

Vilniaus universiteto  
Fizikos fakulteto  
Lazerinių tyrimų centras

Rūta Pakalnytė

PAŽAIDOS LAZERIO SPINDULIUOTEI SLENKSČIO MATAVIMAI:  
TESTAVIMO PROTOKOLŲ IR IMPULSŲ FORMOS ĮTAKOS TYRIMAI

Magistrantūros studijų baigiamasis darbas

Lazerinės fizikos ir optinių technologijų  
studijų programa

Studentas

Rūta Pakalnytė

Leista ginti

2020-06-02

Darbo vadovas

doc. dr. Andrius Melninkaitis

Lazerinių tyrimų centro direktorius

doc. dr. Aidas Matijošius

Vilnius 2020

## Turinys

Įvadas .....	4
1. Pažaidos lazerio spinduliuotei slenkstis (PLSS).....	6
2. Medžiagos ir lazerio spinduliuotės sąveika .....	6
3. Nanosekundinės trukmės impulsais sukelta pažaida dielektrikuose.....	7
3.1 Griūtinis pramušimas.....	7
3.2 Terminė pažaida .....	8
3.3 Defektais inicijuojama pažaida.....	8
4. Laikinės impulso formos (gaubtinės) įtaka pažaidai .....	10
5. PLSS testavimo protokolai .....	11
5.1 Vieno impulso vietai testas (1-į-1) .....	12
5.2 Daugelio impulsų vietai testas (S-į-1) .....	13
5.3 Pakopinis testas (R-į-1) .....	15
5.4 Rastrinio skenavimo testas .....	16
6. Eksperimentų metodika .....	19
6.1 Bandiniai.....	19
6.2 Dangų sluoksniams dengti panaudotų medžiagų apžvalga .....	20
6.2.1 Tantalo pentoksidas .....	20
6.2.2 Aliuminio oksidas (safyras) .....	21
6.2.3 Hafnio oksidas .....	21
6.2.3 Silicio dioksidas (kvarcas arba lydytas kvarcas) .....	21
6.3 Dengimo technologijos.....	22
6.3.1 Jonapluoštis dulkinimas – IBS.....	22
6.3.2. Elektronų pluošto garinimas su plazminiu tankinimu (EBE + PAD).....	23
6.4 Bandinių paruošimas, eksponavimas ir analizavimas .....	23
6.5 PLSS matavimo lazerinė sistema .....	24
7. Pagrindiniai rezultatai ir jų aptarimas .....	26
7.1 Testavimo protokolų, lazerinio impulso formų ir bangos ilgio įtaka PLSS įverčiams	26
7.1.1 PLSS protokolų tyrimas optiniuose elementuose su veidrodine danga.....	28
7.1.2 Skaidrinančių dangų tyrimai skirtingais PLSS protokolais .....	35
7.1.3 Protokolų tyrimas: nedengtų optinių elementų atvejis.....	36
7.2 Pažaidos morfologijos .....	37
Pagrindiniai rezultatai ir išvados .....	40
Literatūros sąrašas .....	42

Santrauka.....	45
Summary .....	46
Priedai.....	47
Priedas A.....	47
Priedas B.....	53

## Įvadas

1960 metais Teodorui Maimanui pademonstravus pirmąjį lazerį [1], ilgai neužtruko, kol 1963 metais Paulas D. Makeris su savo kolegomis lazerininkų bendruomenei pranešė apie pirmąją lazerio spinduliuote indukuotą pažaidą. Tai sukėlė didelį susidomėjimą, kadangi jokia lazerinė sistema negalėjo efektyviai veikti be pakankamai atsparių optinių elementų. Prasidėjo aktyvūs pažaidos lazerio spinduliuotei slenksčių (toliau PLSS) tyrimai. Neilgai trukus buvo susidurta su kita problema – skirtingose laboratorijose išmatuotos vienodų optinių elementų slenkstinės lazerio energijos įtėkio vertės nesutapo. Dėl efektyvesnio technologijų vystymo tai reikėjo kuo greičiau išspręsti. Ši problema buvo aptarta 1969 metais vykusiame pirmajame Boulderio Pažaidų simpoziume. Tačiau tik po daugiau nei dviejų dešimtmečių, 1990 metais išleistas tarptautinis pažaidos lazerio spinduliuotei slenksčio testavimo standartas ISO 11254 [2].

Nuo to laiko mokslininkai tiria įvairias PLSS priklausomybes: lazerio parametrų, aplinkos ar elementų gamybos veiksnių efektus. Buvo pastebėta, kad vienas iš veiksnių, darančių didelę įtaką slenkstinei vertei yra laikinė impulso forma [3], [4]. Taigi, norint išgauti PLSS vertės atkartojamumą skirtingose laboratorijose, testavimams atlikti patogiu naudoti vienmodį lazerio veikos režimą, taip išvengiant neigiamos modų interferencijos pasekmių tiek erdvėje, tiek laike. Tačiau, praktikoje dažnai naudojami ir daugiamodžiai lazeriai, tad vienmodžiais lazeriais išmatuotos PLSS vertės nebūtinai atspindi tikrąją situaciją praktinių taikymų požiūriu. Kitaip tariant, yra svarbu žinoti ir įvertinti kaip vienmodė ir daugiamodė impulso forma paveikia PLSS įvertį. Kitas svarbus kintamasis vertinant PLSS yra testavimo protokolo aspektas: testavimui gali būti naudojami įvairūs ekspozicijos algoritmai ir jie gali turėti nevienodą fizikinę prasmę [5].

Taigi, šio darbo tikslas yra ištirti testavimo protokolo, lazerinio impulso formos ir bangos ilgio įtaką standartinių dielektrinių veidrodžių, komercinių lydyto kvarco pagrindukų ir skaidrinančių dangų PLSS įverčiams.

Darbo tikslui pasiekti buvo iškelti šie uždaviniai:

- Įsisavinti PLSS matavimo metodiką, taikant skirtingus testavimo protokolus;
- Atlikti 48 testus su skirtingų tipų bandiniais, palyginti jų slenkstines vertes ir suprasti protokolo įtaką gautųjų rezultatų įverčiams;

- Apibendrinti gautuosius PLSS rezultatus skirtingiems bangos ilgiams ir laikinėms formoms, naudojant įvairius matavimų protokolus ant optinių elementų su atspindinčia ir skaidrinančia danga, bei išvis nedengtų kvarcinių pagrindukų.

# 1. Pažaidos lazerio spinduliuotei slenkstis (PLSS)

Lazerinė spinduliuotė – tai fotonų srautas, kurį sufokusavus į labai mažų skersinių matmenų pluoštą, gali būti pasiekiamas itin didelis optinis intensyvumas. Prie tam tikro energijos kiekio trumpų (ns) ar ultratrumpų (fs) lazerinių impulsų sufokusuotos spinduliuotės sąveika su optinį elementą sudarančiomis medžiagomis pažeidžia optinį paviršių – pažeistoje vietoje pakinta elemento atspindžio, pralaidumo, sugerties ir sklaidos koeficientai. Kiekybinis dydis, apibūdinantis elemento optinį atsparumą yra vadinamas pažaidos lazerio spinduliuotei slenkščiu (PLSS). PLSS matavimai yra atliekami įvairiose laboratorijose, tačiau keletas mokslinių darbų parodė, jog skirtingose laboratorijose gauti PLSS įverčiai nesutampa, kadangi jie gali priklausyti ir nuo kai kurių ne visada kontroliuojamų eksponavimo parametrų – lazerio bangos ilgio [6], pluošto diametro [7], impulso trukmės [8]–[10], pasikartojimo dažnio; medžiagos charakteristikų – draustinės juostos pločio, terminių bei mechaninių savybių; aplinkos sąlygų – oras / vakuumas [11], švaros lygio, temperatūros [12], drėgmės; elemento projektavimo ir gamybos ypatumų [13]. ISO standartas PLSS apibrėžia kaip didžiausią lazerinės spinduliuotės įtekį, krintantį į optinį elementą, kuriam ekstrapoliuota pažaidos tikimybė yra lygi nuliui [2]. Šiame darbe spinduliuotės kiekiu bus laikomas energijos įtekis – lazerinės spinduliuotės energija, tenkanti į efektyviojo ploto vienetą ( $J/cm^2$ ).

## 2. Medžiagos ir lazerio spinduliuotės sąveika

Lazerine spinduliuote sukeliama pažaida pagal savo priežastingumą gali būti įvairių rūšių. Pavyzdžiui, vienu optinių elementų lazerinė pažaida yra terminių reiškinių pasekmė, o kitų – atsiranda dėl įvairių dangos defektų, užgimusių gamybos proceso ar poliravimo metu [13].

Visų medžiagų, išskyrus labiausiai skaidrias, tokias kaip lydytas kvarcas - silicio dioksidas, kvarcas, deimantas ar safyras, lazerinės kilmės pažaidos kyla dėl terminių reiškinių, kai impulso trukmė yra pakankamai ilga, t.y. nuo  $10^{-8}$  s iki pastovios veikos. Tokios pažaidos pavyzdžiais gali būti lydymasis, aižėjimas, garavimas ir virimas, kurie palieka savo lengvai pastebimus pėdsakus po pažaidos. Čia išvardinti pažaidos mechanizmai gali dominuoti užgoždami vienas kitą priklausomai nuo lazerio impulsų trukmės – nuo pastovios veikos iki  $10^{-6}$  s, didžiausia pasiekiamą temperatūra sąlygoja pažaidą, o kai impulso trukmė yra mažesnė nei  $10^{-6}$  s, dominuoja elektroniniai procesai, kurių poveikis medžiagai yra valdomas fokusuoto pluošto diametru, bangos ilgiu ir medžiagos draustine juosta [14].

Kai lazerinė spinduliuotė krenta į skaidrios medžiagos paviršių, ji yra sugerama cilindro formos tūryje pluošto sklidimo kryptimi. Jei medžiaga pusiau skaidri, forma pasikeičia į nupjauto kūgio. Tačiau bet kokia spinduliuotės sugertis medžiagoje sukelia temperatūros kilimą ties šio cilindro ašimi bei radialinę deformaciją tarp sąveikos ašies ir krašto. Terminis PLSS gali būti apibrėžiamas kaip taškas, kur pluošto centre medžiaga pradeda lydėtis arba aižėti. Tačiau kylant temperatūrai, šilumos plitimas ir radialinis įtempis priklauso ne tik nuo medžiagos savybių ir sugerto šilumos kiekio, bet ir nuo pluošto bei komponento diametrų, impulso trukmės.

Skaidrių medžiagų terminis pažaidos slenkstis yra toks aukštas, kad šį mechanizmą dažniausiai ekranuoja kitokio pobūdžio pažaidos [14]:

- dielektrinis pramušimas, kai impulso trukmė  $\sim 10^{-8} - 10^{-10}$  s;
- griūtinė jonizacija, kai impulso trukmė  $\sim 10^{-10} - 10^{-13}$  s;
- daugiafotonė sugertis, kai impulso trukmė mažesnė negu  $\sim 10^{-13}$  s.

### **3. Nanosekundinės trukmės impulsais sukelta pažaida dielektrikuose**

Šiame darbe aptariamas eksperimentas atliktas su nanosekundiniais ( $\sim 10^{-9}$  s) impulsais, todėl svarbu suprasti jų sąveiką su medžiaga.

#### **3.1 Griūtinis pramušimas**

Kai dielektrikas yra veikiamas elektriniu lauku, egzistuoja tam tikra kritinė elektrinio lauko stiprio riba, kurią peržengus dielektrikas elektriškai suardomas ir pradeda veikti kaip laidininkas. Kitaip tariant dielektrinis pramušamas kietose medžiagose. Šis pažaidos reiškinys stebimas todėl, kad pavieniai laisvieji krūvininkai yra įgreitinami itin stipriame elektriniame lauke ir dėl daugybinių susidūrimų su gardelės atomais išmuša vis naujus surištuosius elektronus iš ten esančių atomų, kurie savo ruožtu irgi įgreitinami ir išmuša vis naujus antrinius elektronus. Šis procesas vadinamas – griūtinė jonizacija. Kaip žinia, dielektrikai turi visiškai užpildytą valentinę juostą ir platų energijų tarpą ( $> 5$  eV) tarp valentinės ir laidumo juostos. Kai dielektrikas yra patalpinamas į stiprų elektrinį lauką, atomo aplinkoje esantis potencialinis barjeras deformuojamas, elektronai įgyja energijos tiek, kad gali tuneliuoti į laidumo juostą. Tokiu būdu išsilaisvinę elektronai įgreitinami elektrinio lauko dėl susidūrimų sužadina vis

daugiau elektronų. Taigi, vis daugiau ir daugiau elektronų atsiduria laidumo juostoje – prasideda laidžių elektronų masinė generacija – griūtis. Medžiaga tampa laidu ir karšta [15].

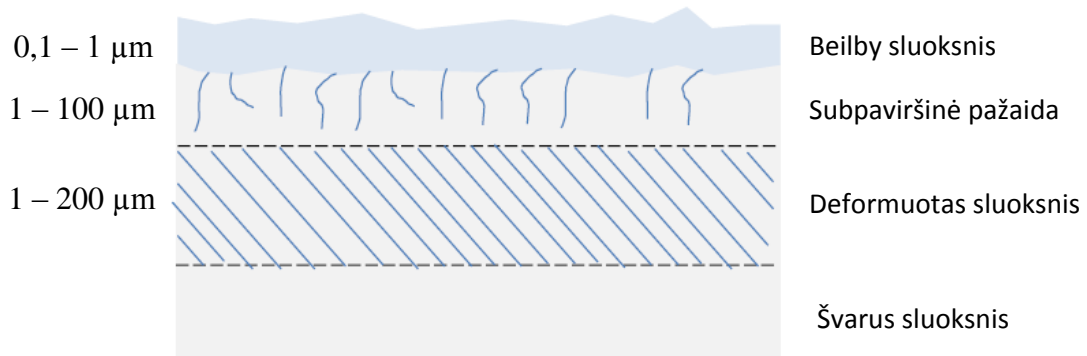
### **3.2 Terminė pažaida**

Nanosekundinių impulsų srityje pažaida gali pasireikšti ir dėl šiluminės energijos kaupimo medžiagos tūryje. Kai krintantis lazerio pluoštas įgreitina elektronus, esančius laidumo juostoje, jie nuolat susiduria su gardele. Tokiu būdu elektronų sukaupta kinetinė energija yra perduodama medžiagos gardelei ir išsklaidoma kaip šiluma. Kadangi dielektrikai pasižymi mažu terminiu laidumu, šiluma kaupiama lokaliai. Pažaida įvyksta, kai absorbuota šiluma viršija kritinę lydymosi, virimo ar skilimo temperatūrą. Toks pažeidimas vadinamas termine pažaida [15].

### **3.3 Defektais inicijuojama pažaida**

Optiniai elementai, naudojami lazeriams, yra netobuli. Netgi „super poliruoti“ stiklo paviršiai slepia tūkstančius defektų, kurie gali būti sporadiškai pasiskirstę tiek paviršiuje, tiek po juo. Defektai - tai įvairūs mechaniniai nevienalytiškumai, pvz., įtrūkimai, įbrėžimai ar priemaišos, dėl kurių optinis elementas gali būti greičiau pažeistas arba su daug mažesniu energijos įtėkiu nei gryna medžiaga [13]. Dauguma defektų susidaro optinių elementų gamybos procesuose, tokiuose kaip šlifavimas, poliravimas, valymas ar dengimas. Pažeistas sluoksnis gali būti netgi kelių šimtų mikronų storio po paviršiumi, jei pvz. paviršiaus apdirbimui naudojamos stambios abrazyvinės medžiagos. Šlifavimo metu naudojamų abrazyvinių dalelių dydis yra apie 10  $\mu\text{m}$ , kurios yra priežastis pačių giliausių defektų. Poliravimas dažniausiai atliekamas mechaniniu – cheminiu būdu, o poliravimo metu suspensijos abrazyvinės dalelės siekia tik iki 3  $\mu\text{m}$ , todėl paviršiniai defektai yra tarsi paslepami po „poliravimo“ sluoksniu, kuris dar vadinamas Beilby sluoksniu, jį atradusio mokslininko garbei [16]. Beilby sluoksnis atsiranda dėl šlyties deformacijų ir cheminės reakcijos tarp poliruojamo stiklo ir poliravimo suspensijos (1 pav.). Kiekvienas paviršiaus ir po paviršinis defektas kelia didelę riziką optinio atsparumo prasme, nes defekto aplinkoje galimai pablogėja mechaninis atsparumas ir padidėja šviesos sugerties parametrai.



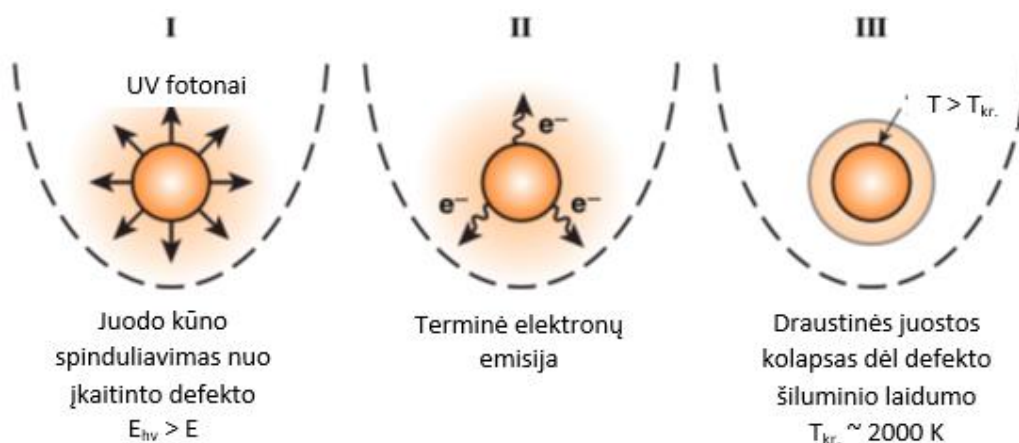


1 pav. Poliruoto paviršiaus sluoksninė struktūra [17].

Taigi, šio tipo lokalizuotos pažaidos būtent ir vyksta dielektrikuose, kuriuose yra tokių defektų. S. Papernov tyrimai [14] parodė, kad vienas defektas dėl savo riboto diametro net ir sugerdamas visą jo skerspjūviui tenkančią impulso energijos dalį niekada negalėtų sukelti katastrofinės pažaidos. Vadinas defekto tūris turi didėti veikiant defektą spinduliuote. Kitais žodžiais tariant – lazeriu kaitinamas defektas „padega“ aplinkui esančią medžiagą – paversdamas ją neskaidria. Buvo iškeltos trys galimos fizikinių mechanizmų hipotezės (2 pav.):

- I: defektas dėl didelės temperatūros skleidžia juodam kūnui būdingą spinduliuotę, kurios maksimumas yra UV srityje. Antrinė UV spinduliuotė jonizuoja stiklą, kuriame yra defektas;
- II: įkaitinta medžiaga dėl termo-joninės emisijos ir foto efekto išlaisvina laisvuosius elektronus, taip paversdama aplinkui esančią terpę metališka terpe, kuriai būdinga didelė sugertis;
- III: įkaitęs defektas sušildo aplinkui esančią terpę iki lydymosi temperatūros taip „sugriaunant“ šios terpės draustinę juostą ir paverčiant medžiagą neskaidria.

Taigi dėl tokiuose defektuose vykstančių reiškinų lokalus PLSS yra žemesnis nei grynos neturinčios defektų medžiagos PLSS.

