

Vilniaus universiteto
Fizikos fakulteto
Lazerinių tyrimų centras

Agnė Butkutė

KINTAMO PORĖTUMO POLIMERINIŲ 3D MIKRODARINIŲ ATSPARUMO
FEMTOSEKUNDINEI LAZERINEI SPINDULIUOTEI TYRIMAS

Magistrantūros studijų baigiamasis darbas

Lazerinės fizikos ir optinių technologijų studijų programa

Studentas

Agnė Butkutė

Leista ginti

2019-05-28

Darbo vadovas

dr. Mangirdas Malinauskas

Konsultantai

dokt. Darius Gailevičius ir dokt. Linas Jonušauskas

Direktorius

l.p.e. dr. Rytis Butkus

Vilnius 2019

Turinys

Įvadas	1
1 Spinduliuotės ir medžiagos sąveika	4
1.1 Netiesinė spinduliuotės ir medžiagos sąveikos prigimtis	4
1.2 Netiesiniai reiškiniai	4
1.3 Terminiai reiškiniai	6
2 3D lazerinė litografija	7
2.1 Pagrindiniai 3DLL principai	7
2.2 Fotopolimerai	10
3 Optinės pažaidos slenkstis	14
4 Tyrimo metodai	17
4.1 Polimerinių darinių formavimas	17
4.2 Optinės pažaidos slenkščio matavimas	20
5 Rezultatai	23
6 Diskusija	37
7 Pagrindiniai rezultatai ir išvados	39
Literatūros sąrašas	40
Priedai	44

Įvadas

Medžiagų apdirbimas ultratrumpais impulsais - sparčiai vystoma mokslo sritis. Didelis pastarųjų dviejų dešimtmečių ultratrumpųjų impulsų lazerių progresas bei naujų fotopolimerių medžiagų sukūrimas leido formuotis technologijai, vadinamai netiesine 3D lazerine litografija (3DLL) [1]. 3DLL metodu fotopolimero pirmtako laše aštriai fokusuota ($NA > 0,3$) lazerio spinduliuote, didelio intensyvumo ($> TW/cm^2$) impulsais dėl netiesinės spinduliuotės ir medžiagos sąveikos, įrašoma 3D struktūra. Tai unikali technologija, leidžianti formuoti subdifrakcinės raiškos ir mažų matmenų 3D darinius. Dėl savo unikalumo technologijai atrandama vis daugiau pritaikymo sričių nuo biomedicinos iki mikro-optikos. Jau yra atliktų eksperimentų, kurių metu tiesioginio lazerinio rašymo metodu suformuoti dariniai buvo naudojami kaip tarpląstelinės matricos, kurias apsodinus reikiamomis ląstelėmis, gali būti implantuojamos į gyvą organizmą [2]. Taip pat tiesioginio lazerinio rašymo metodas suteikia galimybę formuoti itin mažus optinius komponentus, kurie galėtų būti panaudojami įvairiuose mikrooptikos technologijose, tokiose kaip mikrolazeriai [3]. Literatūroje galima rasti nemažai pavyzdžių 3DLL būdu suformuotų lęšių panaudotų informacijos vaizdinime [4], [5]. Taip pat 3DLL suteikia galimybę formuoti ir gana sudėtingos struktūros darinius, tokius kaip fotoniniai kristalai, kuriais galima kontroliuoti šviesos erdvinės ir laikinės dispersijos savybes. Toks funkcionuojantis polimerinis rąstų rietuvės struktūros fotoninis kristalas kaip plokščias fokusuojantis elementas pademonstruotas [6]. Tačiau, norint naudoti tokius optinius komponentus medžiagų apdirbimo, signalų perdavimo ar kituose praktiniuose taikymuose, kuriuose smailiniai impulsų intensyvumai yra dideli (TW/cm^2 ar net didesni) ir norint žinoti šių optinių komponentų pritaikymo galimybes ir apribojimus, reikia nustatyti suformuotų darinių optinės pažaidos slenksčius. Jau anksčiau buvo tirta plonų polimerinių plėvelių [7] bei pilnavidurių polimerinių kubukų optinio atsparumo slenksčiai [8], tačiau, norint įvertinti tendencijas polimerinių darinių atsparumo femtosekundinei spinduliuotei, reikia atlikti ir porėtų darinių optinio atsparumo tyrimą. Taigi šiame darbe buvo formuoti porėti - rąstų rietuvės struktūros - optiniai komponentai bei tirti jų optinio pažaidos slenksčiai bei šių priklausomybės nuo darinių porėtumo.

Šio darbo tikslas - nustatyti optinės pažaidos slenksčius skirtingų polimerinių medžiagų rąstų rietuvės mikrodariniams bei ištirti optinės pažaidos slenksčio priklausomybę nuo darinių porėtumo.

Darbo uždaviniai:

- 1) Suformuoti skirtingų porėtųjų rąstų rietuvės mikrodarinių masyvus.
- 2) Pagal standartizuotą metodiką atlikti optinės pažaidos slenksčio testus.
- 3) Palyginti iš skirtingų fotopolimerų (fotojautrintų ir nefotojautrintų) suformuotų darinių optinės pažaidos slenksčių vertes.
- 4) Palyginti skirtingų porėtųjų darinių optinės pažaidos slenksčių vertes ir nustatyti jų priklausomybę nuo porėtumo.
- 5) Palyginti rąstų rietuvės darinių iš tų pačių fotopolimerų pažaidos slenksčius su kitokių struktūrų darinių optinės pažaidos slenksčiais, publikuotais kituose darbuose.

1 Spinduliuotės ir medžiagos sąveika

1.1 Netiesinė spinduliuotės ir medžiagos sąveikos prigimtis

Apdirbant medžiagą trumpais impulsais, ši paveikiama itin didelio smailinio intensyvumo spinduliuote (GW/cm^2 - PW/cm^2). Medžiagos atsakas, ją paveikus didelio intensyvumo spinduliuote, yra netiesinis ir iš esmės skiriasi nuo medžiagos atsako paveikus mažesnio intensyvumo spinduliuote. Dielektrine medžiaga sklisdama spinduliuotė ją poliarizuoja. Kai spinduliuotės intensyvumas nėra didelis, medžiagos poliarizuotumas tiesiškai priklauso nuo spinduliuotės elektrinio lauko 1. Tačiau, kai spinduliuotės kuriamas elektrinis laukas viršija maždaug 10^7 V/m vertę, medžiagos poliarizuotumo priklausomybė nuo elektrinio lauko tampa netiesinė 2.

$$P(t) = \epsilon_0 \chi^{(1)} E(t), \quad (1)$$

$$P(t) = \epsilon_0 \chi^{(1)} E(t) + \epsilon_0 \chi^{(2)} E^{(2)}(t) + \epsilon_0 \chi^{(3)} E^{(3)}(t) + \dots, \quad (2)$$

čia ϵ_0 yra vakuumo dielektrinė skvarba, $\chi^{(1)}$ yra tiesinis optinis jautris, $\chi^{(2)}$ - antros eilės netiesinis optinis jautris, o $\chi^{(3)}$ - trečios eilės netiesinis optinis jautris.

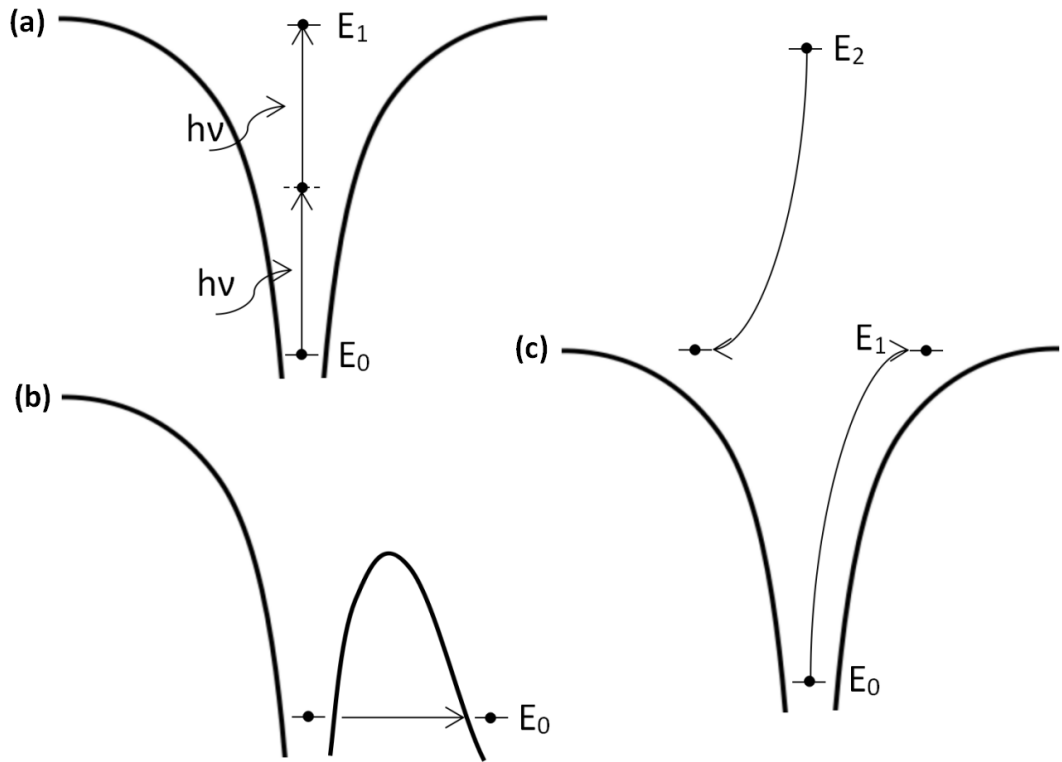
Skirtingi nariai netiesinėje poliarizuotumo išraiškoje lemia skirtingus reiškinius stebimus medžiagoje. Reiškiniai, nulemti kvadratinio netiesinio jautrio, stebimi tik necentrosimetriniuose kristaluose, yra tribangės sąveikos reiškiniai, tokie kaip suminio ir skirtuminio dažnio generacija. Tuo tarpu kubinio netiesinio jautrio nulemti reiškiniai stebimi visose dielektrinėse medžiagose ir gali būti tokie kaip, daugiafotonė sugertis ar tunelinė jonizacija, bei įvairūs šviesos saviveikos reiškiniai, tokie kaip šviesos gijų formavimasis, nulemtas Kero efekto, kai didelio intensyvumo spinduliuotė sklisdama dielektrine terpe pati keičia savo sklidimo sąlygas. [9]

1.2 Netiesiniai reiškiniai

Kaip jau minėta, veikiant medžiagą didelio intensyvumo spinduliuote, pasireiškia įvairūs netiesiniai medžiagos ir spinduliuotės sąveikos reiškiniai, kurie gali būti nulemti skirtingos eilės netiesinio jautrio. Vienas tokių reiškinių yra daugiafotonė sugertis. Daugiafotonė sugertis, tai vienalaikė dviejų ar daugiau fotonų sugertis per virtualius lygmenis iš pagrindinės į sužadintąją būseną. Dvifotonė sugertį lemia antros eilės netiesinis optinis jautris, tuo tarpu trifotonė sugertį lemia trečios eilės netiesinis optinis jautris, taigi atitinkamai aukštesnės eilės daugiafotonė sugertį lemia aukštesnės eilės netiesiniai optiniai jautriai. Daugeliu atveju netiesinėje optikoje daugiafotonė sugertis yra neigiamas efektas iškraipantis pluoštus. Tačiau daugiafotonė sugertis gali būti panaudojama ir teigiamiems praktiniams taikymams, tokiems kaip daugiafotonė spektroskopija, mikroskopija ar skaidrių medžiagų lazerinis apdirbimas.

Netiesiniai procesai yra dominuojantys siekiant lazeriu apdirbti skaidrias medžiagas ultra-

trumpais impulsais. Bene svarbiausi ir dominuojantys netiesiniai efektai yra daugiafotonė jonizacija, tunelinė jonizacija ir griūtinė jonizacija. Daugiafotonė jonizacija, tai medžiagos jonizavimas dėl daugiafotonės sugerties. Elektronas sugėręs kelis vienalaikius fotonus pereina į sužadintąją būseną. Šio proceso principinė schema pavaizduota 1 pav. (a) dalyje. Veikiant medžiagą didelio intensyvumo spinduliuote gali pasireikšti ir kitas netiesinis procesas, toks kaip tunelinė jonizacija, kai krentanti didelio intensyvumo spinduliuotė iškreipia potencialinį barjerą, laikusį elektroną prie atomo, ir potencialiniam barjerui sumažėjus, padidėja tikimybė elektronui tuneliuoti ir tapti laisvam. Taip medžiagoje randasi vis daugiau laisvų elektronų. Principinė šio proceso schema pavaizduota 1 (b) dalyje.



1 pav. (a) daugiafotonės jonizacijos, (b) tunelinės jonizacijos ir (c) griūtinės jonizacijos principinės schemos

Kuris procesas dominuos medžiagoje, ar daugiafotonė sugertis ar tunelinė jonizacija, priklauso nuo lazerio dažnio ir spinduliuotės intensyvumo. Ši priklausomybė yra nusakoma Keldišo parametru 3 [10]:

$$\gamma = \frac{\omega}{e} \sqrt{\frac{m_e c n \Delta E \epsilon_0}{I}}, \quad (3)$$

čia ω yra lazerio dažnis, e - elektrono krūvis, m - elektrono masė, c - šviesos greitis, n - tiesinis lūžio rodiklis, I - lazerio intensyvumas, ϵ_0 - vakuumo dielektrinė skvarba, ΔE - draustinės juostos tarpas.

Kai γ yra daugiau nei 1,5, dominuos daugiafotonė jonizacija, kai γ mažiau nei 1,5, dominuos tunelinė jonizacija. Tuo tarpu, kai Keldišo parametras yra artimas 1,5, vyksta tarpinio režimo jonizacija, kai maždaug vienodą įtaką medžiagos jonizavimui turi tiek daugiafotonė jonizacija, tiek tunelinė jonizacija. Taigi didelio lazerio intensyvumo ir žemo dažnio režime dominuoja tunelinė jonizacija. Didelio intensyvumo ir aukšto lazerio dažnio režime dominuoja daugiafotonė jonizacija. Norint pasiekti reikiama efektą dažnai svarbu kontroliuoti, kuris netiesinis procesas dominuos.

Dar vienas svarbus procesas, atsirandantis dėl netiesinės spinduliuotės ir medžiagos sąveikos, yra griūtinė jonizacija, principinė griūtinės jonizacijos schema pavaizduota 1 pav. (c) dalyje. Spinduliuotei sąveikaujant su medžiaga, iš medžiagos atomų išlaisvinami elektronai, toliau veikiant medžiagą intensyvia spinduliuote šie yra įgreitinami ir jų energija gali būti pakankama išlaisvinti gretimuose atomuose esančius elektronus. Taigi palaipsniui išlaisvinama vis daugiau elektronų. Pasiėkus kritinį elektronų tankį medžiagoje dėl griūtinės jonizacijos gali būti pažeidžiama medžiaga. [9]

1.3 Terminiai reiškiniai

Apdirbant medžiagą lazeriniais šaltiniais, kurių impulsų trukmė yra gana ilga (> 10 ps) stebimi terminiai efektai medžiagoje, kurie prastina medžiagos apdirbimo kokybę. Tokio apdirbimo metu medžiaga paveikiama ne lokaliai, t.y. energija įvesta į židinį plinta į aplinkines sritis, tad paveikiama ir medžiaga aplink apdirbamą sritį - vyksta medžiagos kaitimas ir šilumos difuzija, šis procesas pasireiškia maždaug 1 ns po spinduliuotės sugerties [11]. Tuo tarpu kai medžiaga veikiama femtosekundiniais impulsais spinduliuotės ir medžiagos sąveika yra lokali, energija pirmiau yra panaudojama medžiagos apdirbimui - abliacijai ir medžiagos pašalinimui (~ 100 ps) ar medžiagos jonizacijai (~ 1 ps) - nei, kad spėja įkaisti medžiaga ir šiluma difunduoti į aplinkines sritis [11], todėl aplinkinė medžiaga praktiškai nekaista.

Vykstant bet kokiam procesui, ne visa lazerio spinduliuote medžiagai perduota energija yra panaudojama tik indukuojamam procesui, dalis energijos taip ir lieka efektyviai nepanaudojama. Tokia perteklinė energija relaksuoja, tačiau, jei spinduliuotės dažnis yra didesnis nei būdinga energijos relaksacijos trukmė (~ 1 ms), perteklinė energija kaupiasi, todėl gardelė vis vien šyla [12]. Tad siekiant visiškai išvengti terminių efektų medžiagoje reikia naudoti itin trumpų impulsų (femtosekundinę) spinduliuotę, kurios dažnis taip pat turi būti pakankamai nedidelis.

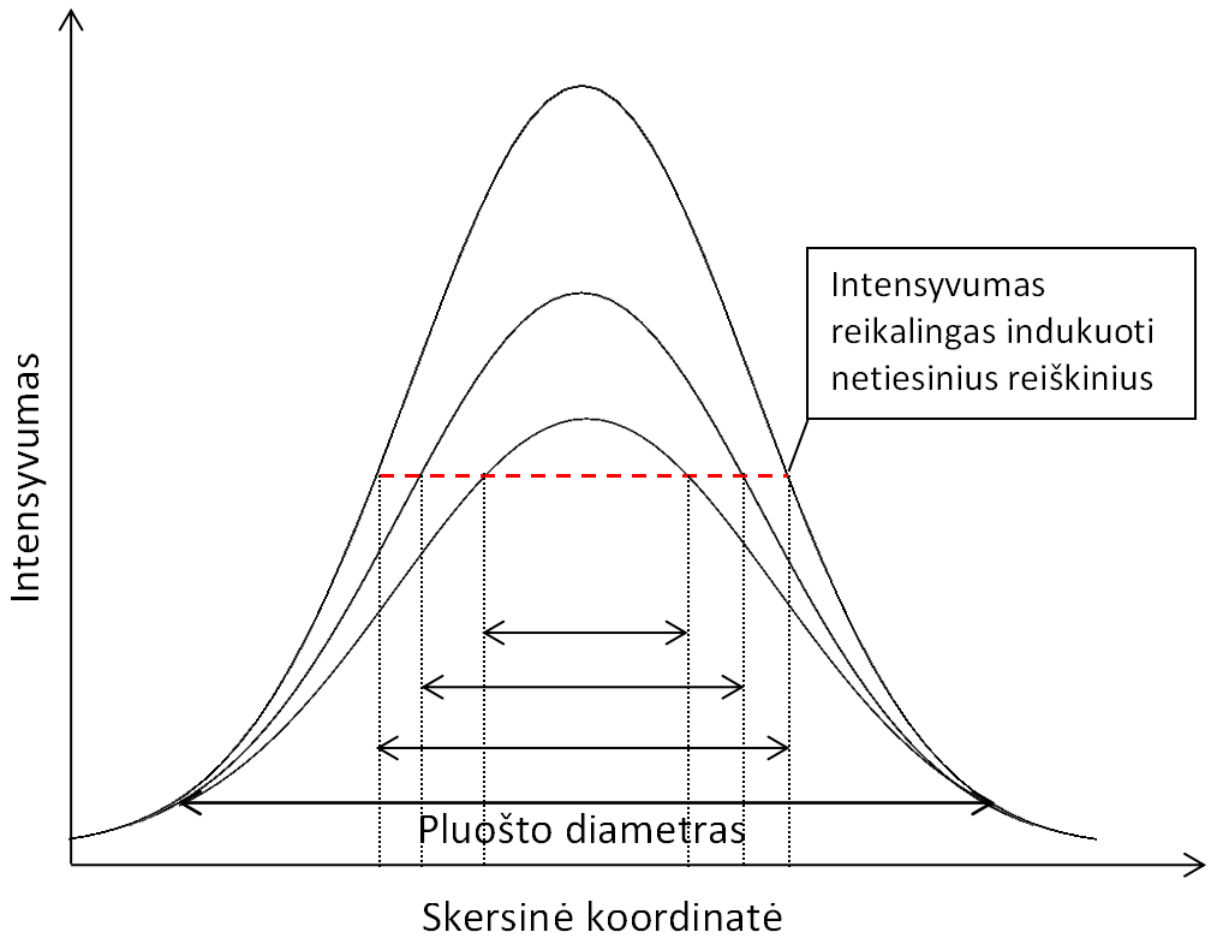
2 3D lazerinė litografija

2.1 Pagrindiniai 3DLL principai

3D lazerinė litografija (3DLL) - tai 3D darinių formavimas femtosekundiniais impulsais, pagrįstas netiesine medžiagos ir spinduliuotės sąveika. 3D litografijoje polimerų pirmtakai paveikiami itin trumpų impulsų spinduliuote. Ši spinduliuotė inicijuoja lokalų polimerų pirmtakų jungimąsi į polimerines grandines. Keičiant lazerio pluošto židinio padėtį bandinio atžvilgiu, formuojami norimi 3D dariniai. 3DLL įprastai naudojami trumpų impulsų (femtosekundiniai) lazeriai, nes dėl didelio tokių lazerių impulsų smailinio intensyvumo pasireiškia netiesinė medžiagos ir spinduliuotės sąveika - vyksta daugiafotonė sugertis [12]. Medžiaga gali būti polimerizuojama tik tam tikrame spinduliuotės intensyvumo intervale, kuris yra vadinamas polimerizacijos langu. Esant mažesniai intensyvumui nepakaks spinduliuotės medžiagai perduodamos energijos sukelti polimerizacijos reakcijai, esant intensyvumui, didesniai nei polimerizacijos lango viršus, medžiaga pradeda degti.

