

Vilniaus universiteto
Fizikos fakulteto
Lazerinių tyrimų centras

Modestas Sadauskas

**Selektyvus metalinių mikro struktūrų cheminis nusodinimas ant
skaidraus dielektriko paviršiaus, panaudojant pikosekundinius ir
femtosekundinius lazerio impulsus**

Magistro studijų baigiamasis darbas

Lazerinės fizikos
studijų programa

Studentas

Modestas Sadauskas

Leista ginti
Darbo vadovas

2021-05-12
dr. Karolis Ratautas

Centro direktorius

prof. Aidas Matijošius

Vilnius 2021

Turinys

Įvadas.....	4
1. Literatūros apžvalga	5
1.1. Technologijos naudojamos elektrinio laidumo takelių ant stiklo formavimui	5
1.2. Lazerinės spinduliuotės sąveika su medžiaga.....	6
1.2.1. Lazerinė spinduliuotė	7
1.2.2. Spinduliuotės sugertis medžiagoje	7
1.2.3. Sugerties procesai dielektrikuose	8
1.2.4. Skaidrių terpių optinis pramušimas	9
1.2.5. Lazerinė abliacija.....	10
1.2.6. Šviesos poliarizacija	11
1.2.7. Gauso ir Beselio pluoštai.....	13
1.3. Cheminės metalizacijos bendrieji dėsningumai.....	15
1.3.1. Anodinė parcialinė reakcija	16
1.3.2. Katodinė parcialinė reakcija	16
2. Eksperimento įranga ir metodika.....	18
2.1. Eksperimento įranga	18
2.2. Metodika	19
2.2.1. Besrovis cheminis metalo nusodinimas.....	19
2.2.2. Pluošto dydžio nustatymas	19
2.2.3. Spinduliuotės poliarizacijos keitimas	20
3. Eksperimento rezultatai	20
3.1. Gauso pluošto skersmens matavimas	20

3.2. Siaurų takelių formavimas	21
3.2.1. Lazeriniai parametrai	21
3.2.2. Takelių formavimas	21
3.2.2.1. Femtosekundiniai impulsai	22
3.2.2.2. Pikosekundiniai impulsai	29
3.2.2.3. Beselio pluoštas	31
3.3. Lietimui jautraus „mygtuko“ maketo konstravimas	36
Pagrindiniai rezultatai ir išvados	39
Literatūros sąrašas	40

Įvadas

„Besrovis cheminis vario mikro takelių nusodinimas ant stiklo paviršiaus panaudojant lazeriu inicijuotą selektyvų paviršiaus aktyvavimą (SSAIL)“ yra susijęs su Fizinių ir technologijos mokslų centre sukurtos technologijos - „Selektyvus paviršiaus aktyvavimas lazerine spinduliuote“ (*Selective Surface Activation Induced by a Laser*, SSAIL [1]) vystymu. Pati technologija skirta polimerų paviršiaus selektyviam metalizavimui, formuojant elektrinio laidumo takelius ant sudėtingos formos plastikinių paviršių [2]. Metodas yra labai svarbus gaminant integruotą į plastikinę detalę elektronika, kurios naudojimas pastaruoju metu labai populiarėja įvairiose pramonės srityse: automobiliuose [2], [3], kompiuteriuose, išmaniuosiuose telefonuose [4], namų apyvokos elektronikoje [5] ar net medicinoje [2]. SSAIL procesą sudaro trys etapai: lazerinis paviršiaus modifikavimas impulsinio lazerio spinduliuote, modifikuotų vietų aktyvavimas joniniu kataliziniu tirpalu, besrovis aktyvuotų vietų cheminis vario nusodinimas. Elektronika integruota ant stiklo ar skaidraus plastiko paviršiaus taip pat turi daugybę potencialių taikymų – OLED, LCD ekranai, skaidrūs elektrodai (metalo mikro tinkleliai) lietimui jautriems ekranams – panelėms (vietoje brangių ITO elektrodų), interjero apšvietimas ir k.t. Atlikus pradinius tyrimus su „soda lime“ stiklu buvo pasiektas selektyvus metalo nusodinimas ant paviršiaus bei ištirta: kaip nusodinto metalo paviršiaus kokybė priklauso nuo lazerinių parametrų. [1], [6]

Geriausia žmogaus akis gali išskirti dvi linijas, kurios yra atskirtos maždaug 0,12 mrad kampų (pagal Relėjaus kriterijų laikant, jog vyzdžio dydis ~ 5 mm bei bangos ilgis 500 nm), tai atitiktų maždaug 24 μm atstumą tarp linijų žiūrint į jas 20 cm atstumu nuo veido. Objektai 40 μm pločio (žmogaus plaukas) yra išskiriami geros akies, tačiau laikoma, jog 20 μm pločio objektai nėra išskiriami.

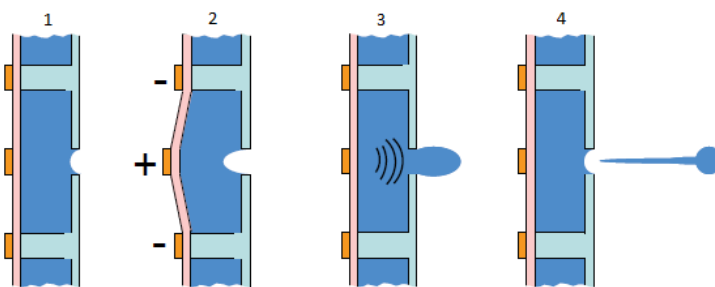
Šio darbo tikslas: ištirti kaip metalizuoto takelio plotis priklauso nuo lazerinių parametrų bei suformuoti siauresnius nei 5 μm pločio elektrinio laidumo takelius ant „soda lime“ stiklo bei PET (polietileno tereftalatas) naudojant femtosekundinių bei pikosekundinių impulsų lazerį.

1. Literatūros apžvalga

1.1. Technologijos naudojamos elektrinio laidumo takelių ant stiklo formavimui

Yra nemažai technologijų elektrinio laidumo takelių formavimui. Tačiau tik kelios iš jų yra plačiau naudojamos pramonėje. Stiklo atveju šių technologijų yra dar mažiau. Svarbiausios technologijos: rašalinis spausdinimas (*inkjet printing*), lazeriu asistuos tas tiesioginis perdavimas (*LIFT – laser induced forward transfer*), fotolitografija,

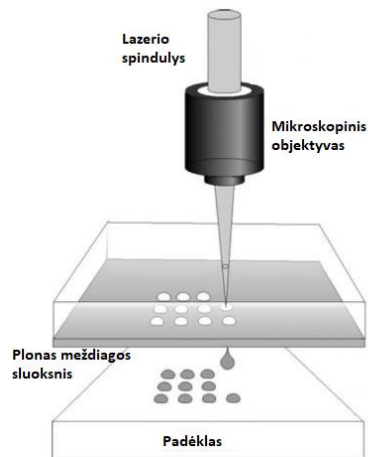
Rašalinis spausdinimas naudoja skystą rašalą, paprastai pagaminta iš sidabro nanodalelių. Terminis arba pjezoelektrinis metodas gali būti naudojamas šio rašalo lašelių išmetimui. Dažniausiai pramonėje yra naudojamas pjezoelektrinis metodas ir jo principas pateiktas Pav. 1.



Pav. 1. Rašalinis spausdinimas pjezoelektriniu principu [7]

Rašalo kamera yra gaminama iš keramikos ir vienoje pusėje yra paliekama skylė išmetimui. Kita pusė turi pjezoelektrinę sienelę, kuri mechaniškai atstumia rašalo lašą, atsiradus elektriniam laukui. Padidėjus kameros tūriui, ši vieta užsipildo rašalu. Išjungus elektrinį lauką pjezoelektrinė siena grįžta į pradinę padėtį ir taip sumažėja kameros tūris. Rašalo perteklius yra išstumiamas pro mikroskopinę skylutę. Šis metodas yra gana brangus dėl naudojamų medžiagų, kurių pagrindą sudaro sidabro nanodalelės. Taip pat kyla daug technologinių problemų spausdinant ant sudėtingų 3D formos paviršių. [7]

Lazeriu asistuos tas tiesioginis perkėlimas – technologija, kuria galima nusodinti skystą arba kietą medžiagą mažų lašelių pavidalu, taip pasiekiant didelę rezoliuciją. Ši technologija nėra plačiai naudojama pramonėje, tačiau šiuo metu vyksta daug mokslinių tyrimų.



Pav. 2. LIFT technologijos principas [8]

Šio metodo principas (Pav. 2) remiasi lazerio energijos absorbcija medžiagoje, dėl kurios vyksta lokalus garavimas ir medžiagos išmetimas iš donoro padėklo ant mūsų norimo padėklo taip suformuojant reikiamą struktūrą. Tolygus donoro medžiagos sluoksnis yra padengiamas ant stiklo padėklo, šis pritvirtinamas nedideliu atstumu nuo padėklo ant kurio bus nusodinta medžiaga, dažniausiai apie 100 μm . Šis procesas yra priklausomas nuo atstumo tarp padėklų. Medžiagos perdavimo procesui, lazerio spindulys yra sufokusuojamas tarp donoro medžiagos bei jos padėklo. Dažniausiai yra naudojamas Nd:YAG nanosekundinis lazeris, spinduliuotės bangos ilgis parenkamas pagal donorinę medžiagą, sidabro nanodalelių atvejų – 1064 nm. Šviesa yra sugerama donoro medžiagos ir stipriai padidėja lokalus slėgis paviršiuje tarp donoro padėklo ir rašalo. Dėl to, maži lašeliai yra išstumiami ir nusėda ant padėklo. Dažniausiai donorinei medžiagai yra naudojamas brangus sidabro rašalas.[8]

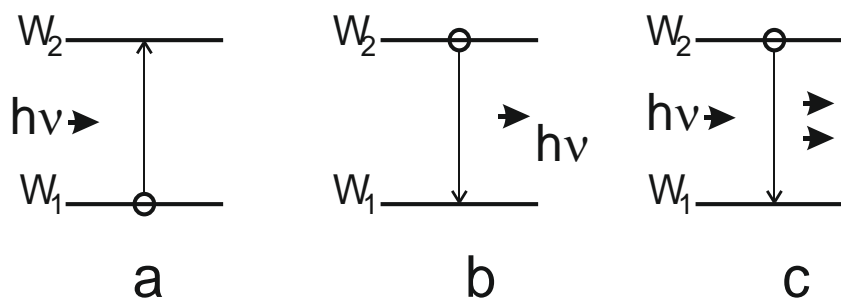
Fotolitografija yra vienas svarbiausių technologinių procesų puslaidininkių pramonėje. Fotolitografijos metodu medžiagos paviršiuje yra formuojamos įvairios struktūros. Iš pradžių medžiagos paviršius yra padengiamas laidžių sluoksniu, ant šio sluoksnio yra suformuojamas fotorezistas, kuris pasižymi atsparumu aplinkai bei yra jautrus šviesai. Naudojant fotokaukę lazeriu suformuojamos reikiamos struktūros. Atliekant nereikalingo sluoksnio išdėtinimą, yra pažeidžiamas medžiagos skaidrumas (turint stiklą ar skaidrų plastiką).

Minėtų technologijų adhezija tarp padėklo bei nusodinamos medžiagos yra silpna lyginant su kitais metodais (pvz. SSAIL technologija nusodinto vario adhezija yra stipresnė keliomis eilėmis).

1.2. Lazerinės spinduliuotės sąveika su medžiaga

1.2.1. Lazerinė spinduliuotė

Šviesa, krentanti į medžiagą gali būti sugeriama, taip sužadinant medžiagos krūvininkus (Pav. 3, a). Jau sužadinti krūvininkai gali išspinduliuoti tokios pat energijos ($h\nu$) fotoną peršokdami iš aukštesnio energijos lygmens (W_2) į žemesnįjį (W_1). Yra galimas ir kitoks variantas – elektronas jau yra sužadintas ir atkeliavęs fotonas jį priverčia grįžti į žemesnįjį (Pav. 3, c), t.y. įvyksta priverstinė emisija, spinduliavimas. [9]



Pav. 3. Šviesos sąveikos su elektronu pavyzdžiai.[9]

Lazeris – tai monochromatinės koherentinės elektromagnetinės spinduliuotės generatorius, veikiantis priverstinio spinduliavimo principu. Lazerio terminas kilęs iš angliško žodžio *LASER* (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*), kurį išvertus turime – šviesos stiprinimas dėl priverstinio spinduliavimo. Pagrindiniai lazerio bruožai: koherentiškumas, didelis spinduliavimo skaistis, kryptingumas bei monochromatiškumas, t.y. galimybė koncentruoti šviesos energiją labai siaurame erdviniame kampe ir mažame spektro intervale. Egzistuoja daugybės rūšių lazeriai, kurie visų pirma yra skirstomi pagal terpės tipą: dujiniai, kietojo kūno, puslaidininkiniai ir kt. Lazerinės spinduliuotės sąveikos su medžiaga rezultatas priklauso nuo spinduliuotės parametrų: galios, bangos ilgio, dažnio, impulso trukmės. [10]

1.2.2. Spinduliuotės sugertis medžiagoje

Medžiagų apdirbimas lazerio spinduliuote yra pagrįstas šios spinduliuotės sugertimi. Spinduliuotės sąveika su medžiaga gali būti aprašoma lygtimi:

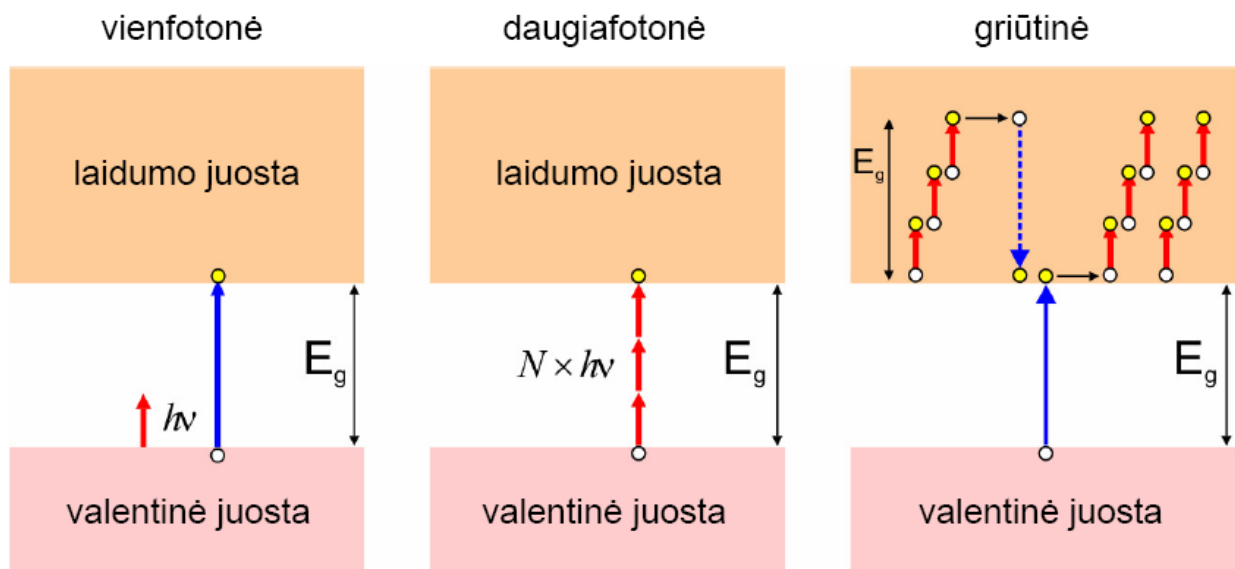
$$I(z) = I_0(1 - R)e^{-\alpha z}, \quad (1)$$