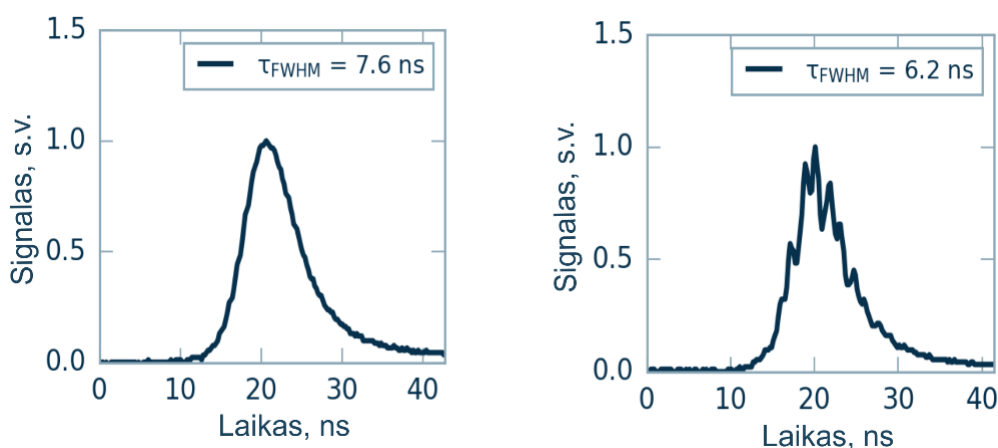


2 pav. Skirtingi pažaidos mechanizmai defektuose [14].

## 4. Laikinės impulso formos (gaubtinės) įtaka pažaidai

Pažaidos lazerio spinduliuotei slenksčio vertei reikšmingą įtaką turi laikinė impulso forma [3], [4]. Atsižvelgiant į lazerinės sistemos schemą ir kaupinimo metodą, galima sugeneruoti skirtingo laikinio intensyvumo impulsų formas. Tokiems nanosekundiniams impulsams generuoti dažniausiai yra naudojami moduluotos kokybės lazeriai.

Pagrindinį vaidmenį čia atlieka lazerio aktyviaja terpe nulemtas stiprinimo juostos spektrinis plotis bei pačio rezonatoriaus ilgis, lemiantis atstumą tarp išilginių rezonatoriaus modų. Jei turime aktyvųjį elementą su siauru energijos juostų tarpu ir trumpu rezonatoriumi, bus generuojama viena išilginė moda, kurios intensyvumas laike yra labai tolydus (3 pav. kairėje).

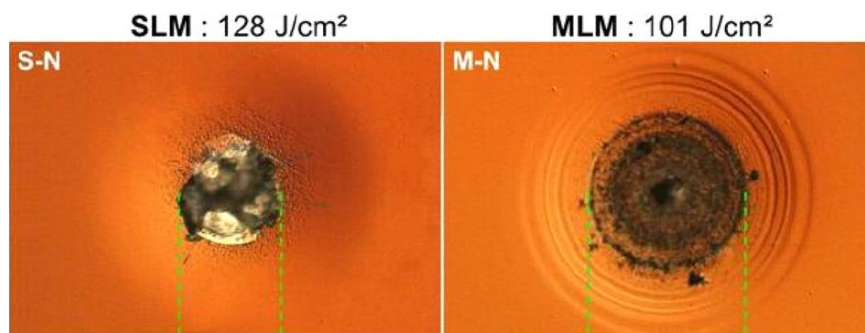


3 pav. Vienmodžio (kairėje) ir daugiamodžio (dešinėje) impulsų formos laike.

Tam tikrais atvejais vienmodė spinduliuotė gali būti naudojama kaip užkratas kitoms stiprinimo pakopoms; pvz.: naudojant išorinius lazerinius osciliatorius (nuolatinės veikos – angl. *continuous wave* arba *CW* režimas), spinduliuotė gali būti injektuojama į moduluotos kokybės lazerį, kur yra sustiprinama papildomai. Tada kiti rezonatoriaus bangos ilgiai yra slopinami dėl to, kad stiprus užkratas „pasiima“ visą aktyviosios terpės kaupinimo energiją. Tačiau ilgesniuose rezonatoriuose (be užkrato) daug lazerinių modų yra sugeneruojamos iš triukšmo ir stiprinamos. Jos konkuruoja dėl sukauptos aktyviosios terpės energijos, vyksta vadinamasis modų „plakimasis“. Tai nėra atsikartojantis reiškinys tarp impulsų. Kiekviena išilginė moda turi šiek tiek kitokią bangos ilgį, fazę ir amplitudę, todėl modams persiklojus laike, jos interferuoja tarpusavyje, taip pagamindamos stipriai laike moduluoto intensyvumo impulsą (3 pav. dešinėje). Tokie impulsai susideda iš daugelio periodinių smailių. Šių impulsų sąveika

su medžiaga yra kitokia nei vienmodžių, o sinchronizavus visas išilgines modas laike, galime sugeneruoti labai trumpą (fs) aukšto intensyvumo impulsą.

Prancūzijos mokslininkai [18], [19], pastebėjo reikšmingų skirtumų tarp vienos ir daugelio išilginių impulsų sukeltos pažaidos morfologijų (4 pav.). Vienos išilginės modos atveju defektai inicijuota pažaida yra apvalaus kraterio formos, tuo tarpu daugeliu išilginių modų (moduliuotos kokybės lazeriuose) pasižymintis impulsas sukuria žiedus aplink kraterį. Pastaruoju atveju impulso gaubtinės forma nėra glotni – ji sudaryta iš daugybinių atsitiktinių sub-impulsų. Koncentrinių žiedų kilmę tyrėjai susiejo su tuo, kad impulso pradžioje esantis sub-impulsas sukelia pažaidą ir jos pasekoje susiformavusį, besiplečiantį plazmos burbulą, kuris plečiasi km/s greičiu, taigi kiekvienas vis vėliau medžiagą pasiekiantis sub-impulsas „mato“ vis labiau išsiplėtusį plazmos vainiką. Kiekvienas energijos pliūpsnis sąveikauja su plazma skirtingais laiko momentais taip formuodamas vis naują „rievę“ aplink pagrindinį kraterį. Nepaisant to, kad tokie morfologijų skirtumai buvo stebėti, impulso gaubtinės formos įtaka pažaidos slenksčiui jų darbe nebuvo išsamiai ištirta.



4 pav. Skirtingos formos gaubtinės impulsais sukelta pažaidos morfologija dielektriko paviršiuje [18], [19]: kairėje vienos išilginės modos (SLM) impulsu sukelta pažaida, dešinėje – daugelio išilginių modų (MLM) lazeriu sukelta pažaidos morfologija.

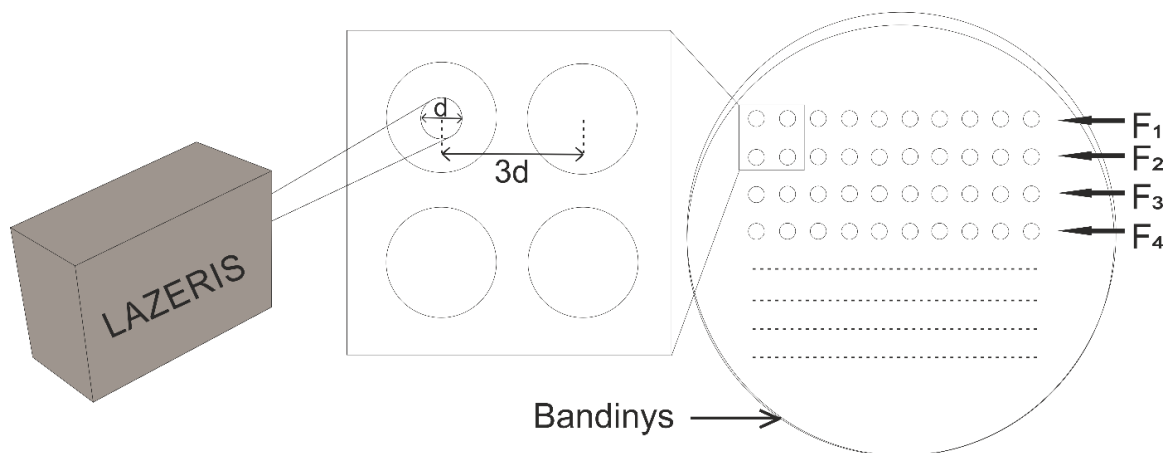
## 5. PLSS testavimo protokolai

Norint sužinoti PLSS, bandinio eksponavimas lazerio impulsais yra atliekamas pagal skirtingus testavimo protokolus. Įvertinus bandinio dydį, matavimo tikslą, būsimas optinio elemento naudojimo sąlygas ir kitus svarbius veiksnius yra pasirenkamas testavimo protokolai. Šiame skyrelyje bus aptarti keturi pagrindiniai PLSS matavimo protokolai: 1-į-1, S-į-1, R-į-1 ir rastrinis skenavimas.

## 5.1 Vieno impulso vietai testas (1-į-1)

Vieno impulso vietai testas, dar kitaip žinomas kaip 1-į-1 testas, yra testavimo procedūra. Jos metu bandinio paviršius virtualiai suskirstomas į testavimo celes, kurios eksponuojamos tam tikro pasirinkto smailinio energijos įtėkio spinduliuote. Kiekvieną kartą ekspozicija lazeriniu impulsu nukreipiama į vis naują (prieš tai neeksponuotą) bandinio vietą. Šio tipo teste pagal *ISO 11254 – 1 (the International Organization for Standardization)* standartą [20] su kiekviena energijos įtėkio verte ( $F$ ) turi būti eksponuojami mažiausiai 10 bandinio vietų (eksperimentinių taškų), kurie atskirti  $\geq 3d$  atstumu vienas nuo kito, kur  $d$  žymi lazerio pluošto diametrą  $1/e^2$  maksimalaus intensyvumo lygyje (5 pav.). Kuo daugiau taškų pasirenkama eksponuoti, tuo tikslesnė pažeidos tikimybės vertė yra gaunama. Pažeidos tikimybė  $P(F)$  suprantama kaip santykis pažeistų  $m$  ir visų eksponuotų bandinio taškų  $N$  su tam tikra energijos įtėkio verte  $F$ :

$$P(F) = \frac{m}{N} \quad (1)$$



5 pav. Vieno impulso testavimo schema,  $d$  – lazerio pluošto diametras.

Energijos įtėkio verčių kiekis turi būti pakankamai didelis, kad apimtų pažeidos tikimybes nuo 0 % (su tam tikru energijos įtėkiu visos eksponuotos bandinio vietos nepažeistos) iki 100 % (su tam tikru energijos įtėkiu visos eksponuotos bandinio vietos pažeistos). Mažesni energijos įtėkio verčių intervalai leidžia tiksliau nustatyti pažeidos slenkstį. Pažeidos slenkstis – tai didžiausia energijos įtėkio vertė, prie kurios pažeidos tikimybė yra 0 %. Ši vertė yra gaunama iš grafiko, kuriame atvaizduota pažeidos tikimybės priklausomybė nuo energijos įtėkio.

Priklausomybė yra tiesiškai ekstrapoliuojama, o tiesinės regresijos būdu gauta vertė ant energijos įtekio ašies ir yra pažaidos slenkstis. [20]

Pasinaudojant Puasono statistika ir defektų slenkščio ansamblių modeliu vieno impulso vietos testas gali suteikti naudingos papildomos informacijos apie skirtingų gamybos procesų kokybę. Jis yra naudojamas norint optimizuoti optikos gamybos procesus, tokius kaip poliravimas ar dengimas, taip pat norint ištirti pagrindinių medžiagų savybes, nustatyti įvairius defektus. Šis testavimo būdas yra vertinamas dėl spartaus grįžtamojo ryšio, kuris suteikia galimybę greitai santykinai palyginti bandinius.

## 5.2 Daugelio impulsų vietai testas (S-į-1)

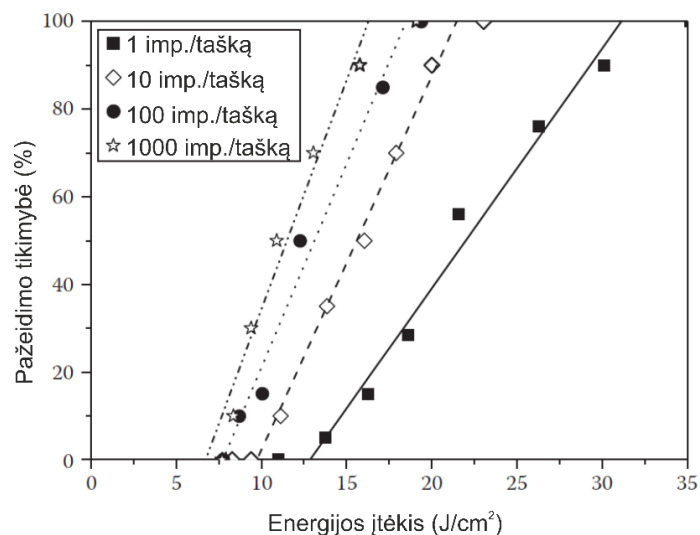
Daugelio impulsų vietai testas, dar kitaip žinomas kaip S-į-1 testas, yra testavimo procedūra, kurios metu tam tikro energijos įtekio pasirinktas impulsų kiekis (S) yra nukreipiamas į prieš tai dar neeksponuotą bandinio vietą. Kaip ir vieno impulso teste, taip pat ir čia, pagal *ISO* standartą [21] su kiekviena energijos įtekio verte turi būti eksponuojami mažiausiai 10 bandinio vietų. Tarp kiekvieno impulso į vieną bandinio vietą yra apibrėžtas, trumpas ir pastovus laiko intervalas – pasikartojimo dažnis. Paprastai, esant mažiems dažniams (1 – 100 Hz), viena bandinio vieta yra eksponuojama vidutiniškai 1 000 impulsų, o esant dideliems dažniams (> 1 kHz), testas nesunkiai gali būti atliktas ir su daugiau impulsų, pvz.: S=10000 impulsų vietai arba daugiau. Jei testuojama vieta yra pažeidžiama anksčiau nei baigėsi numatyta impulsų vora, eksponavimas yra stabdomas, siekiant išvengti tolimesnio bandinio ardymo ir galimos taršos abliacijos produktais, o praėjusių impulsų skaičius yra fiksuojamas ir toliau naudojamas apskaičiuojant slenkstines vertes. Slenkstinė energijos įtekio vertė yra gaunama prieš tai buvusiam skyrelyje aptartu būdu, ekstrapoliuojant bei naudojant tiesinės regresijos metodą atskiroms impulsų klasėms (kai S=1; 10; 100; 1000 ir t.t.).

Skirtingoms impulsų dozėms (S) paprastai stebimos ir skirtingos slenkstines energijos įtekio vertės [21]. Kaip galima pamatyti 6 pav., esant didesniam impulsų skaičiui, pažaidos lazerio spinduliuote slenkstis mažėja. Tokia tendencija vadinama „optinio nuovargio“ arba „fatigue“ efektu (pranc. *fatigue* - nuovargis), ji paprastai yra siejama su kaupimo arba taršos reiškiniais. Tokių reiškinų pavyzdžiai – lokalus šilumos kaupimas, esant dideliame impulsų pasikartojimo dažniui, atominių defektinių būsenų inkubacija. Inkubacijos atveju kiekvienas lazerio impulsas suardo dalį medžiagą rišančių tarpatominių ryšių, bet nesukelia katastrofiškos pažaidos gardelėje. Galimi ir kiti, aplinkos nulemti foto-inicijuoti paviršiaus adsorbcijos

reiškiniai, kai aplinkoje esančios organinės kilmės medžiagos elektrostatiškai pritraukiamos prie eksponuojamos vietos. Nuovargio reiškiniai turi ypatingai didelę reikšmę, kai lazerinių impulsų pasikartojimo dažnis yra  $> 1$  kHz. Turėdami tikslias slenkstines energijos įtekio vertes skirtingam impulsų kiekiui galime įvertinti optikos gyvavimo trukmę, išreikštą bendru eksponuotų impulsų kiekiu  $N$  į optinį elementą. Tam yra braižoma diagrama, kurioje išreikšta PLSS priklausomybė nuo pvz. impulsų skaičiaus natūrinio logaritmo. Tokius duomenis galima aproksimuoti įvairiais modeliais. Vienas iš tokių senėjimo modelių gali būti užrašomas lygtimi [14]:

$$PLSS(N) = A - B * (\ln(N)) \quad (2)$$

kur  $N$  yra bendras lazerio impulsų skaičius tenkantis optiniam elementui, o  $A$  ir  $B$  – laisvieji senėjimo modelio kreivės parametrai. Taigi, dažniausiai naudojamam energijos įtekiui optikos tarnavimo trukmė apibrėžta bendru lazerinių impulsų skaičiumi iki galimos pažaidos momento, ji gali būti gauta iš anksčiau minėtos lygties. Paminėtina ir tai, jog  $PLSS(N)$  dėsningumas gali turėti ir bet kokią kitą formą, kuri priklauso nuo daugybės medžiagos bei aplinkos veiksnių ir testavimo sąlygų [2].



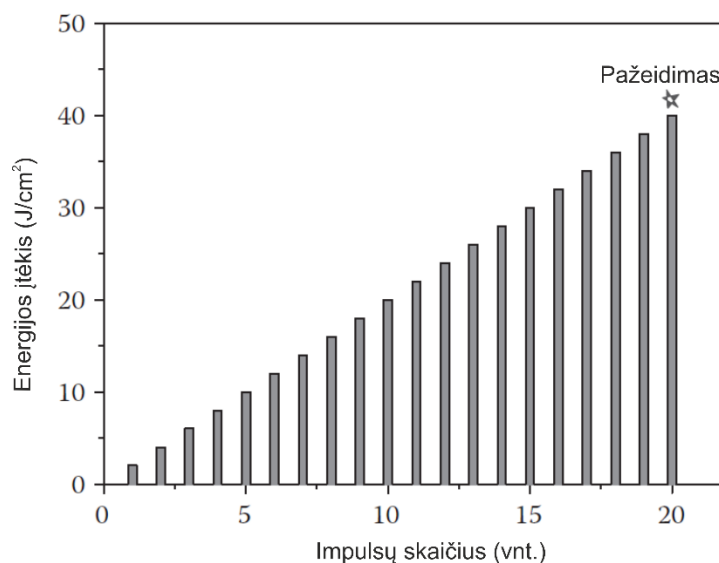
6 pav.  $S - i - 1$  testo pažaidų tikimybių priklausomybės nuo energijos įtekio, esant skirtingiems impulsų kiekiams ( $S = 1; 10; 100; 1000$ ) [2].

Daugelio impulsų testai yra naudojami tada, kai reikia žinoti PLSS vertę, įvertinat galimą nuovargio efektą. Jie leidžia nustatyti impulsų pasikartojimo dažnio įtaką optinio elemento atsparumui, įvertinti elementų senėjimo mastą dėl akumuliacijos efekto bei ekstrapoliuoti

rezultatus padidintoms ekspozicijos dozėms, pasiekiamoms itin retais atvejais. S-į-1 testų rezultatai padeda susikalbėti visiems vertės kūrimo grandinės dalyviams: galutiniam vartotojui – optinių sistemų kūrėjui, tarpininkui – optika prekiaujančioms įmonėms bei gamintojui – optikos gamybą ir plėtrą organizuojančioms bendrovėms, taip užtikrinant visos grandinės produkcijos kokybę.

