiška grafiškai pateikta 3.2 paveiksle. Kaip matome, esant labai dideliems intensyvumams fotojonizacijos greitis beveik visiems bangos ilgiams yra panašus. Tai vadinamasis tunelinis laisvųjų elektronų generavimo režimas. Jis pasireiškia, kai *Keldyšo* parametras $\gamma < 1$. Esant mažesniems intensyvumams, kai $\gamma > 1$, fotojonizacija vyksta dėl daugiafotonės sugerties. Tokiu atveju fotojonizacijos greitis labai priklauso nuo bangos ilgio.

Antrasis (3.1) formulės narys W_{Av} aprašo griūtinės jonizacijos procesus [24, 26, 27], kurie detaliau aptariami disertacijoje. Paminėtina tai, kad šie procesai priklauso nuo elektronų tankio ir dažniau pasireiškia tik tuomet, kai jis yra pakankamai didelis:

$$W_{Av}(I(t), \rho(t)) = \eta \rho I ; \quad (3.3)$$

$$\text{čia } \eta = \frac{\sigma}{\epsilon_{crit}}$$

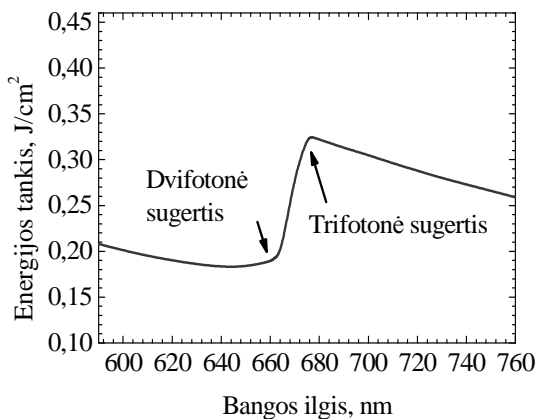
$$\sigma = \frac{e^2}{c \epsilon_0 n_0 m} \frac{\tau_c}{1 + \omega^2 \tau_c^2}$$

$$\tau_c = \frac{16 \pi \epsilon_0^2 \sqrt{m \left(\frac{U_i}{10} \right)^3}}{\sqrt{2} e^4 \rho}$$

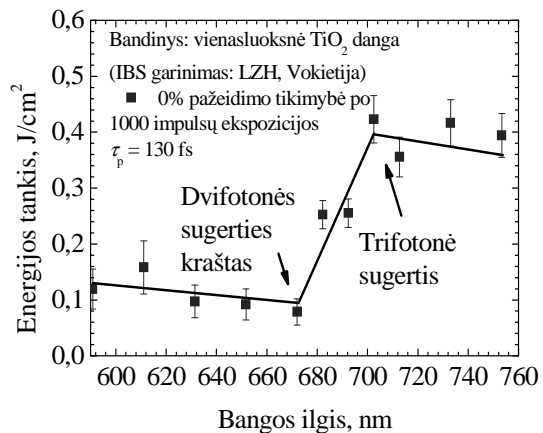
Šiose formulėse: ϵ_{crit} yra sveikąjį skaičių fotonų atitinkanti energija, kurios reikia, kad smūginės jonizacijos būdu būtų sužadintas antrinis elektronas iš valentinės į laidumo juostą; σ – smūginės jonizacijos skerspjūvis; τ_c – vidutinė trukmė tarp pavienio elektrono susidūrimų su atomais.

Trečiasis (3.1) formulės narys W_{rel} iskaito relaksacinius procesus, kurie yra lėti, palyginti su daugiafotonės sugerties ir griūtinės jonizacijos reiškiniais, todėl jų praktiškai galima nepaisyti. Paveiksle 3.3 pateikti du atvejai, apskaičiuoti pagal (3.1), kai elektronų tankis medžiagoje didėja veikiant ją 130 fs trukmės lazerine spinduliuote tokio pat energijos tankio impulsais. Kai impulso bangos ilgis lygus 680 nm, vienam valentinės juostos elektronui sužadinti reikia

3 fotonų, maksimalus pasiektas elektronų tankis impulso metu yra $\sim 10^{19} \text{ cm}^{-3}$. Kita vertus, impulsams, kurių bangos ilgis trumpesnis, t.y. 665 nm, vyksta dvifotonė sugertis ir todėl pasiekiamas $\sim 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ elektronų tankis, kurio pakanka optiniam pažeidimui sukelti. Naudojantis (3.1) formule apskaičiuoti slenkstiniai optinio impulso energijos tankio lygiai TiO_2 medžiagai pavaizduoti 3.4 paveiksle. Esant šioms energijų tankiams prie skirtingų bangos ilgių pasiekiamas vienodas kritinis $\sim 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ elektronų tankis, kuris pakankamas pažeidimui inicijuoti. Kaip matome, slenkstinis intensyvumas kinta šuoliškai bangos ilgių srityje, kur pereinama iš dvifotonės į trifotonę sugertį. Jeigu iš tiesų, kaip teigiama kitų autorių darbuose, pažeidimo slenkstis inicijuojamas sugeneruojant kritinį laisvųjų elektronų tankį dėl daugiafotonės sugerties, turėtume panašią į 3.4 paveiksle priklausomybę stebėti ir pažeidimo slenksčiams. Siekiant patikrinti šią prielaidą, ant B270 stiklo padėklų, panaudojus jonapluoščio dulkinimo (IBS) dengimo technologiją, buvo užgarintos ypač aukštos kokybės TiO_2 dangos. Jų optinis atsparumas buvo testuojamas derinamo bangos ilgio spinduliuote, naudojantis parametriniu šviesos generatoriumi, kaupinamu antrąja titano-safyro lazerio harmonika (400 nm, 130 fs, 1 kHz). Gautieji su $\sim 20 \text{ nm}$ spektrine skyra S -i-1 pažeidimo slenksčiai pavaizduoti 3.5 paveiksle. Kaip matome, pažeidimo slenkstis kinta taip pat šuoliškai: panašiai kaip ir sumodeliuotasis energijos tankis, būtinas kritiniam elektronų tankiui pasiekti. Taigi gautieji teoriniai ir eksperimentiniai rezultatai leidžia manyti, kad daugiafotonė sugertis yra vienas iš esminių optinio pažeidimo mechanizmų femtosekundinių impulsų srityje.



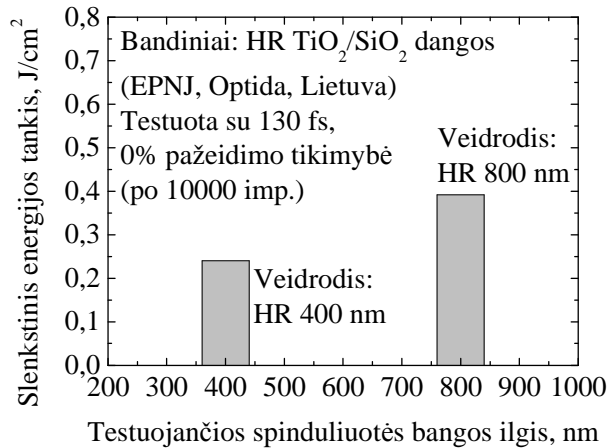
3.4 pav. Teorinis lazerinio impulso energijos tankis, kuris būtinas 10^{21} el./cm^3 tankiui pasiekti, kai TiO_2 veikiame 130 fs lazerio impulsu.



3.5 pav. Eksperimentiškai išmatuotas pažeidimo slenkstis vienasluoksneje TiO_2 dangoje (testuota su 130 fs, 1 kHz impulsais).

Panašūs eksperimentai buvo pakartoti ir daugiasluoksniams $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ didelio atspindžio koeficiento dangoms, užgarintoms panaudojus elektronpluoščio nusodinimo su joniniu tankinimu (EPNJ) technologiją. Siekiant išlaikyti tas pačias interferencines sąlygas, ant BK7 stiklo padėklų buvo užgarintos skirtingos dangos su identiškais spektriniais formulėmis, bet skirtingais sluoksnių storiais, optimizuotais atspindėti skirtingus bangų ilgius. Pirmoji eksperimentinė didelio atspindžio koeficiento danga, skirta atspindėti 800 nm šviesą, buvo testuojama su fundamentaliaja titano-safyro lazerio harmonika (800 nm, 130 fs, 1 kHz). Tuo tarpu antroji – skirta atspindėti 400 nm šviesą, atitinkamai buvo testuojama su antrąja to paties lazerio harmonika (400 nm, 130 fs, 1 kHz). Gautieji rezultatai pavaizduoti 3.6 paveiksle.