čia $I(z)$ – praėjusios medžiagos storį z spinduliuotės intensyvumas, I_0 – krintančios spinduliuotės intensyvumas, R – paviršiaus atspindžio koeficientas, α - sugerties koeficientas. Medžiagos apdirbimui yra svarbi tik įsiskverbusi į medžiagą spinduliuotės dalis, kuri yra lygi $I_0(1-R)$, nes IR yra atspindima. Jei spinduliuotė yra stipriai sugeriama, kūnas gali kaisti, lydėtis bei garuoti. Sugerties

koeficientas α labai priklauso nuo šviesos spinduliuotės dažnio, todėl konkreti medžiaga vienus bangos ilgius gali stipriai sugerti, o kitus praleisti ar atspindėti. [11]

1.2.3. Sugerties procesai dielektrikuose

Energetinių juostų teorija leidžia paaiškinti elektromagnetinio lauko sugerties procesus skirtingose medžiagose. Tai aiškinama, elektrono perėjimu iš vieno lygmens į kitą, sugeriant fotoną. Dielektrikai turi pilnai užpildytą valentinę juostą ir platų draustinį tarpą, todėl regimosios šviesos fotonų tiesinė sugertis negali vykti. Čia pagrindinė sugertis yra šuoliai tarp energetinių juostų, kurie vyksta sugeriant aukšto dažnio (UV) fotoną arba keletą mažo dažnio fotonų (daugiafotoniai procesai). Metaluose sugertis vyksta bet kokiomis sąlygomis, nes jų laidumo zona yra dalinai užpildyta ir laisvi elektronai gali tiesiškai sugerti fotoną dėl atvirkštinio „*bremstrahlung*“ efekto. [10]



Pav. 4. Pagrindiniai sugerties mechanizmai dielektrikuose. [10]

Daugiafotonė sugertis paprastai vyksta kai $h\nu < E_g$, kas įmanoma optiniame arba IR diapazone. E_g – draudžiamosios juostos tarpas, h – Planko konstanta, ν – fotono dažnis. Tokios sugerties sąlyga yra:

$$Nh\nu \geq E_g. \quad (1)$$

Šiuo atveju vyksta N fotonų sugertis vienu metu. Šios sugerties tikimybė arba sparta yra išreiškiama.

$$w^{(N)} = \sigma^{(N)} I^N, \quad (2)$$

čia $\sigma^{(N)}$ – N -fotonės sugerties skerspjūvis, I^N – fotonų intensyvumas. Šis procesas nėra slenkstinis ir esant bet kokiam intensyvumui sugerties tikimybė nėra nulinė, tačiau tik esant pakankamai didelėms I vertėms procesas gali būti stebimas. Tai yra susiję su greitu skerspjūvio $\sigma^{(N)}$ mažėjimu didėjant N . Vykstant daugiafotonei $(N+1)$ fotono absorbcijai medžiagoje spinduliuotės intensyvumas kinta pagal:

$$\frac{dI}{dz} = -(\alpha + \gamma^{(N+1)} I^N) I, \quad (3)$$

čia α - tiesinės sugerties koeficientas, $\gamma^{(N+1)}$ – $(N+1)$ fotono sugerties koeficientas. Daugiafotonė sugertis yra labai silpnas procesas, kurio tikimybė sparčiai mažėja didėjant proceso eilei, skerspjūvių santykis apytiksliai yra lygus $\sigma^{(N+1)}/\sigma^{(N)} \sim 10^{-34}$. [12]

1.2.4. Skaidrių terpių optinis pramušimas

Skaidrumas reiškia, kad medžiagoje nėra rezonansinių dažnių naudojamam bangos ilgiui ir sklindant mažo intensyvumo spinduliuotei, jos sugertis nevyksta. Tokios medžiagos, kaip oras, vanduo, stiklas, pasižymi labai maža sugertimi matomo diapazono šviesai ir jas galima laikyti skaidriomis. Lazerinės medžiagų apdirbimo technologijos pagrindas yra elektromagnetinių bangų sugertis elektronuose bei jų energijos perdavimas kitoms medžiagos dalelėms (atomams, molekulėms), taip pakeičiant medžiagos charakteristikas. Geriausiai tam tinka medžiagos (pvz. metalai), kuriose yra daug laisvųjų elektronų, efektyviai sugeriančių energiją. Skaidriose medžiagose, kurios taip lengvai energijos nesugeria, stipriame šviesos lauke vyksta optinis pramušimas. Tai – medžiagos jonizacija ir jos virtimas sugeriančia plazma veikiant lazerio spinduliuote.

Pramušimo procesą galima skirstyti į keletą etapų: a) laisvųjų elektronų atsiradimas; b) elektronų kaitinimas; c) neutralių medžiagos atomų smūginė jonizacija greitais elektronais; d) elektronų-jonų plazmos susidarymas; e) plazmos kaitinimas.

a) Laisvųjų elektronų atsiradimas vyksta dėl prieš tai minėtos daugiafotonės sugerties proceso;

b) Laisvieji elektronai „kaista“ dėl stabdomosios sugerties ir taip įgauna energiją, reikalingą atomo jonizacijai;

c-d) Esant mažoms energijoms tarp elektronų bei atomų vyksta tamprūs susidūrimai, tačiau, kai ε (elektronų energija) $\geq E_{jon}$ (atomo jonizacijos energija), jonizacijos tikimybė pasidaro didelė ir pradeda vykti netamprūs susidūrimai. Taip elektrono energija yra panaudojama atomo smūginei jonizacijai, dėl ko elektronų padvigubėja. Elektronų skaičius dėl atomų jonizacijos kinta pagal:

$$N_e = N_{e0} \exp(v_i t), \quad (4)$$

čia $v_i = \frac{1}{\tau_i} \ll v$ – jonizacijų dažnis (per laiką τ_i elektronas įgyja E_{jon}). Šis procesas – griūtinė jonizacija. Paprastai laikoma, jog terpės pramušimas įvyko, jeigu laisvųjų elektronų tankis pasiekia kritinį ($N_{kr} \approx 10^{21} \text{ cm}^{-3}$), tokiu atveju medžiagos sugertis ženkliai padidėja;

e) Griūtinės jonizacijos metu elektronų skaičius didėja pagal (4) dėsnį. Kai įvyksta visiška jonizacija, elektronų nuostoliai dėl smūginės jonizacijos dingsta, tačiau didėjant elektronų energijai, dėl susidūrimų su jonais energijos augimo greitis yra ribojamas. Taip visa elektronų energija galiausiai perduodama sunkiems jonams – vyksta plazmos šilimas.

Kietakūnėse terpėse šis pramušimas dažniausiai sąlygoja ir negrįžtamą optinį pažeidimą (optinių savybių pakitimas paveikus lazerio spinduliuote). Pramušimo metu įvyksta greitas medžiagos išilimas, slėgio padidėjimas, susidaro įtempimai, formuojasi smūginės bangos, dėl to medžiaga yra suardoma ir keičiasi jos charakteristikos.

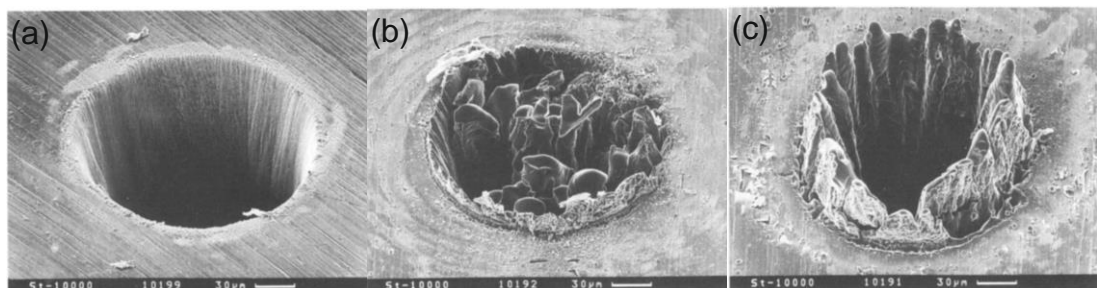
Pramušimo mechanizmai tarp idealių ir neidealių terpių yra skirtingi. Visos terpės turi mikro/makroskopinių priemaišų, kurių lūžio rodiklis bei absorbcijos koeficientas skiriasi nuo aplinkinės terpės, pavyzdžiui, stiklų vidutinis sugerties koeficientas yra $10^{-3} \div 10^{-5} \text{ cm}^{-1}$ eilės, o sugeriančių priemaišų gali siekti $10^2 \div 10^3 \text{ cm}^{-1}$. Šie priemaišų atomai, vakansijos ir kiti defektai gali sukelti energijos lygmenų susidarymą draustinėje juostoje. Nevienalytėse terpėse pramušimas yra sąlygotas priemaišų sugerties ir jų greito išilimo. Dėl šių priemaišų terpės pažeidimo mechanizmui sąlygos yra žymiai palankesnės nei vienalytėje terpėje. [12]

1.2.5. Lazerinė abliacija

Lazerinė abliacija – tai fizikinis procesas, kurio dėka medžiagą galima pašalinti, ją paveikus intensyvia lazerio spinduliuote. Zona, veikiama lazerio spinduliuotės, gali įkaisti iki itin aukštų temperatūrų, kuriose jau vyksta faziniai virsmai – lydymasis bei garavimas. Nutraukus šį lazerinį kaitinimą, vyksta staigus medžiagos aušinimas, todėl medžiaga vėl sukietėja. Lazeriniai abliacijai vykti būtina, jog medžiagos zona, kurioje vyksta sugertis, įkaistų iki garavimo temperatūros. Abliacija vyksta toje vietoje, kur lazerio energijos tankis viršija tos medžiagos slenkstinę vertę. [13]

Medžiagos abliacija priklauso nuo lazerinės spinduliuotės parametrų. Kaip minėta anksčiau, medžiagos vienus spinduliuotės dažnius praleidžia, kitus sugeria. Medžiagos abliacijai taip pat svarbi ir impulso trukmė, nuo kurios priklauso terminiai efektai aplink lazerio spinduliu paveiktą vietą (Pav. 5). Tai yra aiškinama elektronų atvėsimo laiku (τ_e), lazerio impulso trukme (τ_L) bei gardelės šilimo

laiku (τ). Greitų elektronų atvėsimo ir energijos perdavimo gardelei trukmė yra maždaug pikosekundžių eilės. Femtosekundinės impulso trukmės atveju turime $\tau_e \gg \tau_L$. Dėl labai mažos femtosekundinio lazerio impulso trukmės abliacijos procese įvyksta tiesioginis kietas kūnas – garai (arba kietas kūnas - plazma) fazinis kitimas. Tokiu atveju gardelės kaitimas vyksta pikosekundžių eilės intervale. Dėl to femtosekundiniais lazerio impulsais galimas labai tikslus metalų (ir kitų kietų kūnų) lazerinis apdirbimas (žr. Pav. 5 a dalį). Pikosekundinių impulsų atveju turime $\tau_e \ll \tau_L \ll \tau$. Dabar elektronai vėsta perduodami energija gardelei, todėl tokios abliacijos atveju atsiranda išlydytos medžiagos zonos. Dėl šios skystos (išlydytos) fazės susidarymo mažėja abliacijos tikslumas tokiu režimu (žr. Pav. 5 b dalį). Nanosekundinių impulsų atveju turėsime $\tau \ll \tau_L$. Dabar elektronų ir gardelės temperatūros išsilygina lazerio impulso metu. Šiuo atveju lazerio energija pirmiausia šildo paviršių iki lydymosi taško, vėliau iki garavimo temperatūros. Medžiagos šilimo metu yra prarandama didžioji dalis lazerio impulso energijos. Pasiekus garavimo tašką, medžiagai yra suteikiama daugiau energijos nei reiktų garavimui, todėl vyksta labai intensyvus garavimas, susidaro didelės išlydytos medžiagos užvartos. Nanosekundinių impulsų abliacijos atveju medžiagos fazinis virsmas yra procesas: kietas kūnas – skystis – garai (plazma), todėl pasiekti labai tikslų medžiagos apdirbimą yra labai sunku (žr. Pav. 5 c dalį). [14]



Pav. 5. Išabliuotas krateris plieno folijoje, suformuotas: a) 200 fs trukmės impulsų; b) 80 ps trukmės impulsų; c) 3.3 ns trukmės impulsų. [14]

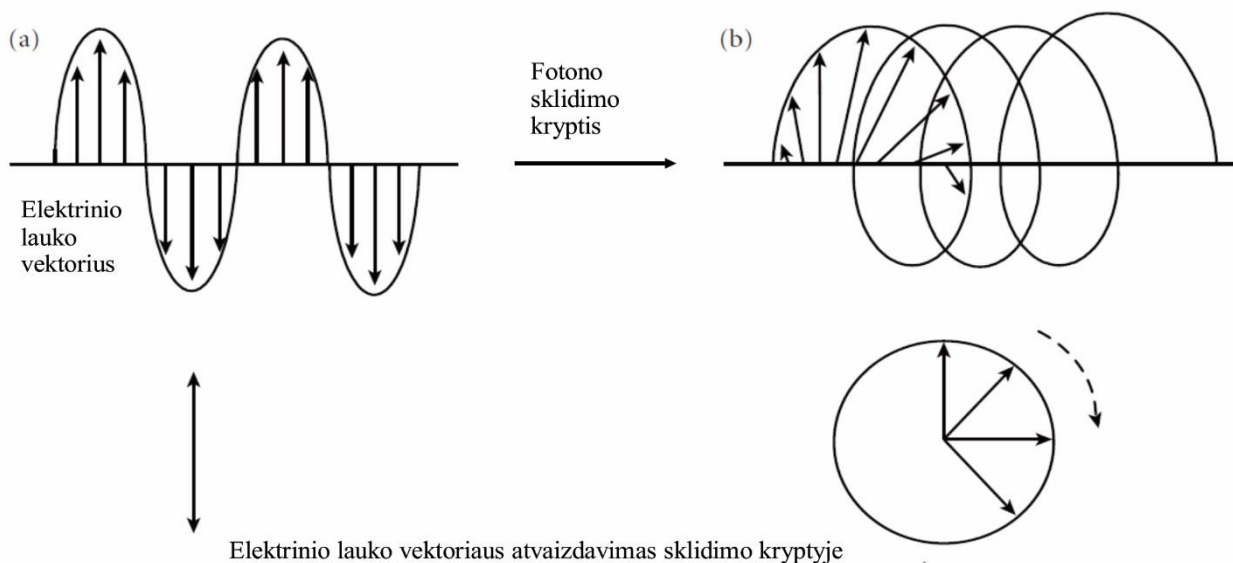
Be jau minėtų lazerinės spinduliuotės parametrų, abliacijai įtakos taip pat turi ir impulsų pasikartojimo dažnis. Daugelyje tyrimų buvo pastebėta, jog didėjant impulsų pasikartojimų dažniui, mažėja abliacijos slenkstis bei didėja abliacijos efektyvumas (didėja kraterio gylis). Tai galima aiškinti tuo, jog esant didesniems pasikartojimų dažniams, laikas tarp dviejų impulsų nėra pakankamai didelis, tam jog medžiaga atvėstų. Dėl to pradinė temperatūra sekančio impulso atveju yra aukštesnė. [6]-[7]

1.2.6. Šviesos poliarizacija

Šviesa yra sudaryta iš elektrinių ir magnetinių bangų osciliuojančių statmenai viena kitos atžvilgiu esančiose plokštumose. Šviesos poliarizacija nusako ryšį tarp plokštumos, kurioje virpa

šviesos elektrinis laukas, bei šviesos sklidimo krypties. Dažniausiai yra atsižvelgiama tik į elektrinį lauką, nes jis turi didžiausią įtaką šviesos sąveikai su medžiaga. Nuo šviesos pluošto poliarizacijos priklauso jos sugertis medžiagoje, tai yra taikoma daugelyje medžiagos apdirbimo technologijų (pvz. pjovime).