### 5.3 Pakopinis testas (R-į-1)

Pakopinis (R - Rampos) testas, dar kitaip žinomas kaip R-į-1, yra testavimo procedūra, kurios metu kiekviena pasirinkta bandinio vieta yra eksponuojama tam tikru impulsų kiekiu, vis keliant energijos įtekio vertę nustatytu žingsniu, iki kol įvyksta (stebima) pažeida (7 pav.). Procedūra gali būti kartojama daugelyje bandinio vietų. Kiekvienos bandinio vietos pradinė energijos įtekio vertė ir kėlimo žingsnis yra tokie patys. Taigi, šis testas atliekamas pasirinktam vietų skaičiui, bet ne daugiau nei telpa eksperimentinių taškų bandinio paviršiuje (priklausomai nuo lazerinio pluošto diametro ir bandinio dydžio). Tiesa, eksperimentinių vietų skaičius paprastai būna gerokai mažesnis nei S-į-1 teste, kadangi pakopinio testo metu reikia nuolat tikrinti bandinį dėl galimų pažeidimų mikroskopu, tad pakopinio testo tikslas dažniausiai būna – nustatyti preliminarų lazerinį pažeidimo slenkstį iš vienos ar keleto vietų. Norint gauti statistiškai patikimesnius rezultatus gali prireikti 100 ar net daugiau eksperimentinių vietų, bet tai reikšmingai išaugina tyrimų trukmę, todėl praktikoje taip daroma retai.



7 pav. R-į-1 testo procedūra [2].

Pakopinio testo pažaidos tikimybė kiekvienai energijos įtėkio vertei yra apskaičiuojama tokiu būdu:

$$P_i = \frac{N_i}{N}, (i = 1, \dots, N), \quad (3)$$

kur  $N$  yra bendras eksponuotų vietų skaičius,  $N_i$  – su  $i$  – ają arba žemesne energijos įtėkio verte eksponuotų ir pažeistų vietų skaičius. Istoriskai taip susiklostė, kad eksperimentinė pažaidos tikimybės nuo energijos įtėkio verčių funkcija parastai nėra ekstrapoliuojama kaip 1-į-1 testo atveju, nors tokia galimybė egzistuoja. Šio tipo testuose pažaidos slenkščiu laikoma didžiausia eksperimentiškai išmatuota energijos įtėkio vertė, kuriai pažaidos tikimybė yra 0 %.

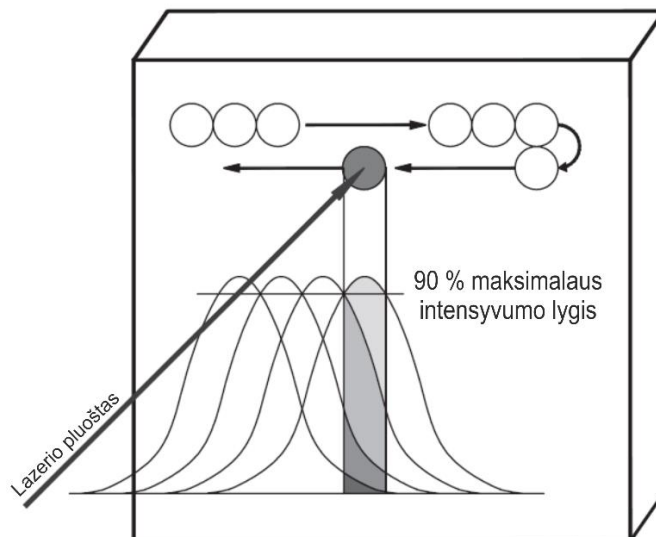
Praėjusiame dešimtmetyje buvo pastebėta, kad eksponuojant bandinį pakopiniu būdu, t.y. pradedant mažomis energijos įtėkio vertėmis, galimas būdingų medžiagos savybių pakeitimas, taip padidinant jo optinį atsparumą. Tai – lazerinio grūdinimo arba paviršiaus nuvalymo efektai, kurie gali būti taikomi veidrodinėms dangoms, poliarizatoriams, KDP/DKDP kristalams bei kitiems optiniams elementams [2].

Šis, dėl pakopinio eksponavimo ir daugybinio mikroskopinio tikrinimo ilgai trunkantis procesas dažniausiai naudojamas įvertinti mažos darbinės apertūros (pvz. šviesolaidžio galas) bandinių pažaidos slenkščį, kai nepakanka paviršiaus ploto atlikti S-į-1 testą. Procedūra taip pat pasitelkiama, kai reikia palyginti skirtingų tiekėjų produkciją ar skirtingus gamybos procesus bei ištirti grūdinimo procesą.

## 5.4 Rastrinio skenavimo testas

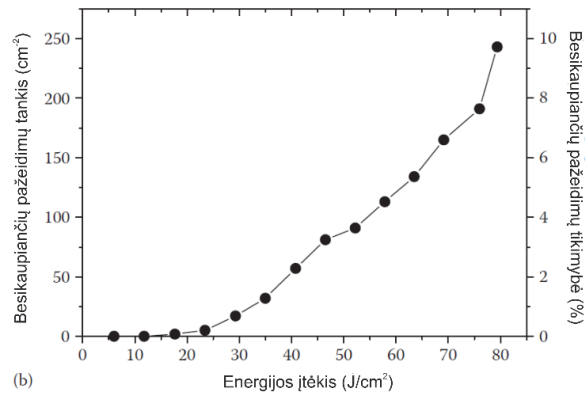
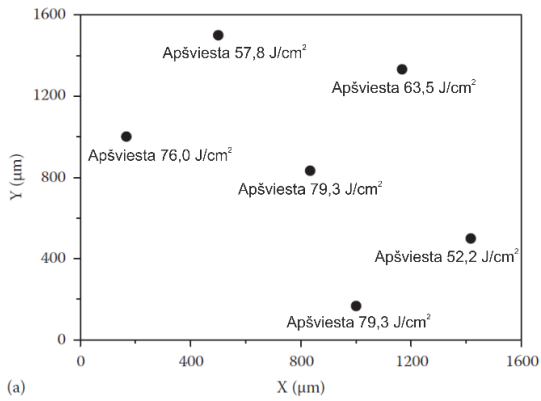
Rastrinis skenavimas – tai į pakopinį testą panaši procedūra, tik šiuo atveju visas bandinio paviršius, o ne viena nuo kitos nutolusios vietos, yra eksponuojamas lazerine spinduliuote vis didinant smailinį įtėkį. Paviršiaus rastrinis skenavimas lazerio pluoštu yra vykdomas „gyvatėlės“ principu: eksponuojant bandinį su pastovia smailinio įtėkio verte ir nustatytu tam tikru impulsų kiekiu vienai vietai. Po skenavimo energijos įtėkio vertė yra šiek tiek pakeliama ir procesas kartojamas iš naujo skenuojant tą patį plotą. Judėjimo žingsnis pasirenkamas taip, kad apskritimo formos lazerinis pluoštas persidengtų, taip sudarydamas homogenišką tiriamo bandinio apšvitinimą. Kadangi pluošto intensyvumas yra Gauso skirstinys, tai priimta judėjimo žingsnį laikyti lygų pluošto diametru 90 % maksimalaus intensyvumo lygyje (8 pav.) [22].





8 pav. Rastrinio skenavimo procedūros scheminis atvaizdavimas [14].

Rastrinio skenavimo testo rezultatai gali būti pateikiami įvairiai: pvz. XY koordinatinių plokštumoje gali būti pažymimos pažaidų vietos su slenkstinėmis energijos įtekio vertėmis (9a pav.). Tokio testo rezultatu taip pat priimtina laikyti ir besikaupiančių pažaidų tankio priklausomybę nuo energijos įtekio (9b pav.). Analizuojant rastrinio skenavimo gautus rezultatus, reikia įvertinti ir galimą lazerinio grūdinimo bei taršos abliacijos produktais įtaką optinio paviršiaus atsparumui. Rastrinis skenavimas gali būti naudojamas ir optinių elementų atsparumo gerinimui – grūdinimui bei lazeriniam valymui. Didelės apertūros optinių elementų gamyboje išvengti pavienių pažaidų ties mažu slenksčiu praktiškai neįmanoma, todėl kai kurie optinių elementų vartotojai priversti toleruoti ir naudoti iš dalies pažeistus optinius elementus: taip atsirado naujas pažaidos kriterijus – funkcinis pažaidos lazerio spinduliuotei slenkstis (FPLSS). Šiame darbe jis nebus plačiau nagrinėjamas, todėl pateikiamas tik apibrėžimas bendram suvokimui – tai didžiausia energijos įtekio vertė, kuriai esant susidarę pavieniai pažeidimai dar netrukdo visos lazerinės sistemos veikimo efektyvumui [23]. Pvz. jei lazerio pluošto diametras yra 10 cm ar daugiau, galima toleruoti 100  $\mu\text{m}$  diametro lokalias pažaidas, jei jų diametras laikui bėgant neauga, o bendras plotas sudaro mažiau kaip 1% apertūros.



9 pav. Rastrinio skenavimo testo rezultatai: a) XY koordinacijų plokštuma su pažymėtomis pažaidų vietomis bei atitinkamomis energijos įtėkio vertėmis, ties kuriomis įvyko pažaidos; b) besikaupiančių pažaidų tankio ir tikimybės priklausomybė nuo energijos įtėkio. [14]

Rastrinio skenavimo testas naudojamas, kai yra reikalingas tikslus viso paviršiaus įvertinimas. Jis pasitelkiamas tirti optikai su mažu defektų tankiu („super“ nupoliruoti), taip pat didelių matmenų optiniams paviršiams ar norint išsiaiškinti blogiausio scenarijaus pasekmes.

## 6. Eksperimentų metodika

Šiame skyriuje bus pristatyti eksperimentui atlikti skirti bandiniai, dangų sluoksnių medžiagos, dengimo technologijos, paruošimas prieš eksperimentą bei PLSS matavimų sistema.

### 6.1 Bandiniai

Eksperimentai buvo atliekami su trijų skirtingų tipų optiniais elementais, dažniausiai pasitaikančiais lazerinėse sistemose:

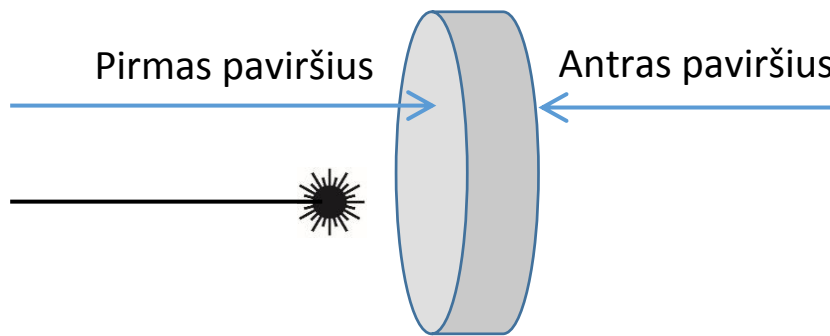
- gerai atspindinti veidrodinė danga suformuota ant lydyto kvarco pagrindu (angl. *high-reflection* arba HR);
- skaidrintas lydyto kvarco langelis (angl. *anti-reflection* arba AR);
- lydyto kvarco pagrindu (nedengtas).

PLSS matavimai atlikti naudojant dvi skirtingas nanosekundinio *InnoLas* lazerio harmonikas – I (1064 nm) ir III (355 nm). Pagrindiniai bandinius apibūdinantys parametrai pateikti 1 lentelėje.

**1 lentelė.** Eksperimentams naudotų bandinių ir jų dangų parametrai.

Harmonika, su kuria testuotas bandinys	Optinio elemento tipas	Optinis padėkliukas	Matmenys	Pirmas paviršius (10 pav.)		Antras paviršius (10 pav.)		Kampas tarp bandinio ir krentančios spinduliuotės
				Dangos medžiaga	Dengimo technologija	Dangos medžiaga	Dengimo technologija	
I	Nedengtas	Lydytas kvarcas	3 vnt. (■ ■ ■ ) Ø25,4 x 1 mm	-	-	nuėsdinta 500 nm	-	0°
	HR 1064 nm	Lydytas kvarcas	Ø50,8 x 9,5 mm	Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub> – SiO <sub>2</sub>	IBS	-	-	45°
	AR 1064 nm	Lydytas kvarcas	3 vnt. (■ ■ ■ ) Ø25,4 x 1 mm	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - SiO <sub>2</sub>	IBS	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - SiO <sub>2</sub>	IBS	0°

III	Nedengtas	Lydytas kvarcas	Ø50,8 x 6 mm	-	-	nuėsdinta 100 nm	-	0°
	HR 355 nm	Lydytas kvarcas	Ø50,8 x 9,5 mm	HfO <sub>2</sub> - SiO <sub>2</sub>	EBE + PAD	-	-	45°
	AR 355 nm	Lydytas kvarcas	3 vnt. (■ ■ ■ ) Ø25,4 x 1 mm	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - SiO <sub>2</sub>	IBS	-	-	0°

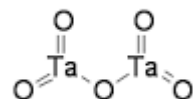


10 pav. Schema, nurodanti sutartinius bandinio pirmo (eksponuojamo) ir antro (galinio) paviršius žymėjimą.

## 6.2 Dangų sluoksniams dengti panaudotų medžiagų apžvalga

### 6.2.1 Tantalo pentoksidas

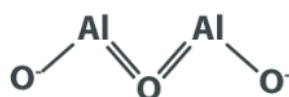
Tantalo pentoksidas, dar kitaip žinomas kaip tantalo (V) oksidas, yra neorganinis junginys, kurio cheminė formulė Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Tai skaidri, kieta, netirpi medžiaga. Tantalo pentoksidas pasižymi dideliu lūžio rodikliu bei mažais sugerties nuostoliais tiriamų bangos ilgių ruože, todėl yra populiarus optinių dangų taikymuose. Dangos iš šios medžiagos yra kietos, atsparios įbrėžimams bei gerai prilipusios prie dengiamo paviršiaus.



11 pav. Tantalo pentoksido struktūrinė formulė.

### 6.2.2 Aliuminio oksidas (safyras)

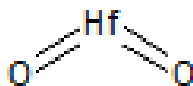
Aliuminio oksidas yra cheminis aliuminio ir deguonies junginys, kurio cheminė formulė yra  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Kristalinė aliuminio oksido forma vadinama korundu arba safyru. Paprastai korundas yra bespalvis, tačiau įvairios priemaišos suteikia jam spalvų. Raudonas skaidrus korundas vadinamas rubinu, o visų kitų spalvų – safyrais. Optiniai elementai su  $\text{Al}_2\text{O}_3$  dangomis pasižymi aukštu PLSS dėl aukštos aliuminio oksido lydymosi temperatūros ( $2072\text{ }^\circ\text{C}$ ), bei dangų atsparumu įbrėžimams dėl itin aukštą kietumą turinčio korundo.



12 pav. Aliuminio oksido struktūrinė formulė.

### 6.2.3 Hafnio oksidas

Hafnio (IV) oksidas yra neorganinis junginys, kurio cheminė formulė  $\text{HfO}_2$ . Tai vienas iš labiausiai paplitusių ir stabiliausių hafnio junginių. Jis turi mažą šiluminę plėtrą, naudojamas optinių dangų pramonėje dėl didelio draustinės juostos tarpo ir gerų optinio atsparumo savybių.  $\text{HfO}_2$  dangos atsparios įbrėžimams, tankios bei gerai prilipusios prie pagrindo.

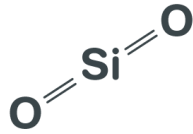


13 pav. Hafnio oksido struktūrinė formulė.

### 6.2.3 Silicio dioksidas (kvarcas arba lydytas kvarcas)

Silicio dioksidas (cheminė formulė  $\text{SiO}_2$ ) yra dažniausiai naudojama mažo lūžio rodiklio medžiaga, kuri kartu su didelio lūžio rodiklio oksidų sluoksniais suformuoja dielektrinius sluoksnius, veikiančius tiek UV ( $\sim 200\text{ nm}$ ), tiek ir IR ( $\sim 3\text{ }\mu\text{m}$ ) spektro dalyse. Tipiški panaudojimo būdai yra skaidrinančių dangų gamyba matomai ir netolimo ultravioleto spektriniais sričiais. Tinka lazerinei optikai - dielektriniams veidrodžiams, poliarizatoriams ir kitiems spektriniams filtrams gaminti. Silicio dioksidas gali būti dengiamas sluoksniuojant jį kartu su aukšto lūžio rodiklio medžiagomis, tokiomis kaip hafnio, cirkonio ir tantalio oksidai,

siekiant pagaminti aukštą PLSS turinčias daugiasluoksnes dangas, skirtas UV lazerių taikymams.



14 pav. Silicio dioksido struktūrinė formulė.

## 6.3 Dengimo technologijos

Optinė interferencinė danga tradiciškai yra gaminama iš periodiškai kintančio lūžio rodiklio sluoksnių, kurie gaunami dengiant padėkliuką skirtingų medžiagų sluoksniais, tiksliai kontroliuojant kiekvieno iš jų storį. Kalbant apie fizinio nusodinimo metodus, dengimo procesą paprastai sudaro trys žingsniai – nusodinamos medžiagos atomų ir molekulių srauto sukūrimas, jo perkėlimas nuo taikinio iki padėkliuko bei dangos auginimas. Šiame darbe pagrindukams visais atvejais buvo naudotas kvarcinis stiklas, kuris buvo dengiamas panaudojant dvi žemiau aptartas fizinio garų nusodinimo technologijas. Tai jonapluoštis dulkinimams (*IBS* – angl. *Ion Beam Sputtering*) ir garinimas elektronų pluoštu su plazminiu tankinimu (*EBE + PAD* – *Electron Beam Evaporation with Plasma Assisted Deposition*).

### 6.3.1 Jonapluoštis dulkinimas – IBS

Šia technika dengiant padėkliuką, norimos medžiagos sluoksnis yra suformuojamas ekstrahuojant jos molekules iš metalinio arba dielektrinio taikinio, didelės energijos ir labai tiksliai kontroliuojamu jonų pluoštu. Taikiniu vadinamas auginamos medžiagos šaltinis. Taikinio atomų išmušimo galimybę sukuria jonų tinklelio optika, kuri gali tiksliai valdyti jonų energiją ir pluošto fokusavimo sąlygas. Pasirinkus, tokią jonų energiją, kad būtų minimizuotas jonų įterpimas į dangą (paprastai 1000 – 2000 eV), ir tiksliai nukreipus į taikinio medžiagą, norimi atomai ar molekulės yra išstumiamos iš jų stabilių pozicijų daugybiniais susidūrimais ir yra priverstos palikti taikinį. Tokia jonų pluošto ir taikinio sąveika vadinama jonapluoščiu dulkinimu. Elektronai, pagaminti neutralizatoriaus ir nukreipti į jonų pluoštą, užkerta kelią pluošto plitimui dėl Kuloninių jėgų stūmos tarp jonų ir neutralizuoja viso pluošto krūvį, taip apsaugodami procesą nuo elektrinių iškrovų vakuuminėje kameroje. Jei taikiniui naudojamas grynas metalas ar puslaidininkis (pvz. hafnio ar silicio), tai siekiant suformuoti oksido sluoksnius vakuuminėje kameroje yra palaikomas ir papildomas deguonies dujų srautas, kuris

leidžia suformuoti oksidinius sluoksnius. IBS metodu pagamintos dangos įprastai pasižymi itin dideliu tankiu ir geru spektriniu stabilumu kintančios aplinkos sąlygomis. Tokiose dangose pasitaiko palyginus nedaug defektų, todėl jos laikomos labai kokybiškomis [24].