Matome, kad didelio atspindžio koeficiento dangos iš $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ taip pat išsiskiria mažesniu optiniu atsparumu trumpesnio bangos ilgio spinduliuotei. Kaip parodė M. Jupė ir bendraautorai [28], jeigu pavienių sluoksnių sudarančių sudėtingesnę dangą, pažeidimo slenksčiai yra žinomi, galima numatyti ir daugiasluoksnės dangos pažeidimo slenksčių. Šiuo atveju daugiasluoksnės $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ dangos optinį atsparumą riboja būtent TiO_2 sluoksnis. Todėl galima teigti, kad daugiafotonė sugertis femtosekundinių impulsų srityje riboja ir daugiasluoksnių didelio atspindžio koeficiento dielektrinių dangų optinį atsparumą.



3.6 pav. Eksperimentiškai išmatuoti didelio atspindžio koeficiento $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ dielektrinių dangų pažeidimo slenksčiai.

4. Padėklo šiurkštumas ir dangos sutankinimas didelės energijos jonais: optinis atsparumas femtosekundinėje srityje

Šiame skyriuje pateikta medžiaga buvo publikuota straipsnyje [A3] ir konferencijos pranešime [C7].

Optinių dangų atsparumas lazerinei spinduliuotei priklauso nuo daugybės veiksnių: kompozitinės sandaros (dangų sluoksnių skaičiaus, jų storio, lūžio rodiklių, eiliškumo), sudėtinių medžiagų cheminės sudėties, porėtumo, grynumo ir kristalinės būsenos. Dengiant dangas skirtingomis garinimo technologijomis, visi šie veiksniai gali būti kontroliuojami tik iš dalies. Pavyzdžiui, dengimui naudojant tradicinę technologiją, t.y. elektronpluoštį nusodinimą, beveik neįmanoma suformuoti labai didelio tankio dangų arba labai tiksliai kontroliuoti jų storio. Be to, optiniam dangų atsparumui gali turėti įtakos ir padėklai (paviršiaus forma, poliravimo būdas, šiurkštumas, užterštumas ir t.t.), ant kurių garinamos dangos. Taigi kiekviena gamybos technologija turi tam tikrų privalumų ir trūkumų, pavyzdžiui, beveik identiškos sandaros dangų, pagamintų šiek tiek skirtingomis sąlygomis (technologijomis), optiniai atsparumai gali būti visiškai skirtingi. Lygiai taip pat šių dangų optinis atsparumas gali skirtis skirtingo bangos ilgio ar impulsų trukmės ir pasikartojimo dažnio spinduliuotės srityse.

Nors ir nemažai optinio atsparumo tyrimų jau buvo atlikta nanosekundinių trukmių lazeriniais impulsais [29-32], iki šiol beveik nebuvo publikacijų, kuriose būtų atskleista įvairių technologinių veiksnių įtaka optiniam atsparumui femtosekundinėje srityje. Tokie tyrimai turi prasmę, nes yra žinoma, jog pažeidimo mechanizmai iš esmės skiriasi esant skirtingos trukmės lazerinei spinduliuotei. Taigi vienas iš šios disertacijos dalies tikslų – iširti, ar nuo standartinių BK7 stiklo padėklų šiurkštumo (nanometrinių paviršiaus nelygumų), ant kurių garinamos dangos, priklauso pačių dangų optinis atsparumas femtosekundinei infraraudonajai lazerinei spinduliuotei. Kartu buvo iškeltas ir antrasis tikslas – eksperimentiškai nustatyti, ar esant tai pačiai spinduliuotei dangų optinis atsparumas pasikeičia, jeigu garinimo metu augančiai dangai naudojamas papildomas tankinamas didelės energijos argono dujų srautu. Siekiant atsakyti į minėtus klausimus, buvo atlikti eksperimentai pagal tokį tyrimų planą:

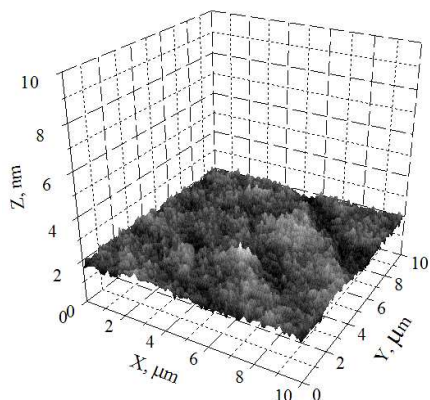
- įvairių gamintojų (skirtingas poliravimas) komercinių BK7 stiklo padėklų paviršių charakterizavimas atominių jėgų mikroskopu (šiurkštumo įvertinimas);
- didelio atspindžio koeficiento dangų garinimas ant charakterizuotųjų skirtingo šiurkštumo padėklų naudojant elektronpluoštį nusodinimą (EPN);
- didelio atspindžio koeficiento ZrO_2/SiO_2 dangų (su identiška viršutinių sluoksnių spektrine formule ir medžiagomis) garinimas ant vienodo šiurkštumo padėklų naudojant dvi skirtingas garinimo technologijas: EPN ir elektronpluoštį nusodinimą su jonų tankinimu (EPNJ);
- visų užgarintų dangų charakterizavimas:
 - spektrofotometriniai pralaidumo matavimai (lūžio rodiklio nustatymas),
 - AJM matavimai (dangų paviršiaus šiurkštumo įvertinimas),
 - rentgeno difrakcijos tyrimai (dangų kristalinės sandaros nustatymas),
 - dangų optinio atsparumo femtosekundinei pasikartojančių impulsų spinduliuotei testavimas ir paviršiaus morfologijos tyrimai *Nomarski* tipo mikroskopu.

Pagrindiniai minėtųjų tyrimų rezultatai pateikti 4.1 ir 4.2 paveiksluose ir apibendrinti 4.1 lentelėje. Pavyzdžiui, 4.1 paveiksle pateiktos skirtingų BK7 stiklo padėklų AJM topografijos. Kaip ir buvo tikėtasi, skirtingų gamintojų paruoštų bandinių tipinis paviršiaus šiurkštumas buvo skirtingas. Jis įvertinamas pagal formules:

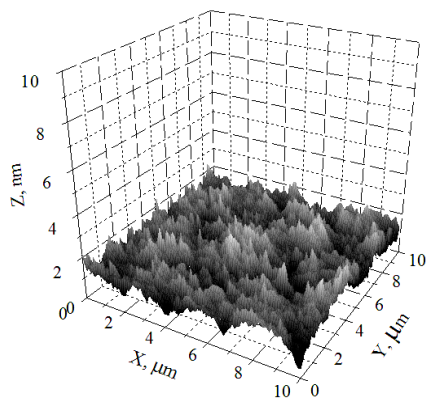
$$R_a = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |Z_i - \bar{Z}|, \quad (4.1)$$

$$R_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \langle Z_i - \bar{Z} \rangle^2}; \quad (4.2)$$

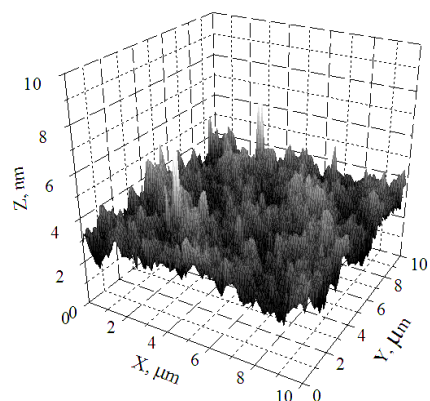
čia R_a ir R_{rms} – atitinkamai nuokrypio (modulio) vidurkis ir vidutinis kvadratinis nuokrypis, Z_i – lokalus paviršiaus aukštis, N – bendras matuotų pozicijų skaičius. Išanalizavus AJM duomenis, paaiškėjo, kad įvairių gamintojų paruoštų standartinių padėklų paviršiaus šiurkštumas (R_{rms}) skiriasi net 4 kartus, tačiau neviršija 0,64 nm.