Šviesos kritimo plokštuma – tai plokštuma, kurioje yra kritęs spindulys ir paviršiaus normalė. Jei šviesos elektrinio lauko vektorius yra kritimo plokštumoje, tai šviesa yra laikoma *p*-poliarizacijos. Jei šviesos elektrinio lauko vektorius sudaro normalę su kritimo plokštuma, tai šviesa yra *s*-poliarizacijos. Jei šviesos elektrinio lauko vektorius sudaro bet kokią kitą kampą, tai gali būti išskaidoma į *s*- ir *p*-poliarizacijos projekcijas. Šviesos šaltiniai su *s*- ar *p*-poliarizacija medžiagos paviršių veikia skirtingai, kintant kritimo kampui φ . Kai $\varphi = 0$, *s* ir *p* negali būti išskiriamos, todėl ir atspindys yra vienodas visoms poliarizacijoms. Didėjant φ , atspindys *s*-poliarizuotai šviesai didėja, kol tampa 1 ties 90° kampu. Atspindys *p*-poliarizacijos šviesai kinta priešingai, t.y. mažėja, kol tampa lygus 0. Toks kritimo kampas, kai tam tikros poliarizacijos šviesa yra pilnai sugerama vadinamas Briusterio (*Brewster*) kampu. Briusterio kampas yra susijęs su medžiagos lūžio rodikliu ($\varphi_{Br} = \tan^{-1} n$).



Pav. 6. (a) Tiesinė bei (b) apskritiminė poliarizacija elektrinio lauko vektoriaus sklidimo atžvilgiu. [17]

Tiesinės poliarizacijos atveju (Pav. 6 a) elektrinis laukas virpa tik vienoje plokštumoje, *s* ir *p* komponentai yra tos pačios fazės. Apskritiminė poliarizacija (Pav. 6 b) apibūdina šviesą, kai elektrinio lauko vektorius yra pastovios amplitudės ir sukasi pastoviu kampiniu greičiu aplink sklidimo ašį. Tokiu atveju *s* ir *p* komponentų fazės skiriasi 90° . Tiesinės poliarizacijos šviesa gali būti keičiama į apskritiminės poliarizacijos šviesą naudojant ketvirčio bangos ilgio fazinę plokštelę.

Elipsinė poliarizacija aprašo šviesą, kurioje elektrinio lauko vektorius sukasi pastoviu kampiniu greičiu aplink sklidimo ašį bei keičiasi jo amplitudė. Jei elektrinis laukas osciliuoja atsitiktinėmis kryptimis, tai tokia šviesa yra laikoma nepoliarizuota.

Šviesos poliarizacija daro įtaką medžiagos sugerčiai ir dėl to įtakoja lazerinio proceso efektyvumą bei kokybę.

1.2.7. Gauso ir Beselio pluoštai

Gauso pluoštas – tai toks elektromagnetinės spinduliuotės pluoštas, kurio elektrinio lauko amplitudės bei intensyvumo skirstinys statmenai sklidimo plokštumai yra aprašomi Gauso funkcijomis. Lazeriniam medžiagų apdirbimui reikia didelio spinduliuotės intensyvumo, šiam darbui taip pat reikia kuo mažesnės pluošto dėmės. Tam yra naudojamas lazerio pluošto fokusavimas, kuris sumažina pluošto spindulį tūkstančius kartų. Sufokusuotos dėmės radiusą galima apskaičiuoti iš:

$$w_0 = \frac{\lambda f}{\pi w}, \quad (5)$$

kur f – naudojamo lęšio židinio nuotolis, w – pluošto radiusas prieš fokusavimą. Sufokusuoto pluošto Reilėjaus ilgis z_R , nusakantis atstumą tarp sufokusuoto pluošto sąsmaukos ir taško, kuriame intensyvumas sumažėja du kartus, yra lygus [11]:

$$z_R = \frac{\pi w_0^2 n}{\lambda} \quad (6)$$

Gauso pluošto radiusas w tam tikrame atstume z priklausys kaip:

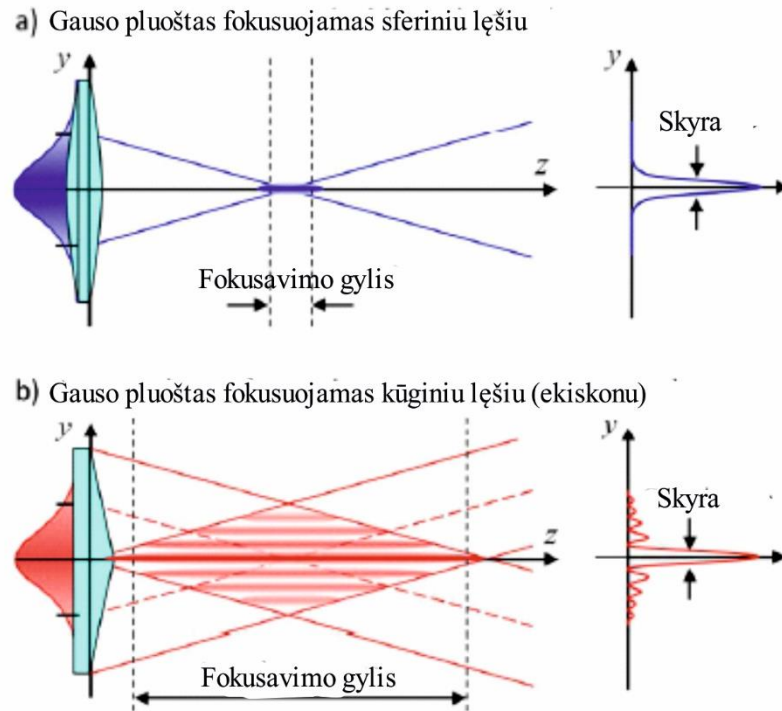
$$w(z) = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_R}\right)^2} \quad (7)$$

Beselio pluoštas yra kūginė banga, kurios artimojo lauko skirstinys gali būti aprašomas Beselio funkcija:

$$E(r, \phi, z) = A_0 \exp(i k_{\parallel} z) J_n(k_{\perp} r) \exp(\pm i n \phi), \quad (8)$$

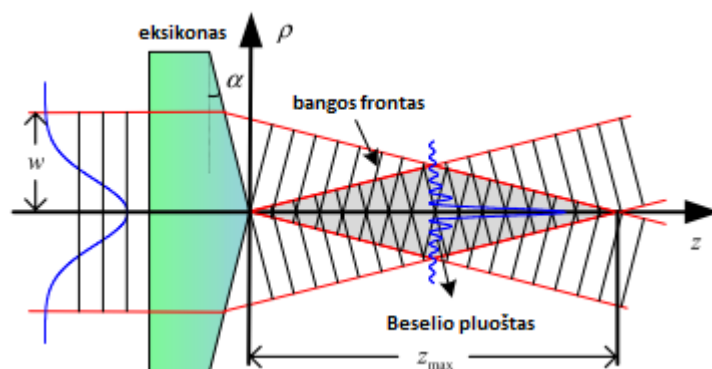
kur J_n yra n -osios eilės Beselio funkcija, k_{\parallel} ir k_{\perp} yra atitinkamai išilginis ir skersinis bangos vektoriai, kur $\sqrt{k_{\parallel}^2 + k_{\perp}^2} = k = 2\pi/\lambda$, o r , ϕ ir z yra radialinė, azimutinė ir išilginė koordinatės. Beselio pluošto erdvinis spektras yra žiedo formos, o artimojo lauko skirstinys susidaro dėl kampais sklindančių šviesos bangų interferencijos. Idealaus Beselio pluošto erdvinio intensyvumo skirstinio matmenys išlieka pastovūs bet kuriame erdvės taške, t.y. toks pluoštas sklisdamas nedifraguoja. Centrinio

intensyvumo smailės matmenys gali būti labai maži, keleto mikrometrų skersmens ($w_B = 2.405/k_{\perp}$). Centrinė Beselio pluošto smailė be difrakcijos gali nusklisti šimtus kartų didesnius atstumus nei Relėjaus ilgis, kai Gauso pluoštas yra sufokusuojamas į tą pačią matmenų dėmę (Pav. 7). Realūs pluoštai laikomi nedifraguojančiais tik tam tikru erdvės atstumu.



Pav. 7. Gauso pluošto fokusavimas sferiniu (a) bei kūginiu (eksikonu, b) lęšiu. Abu pluoštai turi vienodą skyrą bet skirtingus pluošto pasiskirstymus.[19]

Yra keletas būdų generuoti Beselio pluoštams: naudojant žiedinius plyšius, holografinius elementus, akustines gardeles ar kūginį lęšį – eksikoną (efektyviausias būdas, Pav. 8).



Pav. 8. Gauso pluošto transformacija į Beselio pluoštą naudojant eksikoną [20]

Beselio kūgio kampas yra apibrėžiamas kaip $\theta = (n - 1)\alpha$, kur n – eksikono medžiagos lūžio rodiklis, o α – eksikono pagrindo kampas. Žinant šį kampą galima apskaičiuoti Beselio zonos ilgį:

$$z_{max} = \frac{k}{k_{\perp}} w_0 \approx \frac{w_0}{\theta}, \quad (9)$$

kur w_0 – yra pradinio Gauso pluošto radiusas. Jei Gauso pluošto fokusavimo atveju Reilėjaus ilgis bus tuo mažesnis, kuo sufokusuotos dėmės dydis bus mažesnis (6 formulė), tai Beselio pluošto atveju Beselio zonos ilgis priklausys nuo eksikono geometrijos bei įvedamo Gauso pluošto dydžio, t.y. norint turėti, kuo ilgesnį Beselio sklidimo ilgį, galima didinti įvedamo pluošto dydį, kuris neturės įtakos centrinės smailės skersmeniui. [18]–[21]

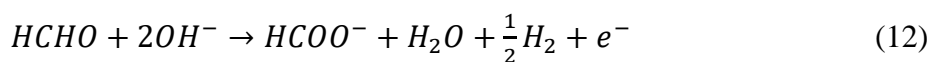
1.3. Cheminės metalizacijos bendrieji dėsningumai

Cheminio metalų nusodinimo procesas leidžia suformuoti metalų bei jų lydinių sluoksnius ant įvairiausių paviršių be išorinės elektros srovės, o tiesiog panaudojant įvairias chemines oksidacijos-redukcijos reakcijas tarp metalo jonų ir tirpale esančio reduktoriaus. Tai labai svarbu metalizuojant dielektrikus (stiklą, keramiką, plastiką ir kitas elektrai nelaidžias medžiagas), kur tiesioginis elektrocheminis nusodinimas nėra įmanomas. Šie procesai turi svarbią ypatybę, pats nusėdantis metalas yra reakcijos katalizatorius ir tokie procesai yra vadinami autokataliziniais. [22]–[24]

Autokatalizinė Cu(II) jonų redukcijos formaldehidu šarminėje terpėje reakcijos lygtis:



Cheminio variavimo procesas gali būti nagrinėjamas kaip dviejų elektrocheminių reakcijų suma, kur tokias sistemas aprašo mišraus potencialo ($E_{mišr}$) teorija. (5) reakcijos lygtis gali būti suskaidyta į paprastą redukcijos reakciją, katodinę parcialinę reakciją (6) bei vieną oksidacijos reakciją, anodinę parcialinę reakciją (7):



Kur galutinė reakcija (5) yra dviejų skirtingų parcialinių (6) ir (7) reakcijų rezultatas. Šios dvi dalinės reakcijos vyksta tame pačiame elektrode. Vykstant katodinei ir anodinei reakcijoms nusistovi mišrus elektrodo potencialas ($E_{mišr}$), kuriam esant katodinės ir anodinės parcialinių reakcijų greičiai yra lygūs. Pagal mišraus potencialo teoriją, tokiose sistemose elektrocheminio proceso sukelta elektros srovė, visada lygi dviejų parcialinių reakcijų algebrinei sumai. $E_{mišr}$ priklauso nuo abiejų reakcijų kinetinių parametrų. [25]–[27]

1.3.1. Anodinė parcialinė reakcija

Anodinė parcialinė reakcija (7) susideda iš dviejų etapų:

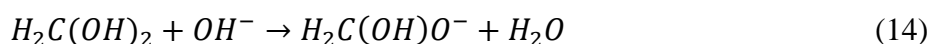
1. Elektriškai aktyvių junginių susidarymas
2. Krūvio pernaša

Elektriškai aktyvių junginių susidarymas susideda dar iš trijų etapų:

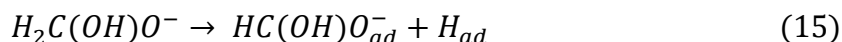
1. H_2CO hidrolizė



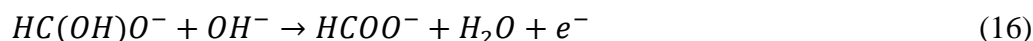
2. Metandiolio disociacija



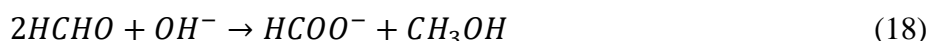
3. Metandiolio anijono chemisorbcinė disociacija



Po to vyksta krūvio pernaša bei vandenilio rekombinacija



Cheminis metalų nusodinimas turi vieną svarbią šalutinę reakciją, dėl kurios įvyksta didesnis formaldehido sunaudojimas. Tai yra aiškinama vykstant Cannizzar'o reakcijai:



Šioje reakcijoje, tarp dviejų formaldehido molekulių, viena oksiduojasi į formiatą, kita redukuojasi į metanolį. Ši reakcija spartėja didėjant pH bei temperatūrai. [25]–[27]

1.3.2. Katodinė parcialinė reakcija

Ši reakcija susideda iš dviejų elementarių etapų, kaip ir prieš tai. Cu^{2+} yra gaunamas pirmajame žingsnyje disocijuojantis kompleksiniam junginiui $[CuL_x]^{2+xp}$:



čia p yra ligando L krūvis ir $2+xp$ yra kompleksinio vario jono krūvis. Krūvio pernaša:



Buvo nustatyta koreliacija tarp kompleksinio junginio disociacijos greičio bei vario nusėdimo greičio. Katodinės parcialinės reakcijos greitį nusako pagrindiniai parametrai: vario jonų bei ligandų koncentracija, tirpalo pH bei priemaišų tipas bei koncentracija. [25]–[27]

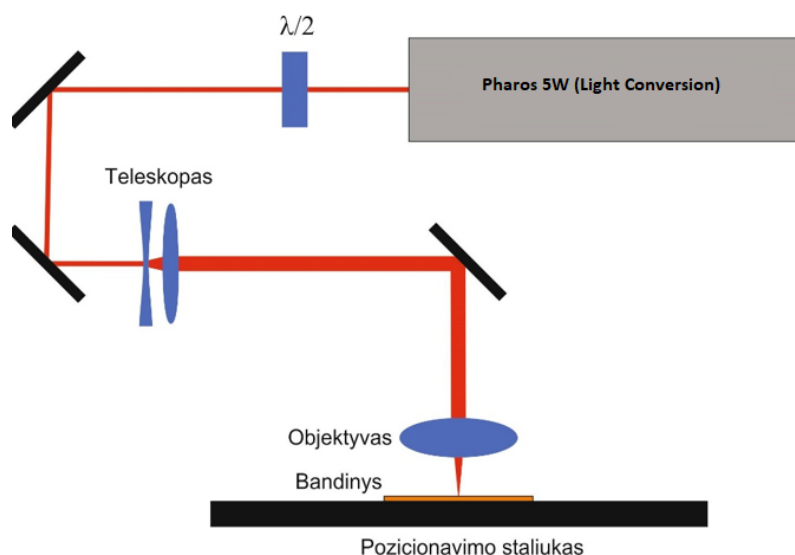
2. Eksperimento įranga ir metodika

2.1. Eksperimento įranga

Silikatinio (*soda lime*) stiklo bei polietileno tereftalato (PET) plastiko paviršiui modifikuoti buvo naudojamas femtosekundinis, sinchronizuotu modų režime veikiantis, diodais kaupinamas kieto kūno (Yb:KGW) lazeris Pharos-5W (*Light Conversion*), lazerio bangos ilgis 515 nm. Lazerio spinduliuotės galia buvo matuojama Ophir Nova II galios matuokliu. Lazerio pluošto pozicionavimui buvo naudojamas Aerotech stalas. Bandinių nuotraukos buvo daromos optiniu mikroskopu Nikon Eclipse LV1000. Bandinių plovimui, prieš besrovį dengimą, buvo naudojama EMAG EMMI 20 HC ultragarsinio valymo vonelė. Lazeriu modifikuotų vietų paviršiaus aktyvavimui buvo naudojamas katalizinis AgNO₃ tirpalas. Vario nusodinimui buvo naudojamas variavimo tirpalas: Lentelė 1. Eksperimento schema pateikiama Pav. 9. Lazerinės sistemos parametrai pateikti 2 lentelėje.

1 Lentelė. Variavimo tirpalas.

Ingredientas	Paaiškinimas	Formulė	koncentracija
Kalio natrio tartratas	ligandas	NaKC ₄ H ₄ O ₆ ·4H ₂ O	0,35 M
Vario sulfatas	Vario donoras	CuSO ₄ ·5H ₂ O	0,12 M
Natrio hidroksidas	Buferis	NaOH	1,25 M
Natrio karbonatas	Buferis	Na ₂ CO ₃	0,3 M
Formaldehidas	Reduktorius	HCOH	3,41 M



Pav. 9. Eksperimento schema

2 lentelė. Lazerinės sistemos parametrai.

Lazeris	Pharos 5W
Impulso trukmė, ps	0,34-1
Pasikartojimų dažnis, kHz	10-100
Impulso energija, μJ	0,124-21,47
Skenavimo greitis, mm/s	0,1-300
Bangos ilgis, nm	515
Lęšio židinio nuotolis, mm	200
Skaitinė apertūra	0,5
Gauso pluošto radiusas sąsmaukoje, μm	1,73
Eksikono viršūnės kampas, °	130
Beselio pluošto centrinės smailės diametras, μm	1,88

2.2. Metodika

2.2.1. Besrovis cheminis metalo nusodinimas

Dielektriko paviršius po lazerinio modifikavimo turi būti kruopščiai nuvalomas ir nuplaunamas etanolyje (98%). Stiklinė su etanolyje esančiu bandiniu dedama į ultragarso vonelę, kurioje palaikoma pastovi temperatūra. Po plovimo proceso, bandinio paviršius, paveiktas lazerine spinduliuote, yra aktyvuojamas sidabro nitrato tirpalu (AgNO_3). Po aktyvavimo, bandinys yra plaunamas distiliuotame vandenyje. Toliau vykdomas besrovis aktyvuotų vietų cheminis metalų nusodinimas, šio proceso metu temperatūra yra palaikoma pastovi ir bandinys yra laikomas panardintas variavimo tirpale.

2.2.2. Pluošto dydžio nustatymas

Lazerio pluošto diametrą galima nustatyti naudojant skenuojamų „peilio“ ar „skylutės“ metodus, tačiau sąsmaukoje esant labai dideliame intensyvumui šios pagalbinės priemonės gali būti išgarinamos. Todėl Gauso pluoštui jo diametrą galima surasti, atliekant tokį pat eksperimentą, kaip ir abliacijos slenkščio radimui.

Abliacijos slenkstis gali būti nustatomas eksperimentiškai iš santykio tarp bandinio paviršiuje susidariusių kraterių skersmens (D), dėl sugertos lazerinės spinduliuotės, ir impulso energijos. Skirtinga impulso energija suformuos skirtingo skersmens kraterį. Tai įvairios energijos impulsais yra išgarinami krateriai medžiagos paviršiuje. Kraterių diametras išmatuojamas, naudojant optinį mikroskopą. Atidėjus priklausomybę $D^2(\ln(E_p))$ ir ją aproksimavus tiese yra nustatomas jos polinkis, kuris yra lygus $2w_0^2$. Taip nustatius pluošto radiusą, galima susirasti ir abliacijos slenkstį,

tiesiog perskaičius E_p į energijos tankį pluošto centre ir pavaizdavus D^2 kaip funkciją nuo $\ln(F_0)$. Šią priklausomybę ekstrapoliuojant tiesę iki $D^2 = 0$, gaunama abliacijos slenkstinė energijos tankio vertė. [13]

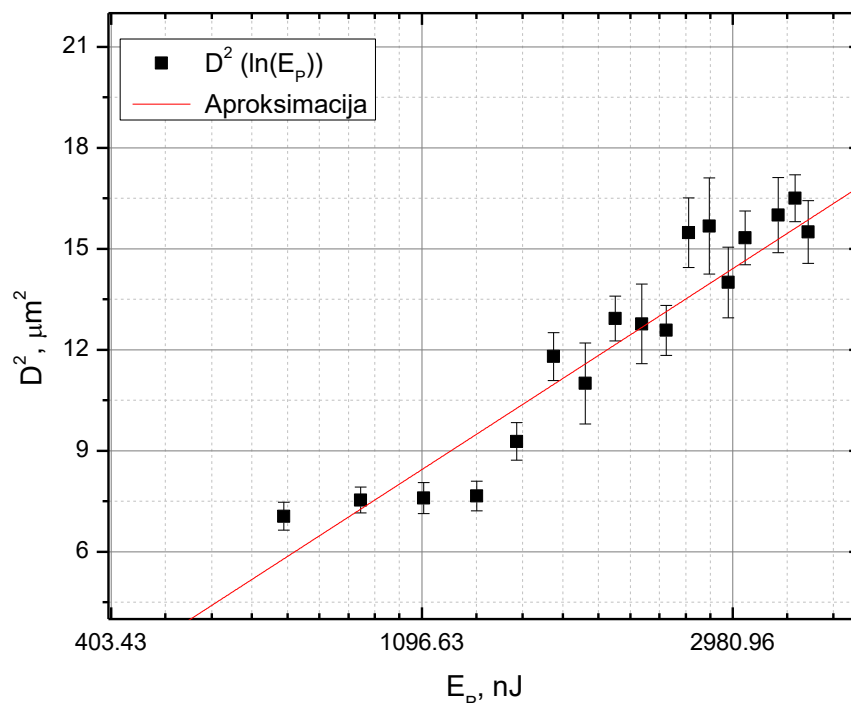
2.2.3. Spinduliuotės poliarizacijos keitimas

Spinduliuotės poliarizacijos keitimui buvo naudojamos $\lambda/2$ bei $\lambda/4$ plokštelės. Pasukant $\lambda/2$ plokštelę 90° kampu galima pakeisti spinduliuotės poliarizacija iš tiesinės, kuri yra vertikali skenavimo kryptį, į tiesinę, kuri būtų horizontali skenavimo kryptį, ir atvirkščiai. Pasukant $\lambda/4$ plokštelę 45° kampu atžvilgiu esančiai poliarizacijai spinduliuotės poliarizacija yra keičiama iš tiesinės į apskritiminę.

3. Eksperimento rezultatai

3.1. Gauso pluošto skersmens matavimas

Metalinė plokštelė buvo modifikuota įvairiomis impulso energijomis ir optiniu mikroskopu išmatuotas lazerio spinduliuote išabliuoto kraterio diametras D . Gauta priklausomybė pavaizduota Pav. 10.



Pav. 10. Lazerio spinduliuotės išabliuoto kraterio D^2 priklausomybė nuo impulso energijos.

Aproksimavus šią priklausomybę tiesę, jos polinkis bus lygūs $2w_0^2$. Tai pluošto radiusas:

$$w_0 = \sqrt{\frac{5,97}{2}} = 1,73 \mu\text{m}$$

3.2. Siaurų takelių formavimas

3.2.1. Lazeriniai parametrai

Eksperimento metu buvo pasirinktas 10 – 100 kHz impulsų pasikartojimų dažnių intervalas. Dielektrikų paviršiaus modifikavimui naudojant kitus impulso pasikartojimo dažnius (50, 100 kHz) lazeriniai parametrai buvo atitinkamai padidinti išlaikant tą pačią spinduliuotės dozę, t.y. didinant impulsų pasikartojimą, tiek pat kartų yra padidinamas ir skenavimo greitis, jog impulsų persiklojimas išliktų toks pat, naudojant tą pačią impulso energiją.

Eksperimentams buvo naudojama 20 skirtingos impulso energijos E_p bei 8 skirtingi skenavimo greičiai v , taip keičiant impulsų persiklojimą P_{over} :

$$E_p = \frac{P}{f}, \quad (21)$$

$$P_{over} = \left(1 - \frac{v}{2w_0f}\right) * 100\%, \quad (22)$$

kur P – lazerio pluošto vidutinė galia, f – impulsų pasikartojimų dažnis, w_0 – pluošto spindulys. Suskaičiuoti lazerinės spinduliuotės impulso energijos tankis F_0 bei spinduliuotės dozė D :

$$F_0 = \frac{E_p}{\pi w_0^2}, \quad (23)$$

$$D = \frac{2F_0 w_0 f}{v} \quad (24)$$

Taip pat buvo keičiama ir spinduliuotės poliarizacija (statmena bei lygiagreči skenavimo kryptys bei apskritiminė).

3.2.2. Takelių formavimas

Ant skaidraus dielektriko paviršiaus įvairiais lazeriniais parametrais (3 bei 4 lentelės) buvo suformuotos 4 mm ilgio linijos, kurios vėliau buvo metalizuotos naudojant SSAIL technologiją. Paviršiaus modifikavimas lazerio spinduliuote tai vykstanti medžiagos cheminė modifikacija, kurios metu ant paviršiaus susidaro cheminiai reduktoriai, galintys redukuoti sidabro jonus ant medžiagos paviršiaus, kurie nusodinami iš aktyvavimo tirpalo, taip pat vyksta abliacija, kurios metu medžiaga yra pašalinama suformuojant šiurkščią struktūrą [1], [28]. Metalizuotų takelių plotis buvo matuojamas optiniu mikroskopu. Modifikuojant plastiko paviršių lazerine spinduliuote buvo

naudojama mažesnė impulso energija, kadangi plastikas turi daugiau priemaišų, t.y. jis geriau sugeria nei stiklas ir jo modifikacijos (SSAIL procesui) bei abliacijos slenksčiai yra gerokai mažesni.

3 lentelė. Skaidrių dielektrikų paviršiaus modifikavimo režimų lazeriniai parametrai naudojant 10 kHz pasikartojimų dažnį naudojant 340 fs impulsų trukmę

Skaidrus dielektrikas	Impulso energija, μJ	Skenavimo greitis, mm/s	Impulso energijos tankis, J/cm^2	Spinduliuotės dozė, J/cm^2
Stiklas	0,48 – 6,71	0,5 - 300	5,11 – 71,36	5,89 – 4938,40
PET	0,12 – 2,10	0,5 - 300	1,28 – 22,33	1,47 – 1545,55

Modifikuojant PET paviršių buvo išlaikomos tos pačios impulso energijos tiek ps, tiek fs atvejais.