### **6.3.2. Elektronų pluošto garinimas su plazminiu tankinimu (EBE + PAD)**

Naudojant elektronų pluošto garinimo techniką, koncentruotas aukštos energijos elektronų pluoštas yra nukreipiamas į taikinį. Taikiny yra lydomas ir garinamas, o garai keliaudami vakuumu pamažu nusėda ant padėkliuko taip suformuodami naują sluoksnį. Garuojantys neutralūs medžiagos atomai ir molekulės pasižymi palyginus nedidele energija, todėl pasiekę padėklą nepasižymi mobilumu, o prikimba ir laikosi beveik toje pačioje vietoje, kur nusileido. Dėl šios priežasties danga būna mažo tūrinio tankio (porėta) bei prastai sukimba su padėklu. Porėtos dangos lengvai sugeria vandenį iš aplinkos ir nepasižymi geru spektriniu stabilumu. Tokią problemą galima spręsti padidinant padėkliuko temperatūrą ir taip padidinant dalelių mobilumą nusodinimo metu, tačiau garinimo įrenginiai dažniausiai turi ribotą aukščiausią galimą temperatūrą. Kaip alternatyva terminiam garinimui, dangos sluoksnio tūrinis tankis gali būti didinamas pasitelkiant didelių energijų asistuojantį plazmos šaltinį. Tokiame procese papildomai įgreitinti teigiami jonai atakuoja padėkliuko paviršių taip suteikdami garuojančioms dalelėms papildomo mobilumo, todėl sėdančios dalelės gali prisiskverbti ir užpildyti susiformavusias tuščias ertmes. Plonasluoksnių dangų nusodinimo procesas, kuriame plazma yra naudojama erdvėje tarp taikinio ir padėkliuko, vadinamas plazminiu tankinimu. Plazma atlieka augimo kinetikos modifikavimo funkciją, taip pagerindama struktūros morfologiją bei fizines dangos savybes [25].

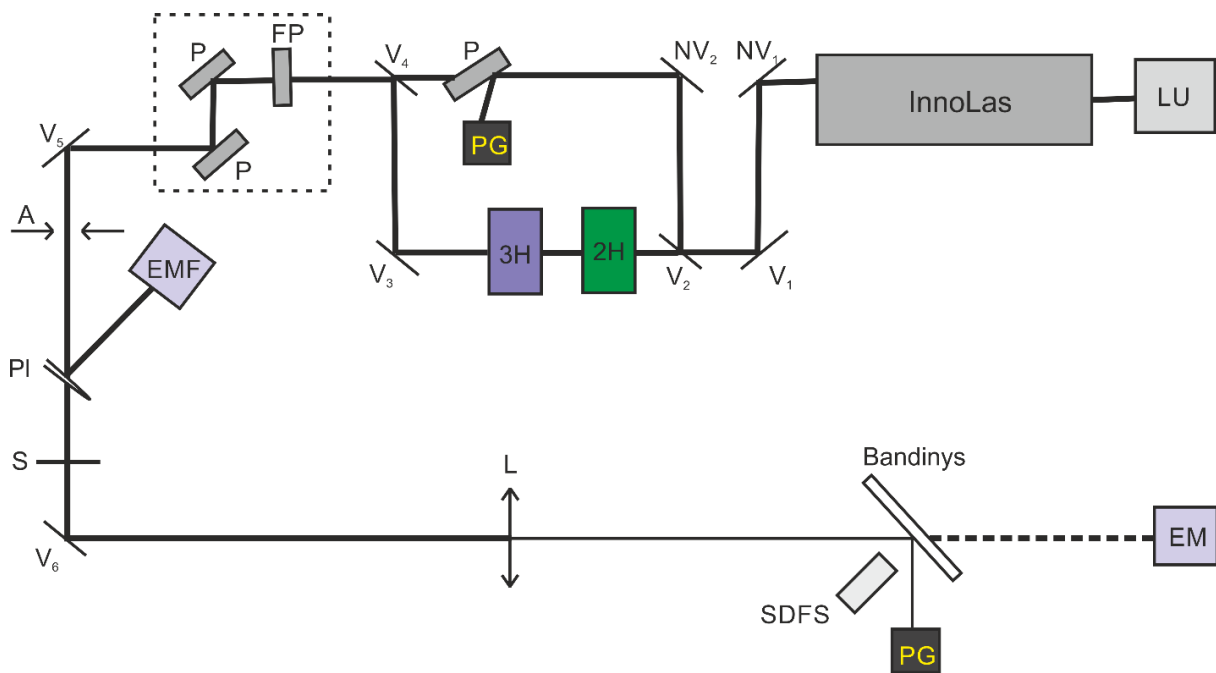
## **6.4 Bandinių paruošimas, eksponavimas ir analizavimas**

Visi gauti bandiniai pirmą kartą išpakuoti švarioje aplinkoje - laboratorijoje. Prieš atliekant eksponavimą, abi bandinio pusės buvo nuvalomos izopropanolio tirpalu, traukiant per paviršių optikai valyti skirtas sudrėkintas servetėles. Prieš kiekvieną eksponavimą lazeriu visas tiriamas bandinio paviršius buvo fotografuojamas, panaudojant mikroskopą (Olympus BXFM, 10x). Toliau buvo atliekami optinio atsparumo tyrimai pasirinktais testavimo protokolais, įstačius bandinį į optinio atsparumo stendą (numatytu kampu su lazerio spinduliuote). Optinio atsparumo testavimo sistemos principinė schema aptarta 6.5 skyrelyje. Priklausomai nuo

testavimo protokolo ypatumų, po eksponavimo arba eigoje, eksponuotas paviršius vėl buvo fotografuojamas mikroskopu. Gauti rezultatai išanalizuoti, naudojant padidinto kontrasto nuotraukas.

## 6.5 PLSS matavimo lazerinė sistema

Šiame darbe aprašytiems eksperimentams atlikti buvo naudojamas nanosekundinis „InnoLas“ lazeris (Vokietija). Lazerio aktyvusis elementas yra Nd:YAG, centrinis fundamentinis bangos ilgis  $\lambda = 1064$  nm, dažnis derinamas iki 100 Hz, o impulso trukmė  $\tau_{\text{imp}} \approx 8$  ns (matuojant pusę smailinės amplitudės aukščio atitinkantį lygį, kartais vadinamą kaip FWHM – angl. *full width at half maximum*).



15 pav. PLSS matavimo schema, naudojant nanosekundinį *InnoLas* lazerį. Schemoje panaudoti sutrumpinimai: LU – lazerio užkratas,  $NV_1$ ,  $NV_2$  – nulenkiama veidrodžiai,  $V_1 - V_6$  – veidrodžiai, 2H – antros harmonikos kristalas, 3H – trečios harmonikos kristalas, PG – pluošto gaudyklė, P – poliarizatoriai, FP – fazinė  $\lambda/2$  plokštelė, A – apertūra, PI – pleištas, S – sklendė, L – glaudžiamasis lęšis, EMF – energijos matavimo fotodiodas, EM – energijos matuoklis, SDFS – sklaidos detektavimo fotodiodų sistema.

Naudojant vienmodį lazerio režimą, įjungiamas lazerio užkratas (LU). Nulenkiama veidrodžiai ( $NV_1$  ir  $NV_2$ ) nukreipia pluoštą į netiesinius antros ir trečios harmonikos kristalus,



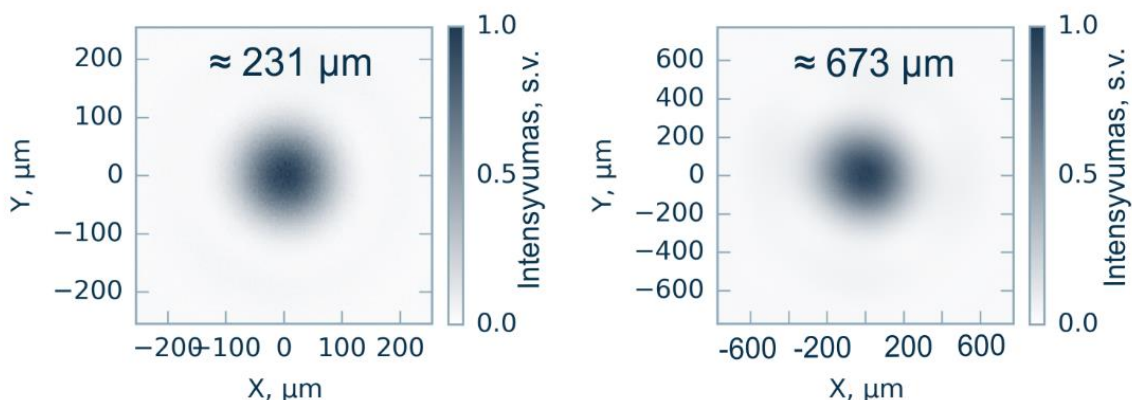
kurie generuoja reikalingą  $\lambda = 355$  nm bangos ilgį, kai eksperimentas atliekamas su III harmonika. Jei bandiniai matuojami pirmąja harmonika, pluoštas tiesiai pro poliarizatorių eina į galios keitiklį, kuris susideda iš fazinės  $\lambda/2$  plokštelės (FP) ir dviejų Briusterio kampo poliarizatorių (P). Pleištas (PI) atskiria dalį pluošto į energijos matavimo fotodiodą (EMF), kuris matuoja energiją eksperimento metu. Automatinis energijos kalibravimas atliekamas nuimamu energijos matokliu (EM). Sklaidos pokyčio detektavimo fotodiodų sistema (SDFS) sudaryta iš fotodiodų, kurie testo metu užregistruotą išsklaidytos spinduliuotės pokytį, fiksuoja pažaidą ir pagal reikiamąbę stabdo tolimesnį eksponavimą.

## 7. Pagrindiniai rezultatai ir jų aptarimas

### 7.1 Testavimo protokolų, lazerinio impulso formų ir bangos ilgio įtaka PLSS įverčiams

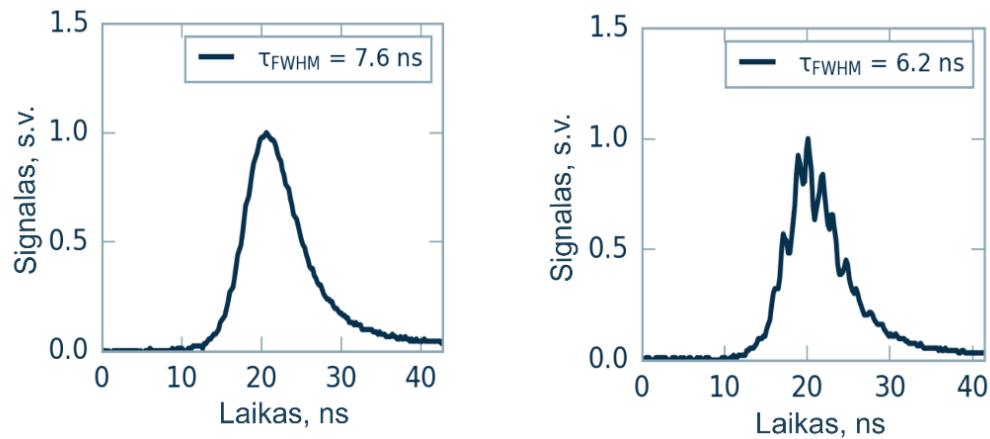
Tyrimo metu buvo siekiama palyginti keturis pagrindinius PLSS testavimo protokolus bei iširti impulsų formos įtaką matavimų rezultatams, kai tiriami beveik identiški bandiniai. 1-į-1, S-į-1, R-į-1 bei rastrinio skenavimo tipų testai atlikti naudojant vienmodį bei daugiamodį išilginių modų lazerio režimus, taip parenkant impulso formą. Darant prielaidą, kad ultravioletinėje ir infraraudonoje srityje pažaidos mechanizmai gali būti skirtingi, eksperimentai buvo atlikti naudojant dviejų bangos ilgių spinduliuotę. Pirmajai harmonikai skirti elementai buvo testuojami su 1064 nm (I harmonika) bangos ilgio spinduliuote, o trečiajai harmonikai skirti elementai - su 355 nm (III harmonika). Kaip jau minėta - iširtos trys skirtingų tipų optinių elementų grupės – veidrodžiai, skaidrinančios dangos ir nedengti optiniai paviršiai – kvarciniai pagrindukai.

Prieš atliekant PLSS matavimus, pirmiausia buvo apibūdinami spinduliuotės parametrai, t.y. išmatuojami pluošto diametras ir impulso trukmė. Atliekant rastrinio skenavimo protokolo matavimus, buvo eksponuojamas 1 cm<sup>2</sup> plotas, o judėjimo žingsnis pasirinktas lygus pluošto diametru 90 % maksimalaus intensyvumo lygyje. Norint pagreitinti testavimo procesą, šio protokolo matavimų metu pluoštas buvo išplečiamas lyginant su 1-į-1, S-į-1, R-į-1 matavimams naudotu pluoštu.



16 pav. Tipiniai pluoštų diametrai matuojant 1-į-1, S-į-1, R-į-1 (kairėje) ir rastrinio skenavimo (dešinėje) testų PLSS.

Impulso trukmė buvo matuojama pusės signalo intensyvumo aukštyje. Vienmodžio ir daugiamodžio impulsų trukmės šiek tiek skiriasi (17 pav.), tačiau yra palyginamos ir rezultatams reikšmingos įtakos nedaro. Tipinės impulsų formos pateiktos 17 paveikslėlyje.



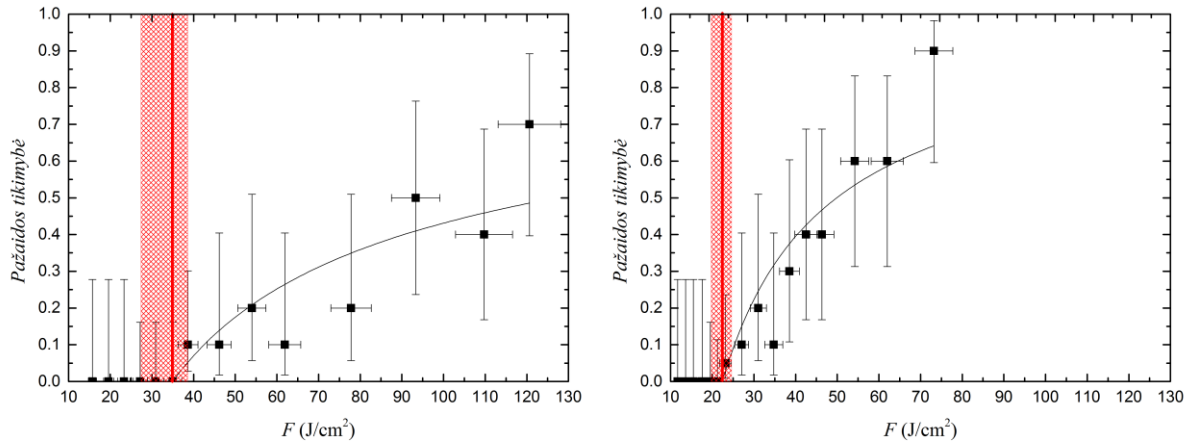
17 pav. Tipinės impulsų forma matuojant PLSS su vienmodžiu (kairėje) ir daugiamodžiu (dešinėje) lazerio režimu.

Išmatavus pluošto diametrą ir impulso trukmę, buvo atliekamas bandinio eksponavimas, naudojant skirtingus testavimo protokolus. Toliau išsamiai aptariami kiekvieno protokolo rezultatai, gauti eksponuojant optinį elementą su veidrodine danga IR srityje. Tolimesnis duomenų interpretavimas buvo atliekamas analogišku būdu, tad aptarti tik apibendrinantys rezultatai ir jų skirtumai. Detalūs kiekvieno atskiro protokolo matavimų grafikai pateikiami darbo priedų A dalyje. Taip pat B priedų dalyje pateikiami visi apibendrinantys grafikai su suvienodinta logaritmine skale, kad būtų lengviau lyginti rezultatus tarpusavyje.

### 7.1.1 PLSS protokolų tyrimas optiniuose elementuose su veidrodine danga

#### I harmonika (HR 1064 nm veidrodis):

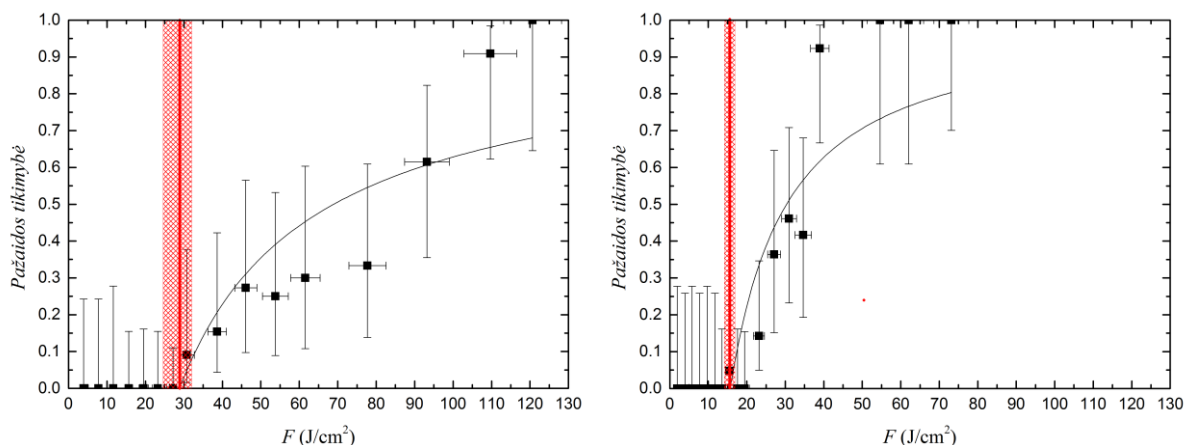
- 1-į-1 protokolai:



18 pav. Pažaidos lazerio spinduliuotei slenksčio matavimo 1-į-1 protokolo rezultatai vienmodžiu (kairėje) ir daugiamodžiu (dešinėje) lazerio režimu. Raudona vertikali linija žymi PLSS, o permatomas tinklas PLSS neapibrėžties intervalą (paklaidas).

Lyginant 18 paveikslėlyje pateiktus 1-į-1 testo metu gautus PLSS įverčius (raudona vertikali linija), esant skirtingoms eksponuojamų impulsų formoms, matome, jog PLSS vertės nesutampa. Daugiamodžio impulso generuojamų pažeidimų tikimybės kreivė yra statesnė, o PLSS vertė žemesnė lyginant su vienmodžio impulsu. Taip pat pastebime, kad abiem atvejais aplink PLSS vertę esančių matavimų pažeidimo tikimybės paklaidos yra žemesnės nei eksponuojant su aukštesniais ar žemesniais nei PLSS energijos įtėkiais. Taip yra dėl pakartotinai atliktų matavimų ties PLSS riba, siekiant padidinti nustatomos PLSS vertės tikslumą.