Polimerų formavimas ultratrumpais impulsais yra naudingas keliais aspektais. Dėl daugiafotonės jonizacijos galima pasiekti subdifrakcinę raišką. Daugiafotonė jonizacija vyksta tik spinduliuotės židinyje, tad galima pasiekti sąlygas, kai sugertis vyksta lokaliame tūrio taške, o ne visame tūryje. Nepaisant to, kad Gausinio pasiskirstymo spinduliuotė negali būti sufokusuota į mažesnę dėmę nei naudojamos spinduliuotės bangos ilgis, naudojant nedidelius intensyvumus (polimerizacijos lango apatinė riba), daugiafotonei sugerčiai reikalingas intensyvumas gali būti pasiekiamas ne visame spinduliuotės židinyje, o tik centinėje jo dalyje. Taigi polimerizacija gali vykti mažesniame tūryje nei naudojamo bangos ilgio pluošto sąsmauka, todėl dėl netiesinių reiškinių formuojami dariniai gali būti subdifrakcinės raiškos. Ši 3DLL savybė parodyta 2 pav. Tad apdirbant medžiagą, pavyzdžiui, 780 nm spinduliuote galima pasiekti maždaug 100 nm raišką [13].

Taip pat daugiafotonė sugertis suteikia galimybę formuoti 3D darinius iškart viename polimero pirmtako laše. Įprastai litografijoje naudojama vienfotonė sugertis. Jei fotono energija didesnė už draustinės juostos tarpą, tuomet medžiaga sužadinama. Jei fotono energija mažesnė, medžiaga nėra sužadinama. Tačiau vienfotonės sugerties atveju spinduliuotė bus sugerama jau pačiame medžiagos paviršiuje, tad 3D dariniai gali būti formuojami tik sluoksnis po sluoksnio polimerizuojant vis naują paviršinį sluoksnį. Tuo tarpu, kai spinduliuotės intensyvumas yra didelis, medžiaga vienu metu gali sugerti kelis spinduliuotės fotonus per virtualius lygmenis, todėl suminė fotonų energija tampa pakankama sužadinti medžiagai. Dvifotonės sugerties atveju spinduliuotė gali būti sugerama medžiagos tūryje ir tik židinio tūryje, nes daugiafotonei sugerčiai reikalingas pakankamas spinduliuotės intensyvumas, kuris bus pasiekiamas tik pačiame spinduliuotės fokuso centre [14]. Tad, keičiant lazerio spinduliuotės židinio padėtį, formuojami 3D dariniai polimeruose, nebūtinai formuojant darinius sluoksnis po sluoksnio [15].



2 pav. Fokusuoto pluošto inicijuotos polimerizacijos raiškos priklausomybė nuo spinduliuotės intensyvumo

Be viso to, reikėtų paminėti, kad apdirbant medžiagas ultratrumpais impulsais, silpniau pasireiškia ir terminiai reiškiniai. Ultratrumpųjų impulsų atveju spinduliuotės ir medžiagos sąveika yra labiau lokalizuota nei veikiant medžiagą didesnės trukmės impulsais, todėl apdirbimo kokybė yra geresnė [16]. Veikiant medžiagą trumpais impulsais energija yra efektyviau perduodama medžiagos sužadinimui (jonizacijai), o ne medžiagos kaitimui, nes medžiaga jonizuojama greičiau nei ši spėja įkaisti [11].

Tiesioginio lazerinio įrašymo metodu pagaminti dariniai gali būti naudingi daugelyje taikymų, nuo biomedicininų iki mikrooptikos ar nanofotonikos taikymų. Jau yra pademonstruota nemažai funkcionuojančių refrakcinės optikos komponentų, tokių kaip mikrolęšiai [4] informacijos vaizdinimui ar daugiasluoksniai lęšiai ant šviesolaidžių galų tiksliam informacijos gautos šviesolaidžiu atvaizdavimui [5], ar šviesos erdvinių savybių valdymui [17].

Be viso to 3DLL metodu gali būti formuojami itin maži fotoniniai komponentai kontroliuoti erdvines ir laikines spinduliuotės savybes [6, 18, 19]. Fotoniniai kristalai įprastai yra gana sudėtingos trimatės ir porėtos struktūros, o norint, kad fotoninis komponentas atliktų tam tik-

ras savo funkcijas (pvz. filtruotų tam tikrą spinduliuotės spektrinę komponentę), reikalinga subdifrakcinė raiška. Taigi 3DLL technologija yra tinkama fotoninių kristalų gamybai.

Vienas įdomesnių ir šiuo metu smarkiai besiplečiančių 3DLL taikymų yra metamedžiagų gamyba. Metamedžiagos - tai medžiagos su neįprastomis fizikinėmis savybėmis. Neįprastos medžiagos savybės išgaunamos pagaminus tam tikros geometrijos struktūrą, kuri jau gali pasižymėti visiškai kitomis savybėmis nei naudojama medžiaga. Jau yra pademonstruota labai įvairių metamedžiagų nuo optinių metamedžiagų, turinčių neigiamą lūžio rodiklį [20], iki mechaninių meta-medžiagų su neigiamu šiluminio plėtimosi koeficientu [21]. Tokios geometrijos struktūra, ją kaitinant, nesiplečia, (nors medžiaga iš kurios ji pagaminta plėstųsi), bet atvirkščiai - kaitinant traukiasi, nes šiluminis plėtimasis yra kompensuojamas struktūros sudedamųjų dalių sukimosi. Natūraliai gamtoje tokios struktūros medžiagos neegzistuoja, tačiau gerai apgalvojus geometriją, gali būti pagamintos 3DLL būdu.

Kitas, taip pat gana egzotinis, technologijos taikymas yra mikrolazerių gamyba. Mikrolazeriai tai nedidelės (maždaug μm eilės) struktūros, generuojančios lazerinę spinduliuotę. Tokie dariniai gali būti formuojami 3DLL technologija, tačiau, norint pasiekti spinduliuotės generaciją, polimero pirmtake gali būti įmaišomos dažų ar metalų priemaišos stiprinančios spinduliuotę [22].

Taip pat literatūroje galima rasti nemažai pavyzdžių, kuriuose 3DLL būdu formuoti objektai medicininiam taikymams. Vienas tokių pavyzdžių yra biokarkasų gamyba [2, 23–25]. Tokie karkasai palengvina audinių gijimą, nes audinio ląstelės yra įkalinamos karkaso porose, tad išlaikoma norima jų pozicija, tačiau iš kitos pusės, karkasas yra pakankamai atviras ir netrukdo ląstelių komunikacijai ir medžiagų apykaitai. Kitomis medžiagų apdirbimo strategijomis, tokią struktūrą suformuoti būtų beveik neįmanoma. Žinoma, svarbu naudoti medžiagas, kurios būtų biosutaikomos ir nežudytų organizmo ląstelių ir tai šiuo metu yra vienas didesnių iššūkių šiame taikyme.

Taip pat 3DLL būdu gali būti formuojami ir laisvai judantys mikromechanizmai, kurie taip pat gali būti taikomi biomedicinoje. Funkcionalūs polimeriniai judantys mechanizmai gali būti pritaikomi mikroschemų laboratorijose (angl. *lab – on – a – chip*), kai mikrokanaluose formuojami dariniai įgalinantys atlikti skysčių analizę. Tokių judančių polimerinių darinių formavimas parodytas [26–28]. Taip pat literatūroje galima rasti judančių polimerinių mikroprietaisų, kurie galėtų būti implantuojami tiesiai į žmogaus organizmą. Toks polimerinis mikrovožtuvas pademonstruotas [29]. Šis funkcinis prietaisas turėtų būti implantuojamas į žmogaus venas. Polimerinis mikrovožtuvas praleidžia kraują tik viena kryptimi, taip mažindamas žmogaus kraujospūdį.

Taigi, matyti, kad 3DLL technologija turi didelį potencialą daugelyje sričių. Tokių technologijų pritaikymas galėtų sukelti revoliuciją daugelyje sričių. Tad vis dar atliekama daug tyrimų tobulinant bei efektyvinant 3DLL technologiją.

2.2 Fotopolimerai

3DLL technologija gali būti gaminami dariniai tik iš tam tinkamų medžiagų, kurios bendru atveju, vadinamos fotopolimerias. Intensyvia lazerio spinduliuote paveikus polimero pirmtaką jame inicijuojama polimerizacijos reakcija, taip formuojamas tvirtas ir stabilus darinys. Praktikoje naudojami labai įvairūs fotopolimerai, tokie kaip SU8, OrmoClear, OrmoComp, Ember PR48, PDMS, SZ2080 ir kiti. Trumpai šias medžiagas čia ir aptarsime.

SU8 epoksidinis neigiamas fotorezistas, kuris dažniausiai naudojamas 2D darinių gamyboje - kontaktinėje litografijoje, formuojant aukštos skyros darinius per kaukę [30] ar stereolitografijoje funkciniais prietaisams gaminti [31]. Šiuo būdu gaminami polimeriniai dariniai dažniausiai polimerizuojami vienfotoniškai, naudojant UV spinduliuotę. Tačiau šis fotopolimeras gali būti struktūrinamas ir dvifotoniškai, taip formuojant ir 3D darinius [32].

OrmoClear ir OrmoComp hibridiniai fotopolimerai dažnai naudojami mikrooptikos ir fotonikos srityje [33]. Iš šių fotopolimerų pagaminti mikro-optikos komponentai yra skaidrūs regimojoje spinduliuotėje. OrmoClear ir OrmoComp apdirbimas nereikalauja jokio papildomo paruošimo prieš ar po lazerinio apdirbimo, tačiau suformuotos struktūros pasižymi dideliu traukimusi.

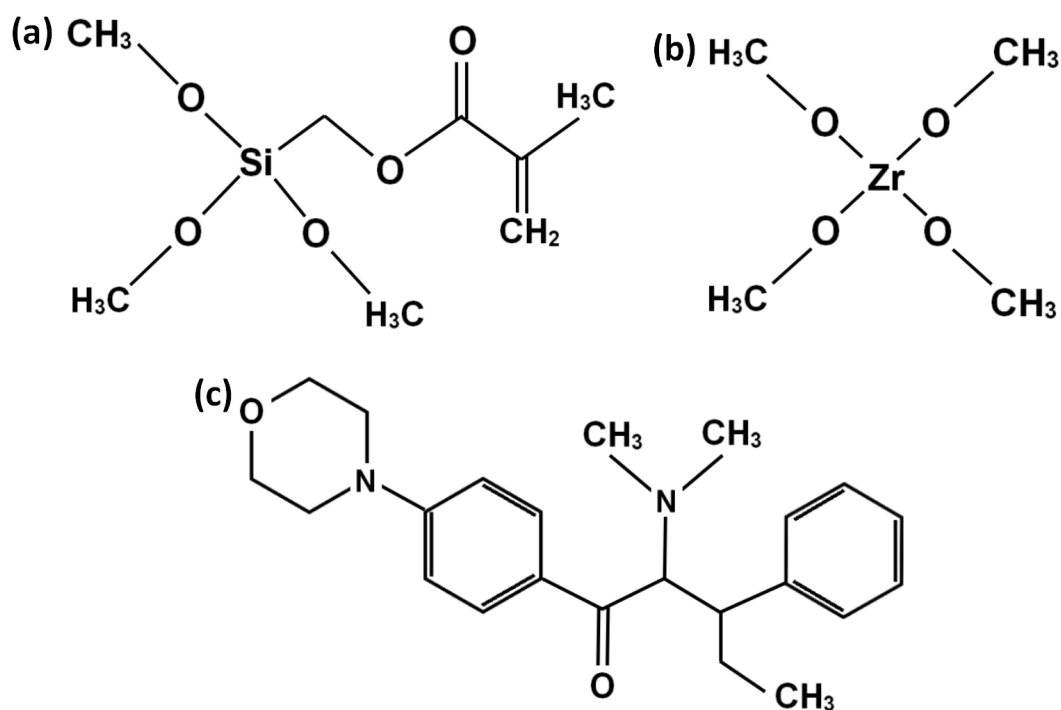
Ember PR48 derva yra sukurta specialiai stereolitografiniams spausdintuvams spausdinti 3D objektus. Šis polimeras įprastai yra polimerizuojamas vienfotoniškai UV spinduliuote, taigi 3D objektai yra spausdinami pasluoksniui t.y sukietinamas tik viršutinis polimero sluoksniu. Derva yra patogi 3D spausdinimui, nes polimerizacijai pakanka gana nedidelio spinduliuotės intensyvumo [34]. Pagamintos struktūros yra skaidrios regimojoje šviesoje.

PDMS elastomeras dažniausiai naudojamas minkštojoje litografijoje t.y. replikuojant jau turimus darinius [35,36]. Šio fotopolimero elastingumas leidžia gana tiksliai atkartoti jau turimą struktūrą. Turint šampą, pagamintą iš PDMS, galima nesunkiai replikuoti struktūras iš norimo fotopolimero, taip daugeliu atveju sutaupant nemažai laiko. Tačiau jau yra darbų, kuriuose 3DLL būdu buvo formuojamos 3D struktūros, tad galima iškart pasigaminti aukštos raiškos šampą iš PDMS [37].

Vienas didžiausių 3DLL iššūkių, tai šiam metodui tinkamų medžiagų paieška. Dauguma fotopolimerų turi labai siauras pritaikymo sritis. Tačiau tobulėjant tiesioginio lazerinio įrašymo technologijoms atsirado poreikis turėti kuo universalesnių medžiagų, tinkamų įvairiems taikymams. Tad ir dabar kuriamos naujos medžiagos tinkamos apdirbti 3DLL būdu. Kaip viena tokių medžiagų buvo sukurta ORMOSIL (angl. *ORganically MODified SILica*) medžiagų klasė ir jai priklausantis SZ2080 polimeras. Šis fotopolimeras yra gana universalus ir yra gerai pritaikomas tiek mikro-optikos [17] ar fotonikos [18], tiek mikro-mechanikos [29] ar biomediciniuose [2] taikymuose.

SZ2080 yra hibridinis organinis-neorganinis fotopolimeras. Polimeras sudarytas iš neorganinės medžiagos: ZPO (Cirkonio propoksidas) ir 80 % organinės medžiagos: metakriloksipropilo

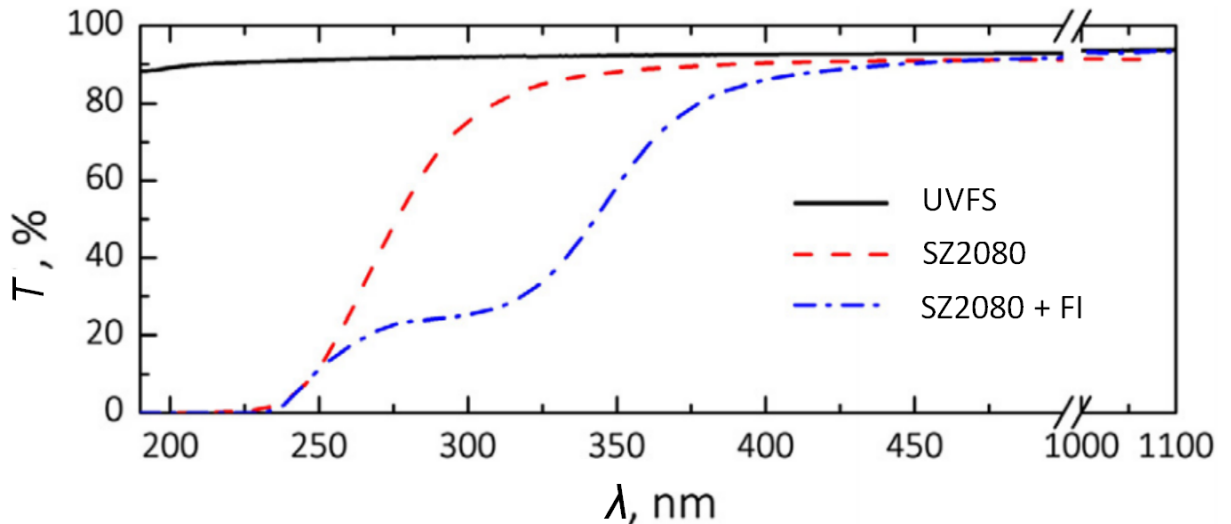
trimetoksisilanas (MAPTMS). MAPTMS ir ZPO molekulės pavaizduotos 3 pav. atitinkamai (a) ir (b) dalyse. Polimero pavadinime skaičiai 20 ir 80 nusako polimero sudėtyje esančių silicio ir cirkonio molinį santykį, kuris šiuo atveju yra 8:2. SZ2080 optiškai skaidri 400 - 2700 nm srityje ir turi absorbcijos piką maždaug ties 370 nm, SZ2080 pralaidumo priklausomybė nuo bangos ilgio pavaizduota 4 pav. [38]. SZ2080 lūžio rodiklis yra apie 1,5 [39], polimerinio SZ2080 darinio lūžio rodiklis gali kisti nuo 1,5 iki 1,515 priklausomai nuo polimerizacijos laipsnio (t.y. nuo jungčių kiekio susidariusio polimerizacijos metu) [40], tačiau vis vien lieka artimas stiklo lūžio rodikliui. Ši medžiaga gana plačiai naudojama tiesioginio lazerinio rašymo 3D darinių formavime dėl šiam metodui palankių savybių. SZ2080 pasižymi dideliu mechaniniu ir optiniu atsparumu. Taip pat nedideliu suformuotu darinių susitraukimu, nes prieš formuojant struktūras medžiaga iškaitinama ir dariniai formuojami jau pusiau kietame polimero pirmtake. [39]



3 pav. (a) MAPTMS molekulė, kuri yra viena iš polimero SZ2080 sudedamųjų dalių, (b) ZPO molekulė, kuri yra viena iš fotopolimero SZ20080 sudedamųjų dalių, (c) IRG fotoiniciatoriaus molekulė

Šiame darbe buvo naudojami ORMOSIL klasės polimerai: grynas SZ2080 bei SZ2080 su 1 % „Irgacure“ 369 (2-benzil-2-(dimetilamino)-4'-morfolinobutirofenono) fotoiniciatoriumi (toliau šis fotoiniciatorius bus vadinamas tiesiog IRG). Šios medžiagos bei kitų, jau minėtų, fotopolimerinių darinių optinės pažaidos slenkstis jau buvo tirtas keletame darbų. Skirtingų plonų polimerinių plėvelių optinės pažaidos slenkstis jau buvo nustatytas [7], 3DLL būdu formuotų kubelių optinės pažaidos slenkstis jau buvo išmatuoti [41]. Tiek vienu, tiek kitu atveju tiriant optinės pažaidos slenkstį femtosekundine 1030 nm spinduliuote ta pačia testavimo metodika

SZ2080 fotopolimeras pademonstravo didžiausią atsparumą nei bet koks kitas naudotas fotopolimeras. Tad šiame darbe buvo naudotos SZ2080 ir SZ2080 su 1% IRG fotoiniciatoriaus, nes šios medžiagos turi geriausias perspektyvas būti plačiai naudojamomis mikrofotonoje ir nanofotonoje.