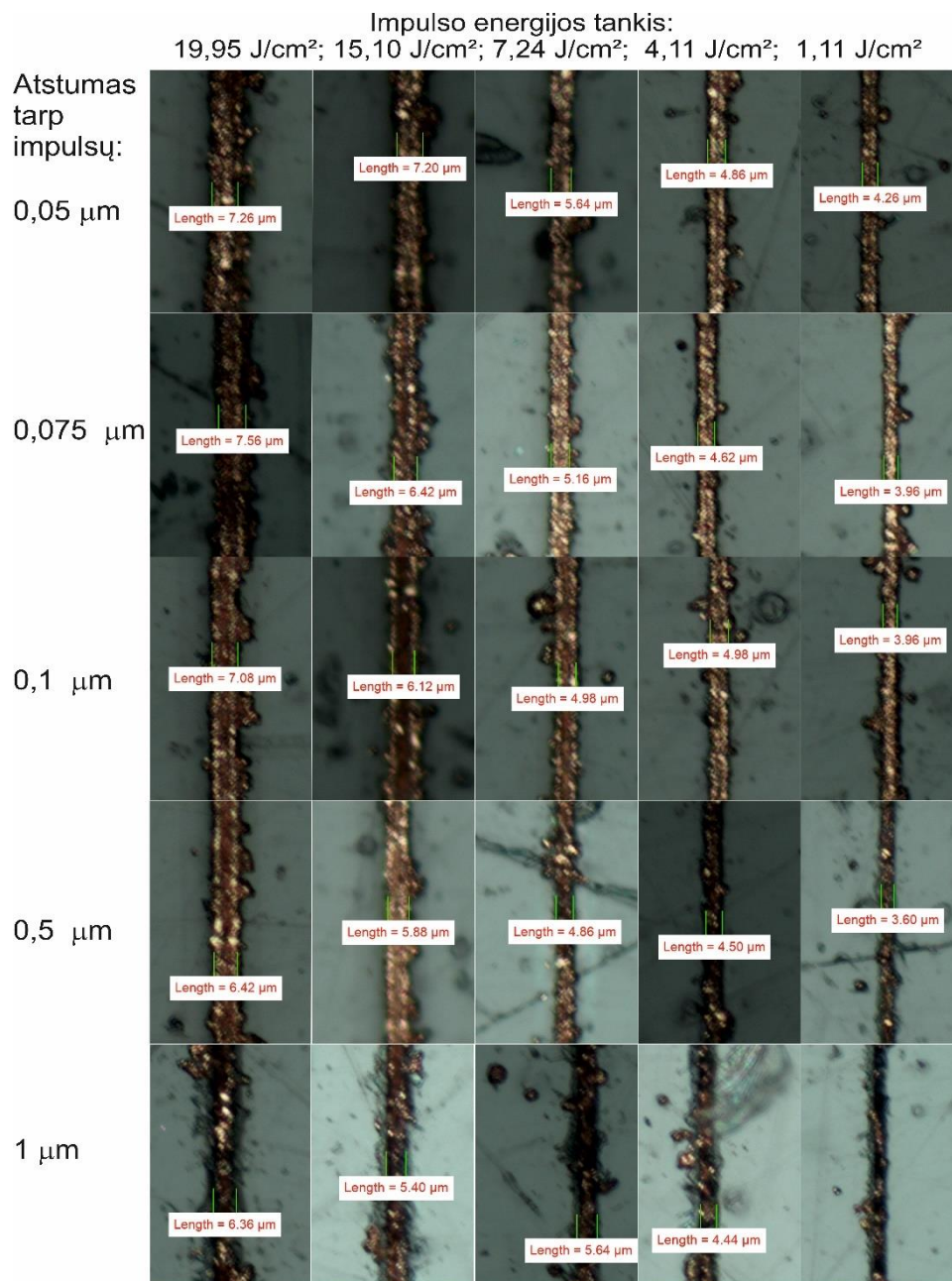
4 lentelė. Skaidrių dielektrikų paviršiaus modifikavimo režimų lazeriniai parametrai naudojant 10 kHz pasikartojimų dažnį naudojant 1 ps impulsų trukmę

Skaidrus dielektrikas	Impulso energija, μJ	Skenavimo greitis, mm/s	Impulso energijos tankis, J/cm^2	Spinduliuotės dozė, J/cm^2
PET	0,13-2,22	0,5 - 300	1,47 – 24,49	1,59 – 1633,87

3.2.2.1. Femtosekundiniai impulsai

PET plastikas

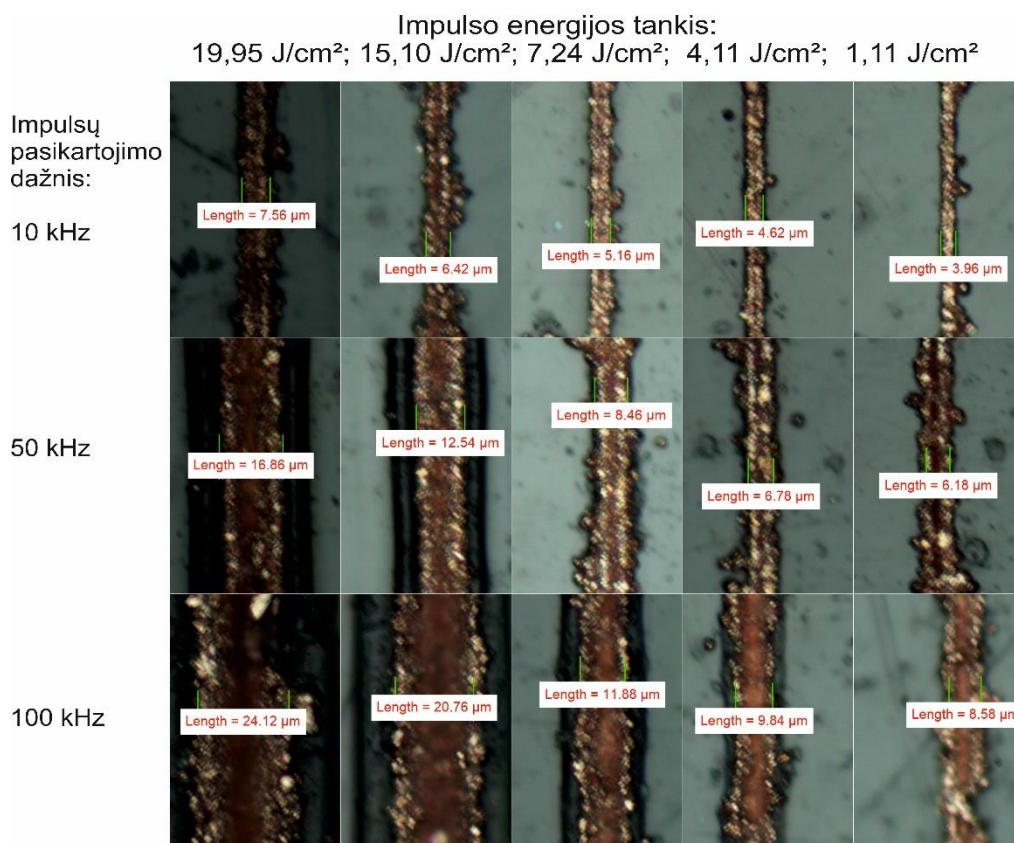
Metalizuotų takelių plotis kinta medžiagą modifikuojant skirtingais lazeriniais parametrais (impulso energija, impulsų persiklojimu ar impulsų pasikartojimo dažniu).



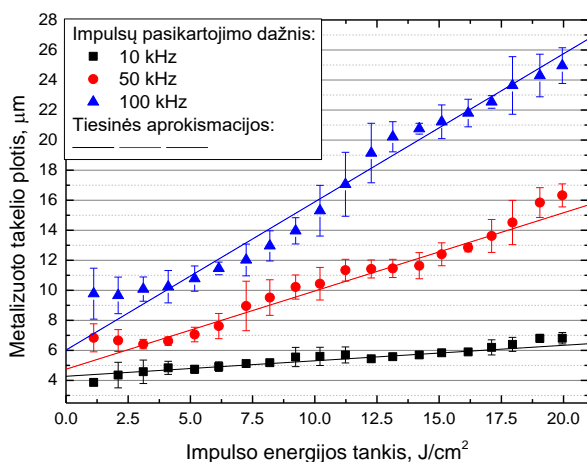
Pav. 11. Metalizuoti takeliai ant PET plastiko paviršių, modifikuojant skirtingomis impulso energijomis bei skirtingu skenavimo greičiu naudojant 10 kHz pasikartojimo dažnį

Medžiagos paviršių modifikuojant vis didesne energija, metalizuotas takelis plėtėja (Pav. 11 ir Pav. 14), nes didinant impulso energiją vis daugiau medžiagos yra modifikuojama ir susidaro didesnė poveikio zona. Tą patį galima pasakyti ir apie impulsų persiklojimo didinimą (atstumo tarp impulsų mažinimą), kuo daugiau impulsų paveikia vieną vietą, tuo daugiau energijos yra suteikiama tos vietos modifikacijai ir atitinkamai didesnis plotas yra aktyvuojamas, turime didesnę poveikio zoną, vyksta inkubacija ir akumuliacija. Naudojant didesnius impulsų pasikartojimo dažnius (50 bei 100 kHz, Pav. 15) galime pastebėti tas pačias tendencijas, t.y. didėjant skenavimo greičiui bei mažėjant impulso energijai takeliai siaurėja. Naudojant tą pačią impulso energiją bei impulsų persiklojimą, tačiau didesnę impulsų pasikartojimo dažnį metalizuoti takeliai tampa platesni (Pav. 12

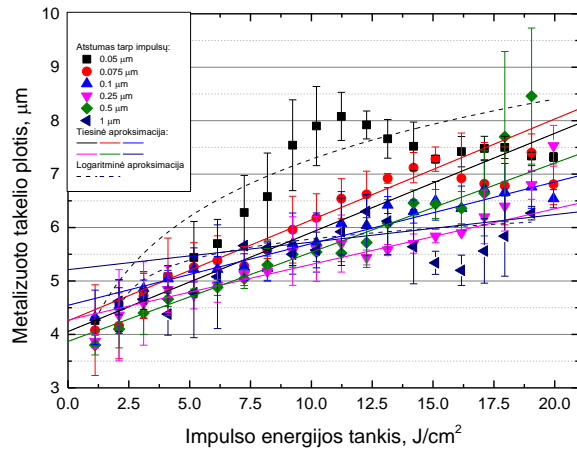
- Pav. 13), tai būtų galima paaiškinta terminė akumuliacija, kai naudojant didesnę impulsų pasikartojimo dažnį laikas tarp gretimų impulsų yra trumpesnis ir medžiaga nespėja išsklaidyti gautos energijos. Sekantis impulsas sąveikauja su aukštesnės temperatūros paviršiumi. Šis terminės akumuliacijos poveikis dėl didesnio impulsų pasikartojimo dažnio ypač pastebimas naudojant didesnes impulso energijas, kaip galima matyti iš pav. 13 pateiktų optinio mikroskopo nuotraukų.



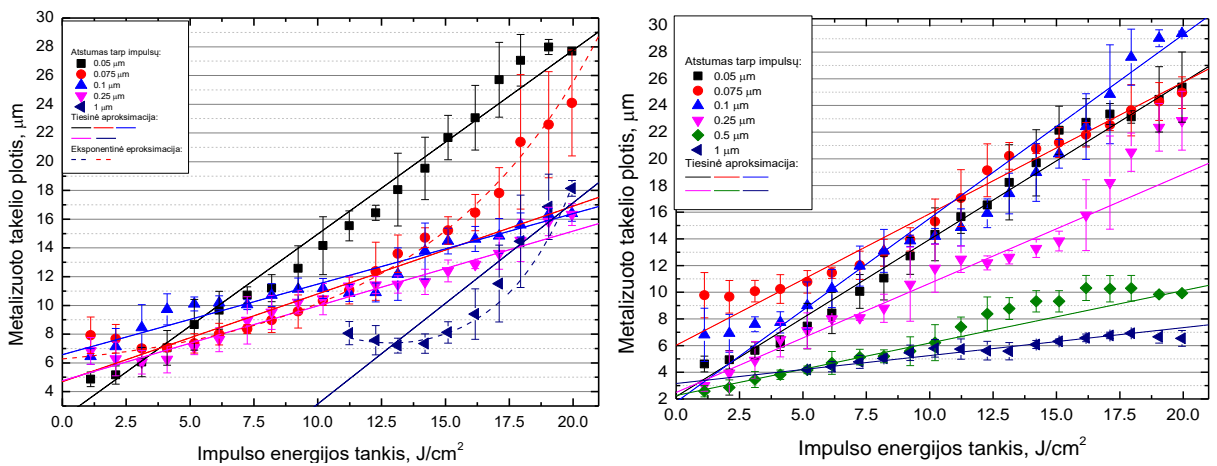
Pav. 12. Metalizuoti takeliai ant PET plastiko, paviršių modifikuojant skirtingomis impulso energijomis esant skirtingam impulsų pasikartojimo dažniui bet tam pačiam atstumui tarp impulsų (75 nm)



Pav. 13. Metalizuotų takelių plotis ant PET, paviršių modifikuojant skirtingomis impulso energijomis esant skirtingam impulsų pasikartojimo dažniui bet tam pačiam atstumui tarp impulsų (75 nm)

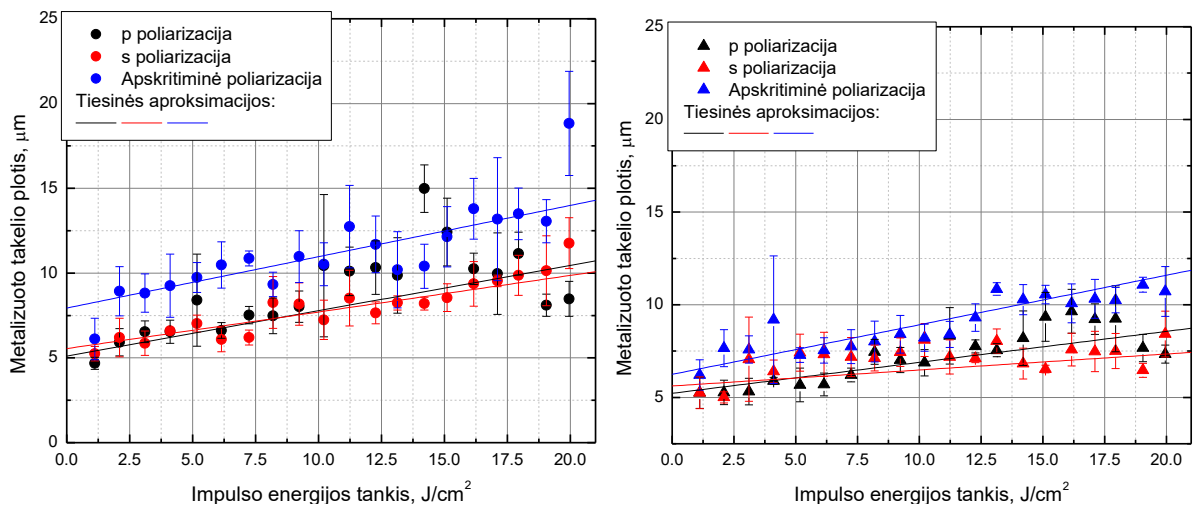


Pav. 14. Suformuotų ir metalizuotų takelių ant PET pločio priklausomybė nuo impulso energijos tankio naudojant skirtingą skenavimo greitį (10 kHz bandinys)

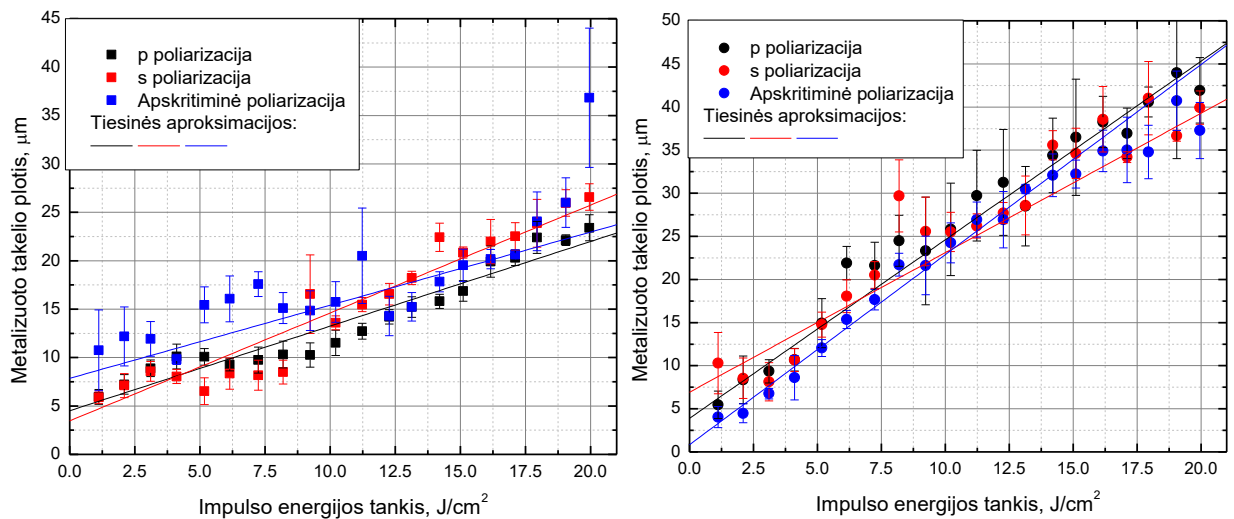


Pav. 15. Suformuotų ir metalizuotų takelių ant PET pločio priklausomybė nuo impulso energijos tankio naudojant skirtingą skenavimo greitį (50 kHz (kairėje) ir 100 kHz (dešinėje))

Norint įvertinti poliarizacijos įtaka metalizuotų takelių pločiui buvo pasirinkti tie patys lazeriniai parametrai tik apsiribota keturiais skirtingais skenavimo greičiais (atstumai tarp impulsų: 0,075; 0,25; 0,5 ir 1 μm). Naudojant tiesinę poliarizaciją (lygiagrečią (p) ar statmeną (s) skenavimo kryptiai) didelių skirtumų, įvertinant paklaidas, tarp metalizuotų takelių pločių pastebėta nebuvo ties visais pasirinktais impulsų persiklojimais (Pav. 16 bei Pav. 17). Tačiau naudojant apskritiminę poliarizaciją takeliai metalizuojasi plačiau, nors atsižvelgiant į paklaidas tas skirtumas nėra labai didelis (iki 20 proc.). Tai gali būti nulemta dėl skirtingo intensyvumo pasiskirstymo rašymo metu. Transliuojant tiesinės poliarizacijos lazerio spindulį, yra gaunamas periodinis intensyvumo skirstinys, tuo tarpu rašymą atliekant apskritiminės poliarizacijos spinduliu, intensyvumo skirstinys yra chaotiškesnis. Šis minėtas chaotiškumas, gali lemti aukštesnį modifikacijos slenkstį ir platesnę jos zoną.