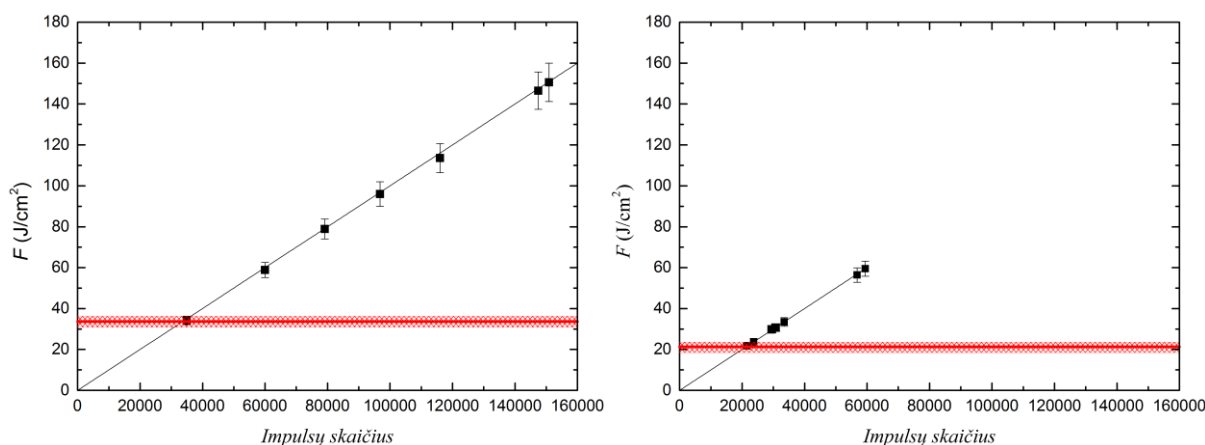
- **S-į-1 protokolas:**



19 pav. Pažaidos lazerio spinduliuotei slenksčio matavimo S-į-1 protokolo rezultatai vienmodžiu (kairėje) ir daugiamodžiu (dešinėje) lazerio režimu. Raudona vertikali linija žymi PLSS, o permatomas tinklėlis PLSS neapibrėžties intervalą (paklaidas).

19 paveikslėlyje pateiktų S-į-1 (kur S = 1000 impulsų) protokolo rezultatų vienmodžiu (kairėje) ir daugiamodžiu (dešinėje) lazerio režimu tendencijos nesiskiria nuo prieš tai aptartų 1-į-1 rezultatų – daugiamodžio impulso pirminė pažaida inicijuojama prie žemesnių energijos įteklių nei vienmodžio impulso atveju.

- **R-į-1 protokolas:**



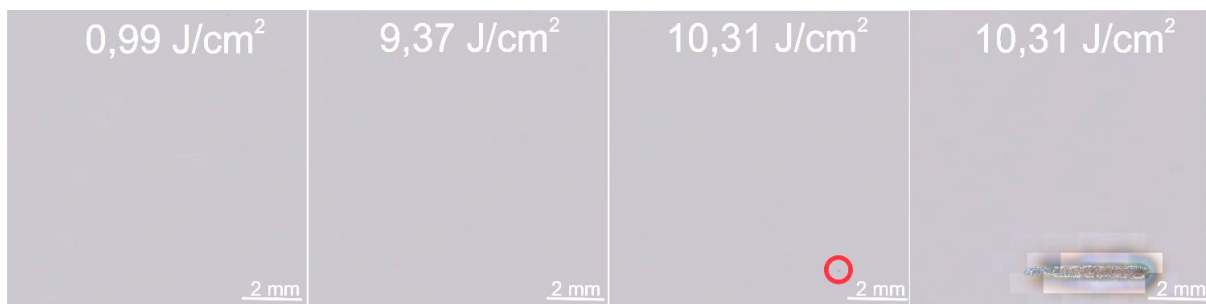
20 pav. Pažaidos lazerio spinduliuotei slenksčio matavimo R-į-1 protokolo rezultatai vienmodžiu (kairėje) ir daugiamodžiu (dešinėje) lazerio režimu. Raudona linija žymi PLSS.

20 paveikslėlyje esančios diagramos iliustruoja pakopinio testo būdu nustatytus PLSS įverčius, atliekant matavimą iki pažaidos: eksponuojant vienmodžiais (kairėje) ir

daugiamodžiais (dešinėje) impulsais. Energijos įtėkis didintas fiksuotu žingsniu (kas  $1 \text{ J/cm}^2$ ) nuo  $\approx 0 \text{ J/cm}^2$  iki kol įvykdavo pažaida, o kiekvienos iteracijos metu 1000 impulsų pasiekdavo tą pačią bandinio vietą. 20 pav. kairėje esanti diagrama gerai atvaizduoja, kokiame plačiame energijos įtėkių intervale gali atsirasti lazerio spinduliuotės inicijuotos pažaidos. Dėl šios priežasties labai svarbu pasirinkti, kiek įmanoma didesnę matavimo imtį, kad būtų užtikrinta, kuo aukštesnė tikimybė aptikti žemiausią PLSS.

- **Rastrinio skenavimo protokolas:**

Rastrinio skenavimo procedūra trunka gerokai ilgiau nei ekspozicija kitais protokolais, taigi siekiant atlikti reikiamus tyrimus šis protokolas buvo taikomas pasirinkus energijos įtėkio žingsnį kelti netiesiškai – t.y. kas 10 % nuo prieš tai eksponuoto sluoksnio energijos įtėkio vertės. Tokiu būdu procentinė matavimų neapibrėžtis yra iš anksto žinoma, o tyrimas neužtrunka daugiau nei dieną vienam bandiniui. Jei pažaidos slenkstis labai aukštas – įprastai skenuojama, kol pasiekama pažaida.

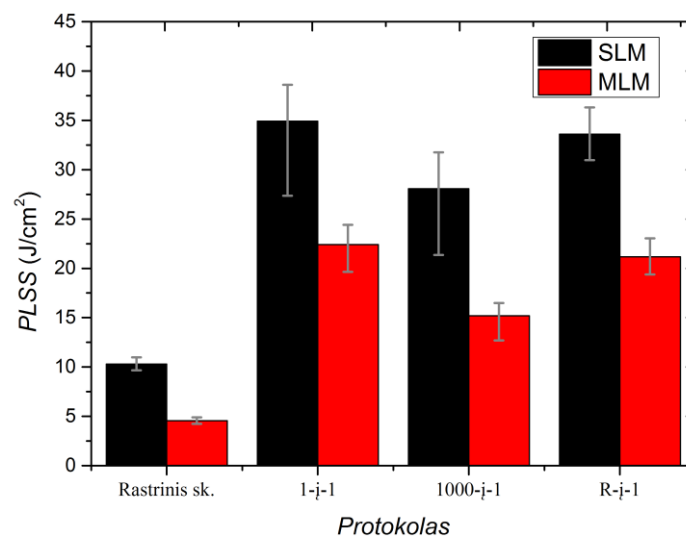


21 pav. Rastrinio skenavimo protokolu eksponuotas bandinio paviršiaus plotas ties skirtingais energijos įtėkio lygiais, kai lazerio bangos ilgis 1064 nm, o impulso forma – vienmodė.

Esant vienmodžiam lazerio režimui skenavimas pradėtas ties  $0,99 \text{ J/cm}^2$  ir baigtas ties  $10,31 \text{ J/cm}^2$ . Iš viso energijos įtėkis buvo keltas 24 kartus, tai reiškia, kad testuojamas  $1 \text{ cm}^2$  bandinio paviršiaus plotas buvo eksponuotas 24 sluoksniais. PLSS nustatytas ties  $10,31 \text{ J/cm}^2$  įtėkio verte. 21 pav. matome, jog dangos pažaidų iki pat slenkstinės vertės neatsirado, tačiau eksponuojant su  $10,31 \text{ J/cm}^2$  spinduliuote atsiradusi pažaida (21 pav. raudoname apskritime esantis taškiukas), toliau tęsiant eksponavimą su tuo pačiu energijos įtėkiu, virto katastrofine.

Esant daugiamodžiam lazerio režimui skenavimas pradėtas taip pat ties  $0,99 \text{ J/cm}^2$  ir baigtas ties  $7,04 \text{ J/cm}^2$ . Iš viso energijos įtėkis buvo keltas 22 kartus, o tai reiškia, kad testuojamas  $1 \text{ cm}^2$  bandinio paviršiaus plotas buvo eksponuotas 22 sluoksniais. PLSS nustatytas

ties  $4,56 \text{ J/cm}^2$  įtėkio verte. Su daugiמודžiais impulsais taip pat vyravo ta pati pažaidų morfologija smulkūs pavieniai defektai – inicijuota pažaida, tęsiant eksponavimą su didesnėmis energijos įtėkio vertėmis, didėjo ir virto katastrofine. Lyginant skirtingų formų impulsų inicijuotą pažaidą, įdomu tai, jog daugiמודžių impulsų atveju matavimą buvo galima tęsti iki  $7,04 \text{ J/cm}^2$ , priešingai nei eksponuojant su vienמודžiais impulsais, kurie inicijavę pažaidą iškart pradėjo visos dangos ardymą. Prancūzų mokslininkai atliko panašų eksperimentą ir ištyrė, jog eksponuojant bandinį su  $1064 \text{ nm}$  bangos ilgio spinduliuote, didesnis pažaidų tankis inicijuojamas esant daugiמודžiam lazerio režimui [26].



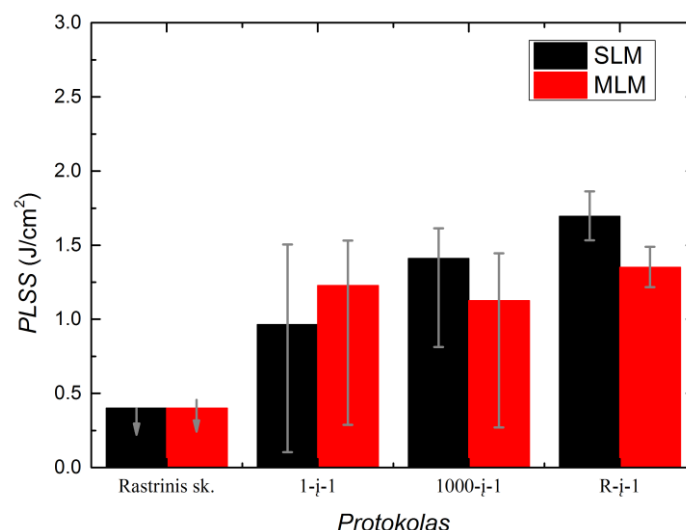
22 pav. PLSS gauti matuojant skirtingais protokolais, naudojant vienמודį (SLM) ir daugiמודį (MLM) lazerio režimus, kai lazerio spinduliuotės bangos ilgis  $1064 \text{ nm}$ .

Taigi, apibendrinat, galime palyginti skirtingais matavimo protokolais ir impulso gaubtinėmis gautus rezultatus, matuojant bandinį su I – aja harmonika (22 pav.). Kaip ir buvo tikėtasi, matome, jog rastrinio skenavimo protokolu išmatuotas PLSS yra pats žemiausias. Labiausiai tikėtina, kad taip yra todėl, kad eksponuojamas  $1 \text{ cm}^2$  plotas yra daugiau nei 15 kartų didesnis už 1-i-1, S-i-1 ir net 300 kartų didesnis R-i-1 protokolų metu apšvitinamų vietų bendrą plotą. Tai užtikrina didesnę tikimybę lazerio pluoštui pataikyti į pačius rečiausius (mažo PLSS) defektus, kurie ir riboja optinio elemento PLSS. Nors 1-i-1 protokolu išmatuotas PLSS yra pats aukščiausias (bandinio tašką pasiekia tik vienas impulsas) PLSS įvertis nuo S-i-1 ir R-i-1 skiriasi gana nedaug. Kadangi lazerio pasikartojimo dažnis palyginus nedidelis ( $100 \text{ Hz}$ ) PLSS ribojantis šilumos kaupimo mechanizmas – mažai tikėtinas. Nuovargio efektas, kuris stebimas S-i-1 testu yra silpnas, bet pastebimas. R-i-1 protokolu atliktas testas duoda tarpinę vertę tarp 1-i-1 ir S-i-1 protokolais išmatuotų PLSS verčių. Tam įtaką daro tai, kad pradedant testavimą

su žemomis energijos įtėkio vertėmis ir palaipsniui jas keliant iki slenkstinės, iš pradžių vyksta dangos valymas ir grūdinimas – aukštesnio nei S-į-1 PLSS priežastis. Tačiau, šio protokolo metu yra apšvitinamas mažiausias bandinio paviršiaus plotas – daugiau nei 300 kartų mažesnis nei rastrinio skenavimo metu, bei apie 20 kartų mažesnis nei 1-į-1 ar S-į-1 protokolų metu. Tai reiškia, kad tikimybė aptikti rečiausius defektus su mažiausiu PLSS stipriai sumažėja, o protokolas tampa ne toks patikimas kaip kiti. Taigi, galime teigti, kad 1-į-1, S-į-1 ir R-į-1 protokolais išmatuoti PLSS įverčiai yra pervertinti lyginant su rastrinio skenavimo protokolo nustatyta verte.

Taip pat galime įvertinti impulso formos įtaką PLSS išmatuotoms vertėms, kai kitos sąlygos ir lazerio parametrai paklaidų ribose nekinta. Matome, jog visais atvejais esant daugelio išilginių modų lazerio režimui PLSS yra žemesnis. Daugiamodžio ir vienmodžio impulsų PLSS verčių skirtumas yra pakankamai didelis – nuo  $\approx 36\%$  iki  $\approx 53\%$ , todėl tikėtina, kad toks didelis pokytis atsiranda dėl didesnio intensyvumo laikinio impulso smailių daugiamodžiam impulse, sugeneruojamų išilginių modų plakimosi metu. Galime daryti išvadą, kad I harmonikos atveju pažaidą nulemia smailinis energijos įtėkis: daugiamodžių impulsų atveju smailinis intensyvumas sub-impulsuose yra aukštesnis nei vienmodžiam impulsui, todėl pažaidos mechanizme labai tikėtinas daugiafotonės sugerties indėlis – daugiamodžiam impulsui PLSS yra žemesnis.

### III harmonika (HR 355 nm veidrodis):

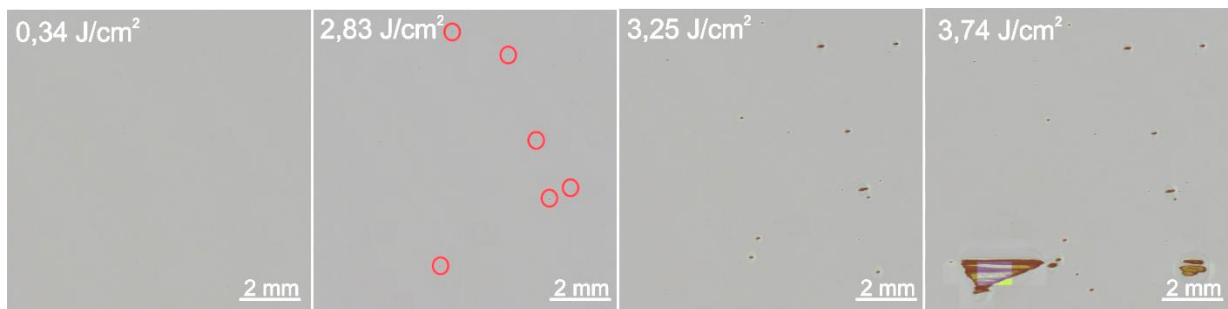


23 pav. PLSS gauti matuojant skirtingais protokolais, naudojant vienmodį (SLM) ir daugiamodį (MLM) lazerio režimus, kai lazerio spinduliuotės bangos ilgis 355 nm.



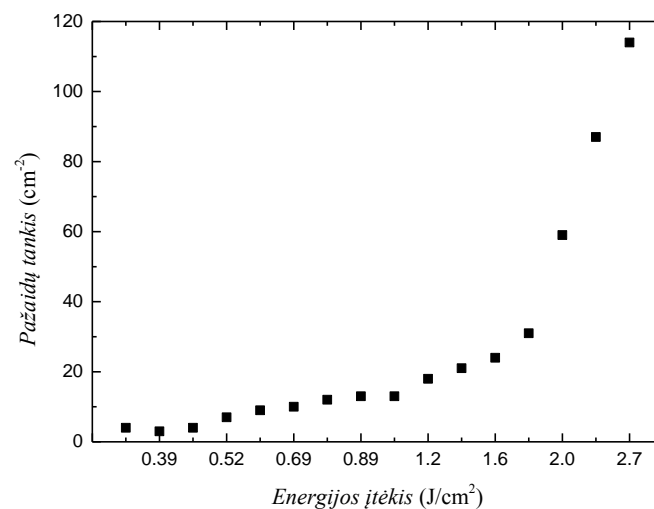
23 paveikslėlyje, apibendrinančiame trečiosios lazerio harmonikos (355 nm) rezultatus, matome, jog išlieka ta pati tendencija kaip ir ankstesniu atveju: rastrinio skenavimo būdu išmatuotas slenkstis yra pats žemiausias dėl didžiausio apimamo testavimo ploto, kuris suteikia galimybę įskaityti itin retų defektų (su žemiausiu PLSS) ribojamą optinio elemento PLSS. Po atliktos nuotraukų analizės nedidelis pažaidų tankis nustatytas jau pirmajame rastrinio skenavimo sluoksnyje, tiek vienmodžio, tiek daugiamodžio impulso atvejais, tad tikslaus rastrinio skenavimo PLSS negalime sužinoti, tačiau akivaizdu, kad jis yra žemesnis nei pirmoji eksponuota energijos įtėkio vertė. Lyginant 1-į-1, S-į-1 ir R-į-1 protokolais išmatuotus PLSS stebime, jog paklaidų ribose jie visi sutampa, nors vienmodžio ir daugiamodžio lazerio režimų PLSS įverčių vidurkis yra aukščiausias R-į-1 protokolo rezultatuose. Šis pasiskirstymas aiškiai parodo, jog pagrindinis skirtumas, lemiantis platų PLSS įverčių diapazoną yra susijęs su apšvitintu bandinio paviršiaus plotu – rastrinio skenavimo metu apšvitintas didžiausias plotas lemia mažiausią PLSS vertę, kai tuo tarpu mažiausias apšvitintas plotas R-į-1 protokolo metu lemia didžiausią PLSS vertę. Tarpiniai protokolai pagal apšvitinamą plotą – 1-į-1 ir S-į-1 – duoda tarpinę, tarp R-į-1 ir rastrinio skenavimo, PLSS vidutinę vertę. Taip pat atskirais protokolais gautose duomenų rinkinių diagramose, kurios pateiktos darbo priede, stebime, jog pažaidos tikimybė nėra tolydi, todėl galimai pasireiškia ir vienas kitą ekranuoja du skirtingi pažaidas inicijuojantys mechanizmai. Pirmoji tikimybės kreivės dalis yra prie žemesnių energijos įtėkio verčių, gulstesnė. Manome, kad tai dangos defektų (pvz. mazginių defektų) inicijuojamos pažaidos nulemti ribojimai: defektų PLSS paprastai būna žemesnis nei optinės dangos. Antrasis staigus kilimas tikimybinėse diagramose teikia informaciją apie pačios dangos medžiagos apribotą PLSS vertę. Kaip ir nurodyta ISO standarte – pažaida laikome, bet kokį lazeriu inicijuotą dangos pakitimą matomą mikroskopu. Taigi, nustatant PLSS, buvo pasirinkta pirmoji gaubtinės dalis, taip siekiant sumažinti aproksimacijos modelio paklaidą. Taip pat matome, jog 1-į-1 ir S-į-1 grafikuose keletas pažaidos tikimybės verčių pakankamai daug nukrypsta nuo aproksimacijos kreivės. Tai rodo, jog bandinio danga ir jos defektai yra gana netolygiai pasiskirstę visame optinio elemento plote. Dangos nehomogeniškumą ir mažą defektų, turinčių žemą PLSS, tankį, patvirtina ir R-į-1 diagramos: itin daug nuo kitų eksponuotų taškų nutolęs slenkstinį pažeidimą turintis taškas. Labai tikėtina, kad defektas su žemiausia PLSS verte šiuo protokolu nebuvo eksponuotas. Taigi, galime teigti, jog šiuo konkrečiu atveju matuojant PLSS su III harmonika testavimo protokolo pasirinkimas tarp 1-į-1, S-į-1 ir R-į-1 neturėjo didelės įtakos slenkstinės vertės nustatymui, tačiau iš rastrinio skenavimo rezultatų akivaizdu, kad visi jie pervertina tikrąjį optinio elemento PLSS.