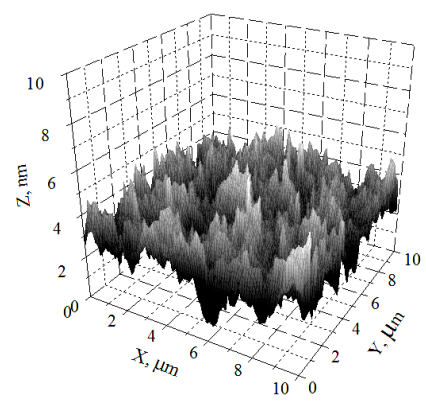
(A) Bandinio A1 paviršius



(B) Bandinio B1 paviršius



(C) Bandinio C1 paviršius

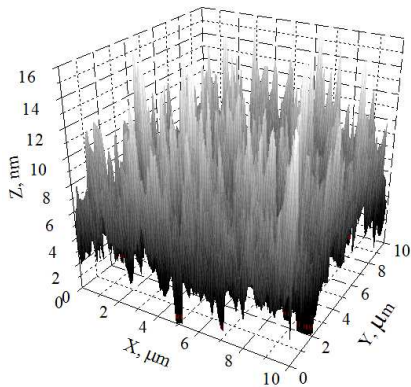


(D) Bandinio D12 paviršius

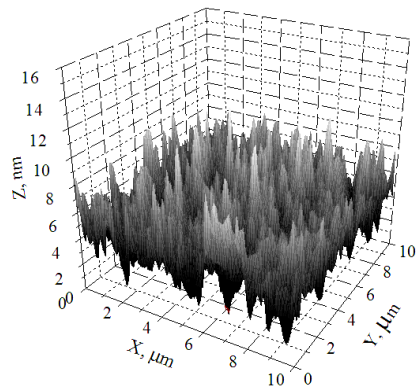
4.1 pav. Tipiški skirtingų gamintojų poliruoti BK7 stiklo padėklų paviršiai. Topografijos gautos skenuojančiu atominių jėgų mikroskopu prieš užgarinant dangas.

Užgarintosios ZrO_2/SiO_2 dangos (apie naudotus garinimo režimus daugiau parašyta disertacijoje) taip pat buvo iširtos AJM (4.2 pav.). Nustatyta, kad abiem technologijomis užgarintųjų dangų (ant vienodo šiurkštumo 0,64 nm padėklų) šiurkštumas gerokai viršija padėklų šiurkštumą: 2,80 nm – EPN ir 1,41 nm – EPNJ.

Eksperimentinės dangos taip pat buvo tiriamos tiek spektrofotometriškai, tiek rentgeno difrakcijos būdu. Iš spektrofotometrinių pralaidumo matavimų, pasinaudojus specialia programine įranga, buvo nustatytos dangų lūžio rodiklių priklausomybės nuo bangos ilgio. Kaip matome iš 4.3 paveikslėlio, EPNJ dangose ZrO_2 sluoksnių lūžio rodiklis yra didesnis negu porėtose EPN dangose: visoje tirtoje spektro srityje. Šie rezultatai gerai sutampa su optikoje žinomu Lorentz-Lorentz [33] sąryšiu.

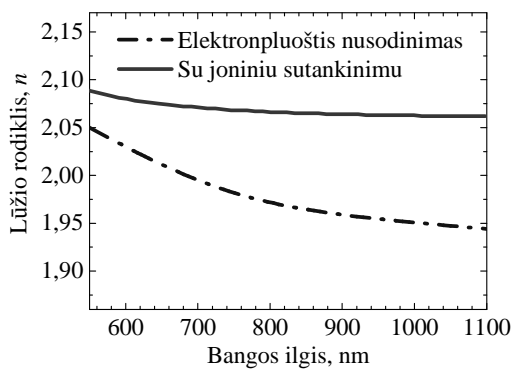


(A) Elektronpluoščių nusodinimo užgarintos dangos paviršiaus nelygumai.

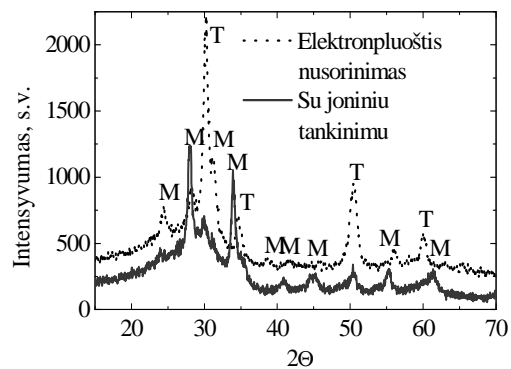


(B) Užgarinta elektronpluoščių nusodinimu papildomai tankinant jonais.

Pav. 4.2. Didelio atspindžio koeficiento dangų paviršių topografija



Pav. 4.3. ZrO_2 sluoksnių, gautų skirtingais garinimo metodais, lūžio rodikliai.



Pav. 4.4. Rentgeno difrakcijos spektrai: T – ZrO_2 tetragoninė būseną, M – ZrO_2 monoklininė būseną (eksperimentuose buvo naudojama $Cu K\alpha_2$ spinduliuotė).

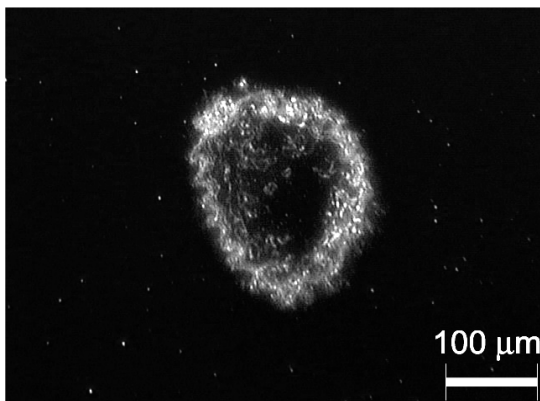
Iš rentgeno difrakcijos spektrų nustatyta, kad papildomas sutankinimas didelės energijos jonais pakeičia vyraujančią ZrO_2 sluoksnių kristalinę sandarą. Iš 4.4 paveikslė matome, kad nenaudojant joninio sutankinimo EPN dangose formuojasi daugiausia tetragoninė ZrO_2 sluoksnių kristalinių fazė, o papildomai tankinant įgreitintu argono dujų srautu (EPNJ) dėl padidinto adatomų mobilumo formuojasi gerokai tankesnė monoklininė kristalinė būseną. Tiek EPN, tiek EPNJ atveju SiO_2 sluoksnių sandara yra amorfinė.

Taigi, charakterizavus padėklus ir dangas, buvo atlikti visų padengtų bandinių optinio atsparumo matavimai. Dangų atsparumas buvo tikrinamas 130 fs trukmės 800 nm bangos ilgio lazerinei spinduliuotei, kurios pasikartojimo dažnis yra 1 kHz. Beveik visų bandinių pažeidimo