4 pav. SZ2080 su ir be fotoiniciatoriaus(FI) pralaidumo kitimas priklausomai nuo bangos ilgio [38]

Daugiafotoniniam polimerinių struktūrų formavimui dažniausiai naudojami polimerai su fotoiniciatoriumi, nes taip padidinamas polimero fotojautrumas. Šiame darbe, kaip viena iš medžiagų, buvo pasirinkta ir SZ2080 su 1% IRG fotoiniciatoriaus. Fotoiniciatoriaus IRG molekulė pavaizduota paveikslo 3 (c) dalyje. Fotoiniciatorius - tai medžiaga, kuri sugėrusi lazerio spinduliuotę skyla ir suformuoja radikalus, su kuriais vėliau jungdamiesi polimerų pirmtakai formuoja polimerines grandines [14]. Dėl fotoiniciatorių prasiplečia polimerų pirmtakų polimerizacijos langas, tačiau, siekiant geriausios rezoliucijos, reikia optimalaus fotoiniciatoriaus kiekio [42]. Kai kurių polimerų pirmtakų polimerizavimasis be fotoiniciatoriaus praktiškai nevyksta, tačiau SZ2080 fotopolimero pirmtakas gali būti polimerizuojamas tiek jo sudėtyje esant fotoiniciatoriaus, tiek be jo.

Polimerų pirmtakų jungimasis į polimerines grandines vyksta keliais etapais: iniciacija 4, sklidimas 5 ir nutrūkimas 6 [43]. Iniciacija vyksta, kai medžiaga (daugeliu atveju fotoiniciatorius) sugeria spinduliuotę ir skilusi molekulė sukuria laisvuosius radikalus. Šie jungiasi su monomerais ir sudaro molekulę su laisva jungtimi, prie kurios gali jungtis kiti monomerai, taip sudarydami polimerines grandines, tad ir toliau vyksta reakcijos plitimas. Reakcija nutrūksta, kai prie molekulės laisvosios jungties prisijungia kitas radikalas ar kitas polimeras su laisva jungtimi.





Taip palaipsniui skirtinguose polimero pirmtako taškuose inicijuojant polimerizacijos reakciją formuojami polimeriniai dariniai.

3 Optinės pažaidos slenkstis

Optiniai komponentai gali atlikti savo funkcijas tik iki ribotos spinduliuotės intensyvumo. Viršijus šią vertę optiniai elementai gali būti negrįžtamai pažeidžiami, todėl nebegali kokybiškai atlikti savo funkcijos optinėje sistemoje. Tad norint žinoti naudojamų elementų optinius atsparumo slenksčius (angl. *Laser Induced Damage Threshold* (LIDT)) reikalingi atskiri matavimai. Žinoma, optinės pažaidos slenkstis priklauso nuo daugelio parametrų, tokių kaip lazerio spinduliuotės impulso trukmės, bangos ilgio, impulso formos, sufokusuoto pluošto dydžio, impulsų pasikartojimo dažnio, impulso energijos, spinduliuotės intensyvumo ar kitų veiksnių [44], [45].

Pagal karštų elektronų plazmos modelį, optiškai pažeidžiant medžiagą joje staigiai ir lokaliai pakyla temperatūra ir taip suardoma vidinė medžiagos struktūra. Tačiau fizikiniai mechanizmai dėl kurių yra vyksta pažeidimas stipriai priklauso nuo impulso trukmės. Naudojant gana ilgus impulsus (μs ir ilgesnius), nepasiekiamas itin didelis spinduliuotės intensyvumas, tad medžiagos ir spinduliuotės sąveika yra tiesinė ir medžiaga yra lokaliai kaitinama. Naudojant trumpesnius impulsus nei maždaug μs , medžiaga suardoma daugiausiai dėl netiesinių reiškinių, nes esant trumpiems impulsams medžiaga veikiama gerokai didesnio intensyvumo spinduliuote. Kuris netiesinis mechanizmas dominuos daugiausiai ir priklauso nuo smailinio intensyvumo. Kai smailinis impulso intensyvumas yra maždaug tarp 10^9 ir 10^{12} W/cm² dominuoja griūtinis medžiagos suardymas, kai medžiagoje esantys laisvieji elektronai yra įgreitinami ir įgavę pakankamai energijos, sąveikaudami su surištaisiais elektronais juos dėl smūginės jonizacijos išlaisvina. Šie taip pat dėl intensyvios spinduliuotės įgreitinami ir išlaisvina dar daugiau surištuųjų elektronų. Taip medžiagoje didėja laisvuųjų elektronų kiekis, kol pasiekus kritinį tankį medžiaga yra negrįžtamai pažeidžiama. Esant dar didesniai smailiniam impulsų intensyvumui (maždaug tarp 10^{12} ir 10^{16} W/cm²) dominuoja medžiagos suardymas dėl daugiafotoninės jonizacijos. Didėjant spinduliuotės intensyvumui didėja tikimybė sugerti kelis fotonus vienu metu, tad medžiagoje didėja laisvųjų elektronų kiekis tiek dėl griūtinės jonizacijos, tiek dėl daugiafotoninės jonizacijos, tad bendru atveju medžiaga pažeidžiama ties mažesniu smailiniu intensyvumu nei atveju, kai dominuoja griūtinė jonizacija. [9]

Žinoma, mažiausiai optiškai atspari bet kokio darinio vieta yra jo paviršius. Taip yra dėl paviršiaus defektų. Optiniame paviršiuje dėl gamybos procesų netobulumo bei įvairių išorinių poveikių atsiranda defektų - mikroįskilimų, struktūros netolygumų, dulkių ar kt. Tiriant optinio paviršiaus pažaidos slenkstį lengviausiai ir yra pažeidžiamos vietos, kuriose yra tokie defektai [46]. Tad didesnis paviršinių defektų kiekis mažina ir viso paviršiaus optinės pažaidos slenkstį. Taigi, norint tinkamai įvertinti optinio komponento pažaidos slenkstį, reiktų tirti silpniausią komponento vietą - jo paviršių, tad spinduliuotė fokusuojama paviršiuje.

Skirtingos medžiagos yra skaidrios skirtingo bangos ilgio spinduliuotei, tai gali lemti, kad vienos medžiagos gali turėti aukštą pažaidos slenkstį vieniems bangos ilgiams, tačiau gerokai mažesnę kietiems. Optinis pažaidos slenkstis bus mažesnis, kai darinio sugerties koeficientas

naudojamai spinduliuotei bus didesnis. Tuo tarpu medžiagos optinės pažaidos slenkstis bus didesnis, kai medžiaga bus skaidri naudojamam bangos ilgiui. Bendru atveju optiniai komponentai negali būti ištestuoti visuose bangos ilgiuose, tad bendrai optinį pažaidos slenkstį galima nustatyti pasirinktai spinduliuotei, priklausomai nuo tiriamo objekto taikymo.

LIDT įvertinimui gali būti naudojami skirtingi metodai: 1-į-1, R-į-1, S-į-1 [47]. Metodo pasirinkimas priklauso nuo tiriamo darinio tipo ir jo funkcionalumo optinėje sistemoje. Pagal 1-į-1 metodą vienas darinio taškas paveikiamas tik vienu lazerio impulsu. Pagal R-į-1 metodą vienas darinio taškas paveikiamas daugeliu impulsų, tačiau impulsų kiekis išlaikomas vienodas. Impulso energijos įtėkis kiekviename taške palaipsniui didinamas. Šiame darbe pasirinkta naudoti S-į-1 metodą, kuris yra aprašomas 21254-1:2011 ir 21254-2:2011 ISO standartais [45]. Pagal šį metodą vienas paviršiaus taškas (šiuo atveju vienas darinys) veikiamas daugeliu impulsų. Visuose paviršiaus taškuose išlaikomas vienodas impulsų skaičius. Tačiau sekančiuose taškuose intensyvumas palaipsniui didinamas. Šio metodo pasirinkimą galima pagrįsti siekiamybėmis, kad darinys būtų atsparus ilgą laiką. Tačiau minėtas ISO standartas yra parengtas standartiniams optiniams komponentams, kurių plotas yra nepalyginamai didesnis (mm ar cm eiles) nei mūsų testuojamų fotoninių kristalų ($100 \times 100 \mu\text{m}$). Tad ISO standarto atkartojimo galimybės mūsų atveju yra ribotos. Siekiant iširti optinės pažaidos slenkstį turime gaminti darinių masyvus, nes vieno darinio plotas visam testui yra per mažas, tas viename darinyje testuojamas tik vienas taškas, todėl testo taškų skaičius yra apribotas labai ribotu darinių skaičiumi.

Pagal S-į-1 metodą, vienas optinio komponento taškas paveikiamas daugeliu impulsų ir stebima ar darinys bus pažeidžiamas. Metodas remiasi statistiniu pažaidos įvertinimu, t.y. dalis darinių eksponuojami pasirinktos galios spinduliuote ir įvertinama tikimybė pažeisti darinius. Taip paveikus vienodą kiekį bandinių skirtingos galios spinduliuote, įvertinamos tikimybės ties kiekviena galia. Eksperimento metu tiesiogiai kontroliuojama lazerio vidutinė galia, tačiau optinės pažaidos slenkstis nusakomas energijos tankio verte, kuri apskaičiuojama pagal formulę:

$$E = \frac{P \cdot k}{f \cdot S}, \quad (7)$$

kur P yra vidutinė lazerio galia, k - nuostoliai patiriami dėl sistemos optikos dalinio nepralaidumo, f - lazerio pasikartojimo dažnis, S - sufokusuoto lazerio pluošto dėmės plotas. Visi taškai, kai tikimybė pažeisti bandinį yra mažiau nei 1, bet daugiau už 0, taip pat paskutinis taškas kai tikimybė lygi 0 bei pirmas taškas, kai tikimybė lygi 1, tiesiškai aproksimuojami ir brėžiama gauta tiesė. Tiesė aprašoma lygtimi:

$$P = aE + b, \quad (8)$$

čia P - tikimybė pažeisti darinius, E - energijos įtėkis, a ir b aproksimuotą tiesę aprašančios konstantos. Įtėkis, ties kuria ši tiesė kerta 0 tikimybę, yra vertinama kaip optinis pažaidos slenkstis [8]:

$$E = \frac{b}{a}. \quad (9)$$

Kadangi turime nedidelį kiekį darinių, pagal kurių pažeidimą siekiame nustatyti pažeidimo tikimybes ties kiekvienu intensyvumu, turime gana nemažą statistinę paklaidą dėl nedidelės statistikos imties [47]:

$$\sigma_p = \sqrt{\frac{p(1-p)}{n}}, \quad (10)$$

čia p - tikimybė pažeisti darinį tam tikros galios spinduliuote, n - ta pačia galia eksponuotų darinių imtis.

Taip pat galiausiai turi būti vertinamas tiesinės aproksimacijos tikslumas, kuris lemia ir pačio optinės pažaidos slenksčio tikslumą. Optinės pažaidos slenksčio tikslumo įvertinimui naudojama formulė [41]:

$$\sigma_E = E \sqrt{\frac{\sigma_a^2}{a} + \frac{\sigma_b^2}{b}}, \quad (11)$$

čia a ir b tiesinės aproksimacijos koeficientai ($y = ax + b$), σ_a - aproksimacijos koeficiento a standartinis nuokrypis, σ_b - aproksimacijos koeficiento b standartinis nuokrypis, E - slenkstinė energijos tankio vertė.

Tačiau šiame tyrime toks optinės pažaidos slenksčio tikslumo vertinimas rodytų nepagrįstai dideles paklaidas, kurios kyla iš nedidelės matavimų imties. Toks paklaidų vertinimas rodo paklaidas, kurios netgi leistų nustatyti slenksčio vertei būti didesnei ar mažesnei nei vertės testuojamame energijos įtekių intervale. Tad toks paklaidų vertinimas nevisiškai koreliuotų su vykdytu eksperimentu. Tad optinės pažaidos slenksčio tikslumas vertinamas kaip optinės pažaidos slenksčio eksperimento vienetinis energijos tankio žingsnis. Taip parenkamas ISO artinys.

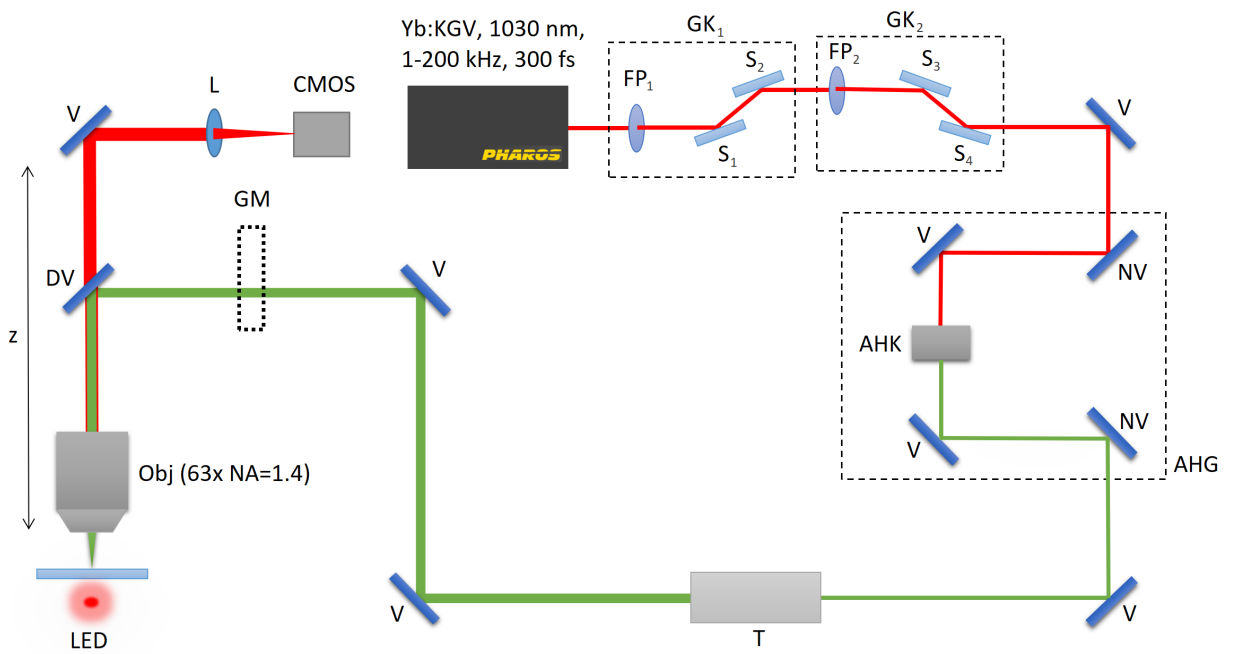
4 Tyrimo metodai

Šiame darbe 3DLL būdu buvo suformuoti polimeriniai rastų rietuvės dariniai iš SZ2080 fotopolimero be iniciatoriaus ir su iniciatoriumi. Vėliau buvo tiriamas šių darinių optinės pažaidos slenkstis S-j-1 metodika.

4.1 Polimerinių darinių formavimas

3D lazerinės litografijos metodu darinių formavimui naudota optinės sistemos schema pavaizduota 5 pav. Šioje sistemoje lazerinės spinduliuotės šaltinis yra Yb:KGV „Pharos“ (Šviesos konversija) lazeris, kuris generuoja 300 fs trukmės impulsus 1 - 200 kHz pasikartojimo dažniu. Generuojamų impulsų centrinis bangos ilgis yra 1030 nm. Polimerinių darinių formavimui buvo naudota šio lazerio spinduliuotės antroji harmonika (515 nm) ir 200 kHz impulsų pasikartojimo dažnis.

Maksimali spinduliuotės galia, galinti pasiekti bandinį kontroliuojama dvejomis $\lambda/2$ plokštėmis (FP₁ ir FP₂). Viena šių plokštelių valdoma rankiniu būdu, kita automatizuotai - kompiuteriu. Veidrodžiais (V ir NV) lazerio spinduliuotė yra nukreipiama į antrosios harmonikos kristalą (AHK), kuriame iš dviejų 1030 nm bangos ilgio fotonų gaunamas vienas 515 nm fotonas. Pro optinę sistemą praeinanti lazerio galia matuojama galios matuokliu (GM), kuris gamybos metu yra išimamas. Lazerio pluoštui bandinyje fokusuoti naudojamas 63x didinimo (1.4 NA) objektyvas (Obj), panardintas į imersinę alyvą. Bandinys iš apačios yra apšviečiamas raudonos šviesos diodu ir gamybos procesas realiu laiku yra stebimas per CMOS kamerą. Bandinio pozicija sufokusuoto lazerio spindulio atžvilgiu keičiama ANT130-110-XY ir ANT130-060-L-Z Aerotech linijinio poslinkio stalu, kuris leidžia kontroliuoti bandinio padėtį X, Y ir Z kryptimis, iki 50 nm tikslumu ir iki 30 cm/s greičiu. Taip pat pluošto padėtis gali būti valdoma galvanoskeneriais.

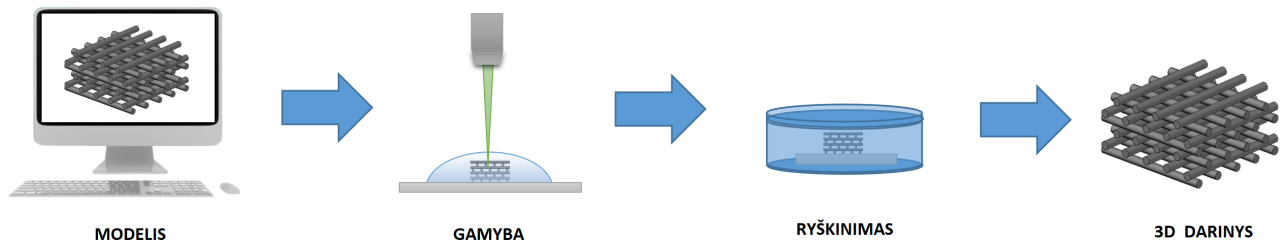


5 pav. Darinių formavimui naudojamos optinės sistemos principinė schema. GK₁ - grubus, ranka valdomas galios keitiklis, sudarytas iš fazinės plokštelės FP₁ ir dviejų stikliukų S₁ ir S₂ orientuotų Briusterio kampu. GK₂ - tikslus, kompiuteriu valdomas galios keitiklis, sudarytas iš fazinės plokštelės FP₂ ir dviejų stikliukų S₃ ir S₄ orientuotų Briusterio kampu. AHG - antrosios harmonikos generacija, veidrodžiu V bei nuimamu veidrodžiu NV spinduliuotė nukreipiama į antrosios harmonikos kristalą AKH, kuriame sugeneruojama 515 nm spinduliuotė. T - teleskopas, išplečiantis spinduliuotę. GM - galios matuoklis. DV - dichroinis veidrodžius, L - lęšis fokusuojantis spinduliuotę CMOS optinėje kameroje, Obj - objektyvas aštriai fokusuojantis spinduliuotę bandinyje, LED - šviesos diodas

Polimerinio darinio gaminimo procesas kontroliuojamas “3DPoli” programa, skirta 3D darinių modeliavimui ir gamybai. Šia programa galima susimodeliuoti norimas 3D struktūras arba importuoti jau turimus stereolitografinius CAD failus. Taip pagal suprogramuotas instrukcijas keičiama poslinkio stalo padėtis lazerio pluošto atžvilgiu. Taip pat pluošto padėčiai bandinio atžvilgiu kontroliuoti gali būti naudojami galvanoskeneriai. “3DPoli” leidžia kombinuoti stalų bei galvanosvenerių darbą, taip pasiekiant didžiausius gamybos greičius.