Pav. 16. Suformuotų ir metalizuotų takelių ant PET pločio priklausomybė nuo impulso energijos tankio naudojant skirtingą spinduliuotės poliarizaciją skenavimo krypties atžvilgiu (10 kHz impulsų pasikartojimo dažnis, atstumas tarp gretimų impulsų: 0,25 μm (kairėje) ir 1 μm (dešinėje))

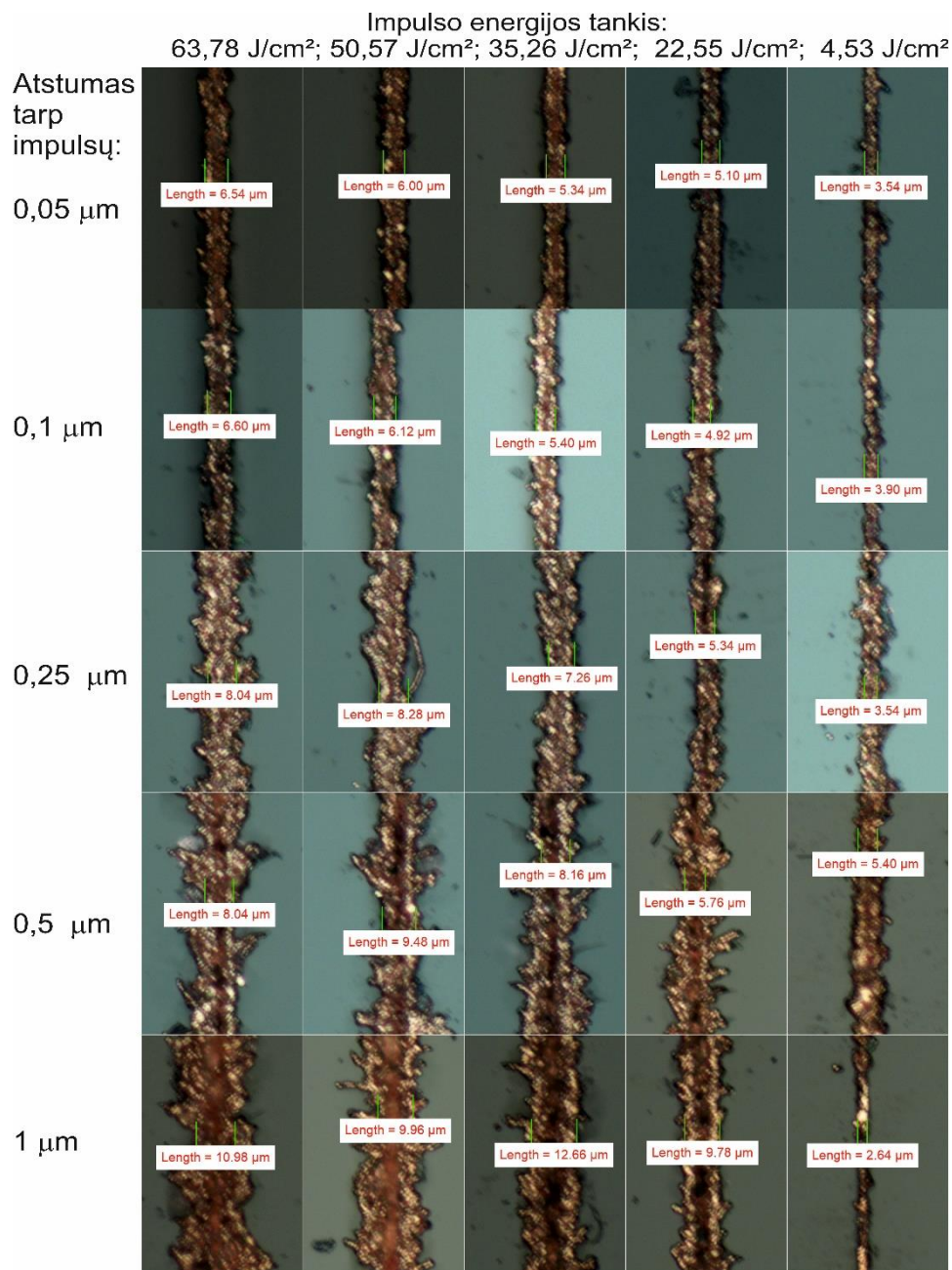


Pav. 17. Suformuotų ir metalizuotų takelių ant PET pločio priklausomybė nuo impulso energijos tankio naudojant skirtingą spinduliuotės poliarizaciją skenavimo krypties atžvilgiu (atstumas tarp gretimų impulsų: 0,075 μm bei 50 kHz impulsų pasikartojimų dažnis (kairėje) ir 0,25 μm bei 100 kHz impulsų pasikartojimų dažnis (dešinėje))

Stiklas

Stiklo atveju metalizuotų takelių plotis nuo impulso energijos priklauso panašiai kaip ir plastiko atveju, t.y. takelis plėtėja didėjant impulso energijai. Tačiau didinant skenavimo greitį yra

stebimos priešingos tendencijos, šiuo atveju mažinant impulsų persiklojimą linijos metalizuojasi plačiau (tai ypač matosi su didesnėmis impulso energijomis, Pav. 18 - Pav. 20).

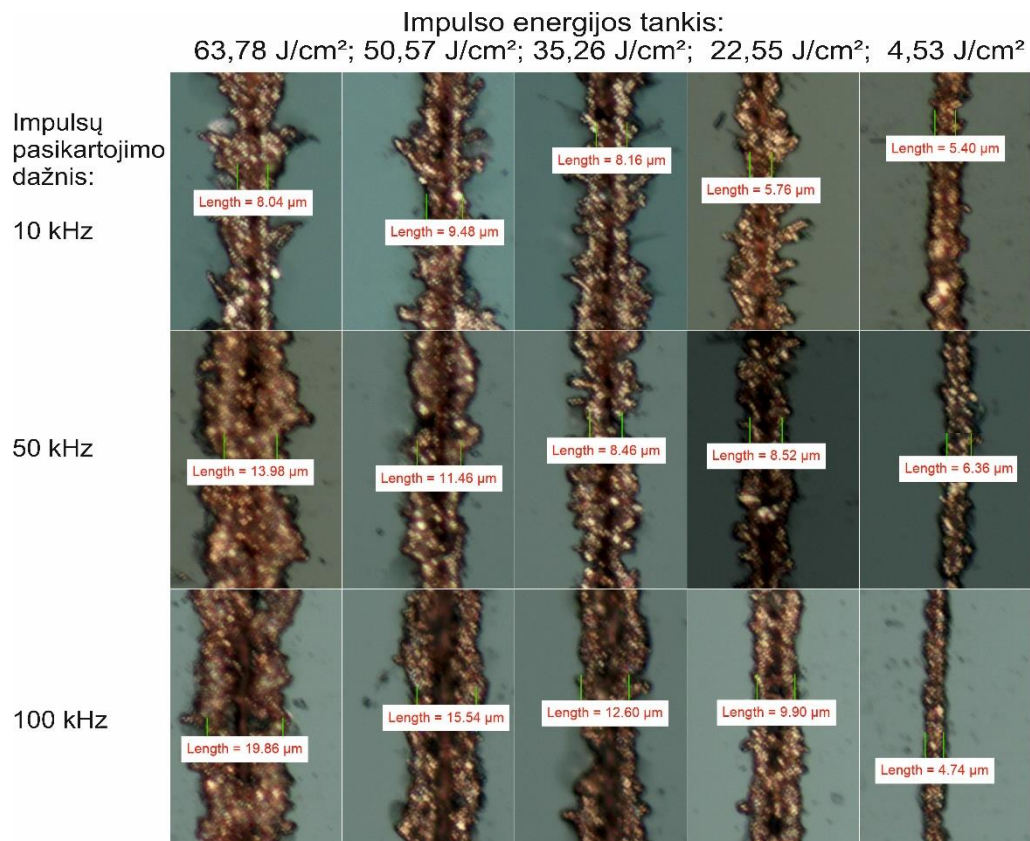


Pav. 18. Suformuotų ir metalizuotų takelių ant stiklo pločio priklausomybė nuo impulso energijos naudojant skirtingą skenavimo greitį (10 kHz bandinys)

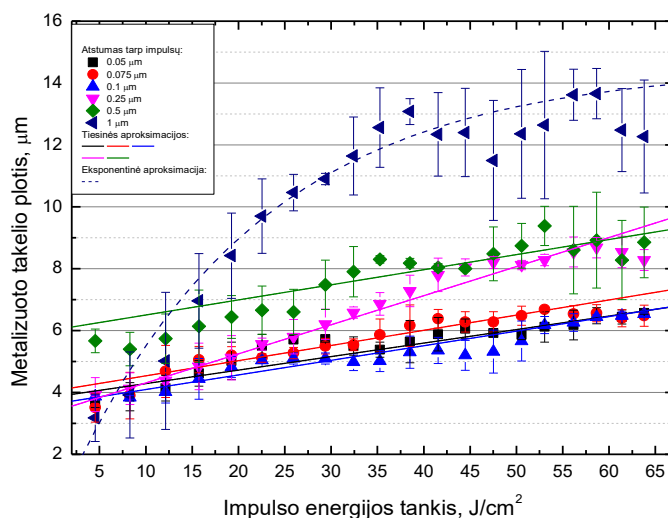
Platesnį linijų metalizavimąsi galima aiškinti mikrotrūkių susidarymu aplink modifikuojamą liniją. Mikrotrūkliai gali paveikti metalizacijos procesą, dėl ko linijos tampa platesnės. Šie trūkliai gali susidaryti dėl stiklo terminio plėtimosi ir susitraukimo atsiradusių įtempių, sukeltų staigiu stiklo šilimu bei aušimu. Turint mažą skenavimo greitį (didelį impulsų persiklojimą) stiklo temperatūra lazerio poveikio vietoje keičiasi nežymiai, t.y. sekantys impulsai yra iššaujami beveik toje pačioje vietoje, ko pasėkoje temperatūros svyravimų amplitudė gerokai sumažėja, kai tuo tarpu didinant

atstumą tarp gretimų impulsų temperatūros šuoliai tarp jų gali būti ganėtinai dideli, dėl ko šie trūkiai ir gali susidaryti (Pav. 18)

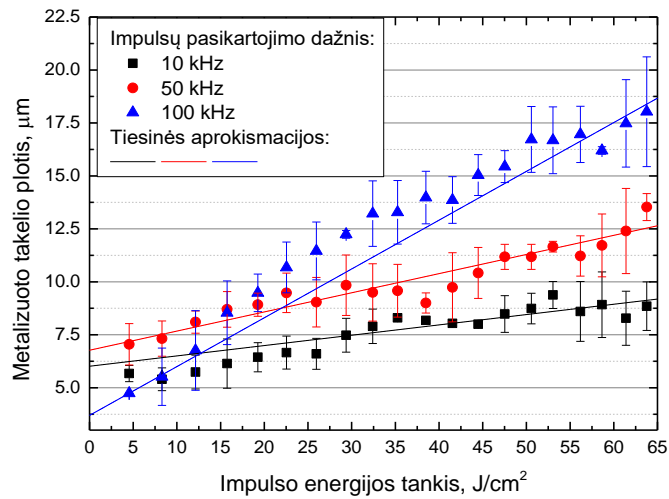
Didinant impulsų pasikartojimo dažnį galime pastebėti terminės akumuliacijos įtaka kaip ir PET atveju (Pav. 19 bei Pav. 21).