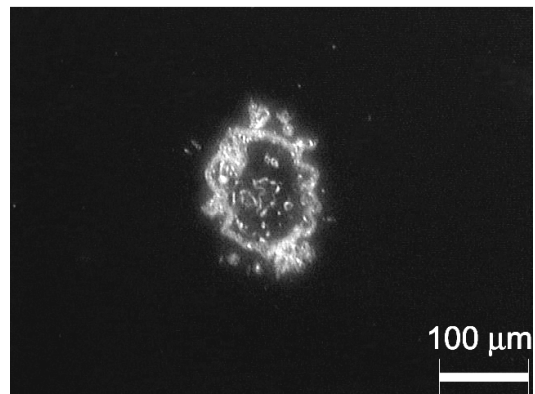
slenksčiai ir charakteringosios pažeidimų kreivės buvo identiškos (4.1 lentelė). Tomis pačiomis eksperimentinėmis sąlygomis tiriant tiek dangų sutankinimo, tiek padėklo šurkštumo įtaką optiniam atsparumui, jokių proporcingumo dėšningumų nepastebėta. Nors elektronpluoščiu nusodinimu užgarintų dangų pažeidimo slenkstis buvo ~3 % aukštesnis, šis skirtumas yra nepaisytinas paklaidų ribose ~10%. Po pažeidimo eksperimentų atliekant abiejų dangų paviršiaus pažeidimo morfologijų vizualinę apžiūrą (4.5 pav.), galima teigti, kad pažeidimas abiem atvejais yra indukuojamas viršutiniame aukšto lūžio rodiklio ZrO₂ dangos sluoksnyje. Būtent šiame sluoksnyje stovinčiosios bangos intensyvumas ~4 kartus viršija kritusiosios bangos intensyvumą. Taip pat pastebėtina ir tai, kad pažeidimo kraterių vaizdai esant tiek sutankintai, tiek nesutankintai dangai yra netaisyklingo apskritimo formos, tuo tarpu skersinis lazerio intensyvumo skirstinys turi cilindrinę simetriją. Netaisyklingi kraterio kraštai gali byloti apie tai, kad pažeidimą sukelia sugertis lokaliuose sugerties centruose – defektuose. Gali būti ir taip, kad tai technologiniai garinimo defektai, kurių įtaka optiniam atsparumui abiem atvejais yra gerokai didesnė negu sutankinimo arba padėklo šurkštumo įtaka.

4.1 lentelė. Eksperimentiniai rezultatai

Bandinys	Garinimo metodas	Testas	Dangos medžiagos	Padėklo paviršiaus šurkštumas, nm		Lazerio pluošto diametras, μm	Bangos ilgis, nm	Impulso trukmė, fs	LIDT po 10000 impulsų, J/cm ²
				R _a	R _{rms}				
A1	EPN	Šurkštumo	ZrO ₂ /SiO ₂	0,12	0,16	535	800	130	0,351
B1			ZrO ₂ /SiO ₂	0,27	0,35	540			0,335
C1			ZrO ₂ /SiO ₂	0,39	0,50	535			0,355
D12		G.	ZrO ₂ /SiO ₂	0,51	0,64	540			0,332
D2	EPNJ (Ar+)	metodo	ZrO ₂ /SiO ₂	0,51	0,64	560			0,343



(A)



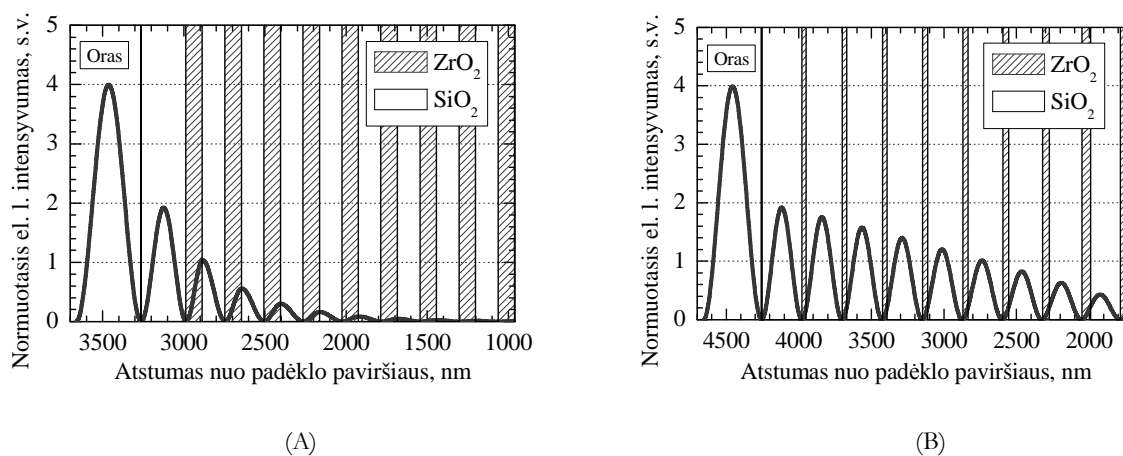
(B)

4.5 pav. Optinio pažeidimo morfologija. Nuotraukos užregistruotos *Nomarski* tipo mikroskopu. A – femtosekundinio lazerio spinduliuote indukuotas pažeidimas EPN užgarintoje ZrO₂/SiO₂ dangoje; B – lazerinis pažeidimas argono jonais sutankintoje EPNJ ZrO₂/SiO₂ dangoje.

5. Interferencinių reiškinių įtaka daugiasluoksnių dangų optiniam atsparumui

Šiame skyriuje pateikta medžiaga buvo publikuota straipsnyje [A19] ir konferencijos pranešime [C15].

Daugiasluoksniuose optiniuose dangose dėl daugybinių šviesos atspindžių interferencijos susidaro stovinčiosios elektromagnetinės bangos. Kaip rodo įvairūs tyrimai [34, 35], būtent šių stovinčiųjų bangų interferencinių pūpsnių intensyvumas apriboja visos daugiasluoksnių dangos optinį atsparumą. Gerai žinoma, kad įprastinio dizaino (alternuojančių didelio ir žemo lūžio rodiklio $\lambda/4$ sluoksnių) dangose stovinčiosios bangos pūpsniai yra lokalizuoti skirtingo lūžio rodiklio sluoksnių sandūrose (5.1 pav., A).



5.1 pav. A – sumodeliuota įprastinės „alternuojančios $\lambda/4$ “ didelio atspindžio dangos struktūra: intensyvumo pūpsniai sutampa su sluoksnių sandūromis; B – modifikuotos dangos struktūra: intensyvumo pūpsniai „pastumti“ į atsparesnius šviesai SiO₂ sluoksnius.

Šios sandūros yra mechaniškai pačios silpniausios vietos dangoje: dėl nevienodo atskirų sluoksnių temperatūrinio plėtimosi įtempimų ir nepakankamos adhezijos. Kita vertus, yra žinoma, kad atskiri dangos sluoksniai taip pat nevienodai atsparūs lazerinei spinduliotei: dažniausiai didesnio lūžio rodiklio sluoksnių pažeidimo slenkstis yra žemesnis [28, 36, 37]. Siekiant padidinti daugiasluoksnių dangų pažeidimo slenkstį, galima sumažinti stovinčiųjų bangų intensyvumą sluoksnių sandūrose dirbtinai „pastumiant“ šių bangų pūpsnius į optiškai retesnius (atsparesnius) sluoksnius. Vienas iš paprasčiausių ir populiariausių būdų didelio atspindžio koeficiento dangų optiniam atsparumui didinti – išorinio dangos sluoksnių storinimas (5.1 pav., A), t.y. užuot naudojus SiO₂ įprastinį optinį storį $\lambda/4$, garinamas storesnis – $\lambda/2$, tokiu būdu intensyviausias stovinčios bangos pūpsnis lokalizuojamas šio sluoksnių viduryje. Panašiai galima modifikuoti ir gilesnius dangos sluoksnius [17, 34, 38, 39], tačiau kartu būtina išlaikyti ir didelio atspindžio koeficiento sąlygą konkrečiam bangos ilgiui. Buvo nemažai bandymų pagaminti tokias dangas, kartu testuojant jų atsparumą su nanosekundinės trukmės impulsais. Šioje disertacijos dalyje taip pat nagrinėjami panašūs reiškiniai. Kaip jau minėta, femtosekundiniams lazerio impulsams būdingi kitokie medžiagų lazerinio ardymo mechanizmai negu nanosekundiniams. Pagrindinis šio skyriaus tikslas – ištirti, ar ultratrumpųjų impulsų atveju daugiasluoksniuose dangose taip pat reikšmingi interferenciniai

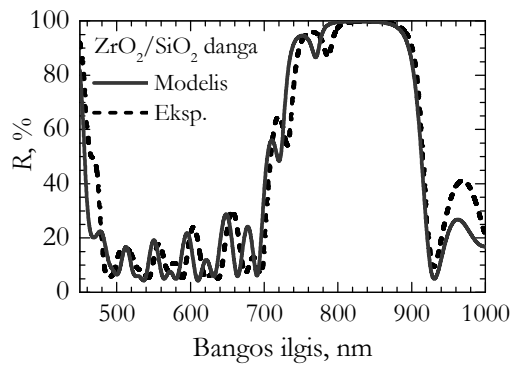
efektai (optinio atsparumo prasme). Šiam tikslui pasiekti ant BK7 stiklo padėklų buvo užgarintos dviejų tipų eksperimentinės dangos (5.1 pav.), kurių savybės buvo modeliuojamos *TFCalc* programine įranga.