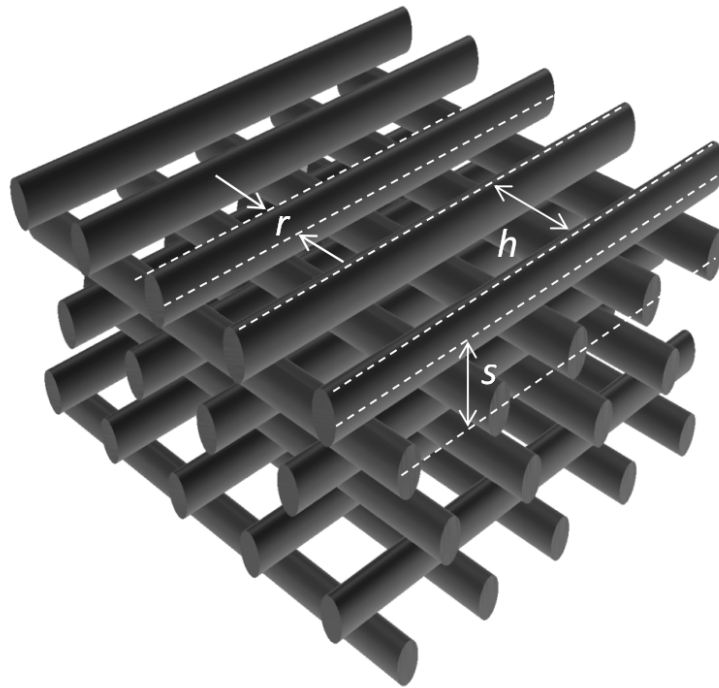
Siekiant suformuoti norimą darinį, pirmiausia objektas sumodeluojamas “3DPoli” programa. Struktūra formuojama polimero pirmtako laše, kuris uždėtas ant plonos (150 μm) stiklo plokštelės ir priklausomai nuo polimero pirmiausiai gali būti specialiai paruošiamas. Šiame darbe naudotas grynas SZ2080 polimero pirmtakas bei SZ2080 polimero pirmtakas su 1% IRG fotoiniciatoriaus. Pirmiausia polimero pirmtakas yra kaitinamas 50°C temperatūroje 90 minučių. Polimeras po kaitinimo sukietėja, taip sumažinamas suformuotos struktūros susitraukimas, nes darinys formuojamas iškart kietoje medžiagoje. Ir tik tuomet sluoksnis po sluoksnio lazeriu įrašoma norima forma. Galiausiai suformuota struktūra panardinama į 4-methyl-2-pentanone

tirpalą ir paliekama 60 minučių. Lazero spinduliuotės nepaveiktas polimero pirmtakas nusiplauna, o suformuotas polimerinis darinys išsilaiko. Svarbiausi gamybos proceso etapai pavaizduoti 6 pav.



6 pav. Polimerinio darinio gamyba. Pirmiausia kompiuteriu sumodeliuojama norima struktūra. Toliau pagal modelį lazeriu formuojama struktūra. Darinys ryškinamas - nesupolimerizuotas polimero pirmtakas pasišalina ir lieka tik polimerinis darinys

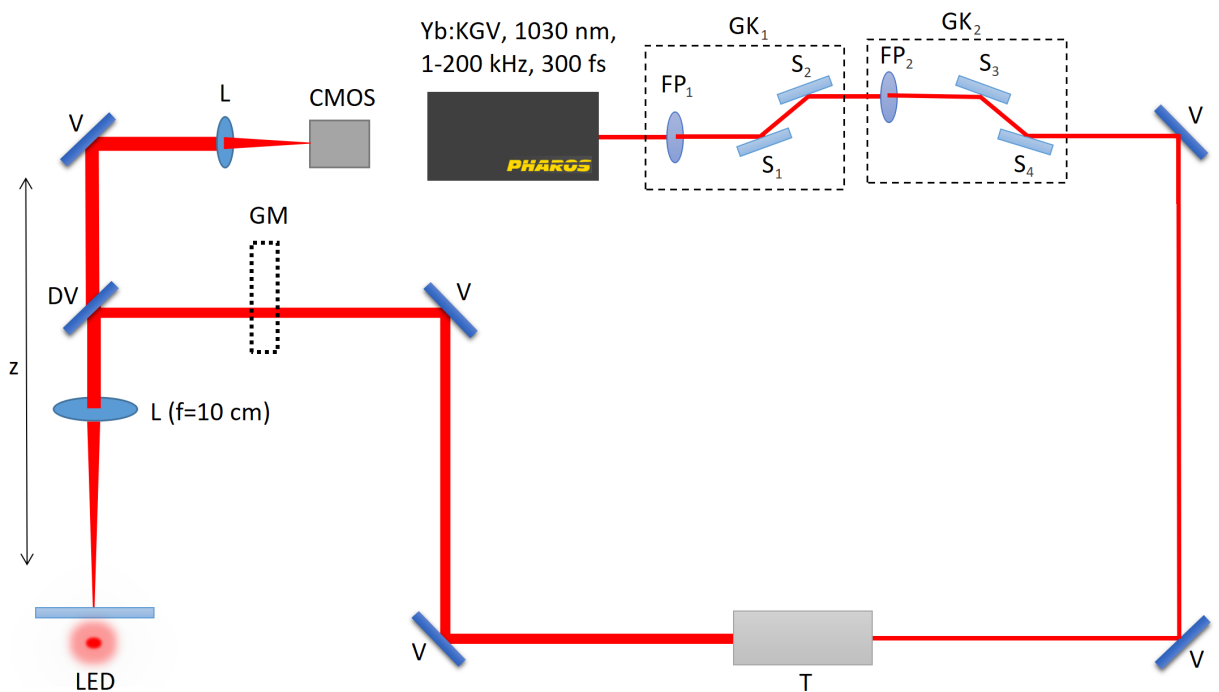
Šiame darbe buvo formuojamos 3D fotoninių kristalų rąstų rietuvės struktūros dariniai. Rąstų rietuvės, tai daugiasluoksniai dariniai, kuriuos sudaro lygiagrečiai išdėstytų linijų sluoksniai, kur kiekvienas vis aukštesnis sluoksnis yra pasuktas 90° kampu. Paprastesniam rąstų rietuvės struktūrų apibūdinimui įvedami s ir h parametrai apibūdinantys formuojamą darinį, h - tarpai tarp linijų centrų sluoksniuose, s - tarpai tarp sluoksnių centrų. Formuojamų darinių principinė schema pavaizduota 7 pav. Taip pat, paveiksle matyti r parametras, kuris apibūdina darinio skersinę raišką arba kitaip formuojamo darinio rąstelio storį. Pirmiausia, siekiant įvertinti skirtingų polimerų darinių optinės pažaidos slenksčius, buvo formuojamos SZ2080 ir SZ2080 + 1% IRG rąstų rietuvės, kuriose $h = 0,8 \mu\text{m}$, $s = 1,13 \mu\text{m}$ bei $r = 350 \text{ nm}$. Tokio darinio rąstelio išilginė raiška yra apie $1 \mu\text{m}$. Tuomet, siekiant įvertinti darinių optinės pažaidos slenksčio priklausomybę nuo darinių porėtumo, buvo formuojami dariniai su pakeistais h parametrais ($h = 1,2, 1,6, 2 \mu\text{m}$). Atlikus darinių formavimo testus su skirtingais formavimo greičiais ($1000 - 5000 \mu\text{m/s}$), buvo pasirinkta formuoti darinius $2500 \mu\text{m/s}$ greičiu, nes taip gautami tvarkingiausios struktūros ir geriausiai išsilaikantys dariniai. Vidutinė lazerio galia, kuria buvo formuojami dariniai buvo parinkta kiekvienam fotopolimero pirmtakui atskirai, siekiant išlaikyti vienodą skersinę raišką. SZ2080 be fotoinciatoriaus buvo gaminami $150 \mu\text{W}$ vidutine galia, o SZ2080 su 1% IRG fotoinciatoriaus gaminta $90 \mu\text{W}$ vidutine galia. Gaunamas 10×10 darinių masyvas, kiekvieno darinio matmenys $100 \times 100 \times 30 \mu\text{m}$, tarpai tarp atskirų darinių $100 \mu\text{m}$ 10 pav.



7 pav. Gaminamo rąstų rietuvės darinio modelio dalis. h - tarpai tarp linijų centrų sluoksniuose, s - tarpai tarp sluoksnių centrų, r - parametras, kuris apibūdina darinio skersinę raišką arba kitaip formuojamo darinio rąstelio storį

4.2 Optinės pažaidos slenksčio matavimas

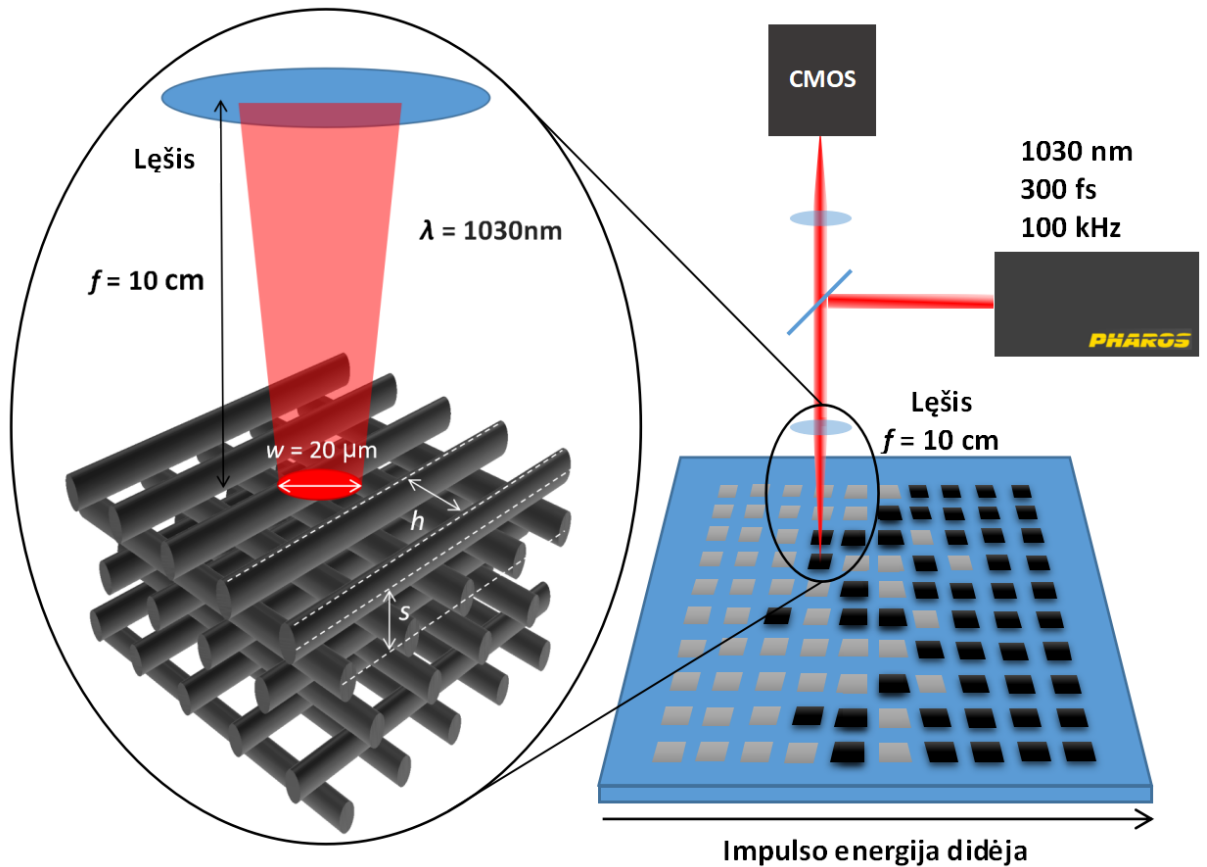
Optinės pažaidos slenkstis buvo tiriamas naudojantis ta pačia optine sistema, tik kiek ją modifikavus, modifikuotos sistemos schema pavaizduota 8 pav. Suformuoti rąstų rietuvės dariniai buvo eksponuojami 100 kHz pasikartojimo dažnio, 1030 nm centrinio bangos ilgio spinduliuote t.y lazerio pirma harmonika (iš sistemos išimami veidrodžiai, nukreipiantys lazerio spinduliuotę į antrosios harmonikos kristalą). Tokie lazerio parametrai buvo pasirinkti, siekiant gautus rezultatus palyginti su jau publikuotais pilnavidurių kubukų optinės pažaidos slenksčiais [8, 41]. Optinės pažaidos slenksčio matavimams spinduliuotę fokusuoti naudojamas 10 cm židinio nuotolio lęšis (L). Suformuotų struktūrų optinės pažaidos slenksčiui įvertinti buvo pasirinkta S-į-1 įvertinimo metodika.



8 pav. Optinės pažaidos slenkščio optinės sistemos principinė schema. GK₁ - grubus, ranka valdomas galios keitiklis, sudarytas iš fazinės plokštelės FP₁ ir dviejų stikliukų S₁ ir S₂ orientuotų Briusterio kampu. GK₂ - tikslus, kompiuteriu valdomas galios keitiklis, sudarytas iš fazinės plokštelės FP₂ ir dviejų stikliukų S₃ ir S₄ orientuotų Briusterio kampu. Veidrodžiais V spinduliuotė nukreipiama į teleskopą T, išplečiantį spinduliuotę. GM - galios matuoklis. DV - dichroinis veidrodis, L - lęšis fokusuojantis spinduliuotę į CMOS optinę kamerą, LED - šviesos diodas, L($f = 10$ cm) - 10 cm židinio nuotolio lęšis fokusuojantis spinduliuotę į darinio paviršių

Matavimams buvo pagamintas 100 (10x10) rąstų rietuvės darinių masyvas. Buvo pasirinkta 10 skirtingų impulso energijų ribose, kuriose tikimasi nustatyti optinės pažaidos slenkstį. Energijos tankio vertės parenkamos taip, kad ties mažiausiomis energijos tankio vertėmis tikimybė pažeisti darinį būtų lygi 0, ekspnuojant darinius didžiausio energijos tankio spinduliuote tikimybė pažeisti darinį būtų lygi 1, tuo tarpu visas likęs intervalas padalinamas į lygias dalis, kad energijos tankio vertės palaipsniui didėtų eilutė iš eilutės. Šio energijos tankio ribos parenkamos atlikus testus su atskiru darinių masyvu. Kiekvienos energijos impulsais vienodą laiką paveikiama po 10 darinių (viena darinių masyvo eilutė), kiekviena kita darinių masyvo eilutė yra paveikiama vis didesnės energijos impulsais. Visi dariniai buvo veikiami 60 s, t.y. maždaug 6000000 lazerio impulsų. Toks impulsų kiekis yra optimalus siekiant, kad darinys būtų atsparus daugeliui impulsų, tačiau testo laikas turi būti pakankamai trumpas, kad būtų įmanoma ištestuoti didelį kiekį darinių masyvų. Pagal vaizdą, gaunamą CMOS kameroje, spinduliuotė fokusuojama į atskirų darinių centrines dalis jų paviršiuje. Taip pat CMOS kameroje stebima pažeidimo eiga bei preliminariai vertinama ar darinys buvo pažeistas. Optinės pažaidos slenkščio įvertinimas schema pavaizduotas 9 pav. Tačiau paveikus visus darinius ir jau atlikus

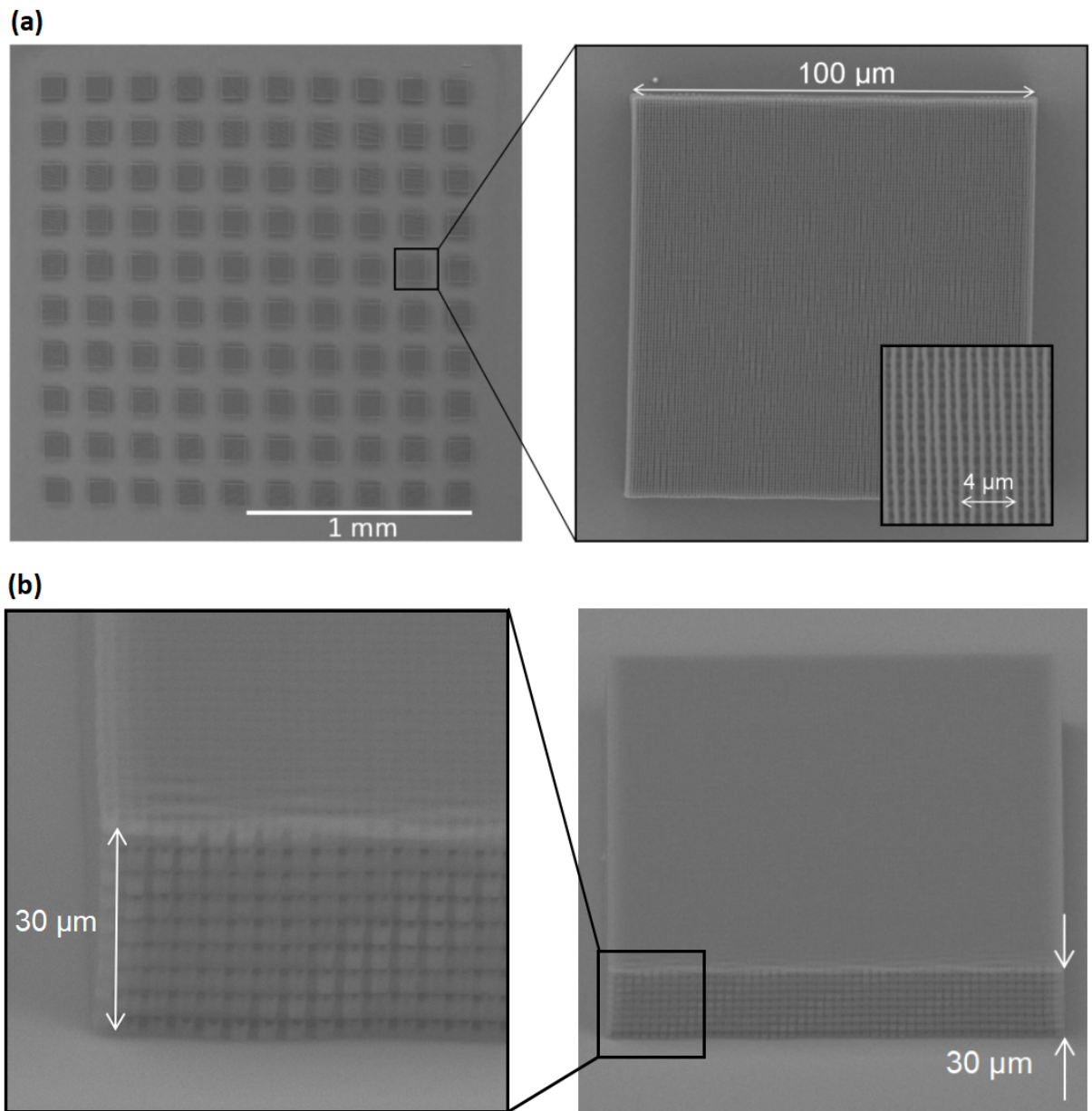
eksperimentą tikslesniam pažeidimų įvertinimui apžiūrimi elektronų pluošto ir optiniu mikroskopais, tam kad būtų pastebėti visų tipų pažeidimai. Elektronų pluošto mikroskopu geriau bus matomi smulkūs darinio morfologijos pakitimai, tuo tarpu optiniu mikroskopu geriau pastebimi spalviniai darinio pakitimai, kurie galimai yra darinio rąstelių lūžio rodiklio pokyčiai atsiradę dėl medžiagos struktūros pakitimų. Galiausiai, apskaičiuojamos tikimybės pažeisti darinį kiekvienos energijos impulsais. Darinių optinės pažeidos slenkstis nustatomas, kai tikimybių $0 < P < 1$ tiesinė aproksimacija kerta 0 tikimybę.