Pav. 19. Metalizuotų takelių plotis ant stiklo, paviršių modifikuojant skirtingomis impulsų energijomis esant skirtingam impulsų pasikartojimo dažniui bet tam pačiam atstumui tarp impulsų (0,5 μm)



Pav. 20. Suformuotų ir metalizuotų takelių ant stiklo pločio priklausomybė nuo impulso energijos tankio naudojant skirtingą skenavimo greitį (10 kHz bandinys)



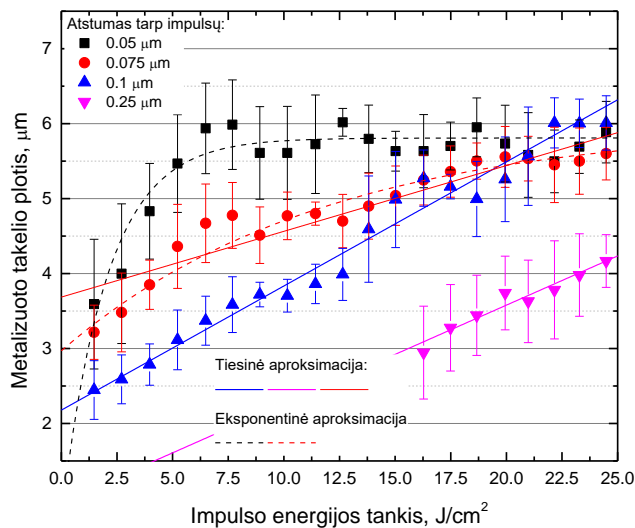
Pav. 21. Suformuotų ir metalizuotų takelių ant stiklo pločio priklausomybė nuo impulso energijos tankio naudojant skirtingą impulsų pasikartojimo dažnį ir esant vienodam impulsų persiklojimui (atstumas tarp impulsų 0,5 μm)

3.2.2.2. Pikosekundiniai impulsai

PET plastikas

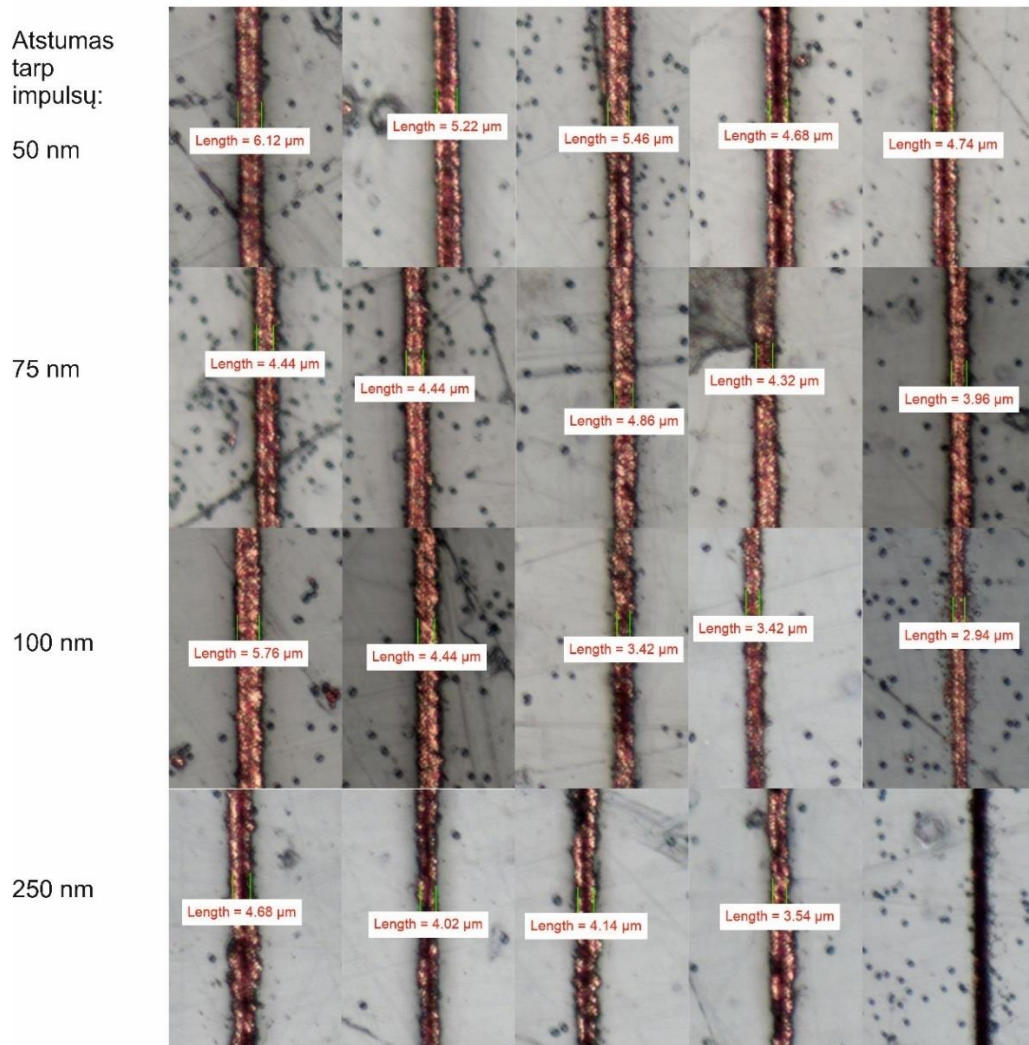
Tokie patys bandymai buvo atlikti ir naudojant 1 ps trukmės impulsus, kiti lazeriniai parametrai buvo išlaikomi kiek įmanoma vienodesni (4 lentelė).

Pikosekundinių impulsų atveju, stebime tas pačias tendencijas – metalizuotas takelis plėtėja didėjant impulso energijai bei impulsų persiklojimui (Pav. 22 ir Pav. 23) dėl didesnės poveikio zonos ir didesnio modifikuojamo ploto.



Pav. 22. Suformuotų ir metalizuotų takelių ant PET pločio priklausomybė nuo impulso energijos tankio naudojant skirtingą skenavimo greitį (10 kHz bandinys)

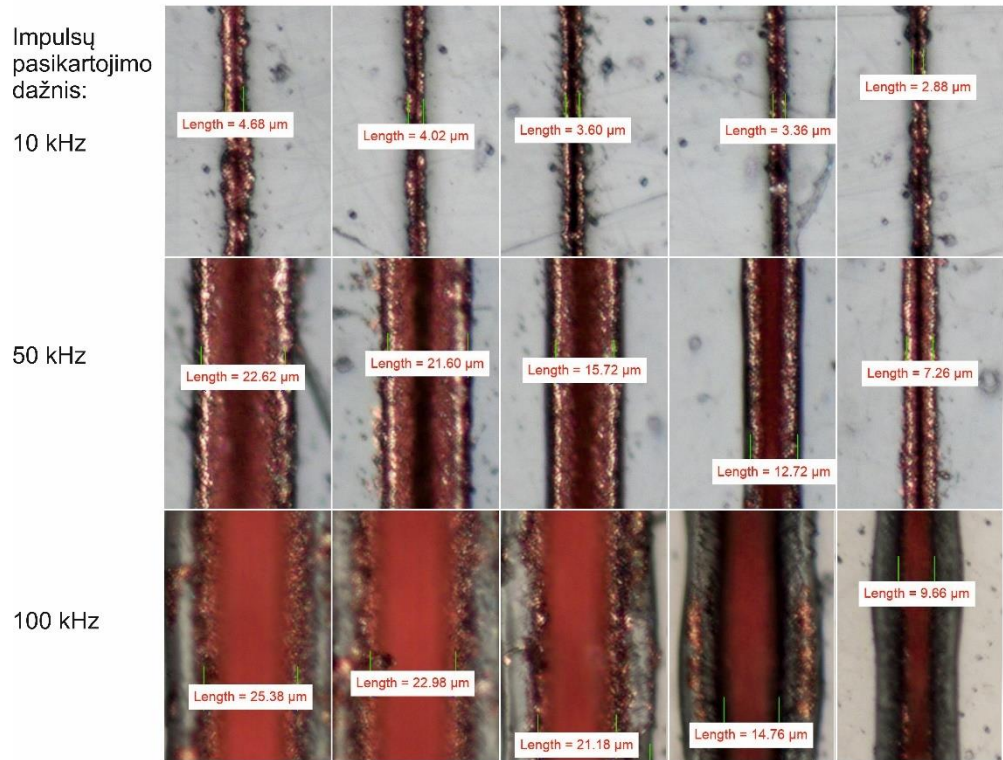
Impulso energijos tankis:
24,48 J/cm²; 20,98 J/cm²; 15,02 J/cm²; 11,42 J/cm²; 3,97 J/cm²;



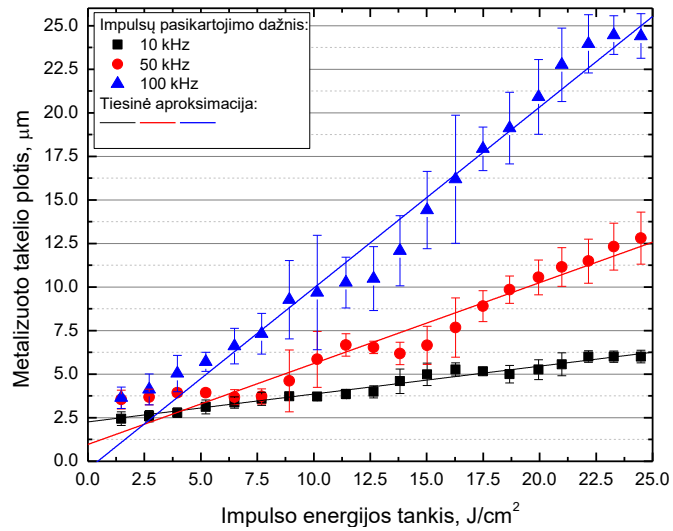
Pav. 23. Metalizuoti takeliai ant PET plastiko paviršių, modifikuojant skirtingomis impulso energijomis bei skirtingu skenavimo greičiu naudojant 10 kHz pasikartojimo dažnį

Didinant impulsų pasikartojimo dažnį (Pav. 24 ir Pav. 25) bet išlaikant tą pačią impulso energiją bei impulsų persiklojimą taip pat stebima terminė akumuliacija, kuri labiausiai matoma esant didesnėms impulso energijomis.

Impulso energijos tankis:
 24,48 J/cm²; 20,98 J/cm²; 17,49 J/cm²; 12,64 J/cm²; 7,69 J/cm²;



Pav. 24. Metalizuoti takeliai ant PET plastiko, paviršių modifikuojant skirtingomis impulso energijomis esant skirtingam impulsų pasikartojimo dažniui bet tam pačiam atstumui tarp impulsų (250 nm)

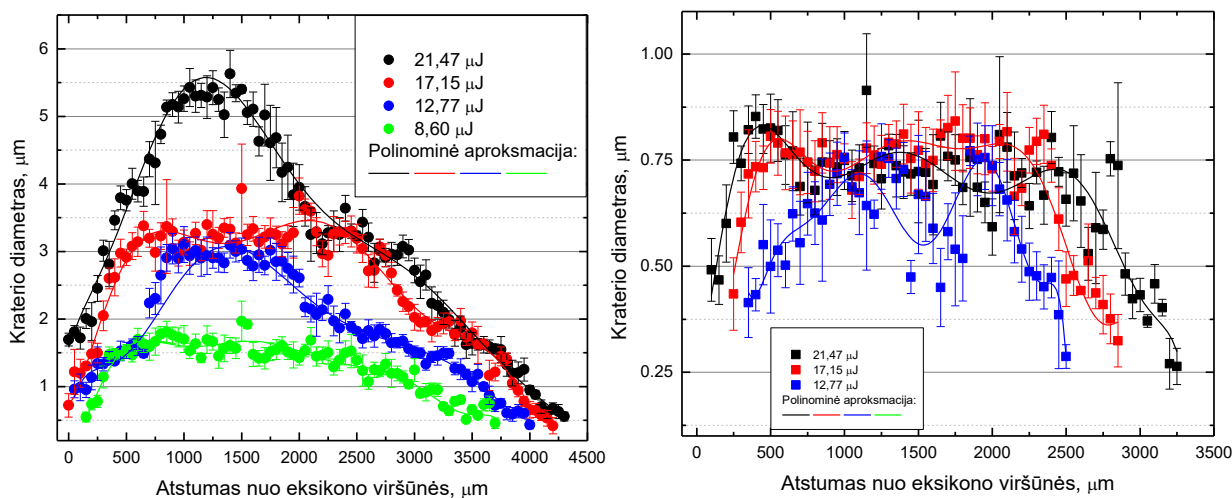


Pav. 25. Metalizuotų takelių plotis ant PET, paviršių modifikuojant skirtingomis impulso energijomis esant skirtingam impulsų pasikartojimo dažniui bet tam pačiam atstumui tarp impulsų (250 nm)

3.2.2.3. Beselio pluoštas

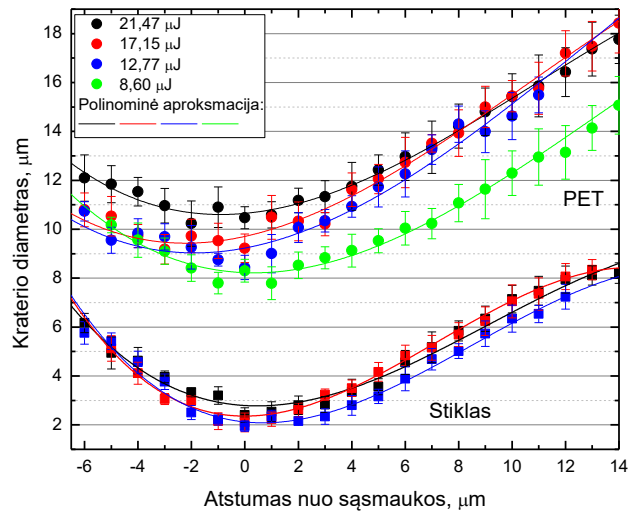
Fokusuojant Gauso pluoštą lęšiu teorinis Relėjaus ilgis $z_R = \frac{\pi w_0^2}{\lambda} \approx 17,62 \mu\text{m}$ (kai $w_0 \approx 1,7 \mu\text{m}$), tačiau naudojant eksikoną galima pasiekti, jog centrinės smailės diametras būtų panašus, bet Beselio zonos ilgis galėtų siekti kelis ar keliasdešimt mm. Tai palengvintų paviršiaus modifikavimą,

kuris nebebūtų toks jautrus atstumui iki bandinio paviršiaus (būtų galima apdirbti didelius medžiagos plotus). Tam buvo pasirinktas eksikonas, kurio viršūnės kampas lygus 130° – teorinis centrinės smailės diametras $\sim 2 \mu\text{m}$, o Beselio zonos ilgis priklauso nuo spinduliuotės pluošto dydžio (kuo didesnis pluoštas prieš eksikoną – tuo ilgesnė Beselio zona). Ant stiklo paviršiaus skirtingais atstumais nuo eksikono viršūnės ($z=0$) buvo eksponuojami pavieniai impulsai, jog būtų galima nustatyti Beselio zonos ilgį, tuo pačiu stebima kaip keičiasi pažeistos zonos diametras kintant atstumui tarp eksikono viršūnės bei bandinio paviršiaus (Pav. 26). Plastiko pažeidimo slenkstis yra gerokai mažesnis nei stiklo, tad naudojant didesnes impulso energijas ($>8,60 \mu\text{J}$) plastiko paviršių gali paveikti ir aplink centrinį maksimumą esanti spinduliuotė žieduose, dėl ko sparčiai išauga išabliuoto kraterio diametras. Tuo tarpu stiklo atveju, net ir turint didžiausią impulso energiją spinduliuotės intensyvumas žiede aplink centrinį maksimumą nėra pakankamas, jog pažeistų stiklo paviršių. Ruožas, kuriame išabliuoto kraterio diametras beveik nekinta stiklui yra gan platus ($\sim 2 \text{ mm}$), plastiko atveju yra siekiama taip pat kuo siauresnių takelių, todėl būtina riboti impulso energija ($<8,60$) su kuria taip pat būtų gaunamas platus ruožas, kuriame kraterio diametras kinta nežymiai.



Pav. 26. Išabliuoto kraterio diametras kintant atstumui tarp eksikono viršūnės bei bandinio paviršiaus. Kairėje – PET plastikas, dešinėje – stiklas.

Turint Gauso pluoštą, išabliuoto kraterio diametras kinta žymiai sparčiau (Pav. 27). Šiuo atveju sufokusuotos Gauso spinduliuotės diametras yra beveik du kartus didesnis ($\sim 4 \mu\text{m}$) nei centrinė Beselio smailė ($\sim 2 \mu\text{m}$). Tačiau, jeigu fokusuoto Gauso pluošto diametras būtų taip pat $2 \mu\text{m}$, išabliuoto kraterio diametro pokytis būtų dar spartesnis nei atvaizduotas Pav. 27.