Pirmosios – standartinio dizaino su alternuojančiais $\lambda/4$ storio aukšto ir žemo lūžio rodiklio ir pastorintu viršutiniu sluoksniais, antrosios – iš tų pačių medžiagų: modifikuotų sluoksnių storių su „pastumtais“ interferenciniais pūpsniais. Tie patys garinimo eksperimentai buvo pakartoti tris kartus su skirtingomis (dažniausiai naudojamomis) aukšto lūžio rodiklio medžiagomis atitinkamai: ZrO_2 , Ta_2O_5 ir HfO_2 . Pagrindinės garinimo sąlygos pateiktos 5.1 lentelėje.

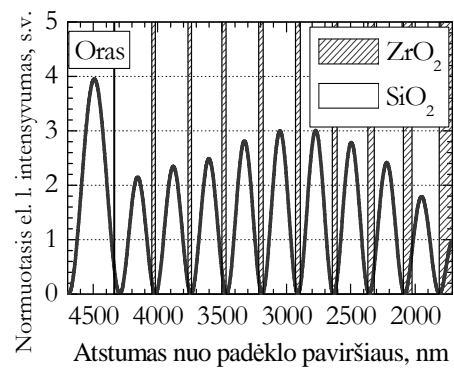
Lenetlė 5.1. Eksperimentinių dangų garinimo sąlygos

Dangos tipas	H sluoksnių medžiaga	L sluoksnių medžiaga	Dengimo technologija	Sl. sk.	Dangos storis, nm	$T_{\text{pagr.}}$, °C	H g.g., Å/s	H g.g., Å/s	O ₂ slėgis, Pa
<i>alteruojanti $\lambda/4$</i>	ZrO_2	SiO_2	EPN	26	3260	300	3,5	5	$4,5 \cdot 10^{-3}$
<i>modifikuota</i>				32	4260				
<i>alteruojanti $\lambda/4$</i>	Ta_2O_5		EPNJ	24	3200	50	1,3	2	$8,0 \cdot 10^{-3}$
<i>modifikuota</i>				22	2800				
<i>alteruojanti $\lambda/4$</i>	HfO_2		EPN	24	3270	300	2	2,8	$4,5 \cdot 10^{-3}$
<i>modifikuota</i>				24	3100				

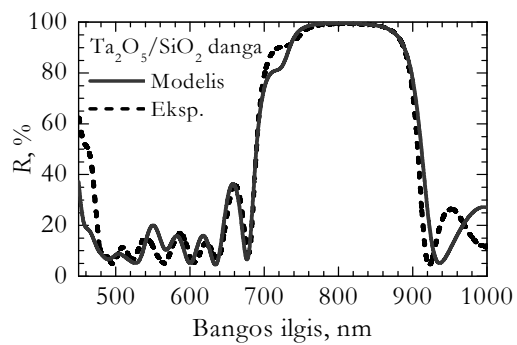
Užgarintosios dangos buvo charakterizuojamos spektrofotometriškai matuojant jų atspindžio spektrus (5.2 pav., A, C, E). Gautieji eksperimentiniai spektrai šiek tiek skyrėsi nuo teoriškai sumodeliuotųjų tų pačių dangų spektrų: dėl ribotos galimybės tiksliai kontroliuoti augančios dangos storį. Iš realių atspindžio spektrų buvo įvertinti tikrieji eksperimentinių dangų sluoksnių storių ir apskaičiuotas (5.2 pav., B, D, F) stovinčiųjų elektromagnetinių bangų intensyvumas. Kaip matome, nedideli ZrO_2 dangų storio nuokrypiai (5.2 pav., B) sąlygojo visiškai kitoki nei tikėtasi (5.1 pav., B) stovinčiosios bangos intensyvumo pasiskirstymą, t.y. vietoj intensyvumo sumažėjimo dėl netikslaus garinimo buvo stebimas jo padidėjimas. Visų eksperimentinių dangų optinis atsparumas femtosekundinei spinduliuotei buvo testuojamas pagal anksčiau aprašytą metodiką. Testavimams buvo naudojamas tas pats lazeris, kurio bangos ilgis – 800 nm, pasikartojimo dažnis – 1 kHz, o impulso trukmė buvo keičiama atitinkamai 130 fs ir 46 fs. Iš atspindžio spektro nustatėm, kad ZrO_2/SiO_2 dangos buvo užgarintos klaidingai, jos buvo testuojamos tik 130 fs trukmės impulsais. Kaip ir tikėtasi, dėl garinimo klaidos modifikuotose ZrO_2/SiO_2 dangose padidėjus stovinčiųjų dangų intensyvumui optinis atsparumas jose buvo žemesnis ($0,44 \text{ J/cm}^2$) negu standartinio dizaino dangų su pastorintu išoriniu sluoksniu ($0,65 \text{ J/cm}^2$). Ta_2O_5/SiO_2 ir HfO_2/SiO_2 dangų atveju garinimo procedūra geriau atkartojė teorinius modelius, o optinio atsparumo rezultatai (5.3 pav.) patvirtino geresnį modifikuotų dangų atsparumą spinduliuotei.



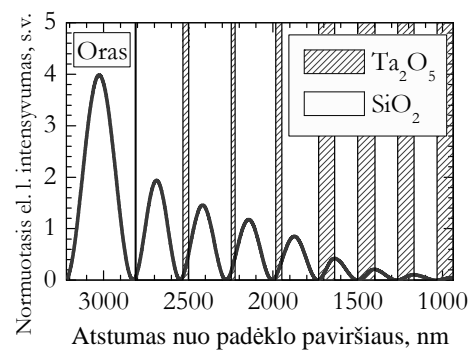
(A)



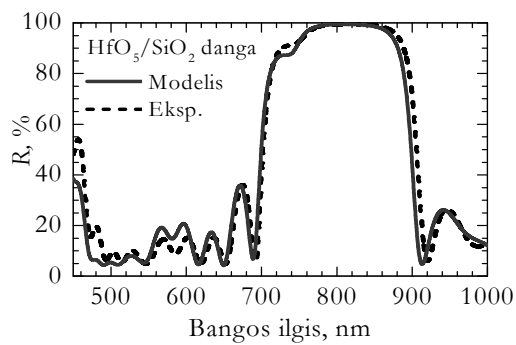
(B)



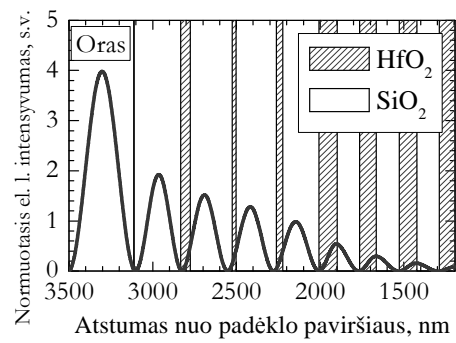
(C)



(D)

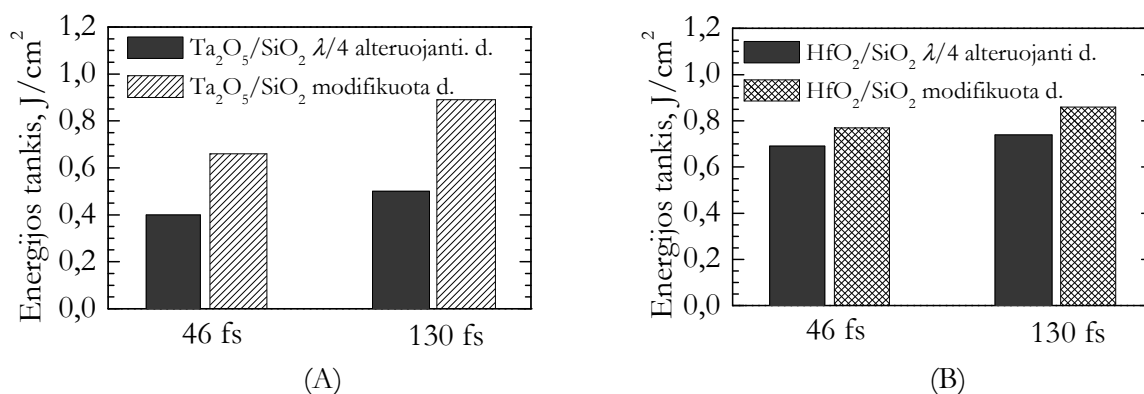


(E)