9 pav. Optinės pažeidos slenkščio principinė matavimo schema. Pažeidos slenkščio matavimui naudojama 1030 nm centrinis bangos ilgio spinduliuotė ir 10 cm židinio nuotolio fokusuojantis lęšis (f)

5 Rezultatai

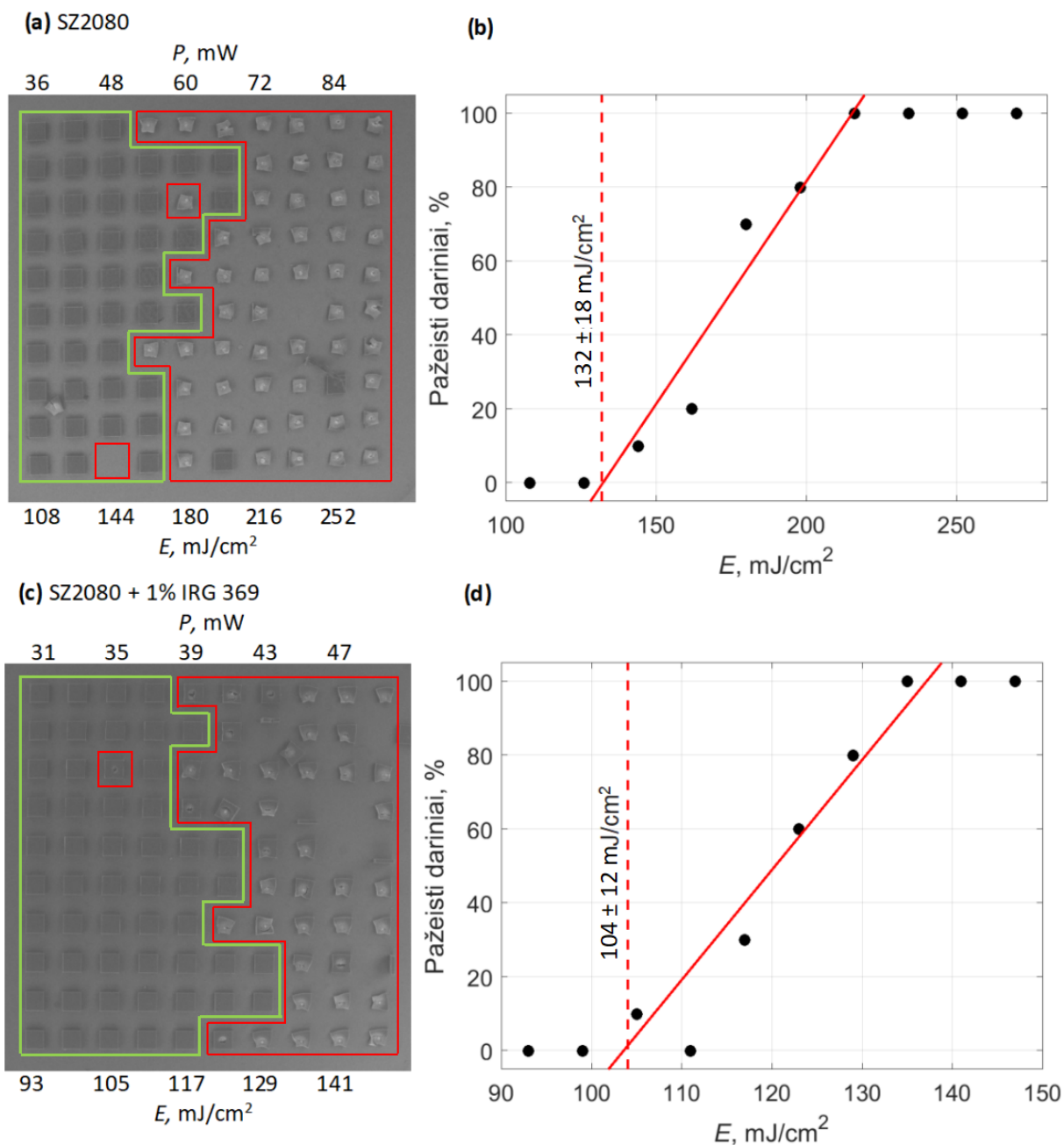
Pirmiausia, buvo suformuoti rąstų rietuvės darinių masyvai iš skirtingų fotopolimerų: SZ2080 ir SZ2080 su 1% IRG fotoinicijatoriaus. Suformuotas darinių masyvas pavaizduotas paveiksle 10 dalyje (a), taip pat iš arčiau pateiktas vieno rąstų rietuvės SEM darinio atvaizdas ($h = 0,8 \mu\text{m}$, $s = 1,13 \mu\text{m}$, $r = 350 \text{ nm}$). 10 pav. (b) dalyje pavaizduotas vienas darinys iš šono. Suformuotos struktūros buvo naudojamos optinės pažaidos slenksčio nustatymo tyrimams pagal jau aptartą S-i-1 metodiką.



10 pav. (a) rąstų rietuvės darinių masyvas ir atskiras darinys iš arčiau, (b) atskiro darinio atvaizdas iš šono

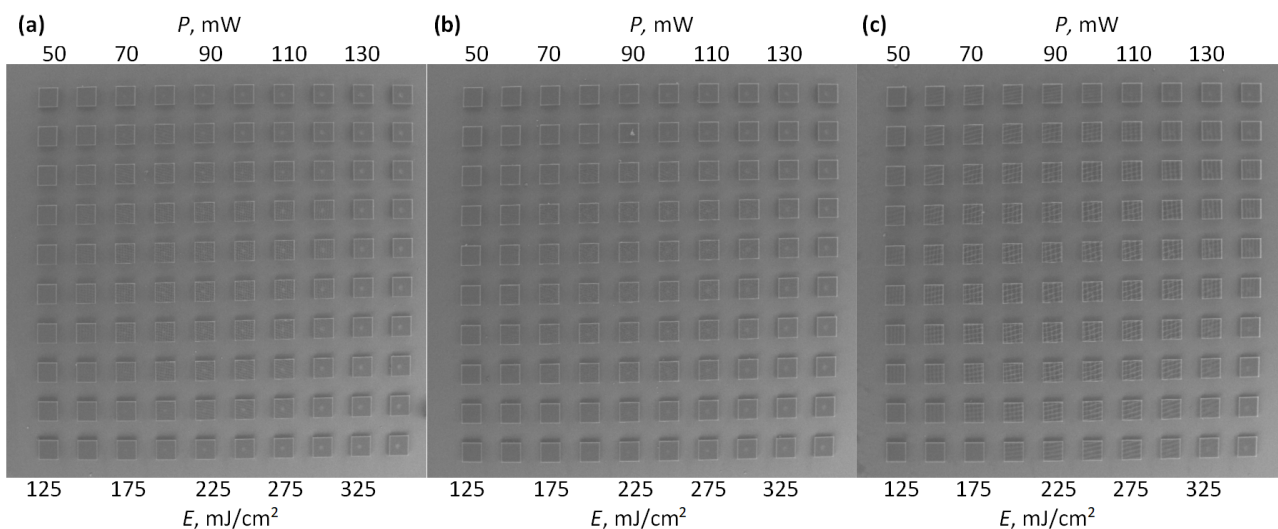
Siekiant palyginti skirtingų medžiagų darinių optinės pažaidos slenksčius, buvo tirti rąstų rietuvės darinių masyvai iš SZ2080 ir SZ2080 + 1% IRG, kurių parametrai $h = 0,8 \mu\text{m}$, $s = 1,13 \mu\text{m}$, $r = 350 \text{ nm}$. Visi darinių masyvai po optinės pažaidos slenksčio tyrimo apžiūrimi per skenuojantį elektronų pluošto mikroskopą (SEM). Darinių masyvų SEM atvaizdai po optinės pažaidos slenksčio tyrimo bei jų optinio pažaidos slenksčio įvertinimo grafikai pateikti 11 pav. (a) dalyje pateiktas SZ2080 masyvo po optinės pažaidos slenksčio tyrimo atvaizdas, (b) dalyje to paties masyvo optinio pažaidos slenksčio grafikai pagal, kurį buvo nustatomas darinių optinės pažaidos slenkstis. SZ2080 dariniams LIDT vertė buvo gauta lygi $132 \pm 18 \text{ mJ/cm}^2$. (c) dalyje pavaizduotas SZ2080 + 1% IRG fotopolimero darinių masyvo po optinės pažaidos slenksčio tyrimo atvaizdas, (d) dalyje to paties masyvo optinės pažaidos slenksčio įvertinimo grafikas. Šiems dariniams gauta LIDT vertė yra lygi $104 \pm 12 \text{ mJ/cm}^2$. Matyti, kad SZ2080 dariniai yra atsparesni ir jų optinės pažaidos slenkstis yra didesnis nei SZ2080 + 1% IRG darinių.

Siekiant ištirti darinių optinės pažaidos slenksčio priklausomybę nuo jų porėtumo (darinių užpildymo), buvo suformuoti keli rąstų rietuvės darinių masyvai su skirtingais h parametrais. Pasirinkta suformuoti dar tris masyvus, kuriuose s ir r parametrai išlieka tokie patys ($s = 1,13 \mu\text{m}$, $r = 0,350 \mu\text{m}$), o h parametro vertės parinktos kartotinės, prieš tai formuoto masyvo h vertėms. Šios kiekvienam darinių masyvui buvo parinktos lygios $1,2 \mu\text{m}$, $1,6 \mu\text{m}$ ir $2 \mu\text{m}$. Darinių, kurių $h = 0,8 \mu\text{m}$, $s = 1,13 \mu\text{m}$, užpildymo faktorius (polimero medžiagos tūrio santykis su bendro darinio tūriu) yra apie 33%. Tuo tarpu pakeistų h parametru darinių užpildymo faktorius $h = 1,2 \mu\text{m}$ dariniams - 22%, $h = 1,6 \mu\text{m}$ dariniams - 17% ir $h = 2 \mu\text{m}$ dariniams - 13%. Šie darinių masyvai, kaip ir prieš tai pateikti, buvo tirti ta pačia, S-į-1, metodika, taip siekiant nustatyti šių darinių optinį pažaidos slenkstį. Atlikus eksperimentą ir apžiūrėjus darinius elektronų pluošto mikroskopu buvo pastebėta, kad darinių pažaidos smarkiai skiriasi nuo prieš tai tirtų parametru darinių. Šių darinių SEM atvaizdai parodyti 12 pav. Pakeitus darinių h parametru darinių pažeidimai atrodė kaip nedideli spalviniai pakitimai ir beveik nepavyko pastebėti jokių topologinių pakitimų, nepaisant to, kad dariniai eksponuojami didesnėmis impulso energijomis nei iš pradžių tirti ($h = 0,8 \mu\text{m}$, $s = 1,13 \mu\text{m}$) dariniai. Atsiradę pažaidos atrodo vis blankesni mažinant impulso energiją, tačiau vertinti, kurie dariniai jau nebėra pažeisti yra sudėtinga. Tad tokiems dariniams optinės pažaidos slenkstis nebuvo nustatytas.



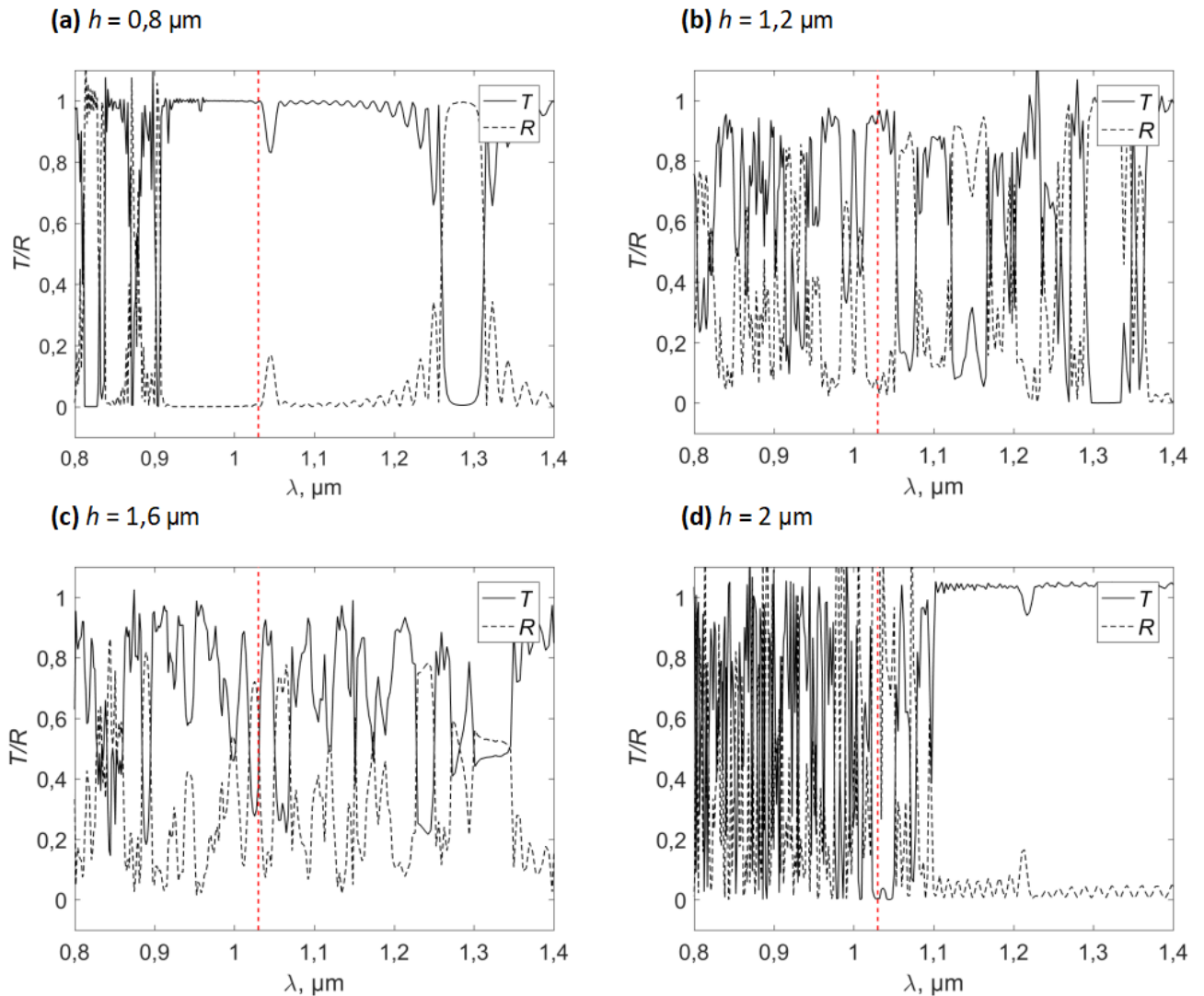
11 pav. SZ2080 ir SZ2080 + 1% IRG rąstų rietuvės darinių masyvai po optinės pažeidimo slenksčio tyrimo. (a) SZ2080 darinių masyvo po optinio pažeidimo slenksčio tyrimo SEM atvaizdas, (c) to paties darinių masyvo LIDT įvertinimo grafikas, (b) SZ2080 + 1% IRG darinių masyvo po optinės pažeidimo slenksčio tyrimo SEM atvaizdas, (d) to paties masyvo LIDT įvertinimo grafikas

Taigi pastebėta, kad pakeistų h parametru dariniai pažeidžiami labai skirtingai, lyginant su prieš tai formuotu masyvu. Greičiausiai, šis skirtumas kyla dėl skirtingų pažeidimo mechanizmų, tačiau dėl kokių priežasčių kinta pažeidimo mechanizmai? Viena iš akivaizdžiausių hipotezių galėtų būti, kad skirtingų darinių optines pažeidas didele dalimi lemia jų kaip fotoninių kristalų sa-



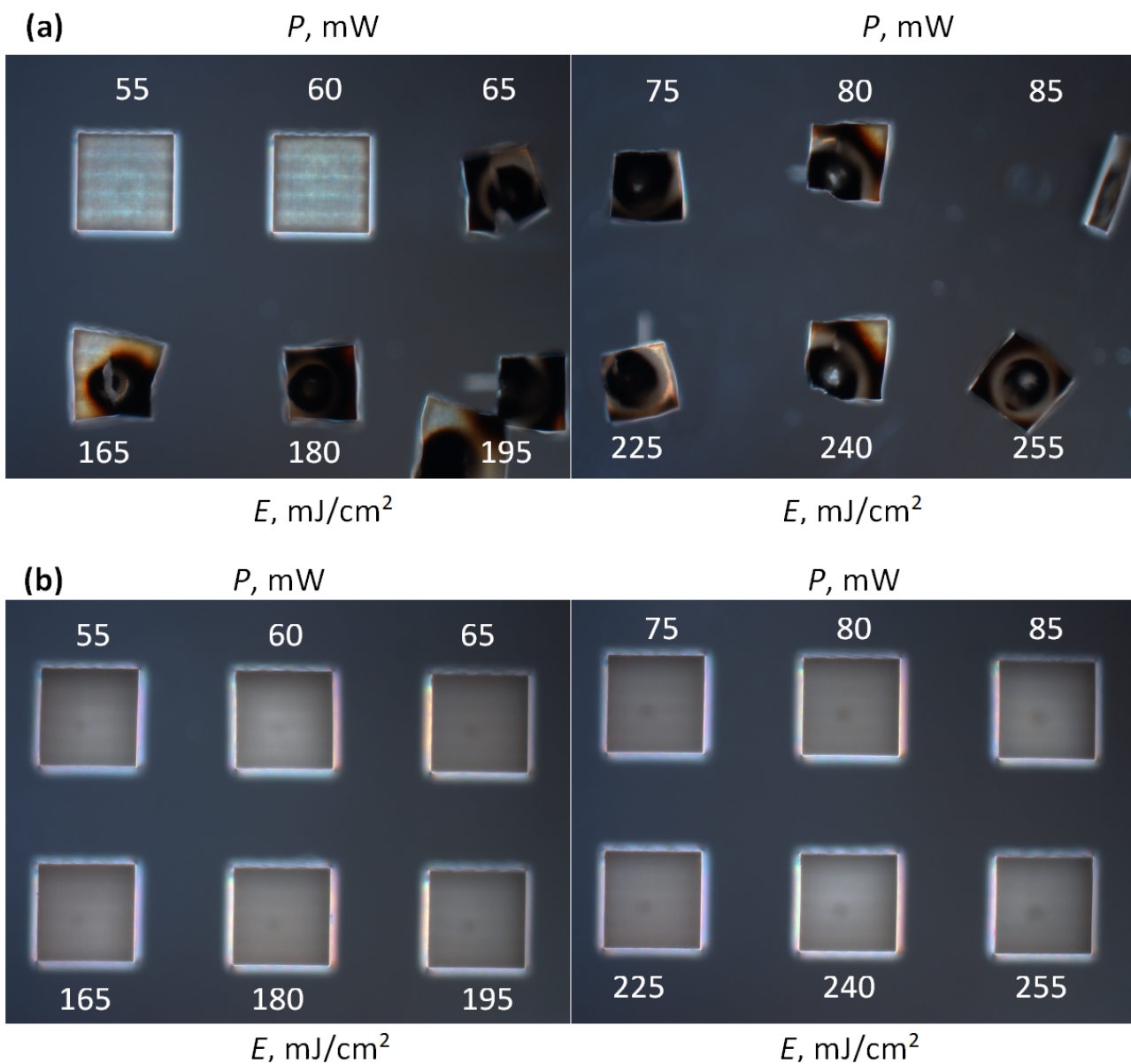
12 pav. SZ2080 darinių masyvų su skirtingais h parametrais ($h=1,2, 1,6$ ir $2 \mu\text{m}$) po optinio pažaidos slenksčio tyrimo SEM atvaizdai

vybės. Taigi reikėjo įvertinti formuotų darinių funkcionalumą naudojamai 1030 nm spinduliuotei. Tam buvo pasitelktas [18] pritaikytas FDTD (angl. *Finite – Difference Time – Domain*) metodas skaitmeniškai modeliuoti fotoninių kristalų funkcionalumą. Šiuo metodu skaitmeniškai baigtiniame taškų skaičiuje sprendžiamos laikinės Maksvelo lygtys. Programa, kurioje buvo sumodeliuotas fotoninis kristalas buvo gauta iš prieš tai minėtos publikacijos autoriaus prof. V. Mizeikio (Shizuoka Universitetas, Japonija), už ką norėčiau jam padėkoti. Taigi pagal turimą programą sumodeliavus pagamintų parametru fotoninius kristalus buvo pastebėta, kad šių fotoninių kristalų funkcionalumas naudojamai spinduliuotei labai skiriasi. Pirminiai $h = 0,8 \mu\text{m}$ dariniai yra pralaidūs 1030 nm spinduliuotei, tuo tarpu $h = 1,2, 1,6$ ir $2 \mu\text{m}$ yra dalinai pralaidūs, tad dalį spinduliuotės ir atspindi. Iš modelių gauti gamintų darinių su skirtingais h parametrais pralaidumo ir atspindžio priklausomybė nuo bangos ilgio pavaizduotos 13 pav.