Lyginant daugiamodžio ir vienmodžio lazerio režimų vertes, didelių skirtumų šiuo atveju nestebime dėl pakankamai didelės matavimų neapibrėžties – paklaidų ribose viskas sutampa. Iš gautų eksperimento rezultatų nežymiai išsiskiria tik R-į-1 protokolu išmatuoti PLSS su skirtingomis impulso formomis. Tai atkartoja tendenciją, gautą matuojant IR srityje. Daugelio išilginių modų režimu gautas slenkstis yra žemesnis nei esant stabiliam lazerio režimui. Tačiau visų kitų protokolų išmatuoti PLSS įverčiai nepriklauso nuo impulso formos. Vienmodžiais ir daugiamodžiais impulsais išmatuotos PLSS vertės skiriasi iki  $\approx 22\%$ . Todėl manome, jog III harmonikos atveju pagrindinis pažaidų nulemiantis veiksnys yra energijos dozė impulse.



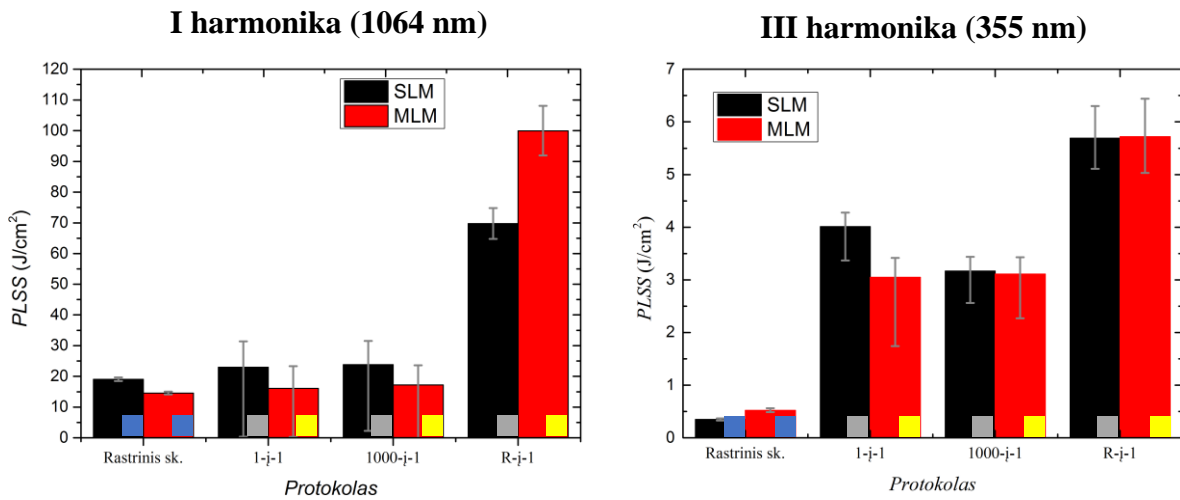
24 pav. Rastrinio skenavimo protokolu eksponuotas bandinio paviršiaus plotas ties skirtingais energijos įtėkio lygiais, kai lazerio bangos ilgis 355 nm, o impulso forma – daugiamodė.

Rastrinio skenavimo protokolui suprasti papildomai buvo suskaičiuota pažaidų tankio priklausomybė nuo energijos įtėkio. 24 paveikslėlyje pastebime, jog pažaidos esant žemiausiems energijos įtėkiams tokios retos ir mažos, kad žiūrint į visą eksponuotą  $1\text{ cm}^2$  paviršiaus plotą jų tiesiog negalime išskirti. Didinat energijos įtėkio vertę, pažaidų tankis greitai didėja (25 pav.).



25 pav. Pažaidų tankio priklausomybė nuo energijos įtėkio, kai lazerio bangos ilgis 355 nm, o impulsų forma – daugiamodė.

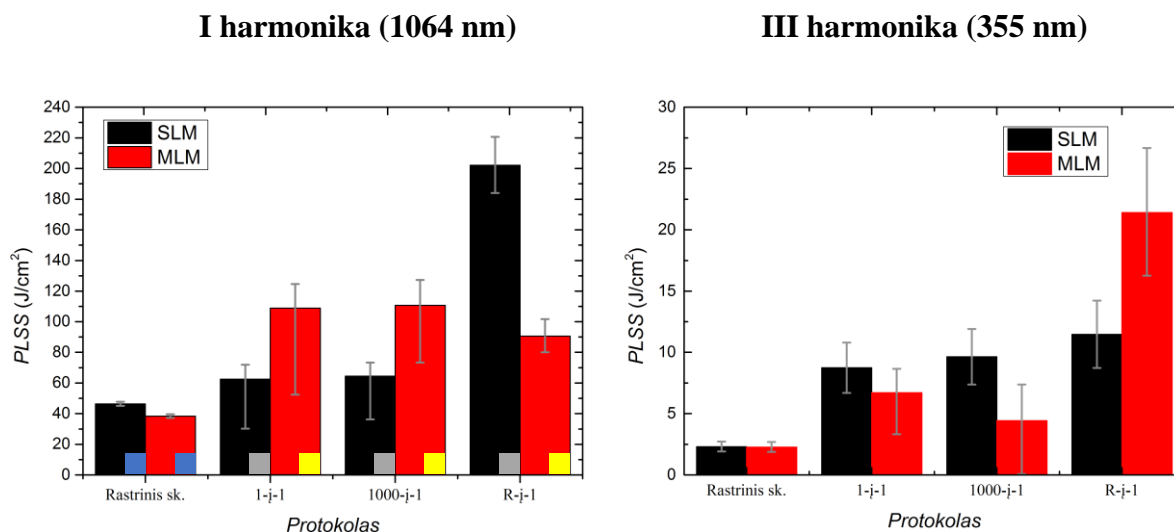
### 7.1.2 Skaidrinančių dangų tyrimai skirtingais PLSS protokolais



26 pav. Optinių elementų su skaidrinančia danga PLSS, gauti matuojant skirtingais protokolais, naudojant vienmodį (SLM) ir daugiמודį (MLM) lazerio režimus, kai lazerio spinduliuotės bangos ilgis 1064 nm ir 355 nm. Spalvoti kvadratai žymi fizinių bandinio vienetą, ant kurio buvo atliktas matavimas.

Pagrindinė tendencija, kaip ir pastebėta matavimuose su veidrodinėmis dangomis, ta pati ir skaidrinančių dangų atveju – R-į-1 testavimo protokolas stipriai pervertina PLSS įvertį lyginant jį su PLSS, nustatytu rastrinio skenavimo metu. Santykis tarp R-į-1 ir rastrinio skenavimo protokolais gautų PLSS įverčių yra didžiausias tiek IR, tiek UV spinduliuotei dėl didžiausio eksponuojamų plotų skirtumo. I harmonikos rezultatuose, lyginant rastrinio skenavimo, 1-į-1 ir S-į-1 protokolais gautus PLSS įverčius matome skirtingą rezultatą nei veidrodinių dangų atveju. Čia visi PLSS įverčiai sutampa paklaidų ribose ir yra beveik lygūs. Tai reiškia, kad dangoje yra labai didelis tankis defektų, turinčių žemą PLSS. Išsiskiria tik R-į-1 atvejis, kur tikėtinas grūdinimo efektas arba slenkstis pervertintas dėl santykinai mažo nuskenuoto ploto ar bandinio nehomogeniškumo. III harmonikos skaidrinančių dangų rezultatai palyginti gerai atitinka anksčiau pastebėtas ir suformuluotas tendencijas veidrodžiams, tačiau reikėtų paminėti, jog skaidrinančių dangų atveju net tik defektai turi didelę įtaką optinio elemento atsparumui lazerinei spinduliuotei. Tokioms dangoms taip pat aktuali ir skiriamosios ribos tarp dangos ir pagrinduko kokybė. Tai reiškia, jog pagrinduko paviršiaus paruošimas, jo kokybė bei Beilby sluoksnio savybės yra daug svarbesnės nei didelio atspindžio dangų atveju.

### 7.1.3 Protokolų tyrimas: nedengtu optinių elementu atvejis



27 pav. Nedengtų optinių elementų PLSS, gauti matuojant skirtingais protokolais, naudojant vienmodį (SLM) ir daugiמודį (MLM) lazerio režimus, kai lazerio spinduliuotės bangos ilgis 1064 nm ir 355 nm. Spalvoti kvadratai žymi fizinių bandinio vienetą, su kuriuo buvo atliktas matavimas.

27 paveikslėlyje matome, jog, vėl gi, tiek IR, tiek UV srityse didžiausias PLSS vidurkių santykis išryškėja tarp rastrinio skenavimo ir R-į-1 protokolų, tačiau nedengtų optinių elementų atveju, eksponuojant IR srityje rezultatai rodo, jog daugiמודžiame režime PLSS įvertis yra aukštesnis, nei matuojant vienmodžiu lazeriu. Čia reiktų pastebėti, jog 1-į-1, S-į-1, R-į-1 matavimai su skirtingomis impulso formomis buvo atliekami naudojant skirtingus bandinius iš tos pačios gamybos partijos. Nors bandiniai pagal gamintojo pateiktus parametrus gaminti identiški, tačiau, kaip matome, rezultatai rodo tam tikrą neatsikartojamumą. Negalime atmesti prielaidos, kad bandiniai yra skirtingi, nes šiuo atveju nėra patvirtinama tendencija, kad eksponuojant daugiמודžiais impulsais PLSS įvertis gaunamas mažesnis nei eksponuojant vienmodžiais. Taigi, labai tikėtina, kad PLSS net ir tos pačios partijos bandiniams neatsikartoja. Atitinkamai, galime daryti prielaidą, kad perkant optinį elementą gamintojo nurodyta PLSS vertė nebūtinai atitinka realybę, jei skirtumai vienoje partijoje viršija matavimų paklaidas. Šią prielaidą galima būtų patikrinti ištyrus PLSS verčių sklaidą visoje gamybos partijoje, o bandinius sertifikuoti. Mažinant riziką, reiktų vengti naudoti elementą arti slenkstinių energijos įtekio verčių.

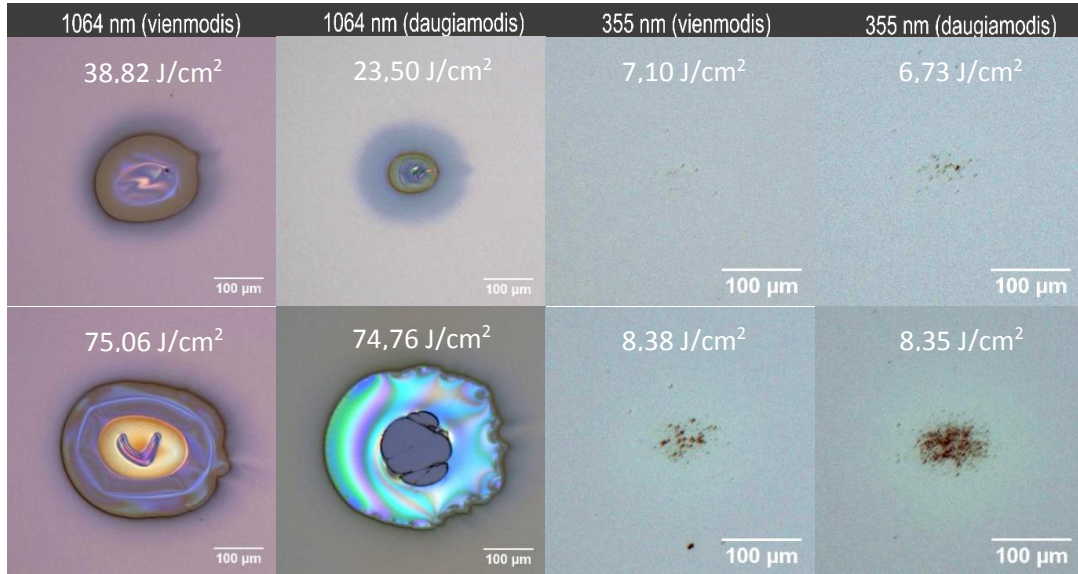
## 7.2 Pažaidos morfologijos

Atlikus paviršiaus morfologijos nuotraukų analizę pastebėta, jog visų protokolų atvejais pažaidų morfologijos buvo panašios. Skyrėsi tik pažaidos, sukurtos su skirtingo bangos ilgio spinduliuote. 28 pav. pateikiamos 1-į-1 protokolu užfiksuotų pažaidų morfologijos IR ir UV srityse, eksponuojant bandinius skirtingais lazerio režimais – vienmodžiu ir daugiamodžiu.

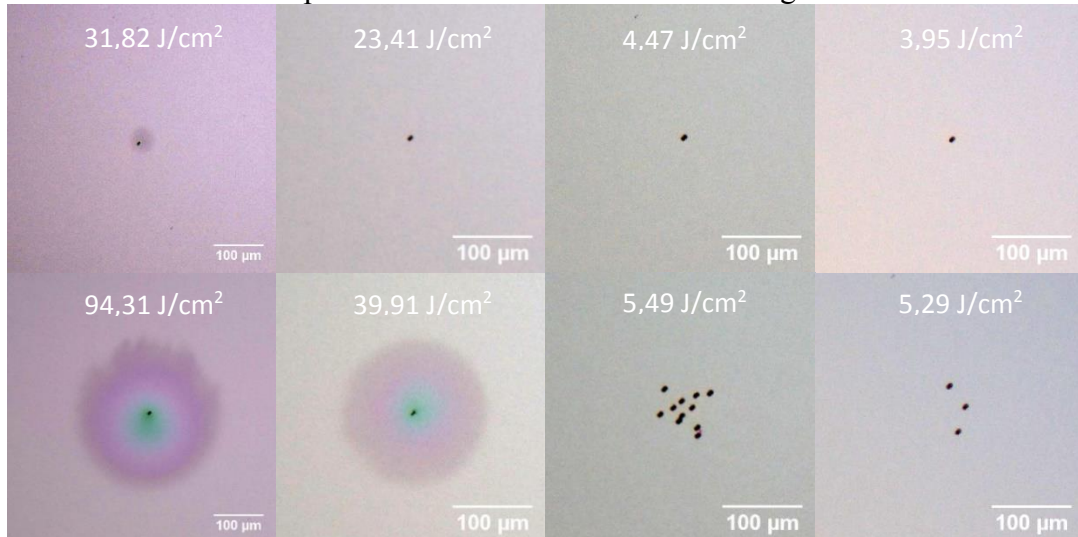
I harmonikos atveju, 28 paveikslėlyje pateiktos pažaidų morfologijų nuotraukos parodo, kad skirtingų optinių elementų grupėms stebimi pažaidos morfologijų skirtumai. Didžiausias skirtumas matosi tarp nedengto lydyto kvarco pagrindu ir bandinių su dangomis. Optiniam elementui su atspindinčia danga būdingos katastrofinės pažaidos ir atskirų sluoksnių delaminacija. Kai eksponuojama su 1064 nm ilgio spinduliuote iki tam tikro intensyvumo ribos dominuoja tiesinė sugertis, tačiau pasiekus pakankamai aukštą intensyvumą, prasideda daugiafotonė sugertis, pakeičianti dangos ar jos defektų optines savybes. Taigi, labai tikėtina kad IR srityje pažaida inicijuojama, kai impulso intensyvumas yra smailinis: likusi impulso dalis tik įkaitina pradėjusią irti vietą, jonizuodama aplinkui esančią medžiagą ir sukeldama plazmos pliūpsnį. Kadangi jonizuotas tūris greitai plečiasi, o pažaidą sukeliantys impulsai turi pakankamai daug energijos likusioje dalyje, išsivysto katastrofinė pažaida. Sugerties centras ir plazmos sukeltas dangos nudeginimas labai gerai matosi ant elementų su skaidrinančiomis dangomis. Nedengtų optinių elementų atveju dominuoja jau kitokio pobūdžio pažaidos – čia dangų nėra, tad nevyksta atsisluoksniavimas. Todėl spalvų matyti gerokai mažiau, o pažaidos nėra tokios išreikštos. Elementas yra pažeidžiamas sąlyginai nedideliame gylyje žemiau paviršiaus, į kurį nukreipta lazerio spinduliuotė. Eksponuojama vieta yra lokalizuotai šildoma ir atkaitinama, o sukuriamas modifikuotos medžiagos sluoksnis lengvai pasišalina. Tokios pat rūšies pažaidos sukeliama tiek eksponuojant su vienmodžiu, tiek daugiamodžiu lazerio režimu visais eksperimente tirtais atvejais. Gerokai padidinus impulso energijos įtekį morfologijos pradeda skirtis: eksponuojant daugiamodžiais impulsais yra stebimi ratilai aplink pažaidas, kurie vienmodžio lazerio režimu nėra inicijuojami [3].

Eksperimentuose su III harmonika visiems testuotiems bandiniams – tiek su atspindinčia danga, tiek su skaidrinančia danga, tiek ir nedengtų lydyto kvarco langelių atveju – vyraujanti pažaidų rūšis yra taškiniai patamsėjimai (28 pav.). Iš pradžių, eksponuojant su šiek tiek didesniu nei slenkstinis energijos įtekium, galime stebėti atsirandant tik po vieną taškelį, tačiau didinant energijos įtekio vertę, taškelių skaičius auga ir pasiskirsto šiek tiek mažesnėse nei pluošto diametras ribose. Tokią pažaidų morfologiją galima būtų paaiškinti kaip dengimo ar elemento poliravimo metu susidariusius sugerties centrus – nanodefektus, kurie pasižymi didesne nei

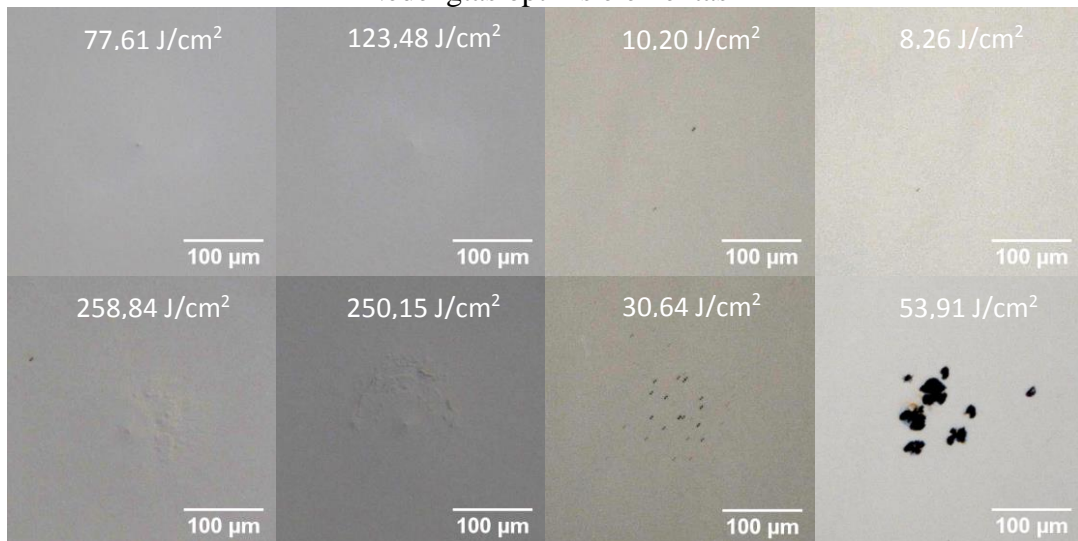
### Optinis elementas su veidrodine danga



### Optinis elementas su skaidrinančia danga



### Nedengtas optinis elementas



28 pav. 1-į-1 protokolo metu užfiksuotų pažeidimų morfologijos pavyzdžiai IR ir UV srityse, eksponuojant bandinį su skirtingais lazerio režimais – vienmodžiu ir daugiamodžiu.

stiklas sugertimi. Jie tiesiogiai sugeria UV fotonus ir išryškėja lokaliuose vietose, sugėrus tam tikrą energijos kiekį. Šių pažeidimų inicijavimą labiau lemia spinduliuotės dozė nei smailinis intensyvumas. Dozė – tai bendras energijos kiekis į ploto vienetą. Šios pažeidimosi vyrauja esant abiem testuotoms impulso formoms, o skirtumai tarp daugiamodžio ir vienmodžio PLSS - minimalūs.