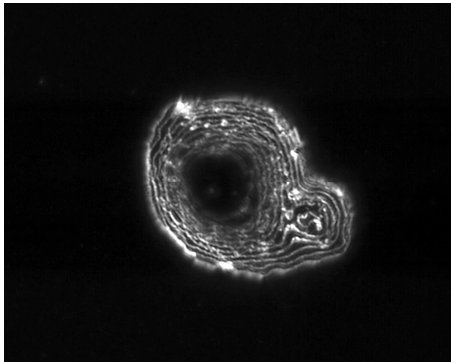
(F)

5.2. pav. Sumodeliuotųjų ir pagamintųjų modifikuotų dangų atspindžio spektrai (A, C, E). Iš realių atspindžio spektrų „atstatyti“ stovinčiųjų bangų elektrinio lauko intensyvumai (B, D, F).

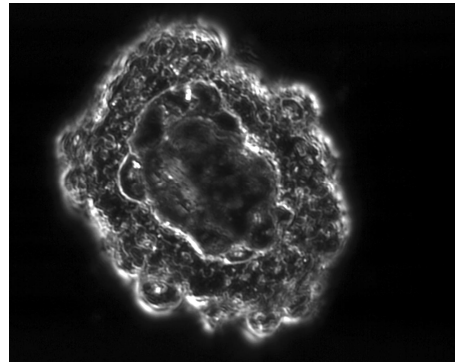


5.3 pav. Eksperimentiškai išmatuoti A – Ta₂O₅/SiO₂ ir B – HfO₂/SiO₂ standartinių ir modifikuotų dangų pažeidimo slenksčiai 46 fs ir 130 fs trukmės lazerinei spinduliotei

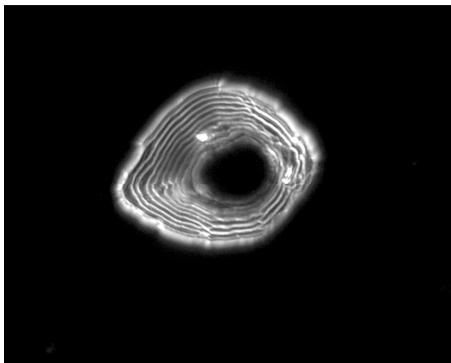
Kaip matome iš gautųjų rezultatų (5.3 pav.), interferenciniai reiškiniai daro didelę įtaką daugiasluoksnių dangų optiniam atsparumui femtosekundinėje srityje ir leidžia jį padidinti. Modifikuotų Ta₂O₅/SiO₂ dangų pažeidimo slenksčiai buvo aukštesni negu įprastų alternuojančių λ/4 sluoksnių dangose. Toks pagerėjimas galimai gautas dėl to, kad pavyko „nustumti“ interferencinius pūpsnius iš Ta₂O₅/SiO₂ sluoksnių sandūros į aukštesnio atsparumo SiO₂ sluoksnius. Ta₂O₅ pažeidimo slenkstis daug žemesnis negu SiO₂ sluoksnių [36]. Tuo tarpu HfO₂ ir SiO₂ sluoksnių pažeidimo slenksčiai skiriasi ne tiek daug [37], todėl esant HfO₂/SiO₂ dangoms skirtumas tarp modifikuotų ir alternuojančių λ/4 atsparumų ne toks didelis. Šiuos rezultatus papildė ir pažeidimo morfologijos stebėjimai optiniu bei atominių jėgų mikroskopais, kurie patvirtina ir kitų autorių gautus rezultatus testuojant su ilgesnių trukmių impulsais. Kaip matome iš teorinio modelio (5.1 pav.), elektromagnetinis laukas daug giliau įsiskverbia į modifikuotas, negu į alternuojančių λ/4 sluoksnių dangas. Dėl šios priežasties modifikuotųjų dangų lazerinio pažeidimo krateriai (5.4 pav.) yra gilesni ir statesni negu alternuojančių λ/4 dangų [34, 35]. Rezultatus patvirtino ir atominių jėgų mikroskopu atlikti papildomi matavimai.



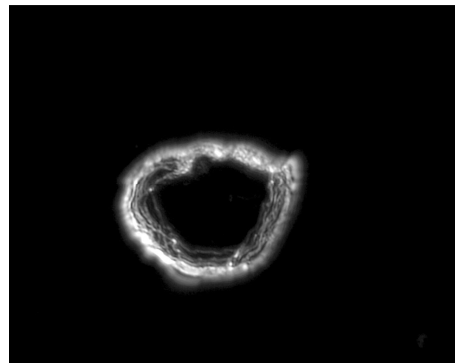
(A) alternuojanti $\lambda/4$ ZrO₂/SiO₂ danga



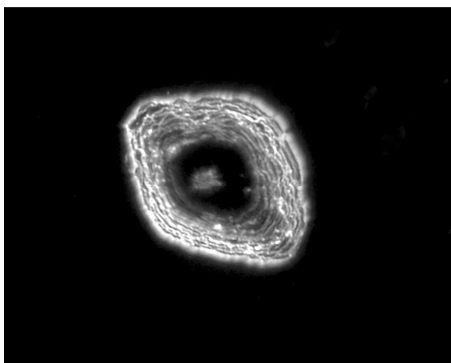
(B) modifikuota ZrO₂/SiO₂ danga



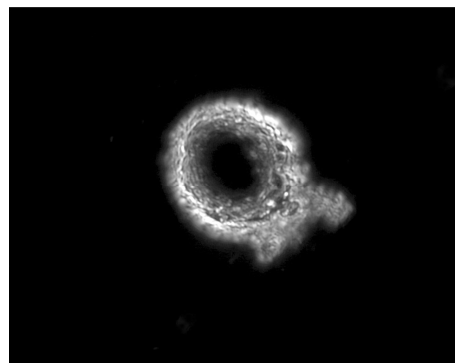
(C) alternuojanti $\lambda/4$ Ta₂O₅/SiO₂ danga



(D) modifikuota Ta₂O₅/SiO₂ danga



(E) alternuojanti $\lambda/4$ HfO₂/SiO₂ danga



(F) modifikuota HfO₂/SiO₂ danga

5.4. pav. Eksperimentinių dangų pažeidimų morfologijos gautos optiniu mikroskopu *Olympus BX41*. A, C, E – alternuojančių dangų pažeidimai, B, D, F – modifikuotų dangų pažeidimai. Visuose paveikslėliuose pavaizduotas vienodas plotas ($78 \times 61 \mu\text{m}^2$).