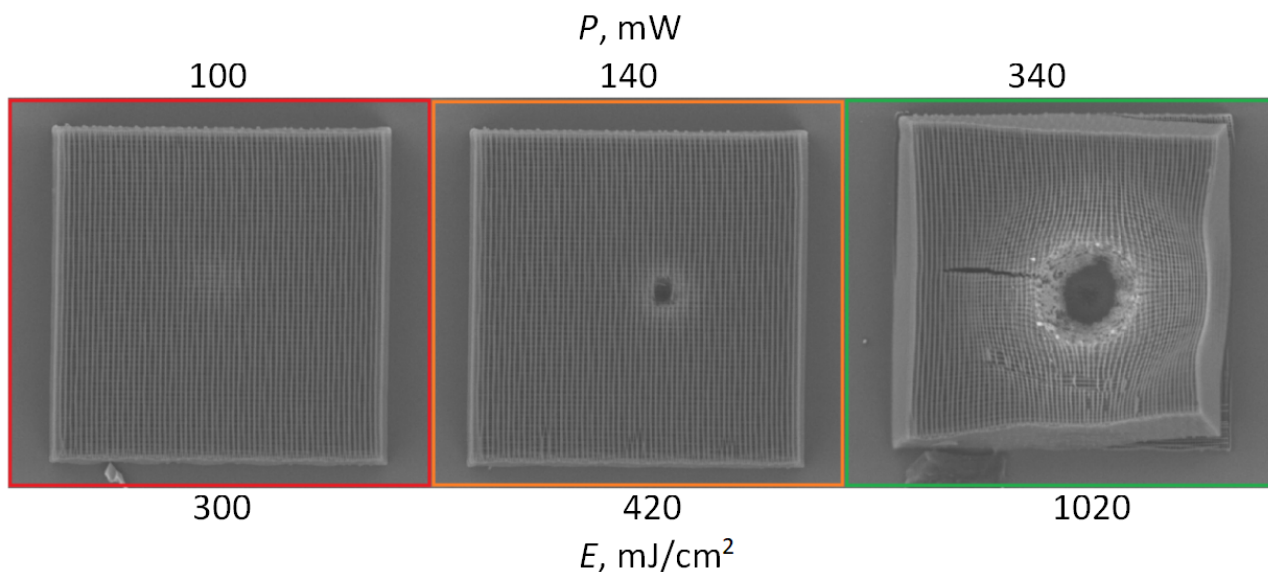
13 pav. Darinių su skirtingais h parametrais pagal modelius gautos atspindžio ir pralaidumo priklausomybės nuo bangos ilgio. (a) $h = 0,8 \mu\text{m}$, (b) $h = 1,2 \mu\text{m}$, (c) $h = 1,6 \mu\text{m}$, (d) $h = 2 \mu\text{m}$

Kad įsitikintume ar modeliai tikrai gerai atspindi eksperimentą, buvo tiesiogiai pamatuotas tų pačių kristalų pralaidumas, tiesiog pastačius galios matuoklį už jų ir fiksuojant praėjusią spinduliuotę. Dariniams, kurių $h = 0,8 \mu\text{m}$, gautas pralaidumas 59 %, kai $h = 1,2 \mu\text{m}$, pralaidumas - 21 %, tuo tarpu, kai $h = 1,6 \mu\text{m}$ ir $h = 2 \mu\text{m}$, pralaidumas tesiekia 12%. Reikia turėti omenyje, kad tokiu matavimu galima tik apytiksliai palyginti darinių pralaidumus, nes čia fiksuojama spinduliuotė praėjusi ne tik pro darinius, bet ir pro stikliuką, taip pat dalis spinduliuotės yra išsklaidoma. Tad šiuo eksperimentu tebuvo patikrinta, ar iš tiesų $h = 0,8 \mu\text{m}$ dariniai yra pralaidesni, nei pakeistų h parametru tirtieji kristalai. Galima teigti, kad pagal modelį gauti duomenys tikrai duoda panašius rezultatus.



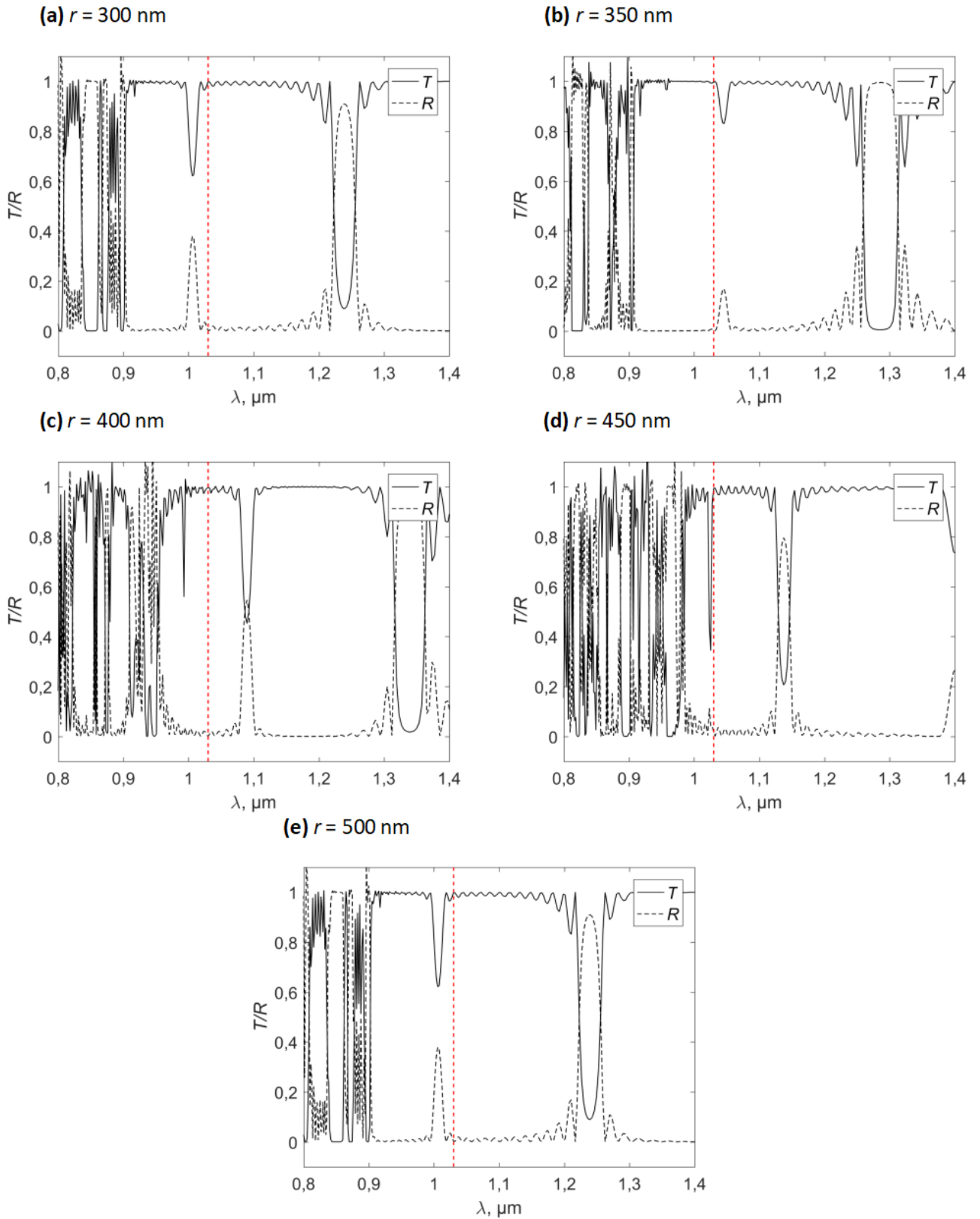
14 pav. Skirtingų pralaidumų fotoninių kristalų pažaidų pavyzdžiai ties tais pačiais impulsų energijos tankiais. (a) Pralaidūs kristalai, (b) dalinai pralaidūs kristalai

Taigi, turint kristalų pralaidumo ir atspindžio naudojamai spinduliuotei duomenis, matyti, kad pralaidžių ir dalinai pralaidžių kristalų optinės pažaidos skiriasi. Pralaidžių kristalų pažaidos atrodo kaip stiprus kristalo topologijos pakitimas. Toks kristalas pažeidimo metu užsižiebia, vizualiai paprasta pastebėti kaip kristalas sudega. Tuo tarpu dalinai pralaidžių kristalų pažaidos ties panašiomis impulso energijomis atrodo tik kaip nedideli spalviniai pokyčiai. Galimai šiek tiek apsilydo rąstelių paviršiniai sluoksniai, tačiau eksperimento metu tokia pažaida beveik nepastebima. Pralaidžių ir dalinai pralaidžių darinių pažaidų pavyzdžiai parodyti 14 pav. Tokius skirtumus gali lemti skirtingų fotoninių savybių nulemti pažaidos mechanizmai.



15 pav. Dalinai pralaidžių kristalų būdingų pažaidų, priklausomai nuo naudojamų impulsų energijos tankių, pavyzdžiai

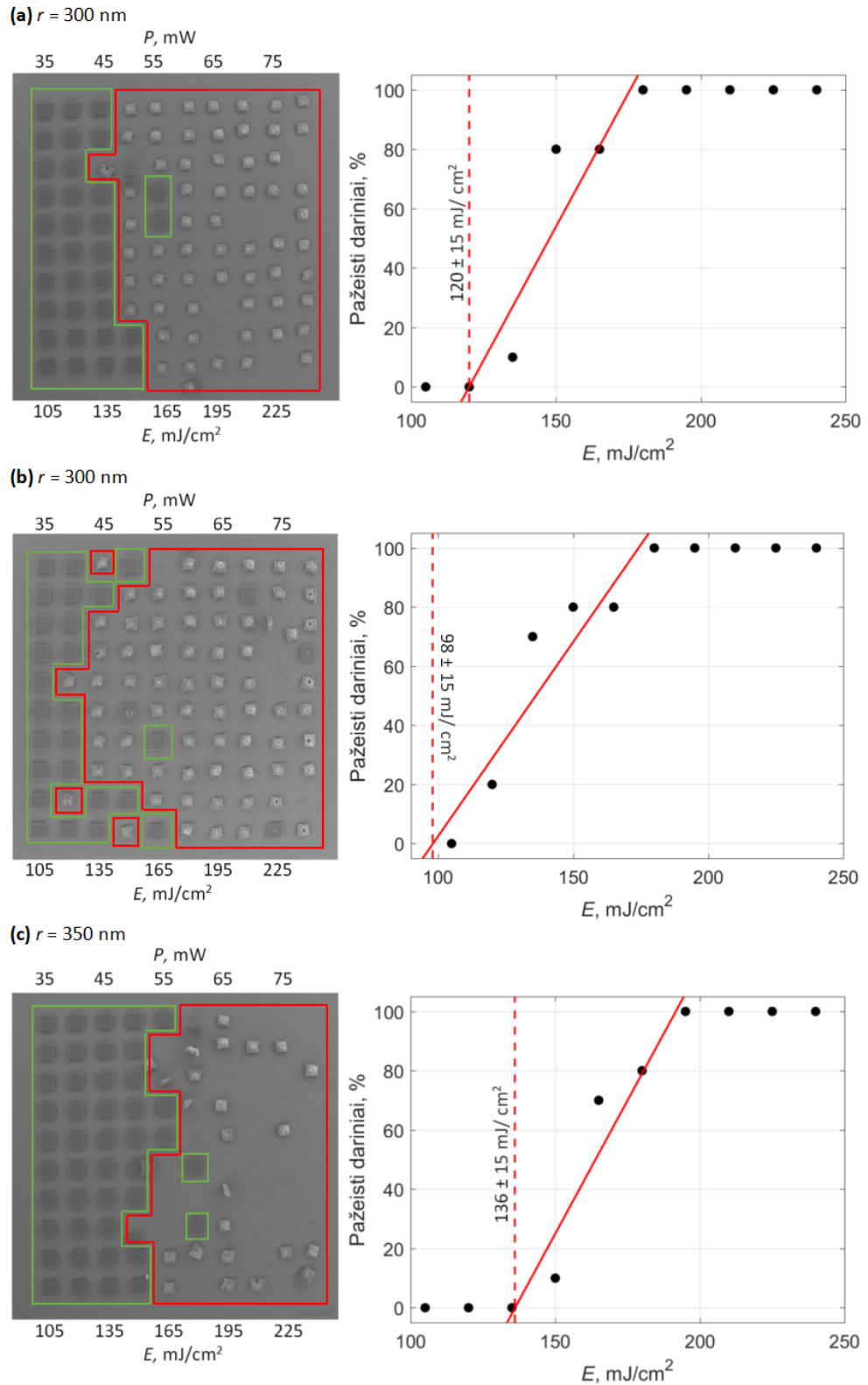
Vertinant darinių optinės pažaidos slenksčius, bet koks darinio pakitimas turi būti vertinamas kaip jo pažaida. Pažaidos gali būti darinių spalvinis pokytis ar bet koks topologinis darinio pakitimas. Tiriant dalinai pralaidžius kristalus, buvo pastebėta, kad jų pažaidų topologija stipriai priklauso nuo naudojamos spinduliuotės impulso energijos. Veikiant darinius didesnės energijos impulsais gaunamas didelis topologinis darinio pakitimas, mažinant impulso energiją darinių topologinis pakitimas tampa vis lokalesnis, prie nedidelių impulso energijų galima stebėti tik spalvinius pakitimus. Pažaidų topologijos pavyzdžiai parodyti 15 pav. Tuo tarpu visiškai pralaidžių darinių pažaidos visuomet atrodo panašiai.



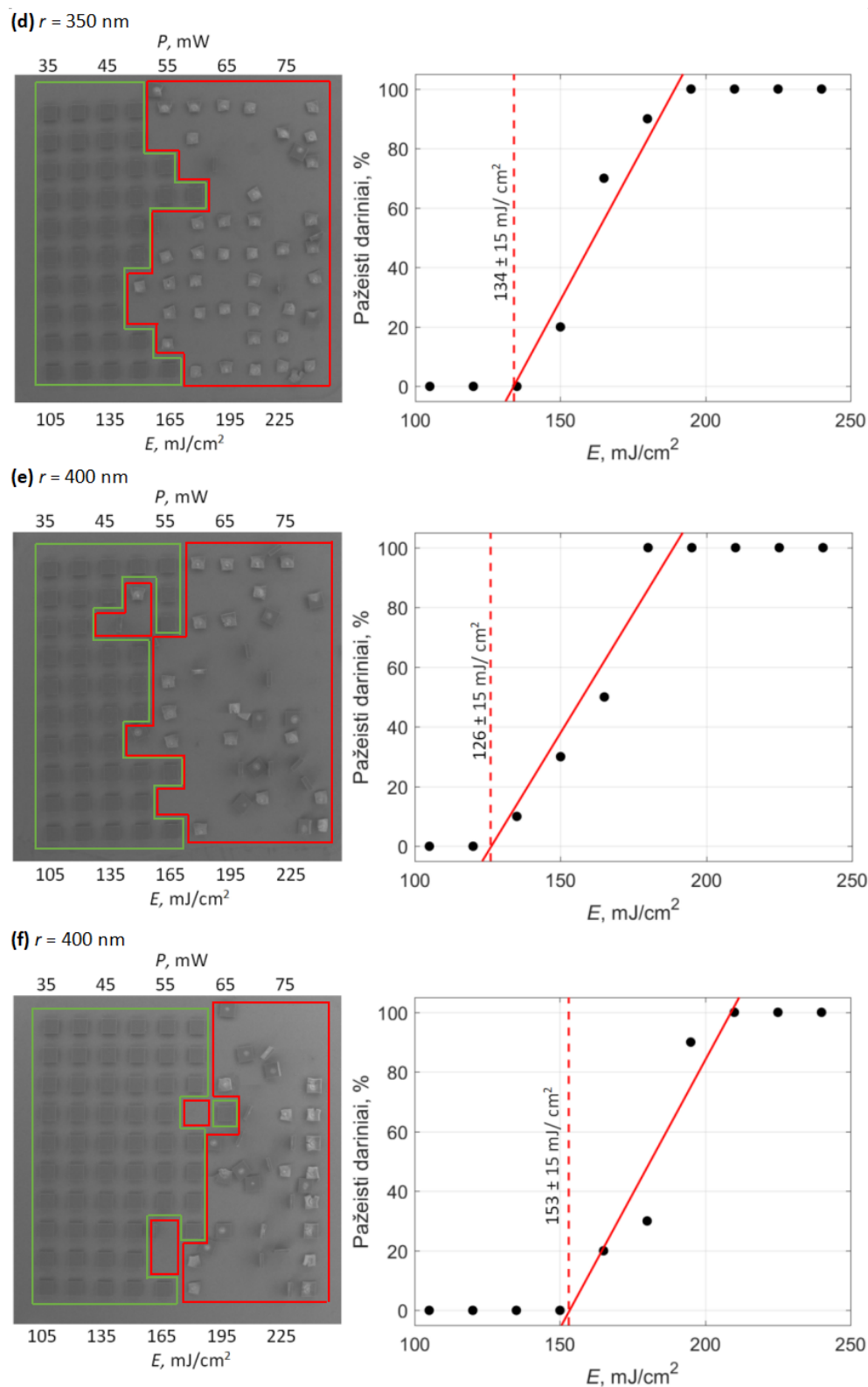
16 pav. Skirtingos raiškos fotoninių kristalų atspindžio ir pralaidumo priklausomybės nuo bangos ilgio, gautos iš FDTD modelio . (a) paveiksle modelis fotoninio kristalo, kurio rąstelių storis 300 nm, (b) 350 nm, (c) 400 nm, (d) 450 nm, (e) 500 nm

Galiausiai, siekiant ištirti darinių optinės pažaidos slenksčio priklausomybę nuo porėtumo, buvo pasirinktas kitas būdas keisti darinių porėtumą. Darinių masyvai buvo formuojami skirtingomis vidutinėmis lazerio galiomis, taip buvo gaunamas raiškos pokytis (skirtingas rąstelių storis arba kitaip tariant skirtingas r parametras) rąstų rietuvės dariniuose, tuo pat metu kinta ir darinių užpildymas arba jų porėtumas. Pirmieji SZ2080 dariniai buvo formuojami vidutine $150 \mu\text{W}$ lazerio galia, tokių darinių skersinis vokselio skersinis matmuo yra apie 350 nm , vokselio išilginis matmuo - apie $1 \mu\text{m}$, o jų užpildymas yra apie 33% . Taip pat buvo suformuoti rąstų rietuvės darinių masyvai 125 , 175 , 200 ir $225 \mu\text{W}$ vidutinėmis lazerio galiomis, kurių skersinė raiška atitinkamai yra apie 300 , 400 , 450 ir 500 nm , išilginė raiška atitinkamai - $0,9$, $1,25$, $1,4$, $1,55 \mu\text{m}$, o užpildymas atitinkamai yra apie 24 , 43 , 55 ir apie 67% . Pirmiausia, tuo pačiu skaitmeniniu metodu buvo patikrinta ar nekinta tokių darinių funkcionalumas pakitus jų užpildymui. Šių darinių pralaidumo ir atspindžio priklausomybė nuo bangos ilgio, keičiant rąstų rietuvės darinių raišką, pavaizduota paveiksle 16, dalyje (a) 300 nm , (b) 350 nm , (c) 400 nm , (d) 450 nm , (e) 500 nm skersinės raiškos modeliai. Grafikuose matyti, kad visi šie dariniai turėtų būti pralaidūs naudojami 1030 nm spinduliutei.