## Pagrindiniai rezultatai ir išvados

- Nanosekundinių impulsų atveju, optinių elementų PLSS įverčiai yra atvirkščiai proporcingi nuskenuotam plotui t.y.: didžiausias slenkstinis energijos įtėkis gaunamas R-į-1 protokolui, kur eksponuotas plotas mažiausias, o mažiausias - rastrinio skenavimo protokolui, kur eksponuojamas plotas didžiausias, todėl saugiam optinių elementų apibūdinimui rekomenduotina naudoti rastrinio skenavimo metodą;
- Pažaidos mechanizmai I ir III harmonikos atvejais galimai yra skirtingi, nes skiriasi ir šiems atvejams būdingos pažaidos morfologijos:
  - I harmonikos impulsų atveju buvo stebima pavieniais defektais inicijuojama pažaida su ją supančiomis pakitusios spalvos aureolėmis – plazmos pėdsakais, kas daugeliu atvejų sukėlė katastrofines pažaidas;
  - III harmonikos atveju pažaidos morfologijai būdingi daugybiniai lokalizuoti patamsėjimai, tačiau plazmos pėdsakų nebuvo stebėta.

Šiuos skirtumus greičiausiai nulėmė tai, kad UV spinduliuotė gerai sugeria defektai ir jų ardymas prasideda esant mažesnėms impulsų energijoms nei IR atveju. Norint vienareikšmiškai iširti skirtumus tarp pažaidos morfologijų reikalingi papildomi tyrimai;

- Testavimui naudojant vienos ir daugelio išilginių modų impulsus stebimas PLSS įverčių skirtumas: daugeliu atvejų mažesnis PLSS gaunamas daugiamodžiams impulsams, kurie dėl išilginių modų plakimosi pasižymi aukštesnėmis intensyvumo fluktuacijomis.
- Skirtumai tarp skirtingų testavimo protokolų gaunamų PLSS įverčių yra nevienodi skirtingų tipų bandinių grupėms ir bangos ilgiams, todėl tikėtina, kad juos nulemia bandinių nehomogeniškumas optinio atsparumo prasme: kiekvienam bandiniui būdingi skirtingi PLSS ribojantys defektų ansamblių skirstiniai.



## **Padėka**

Darbas atliktas bendradarbiaujant su UAB Lidaris (sutartis BS-120000-1018, 2015-04-30), kur visuotinio karantino metu buvo atlikti darbui reikalingi eksperimentiniai tyrimai. Dėkoju Egidijui Pupkai, Dr. Justinui Galiniui ir Dr. Linai Vigricaitei už vertingus praktinius patarimus bei visokeriopą pagalbą, ruošiant eksperimentus ir interpretuojant duomenis. Taip pat esu labai dėkinga darbo vadovui Dr. Andriui Melninkaičiui, kuris su didžiausiu palaikymu vedė mane per šį dviejų metų maratoną magistro laipsnio link. Už tyrimams parūpintus eksperimentinius bandinius dėkoju UAB Optolita ir UAB Altechna.

Dalis darbo rezultatų jau buvo pristatyti tarptautinėje mokslinėje konferencijoje „SPIE LASER DAMAGE 2019“ JAV, kur laimėjo geriausio stendinio pranešimo prizą [27].

## Literatūros sąrašas

- [1] T. Maiman, *Nature*, **187** (4736), 493–494 psl. (1960).
- [2] ISO21254 1-3 Parts: Lasers and laser-related equipment-determination of laser-induced damage threshold of optical surfaces (2011).
- [3] M. Chambonneau, R. Diaz, G. Duchateau, P. Grua, J. Natoli, J. Rullier ir L. Lamaignère, Laser-induced damage morphology in fused silica at 1064 nm in the nanosecond regime, *Proc. of SPIE* **9237** (15), 1–8 psl. (2014).
- [4] G. Batavičiūtė, E. Pupka, V. Pyragaitė, L. Smalakys ir A. Melninkaitis, Effect of longitudinal laser mode beating in damage probability measurements, *Proc. of SPIE* **8885** (1), 1–9 psl. (2013).
- [5] Y. Zhao, Z. Tang, J. Shao ir Z. Fan, Single-shot and multishot laser-induced damage of HfO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> multilayer at YAG third harmonic, *Proc. of SPIE* **5273**, 23-29 psl. (2004).
- [6] L. Gallais, D.-B. Douti, M. Commandré, G. Batavičiūtė, E. Pupka, M. Ščiuka, L. Smalakys, V. Sirutkaitis ir A. Melninkaitis, Wavelength dependence of femtosecond laser-induced damage threshold of optical materials, *Appl. Phys.*, **117**(223103), 1–15 psl. (2015).
- [7] L. G. Deshazer, B. E. Newnam ir K. M. Leung, Role of coating defects in laserinduced damage to dielectric thin films Role of coating defects in laser-induced damage to dielectric thin films, *Appl. Phys. Lett.*, **607** (1973), 1–4 psl. (1991).
- [8] M. Mero, B. Clapp, W. Rudolph, K. Starke, W. Kautek ir S. Martin, On the damage behavior of dielectric films when illuminated with multiple femtosecond laser pulses, *Opt. Eng.*, **44** (5), 1–7 psl. (2005).
- [9] E. S. Bliss, Pulse Duration Dependence of Laser Damage Mechanisms, *OPTO-ELECTRONICS*, **01730** (3), 99–108 psl. (1971).
- [10] D. Du, X. Liu, G. Korn, J. Squier ir G. Mourou, Laser-induced breakdown by impact ionization in SiO<sub>2</sub> with pulse widths from 7 ns to 150 fs Laser-induced breakdown from 7 ns to 150 fs by impact ionization in SiO<sub>2</sub> with pulse widths, *Appl. Phys. Lett.*, **3071** (64), 2–5 psl. (1994).

- [11] L. Jensen, M. Jupé, H. Mädebach, H. Ehlers, K. Starke, D. Ristau, W. Riede, P. Allenspacher ir H. Schroeder, Damage threshold investigations of high power laser optics under atmospheric and vacuum conditions, *Proc. of SPIE* **6403**, 1–10 psl. (2007).
- [12] K. Mikami, S. Motokoshi, M. Fujita, T. Jitsuno, ir K. A. Tanaka, Laser-Induced Damage Thresholds of Optical Coatings at Different Temperature, *Proc. of SPIE* **8190**, 2–6 psl. (2011).
- [13] M. R. Kozlowski ir R. Chow, The role of defects in laser damage of multilayer coatings Mark, *Proc. of SPIE* **2114**, 640–649 psl. (2013).
- [14] D. Ristau, *Laser-induced damage in optical materials*. CRC Press, (2017).
- [15] G. L. Wood ir E. J. Sharp, Laser Induced Optical Damage in Solids, *Night Vis. Electro-Optics*, **124** (1991).
- [16] M. Pfiffer, J. L. Longuet ir D. W. Johnson, Characterization of the Polishing-Induced Contamination of Fused Silica Optics, *J. Am. Ceram. Soc.* **100** (1), 96–107 psl. (2017).
- [17] G. Batavičiūtė, P. Grigas, L. Smalakys, A. Melninkaitis, Revision of laser-induced damage threshold evaluation from damage, *Rev. Sci. Instrum.* **045108** (84) (2013).
- [18] M. Chambonneau, R. Diaz, P. Grua, J. Rullier, G. Duchateau ir J. Natoli, Origin of the damage ring pattern in fused silica induced by multiple longitudinal modes laser pulses, *Appl. Phys. Lett.*, **021121** (104), 1–5 psl. (2014).
- [19] M. Chambonneau, P. Grua, J. Rullier, J. Natoli, ir L. Lamaigne, Parametric study of the damage ring pattern in fused silica induced by multiple longitudinal modes laser pulses, *J. Appl. Phys.*, **103101** (117), 1–8 psl. (2015).
- [20] ISO11254-1 Lasers and laser-related equipment-determination of laser-induced damage threshold of optical surfaces—Part 1: 1-on-1 test (2000).
- [21] ISO11254-2 Lasers and laser-related equipment-determination of laser-induced damage threshold of optical surfaces—Part 2: S-on-1 test (2001).
- [22] J. Wolfe, M. Runkel, J. Folta, M. Borden, C. Stolz ir J. R. Taylor, SPECIFICATION Small Optics Laser Damage Test Procedure, MEL01-013-OD, 1–11 psl. (2005).
- [23] J. Taniguchi, J. Howe, D. J. Smith, E. R. Road, C. Stolz, C. Weinzapfel ir J. Kimmons, Functional damage thresholds of hafnia / silica coating designs for the NIF laser, *Proc. of SPIE* **4347** (716), 109–117 psl. (2001).

- [24] F. Bensebaa, Dry Production Methods, *Interface Science and Technology*, Elsevier Ltd. (19), 147–184 psl. (2013).
- [25] H. Randhawa, Review of plasma-assisted deposition processes, *Thin Solid Films*, (196), 329–349 psl. (1991).
- [26] R. Courchinoux, R. Diaz, M. Chambonneau, T. Donval ir L. Lameignère, Laser damage resistance qualification of large optics for high power laser, (9345) 934508 psl. (2015).
- [27] R. Pakalnytė, E. Pupka ir A. Melninkaitis, Direct comparison of laser-induced damage threshold testing protocols on dielectric mirrors: effect of nanosecond laser pulse shape at NIR and UV wavelengths, *Proc. of SPIE* **11173** (18), 1-10 psl. (2019).

# PAŽAIDOS LAZERIO SPINDULIUOTEI SLENKSČIO MATAVIMAI: TESTAVIMO PROTOKOLŲ IR IMPULSŲ FORMOS ĮTAKOS TYRIMAI

Rūta Pakalnytė

## Santrauka

Lazerinių sistemų pagrindinės sudedamosios dalys yra optiniai elementai. Tad norint prailginti sistemų gyvavimo laiką, svarbu žinoti tų optinių elementų pažaidos lazerinei spinduliuotei slenkstį (PLSS). Skirtingose laboratorijose gaunamos skirtingos PLSS vertės, kadangi PLSS nustatomi naudojant nevienodus eksponavimo algoritmus, skirtingo stabilumo lazerius bei kitus parametrus. Taigi, šio darbo tikslas ir buvo ištirti testavimo protokolo, lazerinio impulso formos ir bangos ilgio įtaką standartinių dielektrinių veidrodžių, komercinių lydyto kvarco pagrindukų ir skaidrinančių dangų PLSS įverčiams. Siekiant šio tikslo, tiriamajame darbe išmatuotos PLSS vertės, naudojant skirtingus testavimo protokolus tokius kaip 1-į-1, S-į-1, kur  $S = 1000$ , R-į-1 ir rastrinio skenavimo. Testai pakartotinai atlikti naudojant vienos išilginės modos ir daugiamodį lazerius.

Atlikus tyrimą, nustatyta, kad nanosekundinių impulsų atveju, optinių elementų PLSS įverčiai yra atvirkščiai proporcingi nuskenuotam plotui t.y.: didžiausias slenkstinis energijos įtekis gaunamas R-į-1 protokolui, kur eksponuotas plotas mažiausias, o mažiausias - rastrinio skenavimo protokolui, kur eksponuojamas plotas didžiausias, todėl saugiam optinių elementų apibūdinimui rekomenduotina naudoti rastrinio skenavimo metodą. Taip pat pastebėta, kad pažaidos mechanizmai I ir III harmonikos atvejais galimai yra skirtingi, nes skiriasi ir šiems atvejams būdingos pažaidos morfologijos. Šiuos skirtumus greičiausiai nulėmė tai, kad UV spinduliuotę gerai sugeria defektai ir jų ardymas prasideda esant mažesnėms impulsų energijoms nei IR atveju. Norint vienareikšmiškai ištirti skirtumus tarp pažaidos morfologijų reikalingi papildomi tyrimai. Rezultatuose, kai testavimui naudojama vienos ir daugelio išilginių modų impulsai, stebimas PLSS įverčių skirtumas: daugeliu atvejų mažesnis PLSS gaunamas daugiamodžiams impulsams, kurie dėl išilginių modų plakimosi pasižymi aukštesnėmis intensyvumo fluktuacijomis. Skirtumai tarp skirtingų testavimo protokolų gaunamų PLSS įverčių yra nevienodi skirtingų tipų bandinių grupėms ir bangos ilgiams, todėl tikėtina, kad juos nulemia bandinių nehomogeniškumas optinio atsparumo prasme: kiekvienam bandiniui būdingi skirtingi PLSS ribojantys defektų ansamblių skirstiniai.

# DIRECT COMPARISON OF LASER-INDUCED DAMAGE THRESHOLD TESTING PROTOCOLS: EFFECT OF NANOSECOND LASER PULSE SHAPE AT NIR AND UV WAVELENGTHS

Rūta Pakalnytė

## Summary

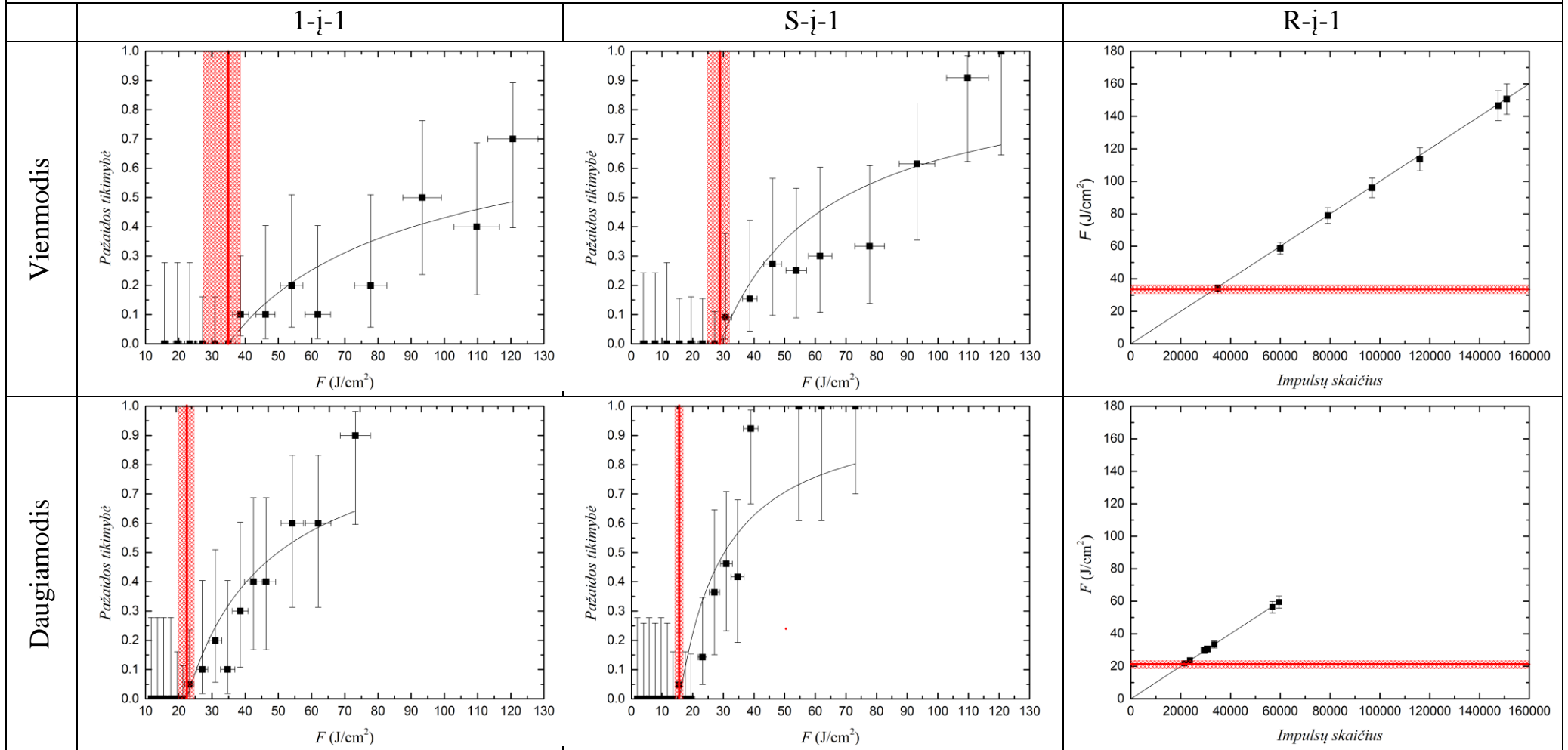
The main components of laser systems are optical elements. Thus, in order to prolong the life of systems, it is important to know the laser induced damage threshold (LIDT) of those optical elements. Different LIDT values are obtained in different laboratories, as LIDT is determined using different exposure algorithms, lasers of different stability and other parameters. Thus, the aim of this work was to investigate the influence of test protocol, laser pulse shape and wavelength on LIDT values of standard dielectric mirrors, commercial fused silica substrates and anti-reflective coatings. To this end, LIDT was measured using different testing protocols such as 1-on-1, S-on-1, where  $S = 1000$ , R-on-1 and Raster Scan. The tests were repeated using single-mode and multi-mode laser regime.

The research found that in all cases, the LIDT value is inversely proportional to the scanned area: the LIDT is highest (R-on-1), where the exposed area is the smallest, and the smallest LIDT is obtained during the Raster Scan protocol, where the exposed area is the largest, therefore Raster Scan method is recommended for the safe characterization of LIDT of optical elements. It has also been observed that the damage mechanisms in the case of I and III harmonics are possibly different, as the damage morphologies, specific to these cases, are also different. These differences are most likely due to the fact that UV radiation is well absorbed by the defects and their degradation begins at lower pulse energies than in the case of IR. Additional studies are needed to unambiguously investigate the differences between damage morphologies. Summarizing the experiments using single and multiple longitudinal mode pulses, a difference in LIDT values is observed in the results: in many cases, a lower LIDT value is obtained with multimode pulses, which have higher intensity fluctuations due to longitudinal mode beating. The differences between the LIDT values obtained by the different test protocols are different for different sample types and wavelengths, so it is likely that these differences are due to sample inhomogeneity in terms of optical resistance: each sample has different LIDT limiting defect ensembles.

**Priedas A:** Optinių elementų su atspindinčiomis ir skaidrinančiomis dangomis, bei nedengtų optinių elementų pažaidos tikimybes priklausomybės nuo energijos įtekio IR ir UV srityse matuojant su vienmodžiu ir daugiamodžiu lazerio režimais.