Išvados

1. Sukurta eksperimentinė testavimo stotis, kuri dėl įvairių rutininių procesų automatizavimo igalino greičiau nustatyti lazeriu indukuotą S -į-1 pažeidimo slenkstį kartu minimizuojant žmogiškąjį faktorių. Sukurtosios sistemos jautrumas pakankamas įvairiems dangų gamybos technologiniams veiksniams tirti femtosekundinių lazerinių impulsų srityje.
2. S -į-1 eksperimentuose, kai testuojamųjų skaidrių medžiagų optinis atsparumas yra ribojamas atsitikrinai išsidėsčiusiais defektais, stebimas pseudoakumuliacinis reiškinys dėl lazerinių impulsų sklidimo krypties ir jų energijos nenuostovumo bei bandinio mechaninių virpesių, nes didėja ir bendras eksponuojamas paviršiaus plotas, kuris didina ir pažeidimo tikimybę.
3. Teoriškai ir eksperimentiškai pademonstruota, kad pažeidimo slenkstis dielektrinėse TiO_2 dangose šuoliškai sumažėja nuo dviejų iki keturių kartų dėl daugiafotonės sugerties, kai tolydžiai keičiamas femtosekundinių (130 fs ir 1 kHz) impulsų bangos ilgis pereina iš spektro srities, atitinkančios trifotonę sugertį, į sritį, atitinkančią dvifotonę sugertį.
4. Eksperimentiškai nustatyta, kad tiek elektronpluoščiu nusodinimu, tiek ir elektronpluoščiu nusodinimu su jonų tankinimu, užgarintos didelio atspindžio koeficiento ZrO_2/SiO_2 dangos pasižymi ne mažiau kaip du kartus didesniu paviršiaus šiukštumu negu padėklų, todėl standartinių padėklų šiurkštumas, neviršijantis 0,64 nm, nedaro didelės įtakos šių dangų optiniam atsparumui esant pasikartojantiems femtosekundiniams (800 nm, 130 fs ir 1 kHz) impulsams.
5. Eksperimentiniais tyrimais nustatyta, kad iš ketvirčio bangos ilgio optinio storio ZrO_2 ir SiO_2 dielektrinių periodinių sluoksnių, pagamintų didelio atspindžio koeficiento, dangų pažeidimo slenksčiai pasikartojantiems femtosekundiniams (800 nm, 130 fs ir 1 kHz) impulsams yra artimi tiek dangoms, pagamintoms naudojant elektronpluoštį nusodinimą, tiek elektronpluoštį nusodinimą su jonų tankinimu, kai tankinančių argono jonų kinetinė energija yra ~ 150 eV.
6. Eksperimentiškai nustatyta, jog modifikuojant dielektrinių dangos sluoksnių storius įmanoma stovinčiųjų elektromagnetinių bangų pūpsnius „nustumti“ į mažesnio lūžio rodiklio medžiagą tenkinant didelio atspindžio koeficiento sąlygą, todėl iki $\sim 78\%$ padidėja šių dangų optinis atsparumas femtosekundinei (800 nm, 130 fs ir 46 fs, 1 kHz) spinduliotei. Dėl gilesnio lauko įsiskverbimo į dangą lazeriu indukuotų pažeidimų krateriai būna statesniais kraštais.

Literatūros sąrašas

1. Theodore Maiman, *Stimulated optical radiation in ruby*. Nature **187**, p. 493-494 (1960)
2. P. D. Maker, R. W. Terhune, and C. M. Savage, *Optical third harmonic generation in Third International Symposium on Quantum Electronics*. Grivetand N. Bloembergen Editor, p. 1559-1576 (1964)
3. B.N. Chichkov, C. Momma, S. Nolte, F. von Alvensleben, and A. Tünnermann, *Femtosecond, picosecond and nanosecond laser ablation of solids*. Applied Physics A: Materials Science & Processing **63**, p. 109-115 (1996)
4. *11254-1: Lasers and laser-related equipment - Determination of laser-induced damage threshold of optical surfaces - Part 1: 1-on-1 test*, ISO, (2000)
5. *11254-2: Lasers and laser-related equipment - Determination of laser-induced damage threshold of optical surfaces - Part 2: S-on-1 test*, ISO, (2001)
6. Barry R. Masters, *Ernst Abbe and the Foundation of Scientific Microscopes*. Optics and Photonics News (2007)
7. Chris Brandmaier, Kenneth R. Spring, and Michael W. Davidson. *Reflected Light DIC Microscopy*. (Visited: 2008-08-31) Available from: <http://www.microscopyu.com/articles/dic/reflecteddic.html>.
8. Jonathan W. Arenberg, *Revised damage frequency method for the determination of laser damage threshold*. in *Laser-Induced Damage in Optical Materials: 1993* E. Bennett Harold, L. Chase Lloyd, H. Guenther Arthur, E. Newnam Brian, and M. J. Soileau, Editors, Proc. of SPIE **2114**, p. 521-526, (1994)
9. S.C. Seitel, A. Giesen, and J. Becker, *International Standard Test Method for Laser Induced Damage of Optical Surfaces*. in *Laser Induced Damage in Optical Materials: 1992*. Harold E. Bennet, Lloyd L. Chase, Arthur H. Guenther, and M.J. Soileau, Editors, Proc. of SPIE **1848**, p. (1993)
10. J. O. Porteus and Steven C. Seitel, *Absolute onset of optical surface damage using distributed defect ensembles*. Applied Optics **23**(21), p. 3796 (1984)
11. K. L. Lewis, Smith G. W, and and A. J. Pidduc, *Nodular defects in sputtered coatings*. in *Laser-Induced Damage in Optical Materials: 1996*. G. J. Exarhos, A. H. Guenther, N. Kaiser, K. L. Lewis, M. J. Soileau, C. J. Stolz, A. Giesen, and H. Weber, Editors, Proc. of SPIE **4932**, p. 26-34, (1996)
12. L. Gallais, H. Krol, J. Y. Natoli, M. Commandré, M. Cathelinaud, L. Roussel, M. Lequime, and C. Amra, *Laser damage resistance of silica thin films deposited by Electron Beam Deposition, Ion Assisted Deposition, Reactive Low Voltage Ion Plating and Dual Ion Beam Sputtering*. Thin Solid Films **515**(7-8), p. 3830-3836 (2007)
13. N. Bloembergen, *Role of cracks, pores, and absorbing inclusions on laser induced damage threshold at surface of transparent dielectrics*. Applied Optics **12**(4), p. 661 (1973)
14. M. A. Villegas, M. A. García, J. Llopis, and J. M. Fernández Navarro, *Optical Spectroscopy of Hybrid Sol-Gel Coatings Doped with Noble Metals*. Journal of Sol-Gel Science and Technology **11**(3), p. 251-265 (1998)
15. Michael Duncan, Mark Bashkansky, and John Reintjes, *Subsurface defect detection in materials using optical coherence tomography*. Optics Express **2**(13), p. 540-545 (1998)
16. H. Krol, L. Gallais, C. Grèzes-Besset, J. Y. Natoli, and M. Commandré, *Investigation of nanoprecursors threshold distribution in laser-damage testing*. Optics Communications **256**(1-3), p. 184-189 (2005)
17. M. Reichling, A. Bodemann, and N. Kaiser, *Defect induced laser damage in oxide multilayer coatings for 248 nm*. Thin Solid Films **320**(2), p. 264-279 (1998)
18. Annelise During, Caroline Fossati, and Mireille Commandré, *Photothermal deflection microscopy for imaging sub-micronic defects in optical materials*. Optics Communications **230**(4-6), p. 279-286 (2004)
19. B. Bertussi, J. Y. Natoli, M. Commandre, J. L. Rullier, F. Bonneau, P. Combis, and P. Bouchut, *Photothermal investigation of the laser-induced modification of a single gold nano-particle in a silica film*. Optics Communications **254**(4-6), p. 299-309 (2005)