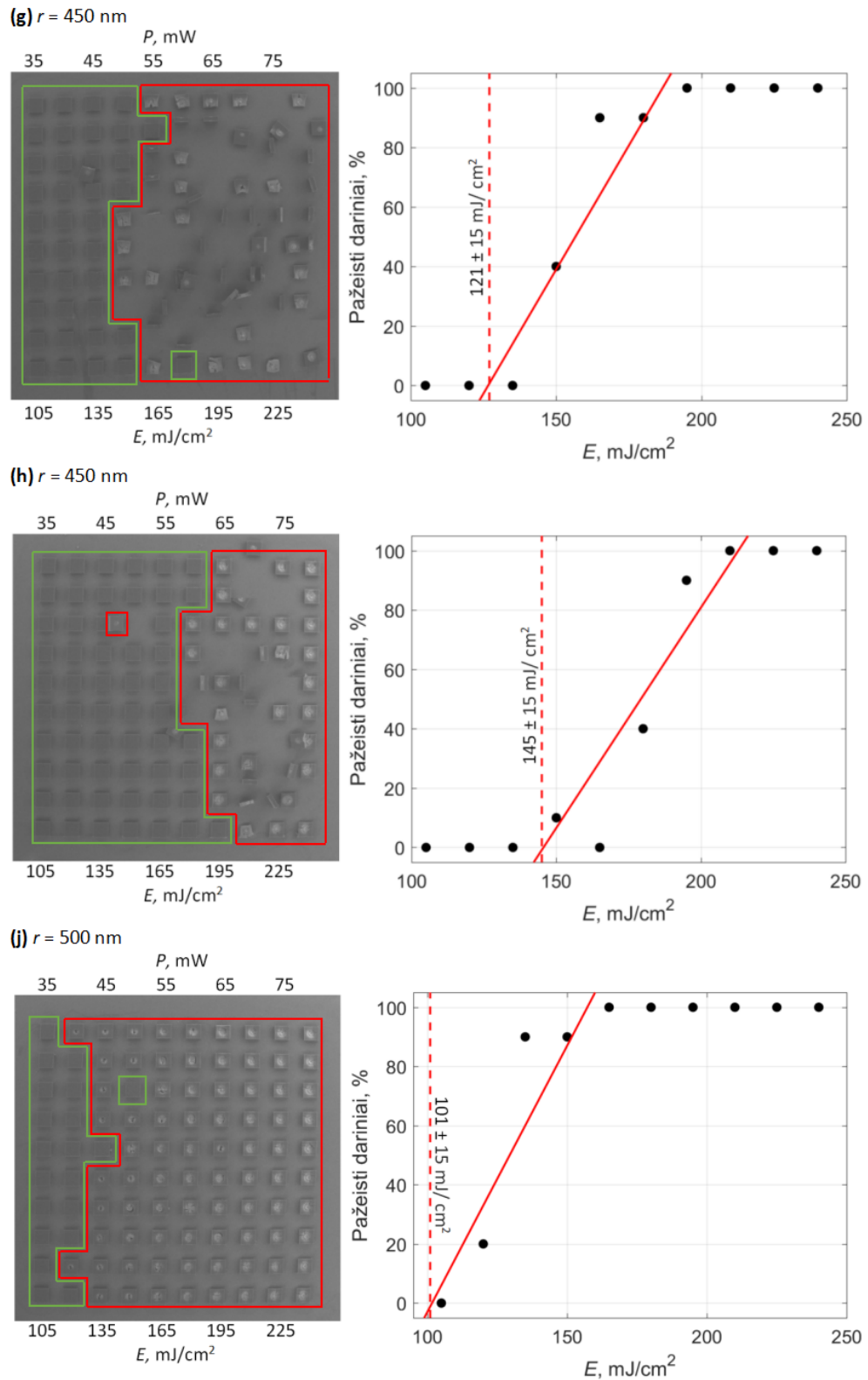
Skirtingomis vidutinėmis galiomis suformuoti dariniai, buvo tirti ta pačia, jau minėta, S-į-1 optinės pažaidos slenksčio vertinimo metodika. Kaip jau minėta buvo ištirta 5 skirtingų raiškų rąstų rietuvės darinių masyvai. Kiekvienos raiškos masyvo matavimas buvo pakartotas du kartus, naudojant vis naują masyvą, kad būtų galima patikrinti rezultatų atsikartojamumą. Darinių atvaizdai po optinės pažaidos slenksčio tyrimo ir jų optinės pažaidos slenksčio įvertinimo grafikai pavaizduoti 17, 18, 19, 20 pav. (a) ir (b) dalyse dariniai formuoti $125 \mu\text{W}$ vidutine galia. Šiems dariniams optinio pažedimo slenkstis vienu atveju buvo gautas lygus $120 \pm 15 \text{ mJ/cm}^2$, kitu $98 \pm 15 \text{ mJ/cm}^2$. (c) ir (d) dalyse dariniai formuoti $150 \mu\text{W}$ vidutine lazerio galia. Šių darinių optinės pažaidos slenkstis lygus $134 \pm 15 \text{ mJ/cm}^2$ ir $136 \pm 15 \text{ mJ/cm}^2$. (e) ir (f) dalyse dariniai formuoti $175 \mu\text{W}$ vidutine galia, gautas optinis pažaidos slenkstis $126 \pm 15 \text{ mJ/cm}^2$ ir $153 \pm 15 \text{ mJ/cm}^2$. (g) ir (h) dalyse dariniai formuoti $200 \mu\text{W}$, šių darinių optinės pažaidos slenksčiai yra $121 \pm 15 \text{ mJ/cm}^2$ ir $145 \pm 15 \text{ mJ/cm}^2$. (j) ir (k) dalyse pavaizduoti dariniai formuoti $225 \mu\text{W}$ vidutine galia, šių darinių optinės pažaidos slenksčiai yra lygūs 101 ir $102 \pm 15 \text{ mJ/cm}^2$.



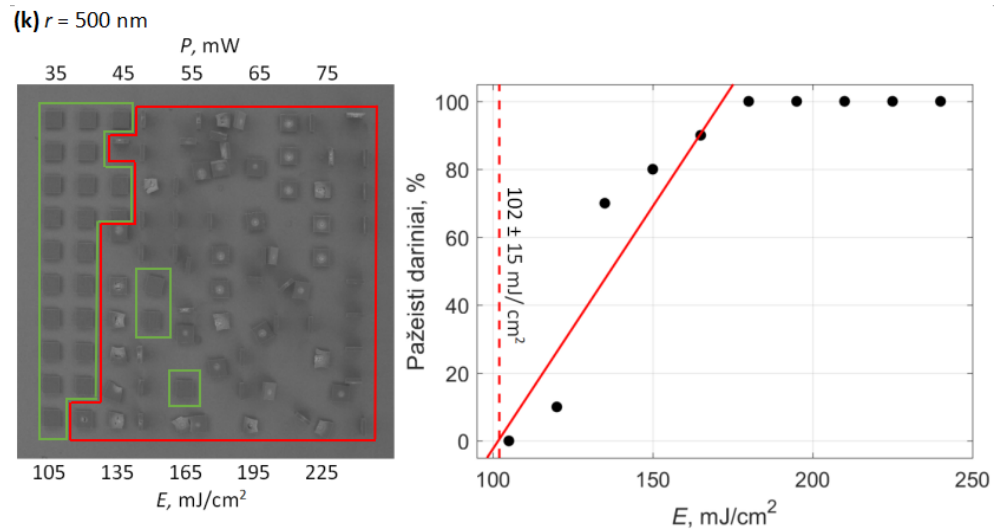
17 pav. SZ2080 darinių masyvų formuotų skirtingomis vidutinėmis galiomis LIDT tyrimas, pavaizduota kiekvieno masyvo SEM atvaizdas po optinės pažeidimo slenksčio tyrimo ir optinės pažeidimo slenksčio nustatymo grafikas. (a) ir (b) SZ2080 darinių masyvai, formuotas $125 \mu\text{W}$ vidutine galia (c) SZ2080 darinių masyvas, formuotas $150 \mu\text{W}$ vidutine galia



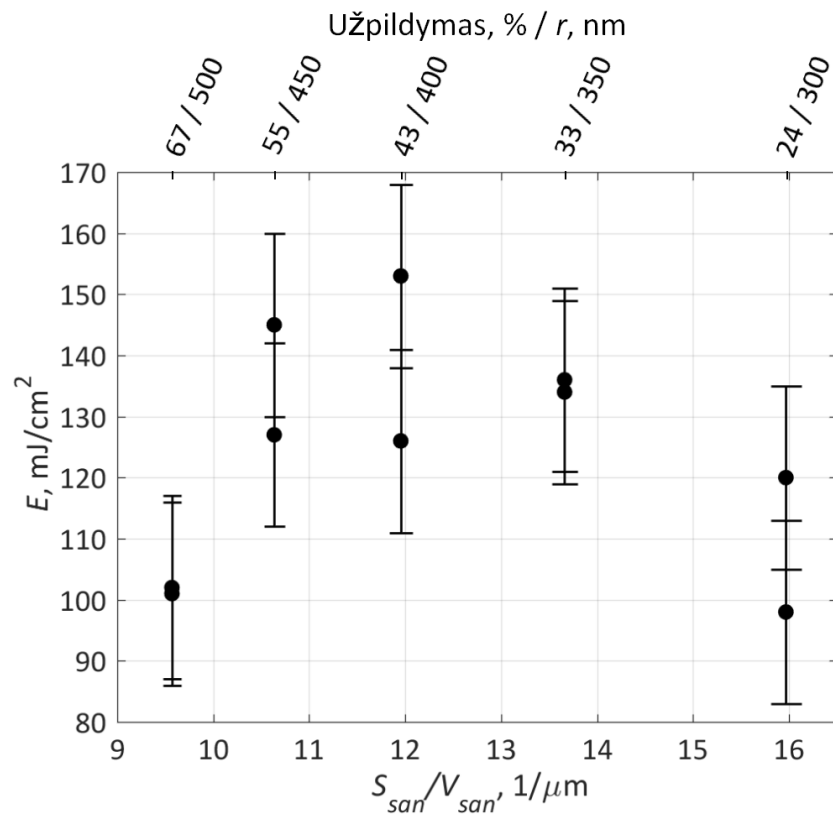
18 pav. SZ2080 darinių masyvų formuotų skirtingomis vidutinėmis galiomis LIDT tyrimas, pavaizduota kiekvieno masyvo SEM atvaizdas po optinės pažeidos slenksčio tyrimo ir optinės pažeidos slenksčio nustatymo grafikas. (d) SZ2080 darinių masyvai, formuoti $150 \mu\text{W}$ vidutine galia. (e) ir (f) SZ2080 darinių masyvai, formuoti $175 \mu\text{W}$ vidutine galia.



19 pav. SZ2080 darinių masyvų formuotų skirtingomis vidutinėmis galiomis LIDT tyrimas, pavaizduota kiekvieno masyvo SEM atvaizdas po optinės pažeidimo slenksčio tyrimo ir optinės pažeidimo slenksčio nustatymo grafikas. (g) ir (h) SZ2080 darinių masyvai, formuoti $200 \mu\text{W}$ vidutine galia (j) SZ2080 darinių masyvas, formuotas $225 \mu\text{W}$ vidutine galia



20 pav. SZ2080 darinių masyvų formuotų skirtingomis vidutinėmis galiomis LIDT tyrimas, pavaizduota kiekvieno masyvo SEM atvaizdas po optinės pažaidos slenksčio tyrimo ir optinės pažaidos slenksčio nustatymo grafikas. (k) SZ2080 darinių masyvas, formuotas $225 \mu\text{W}$ vidutine galia



21 pav. SZ2080 darinių masyvų, formuotų skirtingomis galiomis, optinės pažaidos slenksčio priklausomybė nuo paviršiaus ploto ir tūrio santykio

Kad galėtume tinkamai įvertinti gautas tendencijas, buvo apskaičiuotas skirtingų raiškų darinių tūrio bei paviršiaus ploto santykiai su visiškai pilnaviduriu dariniu. Gauta, kad didinant darinių rąstelių storį tiek darinių santykinis tūris (arba užpildymas), tiek jų santykinis paviršiaus plotas didėja. Tačiau paviršiaus ploto ir tūrio santykis dariniuose mažėja. Galiausiai visi šie rezultatai pateikti bendrame grafike kaip optinės pažaidos slenksčio priklausomybė nuo tūrio ir ploto santykio 21. Tiek darinių užpildyto tūrio, tiek paviršiaus ploto santykis buvo apskaičiuoti analitiškai, taikant geometrijos formules. Toks skaičiavimo metodas nėra visiškai tikslus dėl darinio rąstelio persiklojimo, tačiau reikšmingai nepakeičia paviršiaus ploto ir tūrio santykio bei neiukreipia stebimų tendencijų. Matyti, kad didėjant darinių paviršiaus ploto ir tūrio santykiui optinės pažaidos slenksčio priklausomybė nėra tiesinė. Iš pradžių optinės pažaidos slenkstis auga, o pasiekęs tam tikrą vertę pradeda mažėti, tačiau šios tendencijos yra nedaug didesnės už matavimų paklaidas. Tokia priklausomybė rodo, kad optinės pažaidos slenkstis tokios struktūros dariniams nėra reikšmingai priklausomas nuo darinio porėtumo. Galimai optinės pažaidos slenksčio kitimą lemia ne vien tik paviršiaus ploto ir tūrio nulemti pažaidos mechanizmai. Tam gali įtakos turėti ir kiti fotoniniai efektai, tokie kaip elektrinio lauko pasiskirstymas darinyje.

6 Diskusija

Šiame darbe buvo suformuoti keli skirtingų fotopolimerų ir skirtingų parametrų rąstų rietuvės darinių masyvai, kuriuos eksponuojant femtosekundine lazerio spinduliuote buvo siekiama nustatyti iš skirtingų polimerų pagamintų darinių optinės pažaidos slenksčius ir optinės pažaidos slenksčio priklausomybę nuo darinių porėtumo. Pirmiausia, buvo tirti identiški dariniai, suformuoti iš SZ2080 ir SZ2080 + 1% IRG fotopolimerų, kurių parametrai yra $h = 0,8 \mu\text{m}$, $s = 1,13 \mu\text{m}$, $r = 0,35 \mu\text{m}$. SZ2080 darinių optinės pažaidos slenkstis yra $132 \pm 15 \text{ mJ/cm}^2$. SZ2080 + 1% IRG darinių optinės pažaidos slenkstis - $104 \pm 12 \text{ mJ/cm}^2$. Jau anksčiau yra atlikti tų pačių polimerų dangų optinės pažaidos slenksčio tyrimai femtosekundiniais impulsais ta pačia S-į-1 tyrimo metodika, šiame darbe gauti rezultatai lyginant su dangų optinės pažaidos slenksčiais yra apie 5 kartus mažesni, kai energijos dozės yra apie 1000 kartų mažesnės [7]. Taip pat jau yra atlikti tyrimai pilnavidurių, iš tų pačių fotopolimerų 3DLL būdu formuotų, darinių optinės pažaidos slenkščiui nustatyti, šiame darbe gauti rezultatai savo skaitinėmis vertėmis yra 6 - 50 % mažesni nei pilnavidurių darinių optinės pažaidos slenksčio vertės. Pagal čia gautus rezultatus galima teigti, kad SZ2080 darinių optinės pažaidos slenkstis yra apie 30 % didesnis nei darinių, pagamintų iš SZ2080 su fotoinicatoriaus priemaiša. Tokios pačios tendencijos atsispindi ir kituose darbuose [7], [41].

Siekiant nustatyti optinės pažaidos slenksčio priklausomybę nuo porėtumo, buvo tirti rąstų rietuvės dariniai su skirtingais h parametrais ($h = 1,2, 1,6, 2 \mu\text{m}$). Šių darinių pažaidų topologija smarkiai skiriasi nuo darinių, kurių $h = 0,8 \mu\text{m}$. Pasitelkus skaitmeninius modelius paaiškėjo, kad pažaidų skirtumai galėjo atsirasti dėl skirtingų darinių fotoninių savybių. Tai rodo, kad fotoninių kristalų su skirtingomis savybėmis pažaidų mechanizmai yra skirtingi. Pralaidiems fotoniniams kristalams pažaidos mechanizmas turėtų būti kiek paprastesnis nei dalinai pralaidiems. Spinduliuotė, sklisdama per kristalą, jį lokaliai įkaitina ir pasiekus tam tikrą ribą darinys deformuojasi. Pralaidžių kristalų atveju visa spinduliuotė praeina, per visus darinio sluoksnius. Tuo tarpu dalinai pralaidžiuose kristaluose dalis spinduliuotės atsispindi nuo kiekvieno sluoksnio. Tad ne visa spinduliuotės energija pasiekia visus darinio sluoksnius, todėl dėl tokių atspindžio nuostolių sukelti darinio morfologijos pakitimus yra sudėtinga ir tam reikia ypatingai didelio energijos tankio. Taip pat galimai atsispindėjusi spinduliuotė konstruktyviai interferuoja, tad aplydo dalį darinio, nesukeliant topologinių pakitimų. Taip pat buvo pastebėta, kad dalinai pralaidžių kristalų optinės pažaidos morfologija stipriai priklauso nuo spinduliuotės intensyvumo. Esant nedideliame spinduliuotės intensyvumui, stebimi tik spalviniai pokyčiai, o naudojant didesnio intensyvumo spinduliuotę, sukeliama ir topologiniai pokyčiai. Tuo tarpu pralaidžių darinių pažaidos beveik visuomet atrodo kaip stiprūs topologiniai pokyčiai.

Norint įvertinti optinės pažaidos slenksčio priklausomybę nuo darinių porėtumo, reikia vertinti tik vienodo funkcionalumo darinius, nes kitu atveju pažaidos slenksčių skirtumus lems ne

tik darinių užpildymas, bet ir jų fotoninės savybės. Taigi buvo pasirinkta vertinti tik pralaidžius darinius, todėl buvo tirti darinių masyvai vienodais s ir h parametrais ($h = 0,8 \mu\text{m}$, $s = 1,13 \mu\text{m}$), tačiau skirtingomis skersinėmis raiškomis, kurios atitinkamai yra 300, 350, 400, 450 ir 500 nm. Gautas didžiausias optinis pažaidos slenkstis 400 nm rąstelių storio dariniams, kuris yra lygus $153 \pm 15 \text{ mJ/cm}^2$, mažiausias nustatytas optinis pažaidos slenkstis 300 nm rąstelių storio dariniams, kuris yra lygus $98 \pm 15 \text{ mJ/cm}^2$. Šio vertės skiriasi apie 50 %. Gautus optinės pažaidos slenksčius atvaizdavus kaip priklausomybę nuo darinių paviršiaus ploto ir tūrio santykio pastebėta, kad šiam santykiui didėjant darinių optinės pažaidos slenkstis iš pradžių didėja, tačiau pasiekus tam tikrą vertę, vėl pradeda mažėti. Matyti, kad Darinio tūrio didėjimas yra spartesnis nei paviršiaus ploto augimas, todėl galima manyti, kad esant mažesniems paviršiaus ploto ir tūrio santykiams dominuoja vieni mechanizmai, tuo tarpu didėjant šiam santykiui dominuos kiti pažaidos mechanizmai. Esant mažesniams paviršiaus ploto ir tūrio santykiui daugiausiai turėtų dominuoti spinduliuotės sugertis tūryje, kuri lokaliai kaitina medžiagą ir kuo didesnis tos medžiagos tūris, tuo energija tolygiau pasiskirsto medžiagoje. Tad didėjant darinio tūriui, didėja ir optinės pažaidos slenkstis. Tačiau paviršiaus ploto didėjimas lemia optinio pažaidos slenksčio mažėjimą, nes kiekvieno optinio komponento paviršius yra silpniausia jo vieta. Didėjant paviršiaus plotui, didėja ir paviršinių defektų skaičius, o dariniai lengviausiai pažeidžiami defekto vietoje [46]. Tačiau tiksli paviršiaus ploto ir tūrio svarba pažaidai nėra žinoma ir ši interpretacija iki galo nepaaiškina gautos priklausomybės. Galimai gautiems rezultatams įtaką daro ne vien tik darinio paviršiaus plotas ar užpildyto tūrio santykis. Galima optinės pažaidos slenksčius lemia ir fotoniniai efektai, tokie kaip elektrinio lauko pasiskirstymas darinyje. Kai elektrinis laukas intensyviausias rąstelių kraštuose darinys gali būti pažeidžiamas lengviau, kai elektrinis laukas koncentruotas rąstelių centruose ar darinio porose optinės pažaidos slenkstis turėtų būti didesnis. Norint vienareikšmiškai interpretuoti rezultatus, reikalingi papildomi modeliavimo darbai, siekiant išsiaiškinti ar gautas optinės pažaidos slenksčio kitimas yra nulemtas elektrinio lauko pasiskirstymo darinyje. Tad greičiausiai pasirinktų parametrų kristalai nėra tinkami porėtų darinių optinės pažaidos slenksčio priklausomybei nuo porėtumo tyrimui. Tokiems tyrimams būtų prasmingiausia pasirinkti darinius, kurie nebūtų subdifrakcinės raiškos naudojamam bangos ilgiui, taip siekiant išvengti fotoninių efektų.

7 Pagrindiniai rezultatai ir išvados

1) Optinės pažaidos slenkstis rąstų rietuvės mikrodariniams iš nefotojautrinto SZ2080 fotopolimero ($132 \pm 18 \text{ mJ/cm}^2$) dėl didesnės trifotonės sugerties yra apie 30 % didesnis nei dariniams iš SZ2080 fotopolimero su 1 % IRG fotoiniciatoriumi ($104 \pm 12 \text{ mJ/cm}^2$).