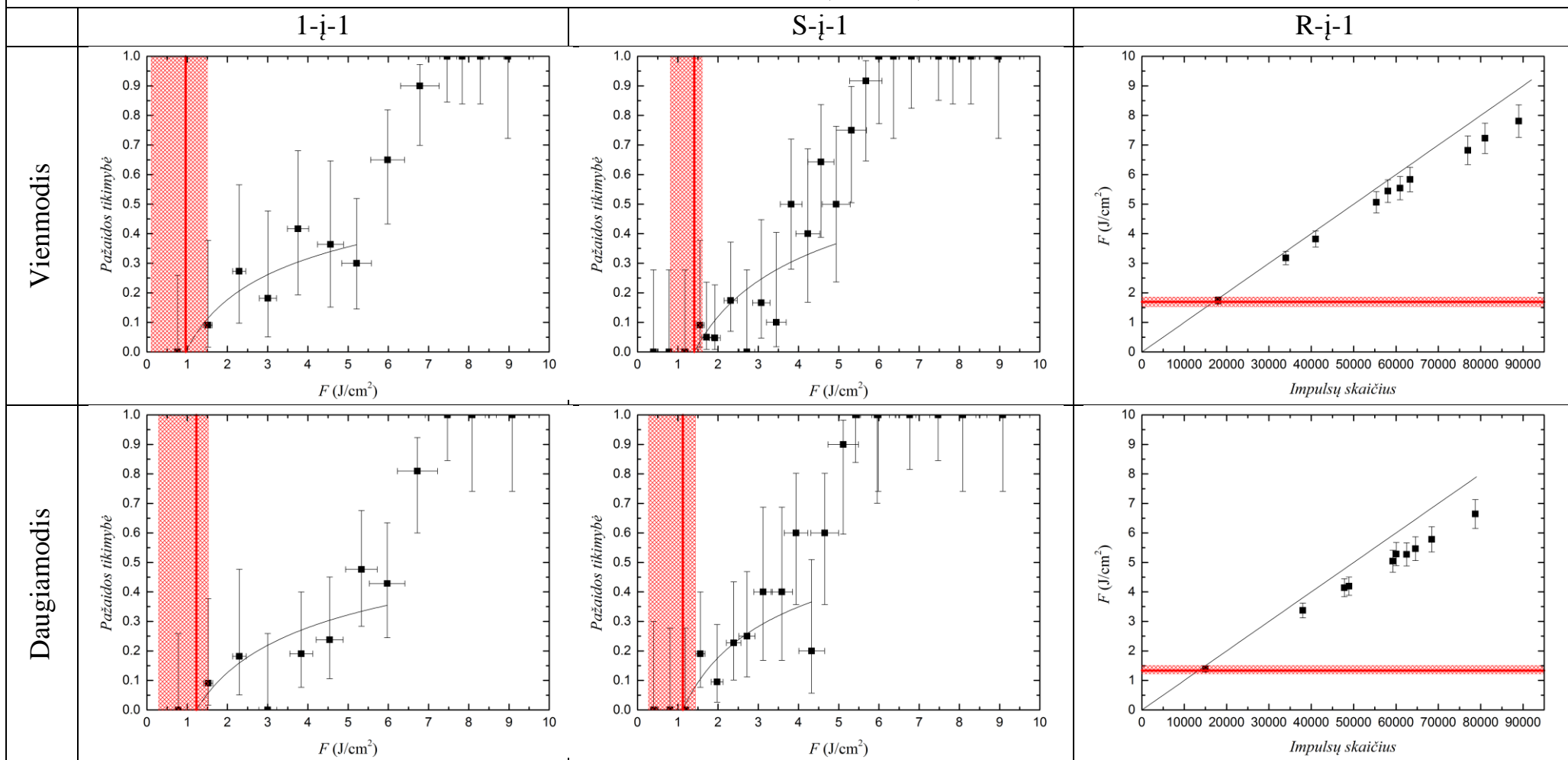
### Optiniai elementai su atspindinčiomis dangomis

I harmonika (1064 nm)



# Optiniai elementai su atspindinčiomis dangomis

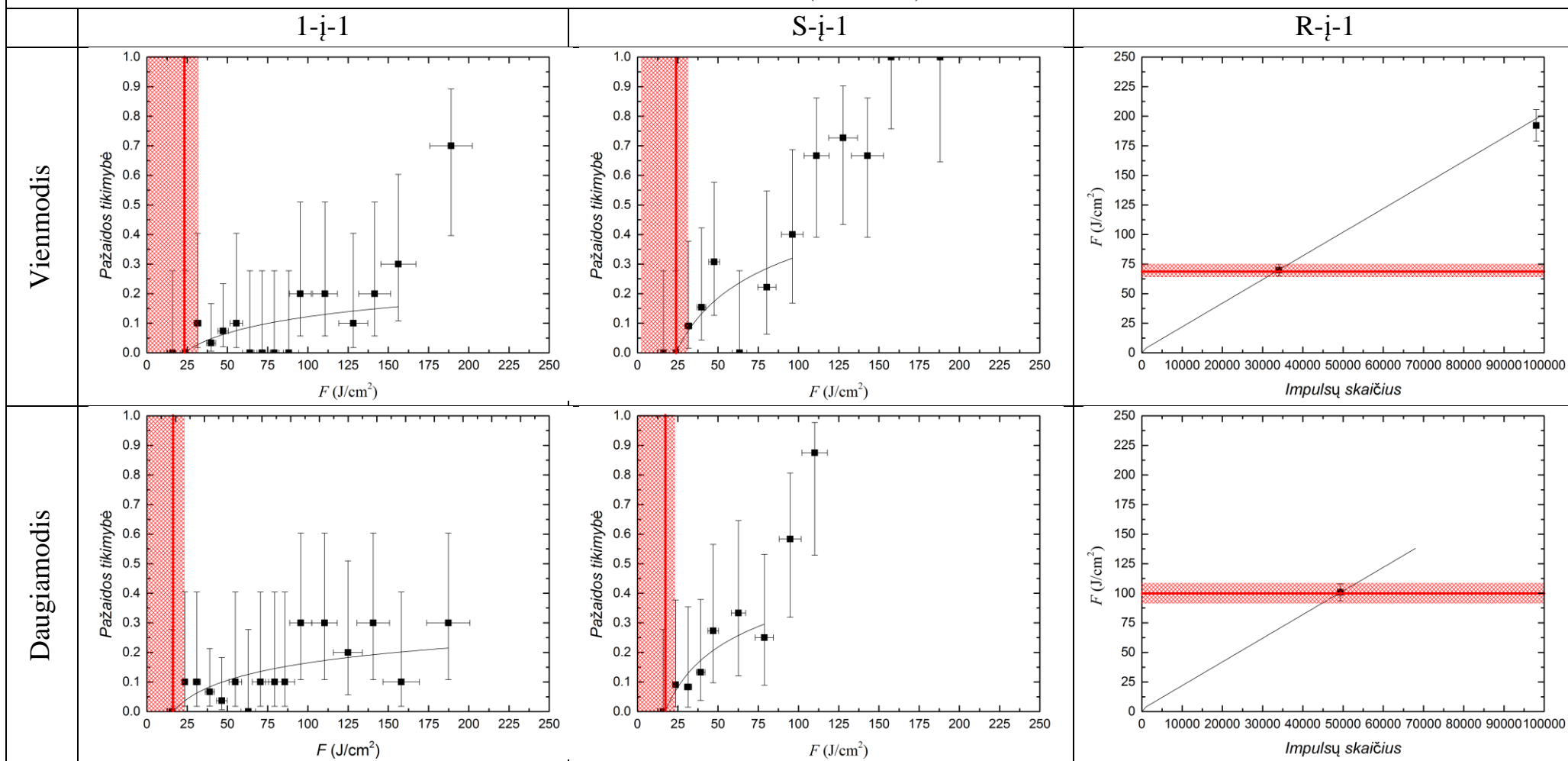
## III harmonika (355 nm)





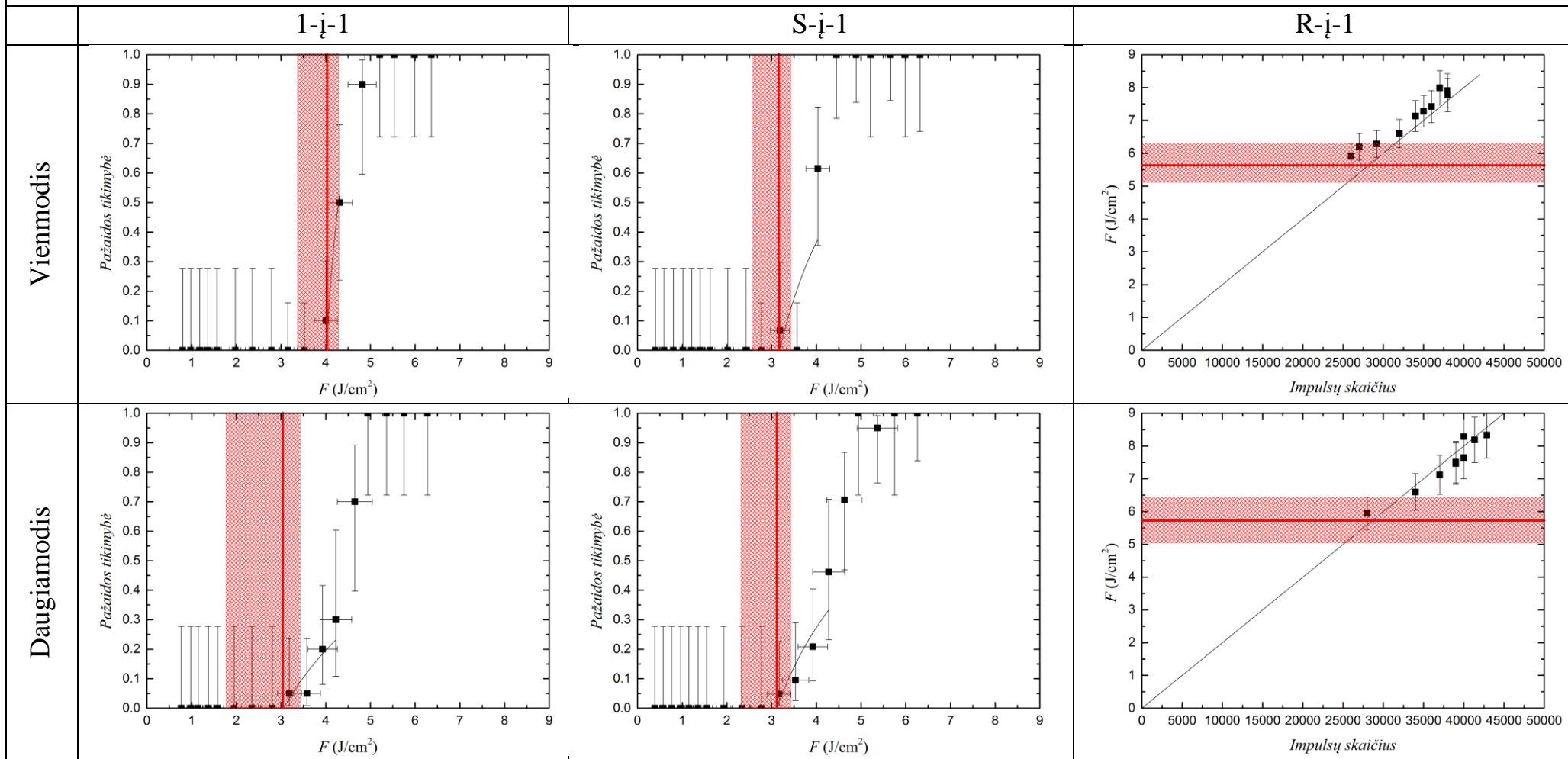
# Optiniai elementai su skaidrinančiomis dangomis

I harmonika (1064 nm)



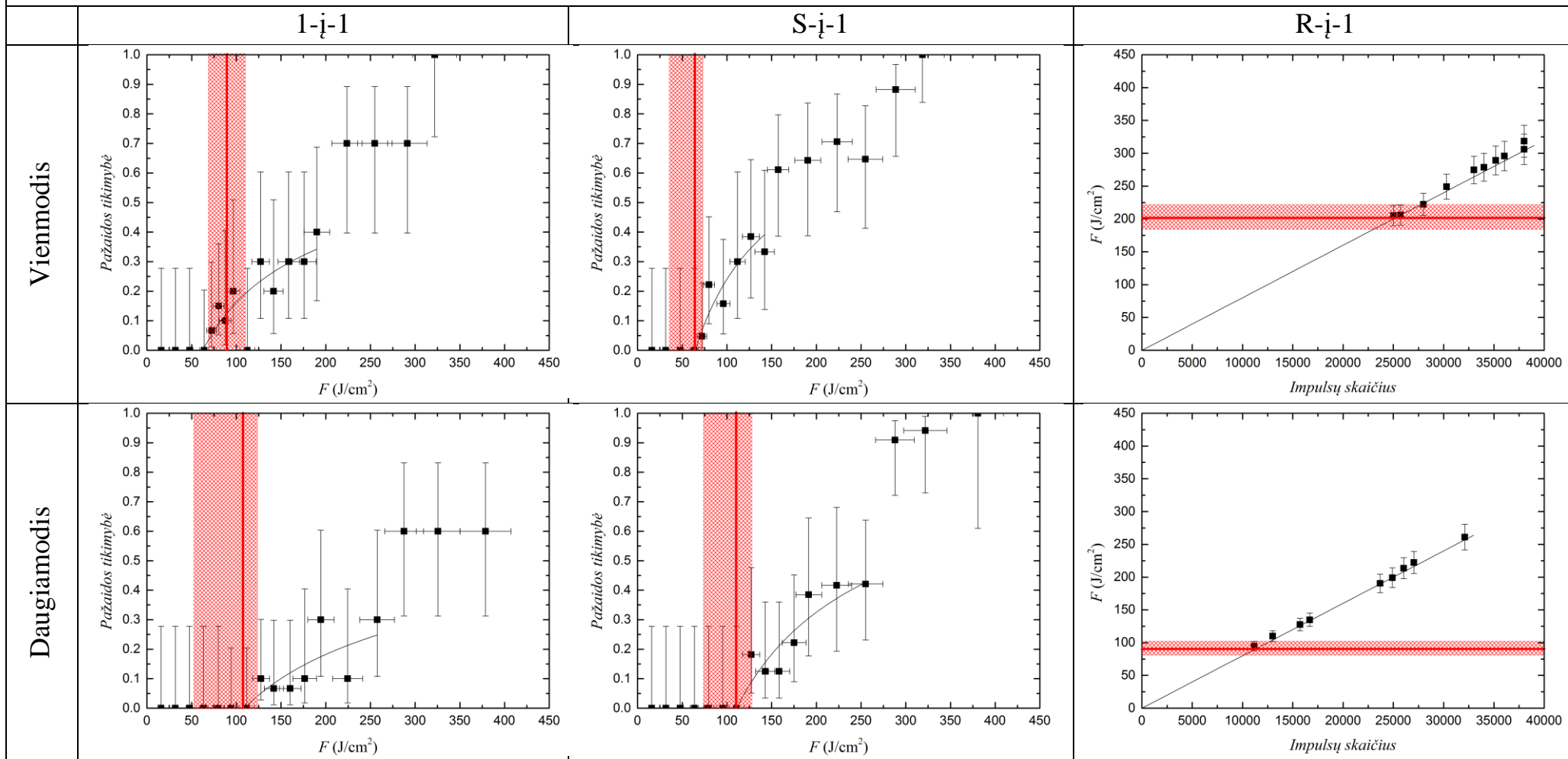
# Optiniai elementai su skaidrinančiomis dangomis

## III harmonika (355 nm)



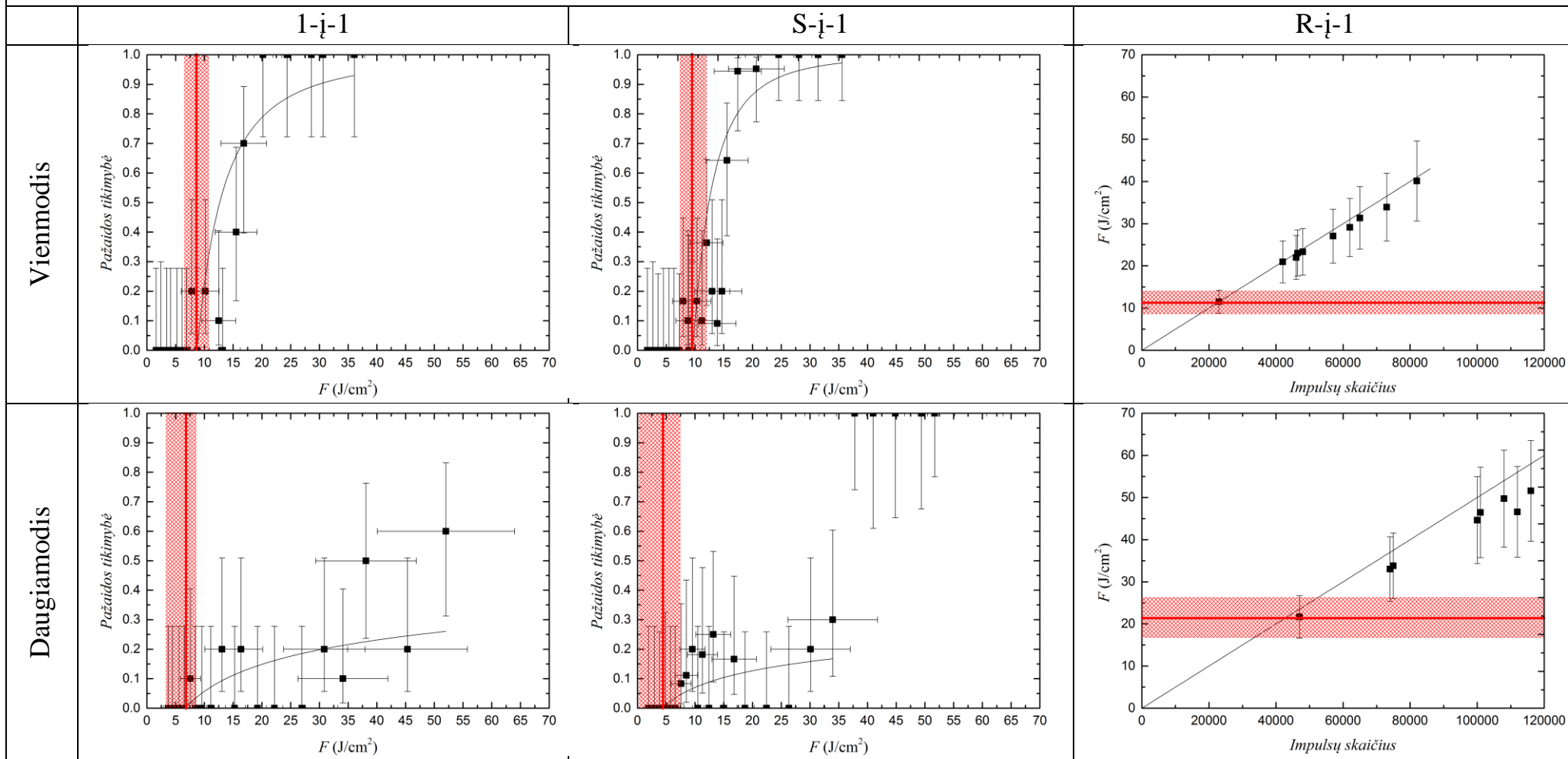
# Nedengti optiniai elementai

I harmonika (1064 nm)



# Nedengti optiniai elementai

## III harmonika (355 nm)



**Priedas B:** Visų protokolų PLSS įverčių palyginimas ant skirtingų optinių elementų, matuojant dviem bangos ilgiais tiek vienmodžiu, tiek daugiamodžiu lazerio režimais.