20. Zhouling Wu, Christopher J. Stolz, Shannon C. Weakley, James D. Hughes, and Qiang Zhao, *Damage threshold prediction of hafnia-silica multilayer coatings by nondestructive evaluation of fluence-limiting defects*. Applied Optics **40**(12), p. 1897-1906 (2001)
21. Jean-Yves Natoli, Laurent Gallais, Hassan Akhouayri, and Claude Amra, *Laser-induced Damage of Materials in Bulk, Thin-film, and Liquid forms*. Applied Optics **41**(16), p. 3156-3166 (2002)
22. A. Vogel and V. Venugopalan, *Mechanisms of pulsed laser ablation of biological tissues*. Chemical Reviews **103**(2), p. 577-644 (2003)
23. Chris B. Schaffer, André Brodeur, and Eric Mazur, *Laser-induced breakdown and damage in bulk transparent materials induced by tightly focused femtosecond laser pulses*. Measurement Science and Technology **12**, p. 1784 (2001)
24. Kai Starke, *Übertragung von Standardmessverfahren zur Charakterisierung optischer Beschichtungen in den Bereich ultrakurzer Laserpulse*, PhD thesis, Universität Hannover, (2004)
25. L. V. Keldysh, *Ionization in the field of a strong electromagnetic wave*. JETP **47**, p. 1945-57 (1964)
26. S.S. Mao, F. Quere, S. Guizard, X. Mao, R.E. Russo, G. Petite, and P. Martin, *Dynamics of femtosecond laser interactions with dielectrics*. Applied Physics A: Materials Science & Processing **79**, p. 1695-1709 (2004)
27. B. C. Stuart, M. D. Feit, S. Herman, A. M. Rubenchik, B. W. Shore, and M. D. Perry, *Nanosecond-to-femtosecond laser-induced breakdown in dielectrics*. Physical Review B **53**(4), p. 1749 (1996)
28. M. Jupé, M. Lappschies, L. Jensen, K. Starke, D. Ristau, A. Melninkaitis, V. Sirutkaitis, I. Cravetchi, and W. Rudolph, *Mixed oxide coatings for advanced fs-laser applications*. J. Exarhos Gregory, H. Guenther Arthur, L. Lewis Keith, Ristau Detlev, M. J. Soileau, and J. Stolz Christopher, Editors, Proc. of SPIE **6720**, p. 67200U, (2007)
29. Robert Chow, Steve Falabella, Gary E. Loomis, Frank Rainer, Christopher J. Stolz, and Mark R. Kozlowski, *Reactive evaporation of low-defect density hafnia*. Applied Optics **32**(28), p. 5567 (1993)
30. R. Crase, *The Effects of Polishing Materials on the Laser Damage Threshold of Optical Coatings*. in *Laser-Induced Damage in Optical Materials : 1990*. H. E. Bennett, L. L. Chase, A. H. Guenther, B. E. Newnam, and M. J. Soileau, Editors, Proc. of SPIE, **1441**, p. 381-389, (1991)
31. Norbert Kaiser and Hans K. Pulker, *Optical interference coatings*. Springer Series in Optical Sciences. 2003, Berlin. 504.
32. John A. Thornton, *Influence of Apparatus Geometry and Deposition Conditions on the Structure and Topography of Thick Sputtered Coatings*. Journal of Vacuum Science & Technology **11**(4), p. 666-670 (1974)
33. Marcelo Viana, Tarik Mohallem, Gabriel Nascimento, and Nelcy Mohallem, *Nanocrystalline Titanium Oxide thin Films Prepared by Sol-Gel Process*. Brazilian Journal of Physics **36**(3B), p. 1081-1083 (2006)
34. Weidong Gao, Meiqiong Zhan, Shuhai Fan, Janda Shao, and Zheng-Xiu Fan, *Laser-induced damage of Ta₂O₅/SiO₂ narrow-band interference filters under different 1064 nm Nd:YAG laser modes*. Applied Surface Science **250**(1-4), p. 195-202 (2005)
35. Joseph Lowry, Marshall Thomsen, Ernest R. Behringer, and Zhouling Wu, *Layer Thickness Fluctuations in Optical Coatings with Non-Quarter-Wave Design*. Applied Optics **38**(10), p. 2083-2085 (1999)
36. M. Mero, J. Liu, W. Rudolph, D. Ristau, and K. Starke, *Scaling laws of femtosecond laser pulse induced breakdown in oxide films*. Physical Review B **71**(11), p. 115109 (2005)
37. Mark Mero, Benjamin Clapp, Jayesh C. Jasapara, Wolfgang Rudolph, Detlev Ristau, Kai Starke, Jörg Krüger, Sven Martin, and Wolfgang Kautek, *On the damage behavior of dielectric films when illuminated with multiple femtosecond laser pulses*. Optical Engineering **44**(5), p. 051107-1 - 051107-7 (2005)
38. F. Demichelis, E. Mezzetti-Minetti, L. Tallone, and E. Tresso, *Optimization of optical parameters and electric field distribution in multilayers*. Applied Optics **23**(1), p. 165 (1984)

39. Carl M. Liebig and W. M. Dennis, *Simulation of interactions of high-intensity ultrashort pulses with dielectric filters*. Optical Engineering **46**(2), p. 023801 (2007)

Summary

OPTICAL RESISTANCE OF DIELECTRIC COATINGS TO MULTI-PULSE FEMTOSECOND LASER RADIATION

The present Ph.D. thesis is the experimental and theoretical analysis of damage processes in thin film dielectric coatings induced by the femtosecond laser pulses. Experimental investigations were performed by automated metrological facility designed for *S-on-1* laser-induced damage threshold measurements. Femtosecond repetitive pulses (1 kHz) either at fixed 800 nm and 400 nm wavelengths or continuously tunable in 590 nm to 750 nm spectral range were used for measurements. The sensitivity of assembled metrological facility was sufficient for the determination of various deposition factors (process parameters and coating materials) on LIDT of optical coatings. During our experimental investigations on multi-layer ZrO_2/SiO_2 , HfO_2/SiO_2 , Ta_2O_5/SiO_2 , TiO_2/SiO_2 high reflection coatings and single-layer TiO_2 several important results were obtained. This allows us to conclude: stepwise transition of LIDT values was experimentally observed in range where two-photon absorption changes to three-photon absorption. It confirms that multiphoton absorption is one of the main damage mechanisms in femtosecond range. The multilayer coatings deposited by IAD and e-beam techniques on substrates having roughness of 0.64 nm or smaller showed similar LIDT values. Moreover, it was also confirmed that suppressing of standing wave electric field intensity at the outer layers of high refractive index improves the optical resistance of high reflectivity coatings also for femtosecond pulses. Furthermore, the model of the pseudo-accumulation effect is introduced for optical surfaces containing absorbing defects. The results of *Monte Carlo* simulations show that pulse-to-pulse fluctuations of laser beam propagation direction, energy or even mechanical vibrations in the optical systems produce apparently accumulative damage statistics. The exposed area increases shot-by-shot, thus increasing the *S-on-1* probability of damage.

Trumpos žinios apie doktorantą

Vardas: Andrius

Pavardė: Melninkaitis

Gimimo data: 1980 05 23

Gimimo vieta: Jurbarkas

El. paštas: Andrius.Melninkaitis@ff.vu.lt

Telefono nr.: +37068484671

Išsilavinimas:

1986–1998 Jurbarko A. Giedraičio Giedriaus gimnazija

1998–2002 Vilniaus universitetas, Fizikos fakultetas, *Bakalauro kvalifikacinis laipsnis.*

2002–2003 Hanoverio universitetas, Fizikos fakultetas, *Magistro studijos (pagal Erasmus apsiikeitimo programa).*

2002–2004 Vilniaus universitetas, Fizikos fakultetas, *Magistro kvalifikacinis laipsnis (Magna cum laude diplomas).*

2004–2008 Vilniaus universitetas, Fizikos fakultetas, Kvantinės elektronikos katedra ir Lazerinių tyrimų centras. *Doktorantūra.*

Mokslinio darbo patirtis:

2000–2003 Laborantas, Vilniaus universiteto Lazerinių tyrimų centras.

2003–2004 Jaunesnysis mokslo darbuotojas, Hanoverio lazerių centras.

2004–2009 Jaunesnysis mokslo darbuotojas, Vilniaus universiteto Lazerinių tyrimų centras.

Curriculum Vitae

Name: Andrius

Surname: Melninkaitis

Date of birth: 1980 05 23

Place of birth: Jurbarkas

E-mail: Andrius.Melninkaitis@ff.vu.lt

Phone: +37068484671

Education:

1986–1998 A. Giedraičio Giedriaus Gymnasium in Jurbarkas.

1998–2002 Vilnius University, Faculty of Physics. (*Bachelor degree*)

2002–2003 University of Hannover, Faculty of Physics.
(*Master studies according to Erasmus exchange program*)

2002–2004 Vilnius University, Faculty of Physics. (*Master degree: Magna cum laude*).

2004–2008 Vilnius University, Faculty of Physics, Department of Quantum Electronics and Laser Research Center. (*Ph.D. studies*).

Professional experience:

2000–2003 Laboratory assistant at Vilnius University Laser Research Center.

2003–2004 Junior research assistant (HiWi) at Laser Zentrum Hannover e.V.

2004–2009 Junior research fellow at Vilnius University Laser Research Center.