2) Tirtų dalinai pralaidžių ir pralaidžių mikrodarinių (fotoninių kristalų) optinių pažaidų morfologija priklausomai nuo energijos įtekio vertės kokybiškai skiriasi dėl skirtingo spinduliuotės elektrinio lauko pasiskirstymo pralaidžiuose ir dalinai pralaidžiuose fotoniniuose kristaluose:

(a) Dalinai pralaidžių kristalų pažaidų morfologija priklauso nuo spinduliuotės intensyvumo - stebimi trys kokybiškai skirtingos morfologijos pažaidų tipai.

(b) Pralaidžių kristalų pažaidų morfologija nepriklauso nuo spinduliuotės intensyvumo - stebimas tik vieno tipo pažeidimas.

3) Keičiant darinių porėtumą, aprašomą paviršiaus ploto ir užpildyto tūrio santykiu intervale 9 - $16 \mu\text{m}^{-1}$, optinės pažaidos slenkstis pasiekia minimalią ($98 \pm 15 \text{ mJ/cm}^2$) ir maksimalią vertes ($153 \pm 15 \text{ mJ/cm}^2$), kurios skiriasi iki 50 %.

4) Aiški optinės pažaidos slenksčio priklausomybė nuo darinių užpildymo, paviršiaus ploto ar paviršiaus ploto/užpildymo santykio nestebima. Pažaidos mechanizmą tiriamajai geometrijai galimai lemia fotoniniai efektai (elektrinio lauko pasiskirstymas) kristaluose.

5) Optinės pažaidos slenksčiai gauti SZ2080 rąstų rietuvės dariniams yra 6 - 50 % mažesni nei 3DLL formuotų pilnavidurių SZ2080 mikrokubukų pažaidos slenkstis.

Literatūros sąrašas

- [1] M. Malinauskas, A. Žukauskas, S. Hasegawa, Y. Hayasaki, V. Mizeikis, R. Buividas, S. Juodkasis, Ultrafast laser processing of materials: from science to industry, *Light Sci. Appl* **5**(8), e16133 (2016).
- [2] J. Mačiulaitis, M. Deveikytė, S. Rekštytė, M. Bratchikov, A. Darinskas, A. Šimbelytė, G. Daunoras, A. Laurinavičienė, A. Laurinavičius, R. Gudas, M. Malinauskas, R. Mačiulaitis, Preclinical study of SZ2080 material 3D microstructured scaffolds for cartilage tissue engineering made by femtosecond direct laser writing lithography, *Biofabrication* **7**(1), 015015 (2015).
- [3] A. Žukauskas, M. Malinauskas, L. Kontenis, V. Purlys, D. Paipulas, M. Vergris, R. Gadonas, Organic dye doped microstructures for optically active functional devices fabricated via two-photon polymerization technique, *Lith. J. Phys.* **50**(1), 55 (2010).
- [4] M. Malinauskas, H. Gilbergs, V. Purlys, A. Žukauskas, M. Rutkauskas, R. Gadonas, Femtosecond laser-induced two-photon photopolymerization for structuring of micro-optical and photonic devices, *Proc. SPIE* **7366**, 736622 (2009).
- [5] T. Gissibl, S. Thiele, A. Herkommer, H. Giessen, Two-photon direct laser writing of ultra-compact multi-lens objectives, *Nat. Photonics* **10**(8), 554–560 (2016).
- [6] L. Maigytė, V. Purlys, J. Trull, M. Peckus, C. Cojocar, D. Gailevičius, M. Malinauskas, K. Staliunas, Flat lensing in the visible frequency range by woodpile photonic crystals, *Opt. Lett.* **38**(14), 2376–2378 (2013).
- [7] A. Žukauskas, G. Batavičiūtė, M. Ščiuka, Z. Balevičius, A. Melninkaitis, M. Malinauskas, Effect of the photoinitiator presence and exposure conditions on laser-induced damage threshold of ORMOSIL (SZ2080), *Opt. Mater.* **39**, 224 (2015).
- [8] L. Čekanavičius, L. Jonušauskas, A. Butkutė, M. Malinauskas, Methods and challenges in laser-induced damage threshold evaluation of volumetric photopolymerised microstructures, *Proc. SPIE* **10677**, 106772K (2018).
- [9] A. Dubietis, *Netiesinė optika paskaitų konspektas* (Vilniaus universitetas, Vilnius, 2009).
- [10] L. V. Keldysh, Ionization in the field of a strong electromagnetic wave, *J. Exp. Theor. Phys.* **20**(5), 1307–1314 (1965).
- [11] S. K. Sundaram, E. Mazur, Inducing and probing non-thermal transitions in semiconductors using femtosecond laser pulses, *Nat. Mater.* **1**(4), 217–224 (2002).

- [12] K. Sugioka, Y. Cheng, Femtosecond laser three-dimensional micro- and nanofabrication, *Appl. Phys. Lett.* **1**(4), 041303 (2014).
- [13] X. Z. Dong, Z. S. Zhao, X. M. Duan, Improving spatial resolution and reducing aspect ratio multiphoton polymerization nanofabrication, *Appl. Phys. Lett.* **92**(9), 091113 (2008).
- [14] S. Wu, J. Serbin, M. Gu, Two-photon polymerisation for three-dimensional micro-fabrication, *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry* **181**, 1–11 (2006).
- [15] S. R. T. B. S. J. L. Jonušauskas, D. Gailevičius, M. Malinauskas, Mesoscale laser 3d printing, *Opt. Express* **27**(4), 15205–15221 (2019).
- [16] M. Lenzner, J. Krüger, W. Kautek, F. Krausz, Precision laser ablation of dielectrics in the 10-fs regime, *Appl. Phys. A* **68**(3), 369–371 (1999).
- [17] A. Žukauskas, V. Melissinaki, D. Kaškelytė, M. Farsari, M. Malinauskas, Improvement of the fabrication accuracy of fiber tip microoptical components via mode field expansion, *J. Laser. Micro. Nanoeng.* **9**(1), 68 (2014).
- [18] M. Mizeikis, V. Purlys, R. Buividas, S. Juodkasis, Realization of structural color by direct laser write technique in photoresist, *J. Laser. Micro. Nanoeng.* **9**(1), 42 (2014).
- [19] Q. Sun, S. Juodkasis, N. Murazawa, V. Mizeikis, H. Misawa, Femtosecond laser photopolymerization of photonic and free-movable microstructures in sol-gel hybrid resist, *Proc. SPIE* **7591**, 75910K–1 (2010).
- [20] M. Kadic, G. W. Milton, M. van Hecke, M. Wegener, 3D metamaterials, *Nat. Rev. Phys.* **1**, 198–210 (2019).
- [21] J. Qu, M. Kadic, A. Naber, M. Wegener, Micro-structured two-component 3D metamaterials with negative thermal-expansion coefficient from positive constituents, *Sci. Rep.* **7**, 40643 (2017).
- [22] A. Žukauskas, M. Malinauskas, L. Kontenis, V. Purlys, D. Paipulas, M. Vengris, R. Galdonas, Organic dye doped microstructures for optically active functional devices fabricated via two-photon polymerization technique, *Lith. J. Phys.* **50**(1), 55–61 (2010).
- [23] J. Torgersen, A. Ovsianikov, V. Mironov, N. Pucher, X. Qin, Z. Li, J. Stampfl, Photosensitive hydrogels for three-dimensional laser microfabrication in the presence of whole organisms, *J. Biomed. Opt.* **17**(10), 105008 (2012).
- [24] S. Rekštytė, E. Kaziulionytė, E. Balčiūnas, D. Kaškelytė, M. Malinauskas, Direct laser fabrication of composite material 3D microstructured scaffolds, *J. Laser Micro. Nanoen.* **9**(1), 25–30 (2014).

- [25] B. Richter, V. Hahn, S. Bertels, T. K. Claus, M. Wegener, G. Delaittre, M. Bastmeyer, Guiding cell attachment in 3D microcaffolds selectively functionalized with two distinct adhesion proteins, *Adv. Mater.* **29**(5), 1604342 (2016).
- [26] S. Maruo, H. Inoue, Optically driven micropump produced by three-dimensional two-photon microfabrication, *Appl. Phys. Lett.* **89**(14), 144101 (2006).
- [27] J. Kohler, S. I. Ksouri, C. Esen, A. Ostendorf, Optical screw-wrench for microassembly, *Microsyst. Nanoeng.* **3**, 16083 (2017).
- [28] A. C. Lamont, A. T. Alsharhan, R. D. Sochol, Geometric determinants of in-situ direct laser writing, *Sci. Rep.* **9**(1), 394 (2019).
- [29] C. Schizas, V. Melissinaki, A. Gaidukevičiūtė, C. Reinhardt, C. Ohrt, V. Dedoussis, B. N. Chichkov, C. Fotakis, M. Farsari, D. Karalekas, On the design and fabrication by two-photon polymerization of a readily assembled micro-valve, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* **48**, 435 (2009).
- [30] P. Singh, V. Sharma, V. K. Tanwar, S. C. Jain, Soft-lithography: Its application in solar cells, microelectronics and life sciences, *Nanotechnology* **9**(1), 127–133 (2007).
- [31] A. Tatikonda, V. Jokinen, H. Evard, S. Franssila, Sacrificial layer technique for releasing metallized multilayer SU-8 devices, *Micromachines* **9**(12), 673 (2018).
- [32] S. Juodkazis, V. Mizeikis, K. K. See, M. Miwa, H. Misawa, Two-photon lithography of nanorods in SU-8 photoresist, *Nanotechnology* **16**(6), 846–849 (2005).
- [33] J. Serbin, A. Egberta, A. Ostendorf, B. Chichkov, R. Houbertz, G. Domann, J. Schulz, C. Croanauer, L. Frohlich, M. Popall, Femtosecond laser-induced two-photon polymerization of inorganic-organic hybrid materials for applications in photonics, *Opt. Lett.* **28**(5), 301–303 (2003).
- [34] E. Skliutas, S. Kasetaitė, L. Jonušauskas, J. Ostrauskaitė, M. Malinauskas, Photosensitive naturally derived resins toward optical 3-D printing, *Opt. Eng.* **57**(4), 1–9 (2018).
- [35] Y. Xia, G. M. Whitesides, Soft lithography, *Annu. Rev. Mater. Sci.* **28**(1), 153–184 (1998).
- [36] X. Han, B. Su, B. Zhou, Y. Wu, J. Meng, Soft lithographic fabrication of free-standing ceramic microparts using moisture-sensitive pdms molds, *J. Micromech. Microeng.* **29**(3), 035002 (2019).
- [37] R. Buividas, S. Rekštytė, M. Malinauskas, S. Juodkazis, Nano-groove and 3D fabrication by controlled avalanche using femtosecond laser pulses, *Opt. Mater. Express* **3**(10), 1674–1686 (2013).

- [38] A. Žukauskas, G. Batavičiūtė, M. Ščiuka, T. Jukna, A. Melninkaitis, M. Malinauskas, Characterization of photopolymers used in laser 3D micro/nanolithography by means of laser-induced damage threshold (LIDT), *Opt. Mater. Express* **4**(8), 1601 (2014).
- [39] A. Ovsianikov, J. Viertl, B. Chichkov, M. Oubaha, B. MacCraith, I. S. A. Giakoumaki, D. Gray, M. Vamvakakiand, M. Farsari, C. Fotakis, Ultra-low shrinkage hybrid photosensitive material for two-photon polymerization microfabrication, *ACS Nano* **2**(11), 2257–2262 (2008).
- [40] A. Žukauskas, I. Matulaitienė, D. Paipulas, G. Niaura, M. Malinauskas, R. Gadonas, Tuning the refractive index in 3d direct laser writing lithography: towards grin microoptics, *Laser Photonics Rev.* **9**(6), 706 – 712 (2015).
- [41] L. Jonušauskas, L. Čekanavičius, G. Rimšelis, D. Gailevičius, M. Malinauskas, The optical damage threshold of 3D nanolithography produced microstructures under intense femto-second irradiation, *Proc. SPIE* **10544**, 1054417 (2018).
- [42] I. Wang, M. Bouriau, P. L. Baldeck, C. Martineau, C. Andraud, Three-dimensional micro-fabrication by two-photon-initiated polymerization with a low-cost microlaser, *Opt. Lett.* **27**(15), 1348–1350 (2002).
- [43] M. Farsari, M. Vamvakaki, B. N. Chichkov, Multiphoton polymerization of hybrid materials, *J. Opt* **12** (2010).
- [44] B. C. Stuart, M. D. Feit, S. Herman, A. M. Rubenchik, B. W. Shore, M. D. Perry, Nanosecond-to-femtosecond laser-induced breakdown in dielectrics, *Phys. Rev. B* **53**(4), 1749–1761 (1996).
- [45] A. Melninkaitis, D. Miksys, T. Balčiūnas, O. Balachninitė, T. Rakickas, R. Grigonis, V. Sirutkaitis, Automated test station for laser-induced damage threshold measurements according to ISO 11254-2 standard, *Proc. SPIE* **6101**, 61011J (2006).
- [46] G. Batavičiūtė, M. Ščiuka, A. Melninkaitis, Direct comparison of defect ensembles extracted from damage probability and raster scan measurements, *J. Appl. Phys.* **118**, 105306 (2015).
- [47] G. Batavičiūtė, P. Grigas, L. Smalakys, A. Melninkaitis, Revision of laser-induced damage threshold evaluation from damage probability data, *Rev. Sci. Instrum.* **84**(4), 045108 (2013).

Priedai

Summary

Investigation of variable porosity polymeric 3D microstructures resilience to femtosecond irradiation

Agnė Butkutė

3D laser lithography (3DLL) is a rapidly developed laser material processing technique. Using femtosecond pulses, this technology is based on nonlinear radiation-material interaction processes - two-photon absorption which allows fabricating polymeric 3D structures with sub-diffractive resolution. Some of the 3DLL applications are micro-optics and nano-photonics. In literature, we can find lots of examples of components made by a 3DLL technique such as microlenses and photonic crystals. However, to use them practically, it is essential to know its laser-induced damage threshold (LIDT). This work is concentrated on different porosity and various polymeric material (SZ2080 and SZ2080 with Irgacure 369 photoinitiator) woodpile structures photonic crystals fabrication and its LIDT evaluation according to the standardized ISO like S-on-1 measurement technique. After the LIDT experiment, we concluded that woodpile structures made out of SZ2080 materials are more resilient to femtosecond radiation and have about about 30% greater LIDT value than structures made out of SZ2080 with 1% Irgacure photoinitiator. By testing different properties photonic crystals we noticed that structures damage topology strongly depends on structure photonic properties. Partially transmitting crystals damage varies from used radiation intensity. When smaller intensities are used damages look like woodpile color changes, while greater intensities cause structure topology changes. Meanwhile, all damage caused to transparent woodpiles appears as strong topology changes. Transparent woodpiles were chosen to test woodpiles LIDT values dependency on its porosity. Starting with structures having the least surface area to volume ratio, as the ratio increases the LIDT value increases slightly as well, but at some point, it reaches an optimal value and decreases again. This indicates that the damage process is most probably governed by at least two different mechanisms. At smaller surface area and volume ratios, linear absorption is dominating. The field is more localized inside the polymer material, rather than air or air-material interfaces, a qualitatively more uniform damage topology is observed. When the ratio is increased further, damage induced on surface defects becomes dominant. As the material-air interface area is increased, naturally the number of surface imperfections per unit cell increases. Despite this there can not be seen LIDT dependence only on structures porosity or surface area. Most probably crystals photonic properties (electric field distribution in structure volume) can influence LIDT, as well. Thus, in this work for the first time LIDT for 3DLL formed photonic crystals was investigated and crystals photonic properties for its LIDT were noticed.

Santrauka

Kintamo porėtumo polimerinių 3D mikrodarinių atsparumo femtosekundinei lazerinei spinduliuotei tyrimas

Agnė Butkutė

3D lazerinė litografija (3DLL) - sparčiai vystoma medžiagų apdirbimo sritis, kuri leidžia formuoti subdifrakcinės raiškos polimerinius 3D darinius. Vienos iš šios technologijos pritaikymo sričių - mikroskopika ir nanofotonika. Norint naudoti tokius polimerinius komponentus realiose sistemose būtina įvertinti jų optinės pažaidos slenkstį. Tačiau vis dar nėra darbų, kuriuose būtų tirtas mikro-optinių ar nano-fotoninių komponentų optinis pažaidos slenkstis. Tad šiame darbe buvo nustatyta skirtingų polimerinių medžiagų (SZ2080 ir SZ2080 su 1% Irgacure 369 fotoiniciatoriaus) ir skirtingo porėtumo SZ2080 rąstų rietuvės struktūros fotoniniai kristalai. Optinis pažaidos slenkstis buvo tirtas pagal standartizuotą S-į-1, metodika, kai kiekvienas darinys paveikiamas pastoviu skaičiumi femtosekundinio lazerio impulsų. Atlikus tyrimą paaiškėjo, kad SZ2080 fotoniniai kristalai yra atsparesni femtosekundinei spinduliuotei nei SZ2080 + 1 % IRG fotoniniai kristalai. Taip pat buvo pastebėta, kad pralaidžių ir dalinai pralaidžių, naudojamai spinduliuotei, darinių pažaidos morfologija stipriai skiriasi. Dalinai pralaidžių kristalų pažaidos morfologija priklauso nuo spinduliuotės intensyvumo. Mažesnio intensyvumo spinduliuotė sukelia tik spalvinius pakitimus, didesnio intensyvumo spinduliuotė sukelia ir fotoninio kristalo morfologijos pakitimus. Tuo tarpu pralaidžių kristalų pažaida sukelta bet kokio intensyvumo spinduliuotės sukelia stiprų darinio morfologijos pakitimą. Ištyrus pralaidžių fotoninių kristalų optinio pažaidimo slenkščio priklausomybę nuo jų porėtumo buvo pastebėta, kad iš pradžių darinių optinės pažaidos slenkstis kyla, tačiau pasiekęs tam tikrą darinio užpildymo vertę vėl pradeda mažėti. Taip galimai nutinka, nes, didėjant darinio užpildymui, didėja ir paviršiaus plotas. Tad, esant mažesniems darinio užpildymams, dominuoja energijos sugertis tūryje, kuri lokaliai kaitina darinį. Kuo didesnis tūris, tuo tolygiau ši energija pasiskirsto, todėl darinys pažeidžiamas sunkiau. Tuo tarpu, kai stipriai išauga paviršiaus plotas, dominuoja pažaida dėl paviršinių defektų. Tačiau galimai optinės pažaidos vertės priklauso ne vien tik nuo darinio užpildyto tūrio ar paviršiaus ploto, o ir nuo darinio fotoninių sąvybių, tokių kaip spinduliuotės elektinio lauko pasiskirstymas darinyje. Taigi šiame darbe pirmą kartą nustatytas optinės pažaidos slenkstis 3DLL būdu formuotiems nanofotoniniams elementams ir pastebėta darinių pažaidų priklausomybė nuo jų fotoninių sąvybių.

Pagal baigiamąjį darbą parengti pranešimai ir publikacijos

Publikacijos:

1) L. Čekanavičius, L. Jonušauskas, A. Butkutė, M. Malinauskas, Methods and challenges in laser-induced damage threshold evaluation of volumetric photopolymerised microstructures, SPIE 10677, 106772K (2018).

2) A. Butkute, L. Jonušauskas, D. Gailevičius, V. Mizeikis, M. Malinauskas, "Femtosecond laser induced damage threshold (LIDT) of 3D nanolithography made micro- and nano-optical elements", Proc of SPIE 10909, 109090T (2019).

Konferencijos:

1) L. Jonušauskas, L. Čekanavičius, A. Butkutė, M. Malinauskas "Quantitative laser induced damage threshold investigation of femtosecond laser lithography produced 3D structures", LPM 2018, Edinburgh, UK, 2018.

2) L. Jonušauskas, L. Čekanavičius, A. Butkutė, M. Malinauskas, "Qualitative and Quantitative Investigation of Free-Form fs Laser Made Structures to Intense Ultrafast Laser Radiation", ICPEPA 11, Vinius, Lithuania, 2018.

3) L. Jonušauskas, A. Butkutė, L. Čekanavičius, M. Malinauskas, "Femtosecond laser induced damage threshold (LIDT) of 3D nanolithography made micro- and nano-optical elements", Photonics West 2019, San Francisco, CA, United States, 2019.

4) A. Butkutė, L. Jonušauskas, D. Gailevičius, L. Čekanavičius and M. Malinauskas, "Femtosecond laser induced damage threshold (LIDT) of 3D nanolithography made micro- and nano-optical elements", Open Readings 2019, Vilnius, Lithuania, 2019.