Pav. 27. Išabliuoto kraterio diametras kintant atstumui nuo sufokusuoto Gauso pluošto sąsmaukos iki bandinio paviršiaus. Viršutinėje dalyje – PET plastikas, apatinėje – stiklas.

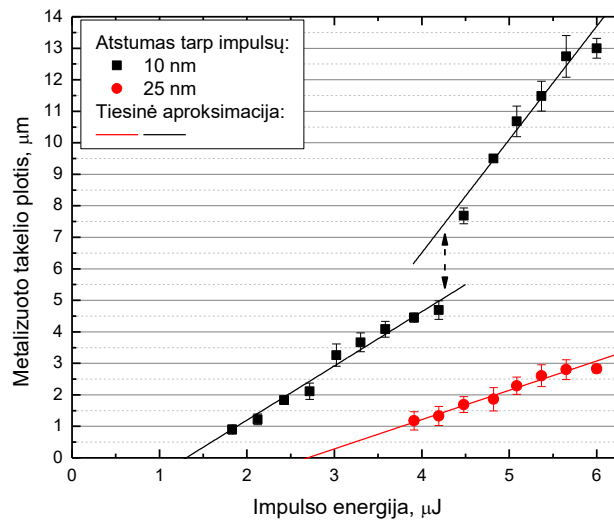
Pasirinkus 3 mm atstumą nuo eksikono kūgio viršūnės iki apdirbamo paviršiaus (siekiant išvengti pažeidimų ant apatinio bandinio paviršiaus), įvairiais lazeriniais parametrais buvo modifikuojamos linijos dielektrikų (stiklo bei PET) paviršiuje, po to chemiškai aktyvuojamos ir metalizuojamos. Skenavimo greitis buvo sumažintas lyginant su prieš tai atliktais bandymais Gauso pluoštu, tam jog išlaikyti panašų impulsų persiklojimą (Beselio centrinės smailės diametras yra mažesnis nei fokusuoto Gauso pluošto). Lazeriniai parametrai pateikti 5 lentelėje.

5 lentelė. Skaidrių dielektrikų paviršiaus modifikavimo režimų lazeriniai parametrai naudojant 10 kHz pasikartojimų dažnį naudojant Beselio pluoštą bei 350 fs trukmės impulsus.

Skaidrus dielektrikas	Impulso energija, μJ	Skenavimo greitis, mm/s	Atstumas nuo eksikono viršūnės, mm
Stiklas	1,21-21,47	0,1 – 12,5	3
PET	0,35-6,01	0,1 – 12,5	

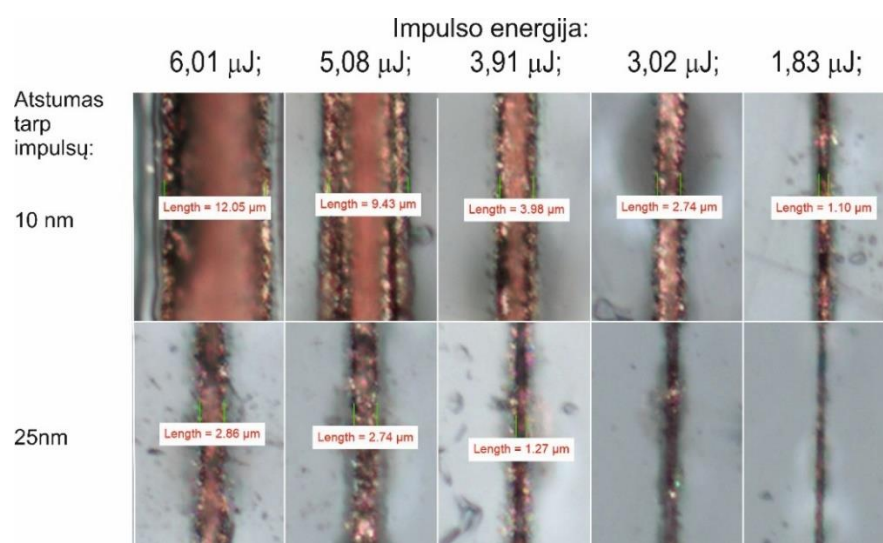
Pav. 28 bei Pav. 29 pavaizduota metalizuoto takelio pločio priklausomybė nuo impulso energijos PET paviršių modifikuojuojant Beselio pluoštu. Ši priklausomybė yra panaši į prieš tai aprašytą, paviršių modifikuojuojant Gauso pluoštu, tačiau paviršiaus modifikavimui reikia kelis kartus didesnės impulso energijos nei Gauso pluošto atveju (>10 kartų). Tai yra todėl, jog didžioji energijos dalis yra sukaupta Beselio žieduose, o žiedo intensyvumas yra kur kas mažesnis nei abliacijos slenkstis. Sėkmingam paviršiaus metalizavimui reikia, jog paviršius būtų modifikuotas didesne nei slenkstine modifikacijos doze (SSAIL technologijai [1], [6]), tai iš Pav. 28 matome, jog naudojant didžiausią impulsų persiklojimą takelis metalizuojasi tik jį modifikuojuojant ne mažesne nei 1,83 μJ impulso energija, kai tuo tarpu greitį padidinat 2,5 karto, minimali impulso energija pasislenka į

3,91 μJ , greitį didinant dar kelis kartus takeliai nebesimetaluoją, nes neužtenka impulso energijos, jog būtų pasiekta panaši spinduliuotės dozė kaip ir mažesnių greičių atveju.



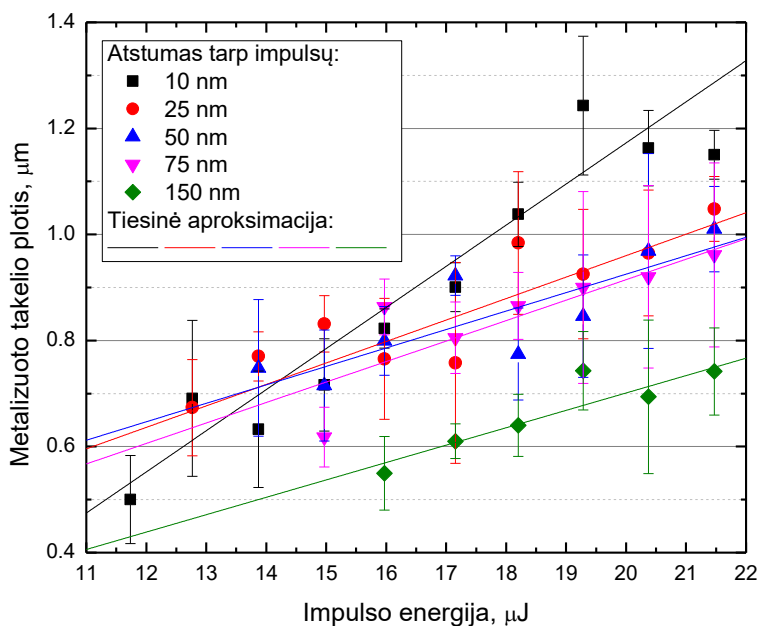
Pav. 28. Suformuotų ir metalizuotų takelių ant PET pločio priklausomybė nuo impulso energijos naudojant skirtingą skenavimo greitį linijas formuojant Beselio pluoštu ir 10 kHz impulsų pasikartojimo dažniu.

Naudojant 10 nm impulsų persiklojimą atsiranda trūkis ties 4,3 μJ impulso energija ir didinant ją, metalizuotas takelis plėtėja sparčiau nei iki šio trūkio. Šiuo atveju paviršių pradeda veikti ir spinduliuotė esanti žiede aplink centrinį maksimumą (žieduose esanti spinduliuotė yra sugerama medžiagos tūryje). Šio trūkio nėra naudojant didesnę skenavimo greitį, nes atstumas tarp gretimų impulsų yra didesnis ir medžiagos temperatūra ties kiekvienu impulsu yra žemesnė nei 0,1 mm/s skenavimo greičio atveju, t.y. turime mažesnę terminę akumuliaciją. Tiesa, šis trūkis galėtų atsirasti ties didesnėmis impulso energijomis.

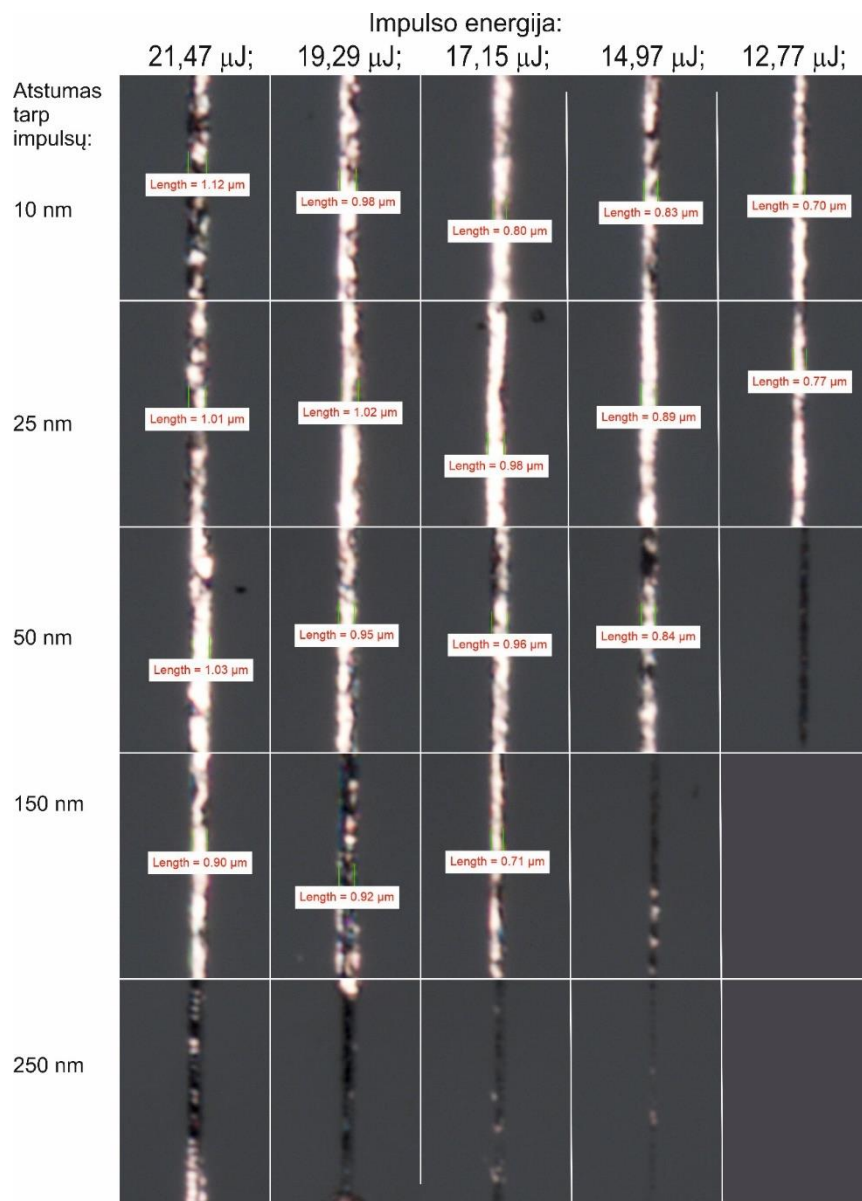


Pav. 29. Suformuotų ir metalizuotų takelių ant PET pločio priklausomybė nuo impulso energijos naudojant skirtingą skenavimo greitį linijas formuojant Beselio pluoštu ir 10 kHz impulsų pasikartojimo dažniu

Stiklo atveju energijos, esančios Beselio žieduose aplink centrinį maksimumą, neužtenka, jog būtų pažeistas bei modifikuojamas stiklo paviršius. Tam didžiausią įtaką turi tik centrinis maksimumas, todėl metalizuoto takelio plotis kinta gana nežymiai lyginant su plastiką (Pav. 30 bei Pav. 31). Metalizuoto takelio plotis kinta gana tolygiai su visais skenavimo greičiais, išskyrus 0,1 mm/s, kur takelio išplatėjimas vyksta greičiau (Pav. 30). Tai galėtų lemti didesni terminiai efektai nei kitų skenavimo greičių atveju.



Pav. 30. Suformuotų ir metalizuotų takelių ant stiklo pločio priklausomybė nuo impulso energijos naudojant skirtingą skenavimo greitį linijas formuojant Beselio pluoštu ir 10 kHz impulsų pasikartojimo dažniu.



Pav. 31. Suformuotų ir metalizuotų takelių ant stiklo pločio priklausomybė nuo impulso energijos naudojant skirtingą skenavimo greitį linijas formuojant Beselio pluoštu ir 10 kHz impulsų pasikartojimo dažniu

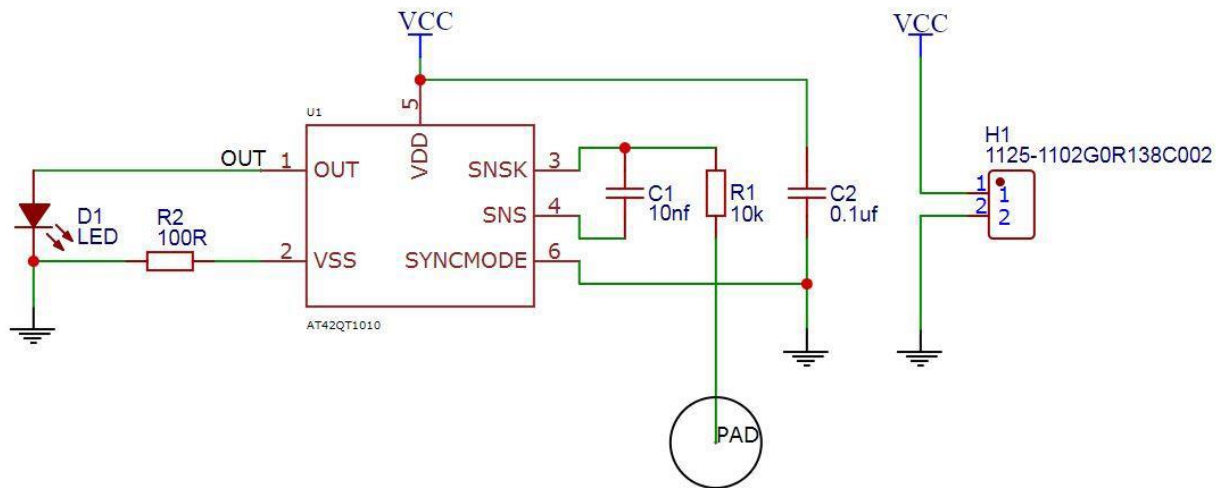
3.3. Lietimui jautrus „mygtuko“ maketo konstravimas

Lietimui jautrus „mygtukas“ yra elektroninis jutiklis, naudojamas fiziniam prisilietimui nustatyti ir fiksuoti. Tai mažas, paprastas, nebrangus jutiklis, sukurtas pakeisti senus mechaninius jungiklius. Elektroninė grandinės schema bei skaidrusis elektrodas buvo suformuotas ant silikatinio stiklo padėklo naudojant optimalius, tyrimais nustatytus, SSAIL proceso parametrus.

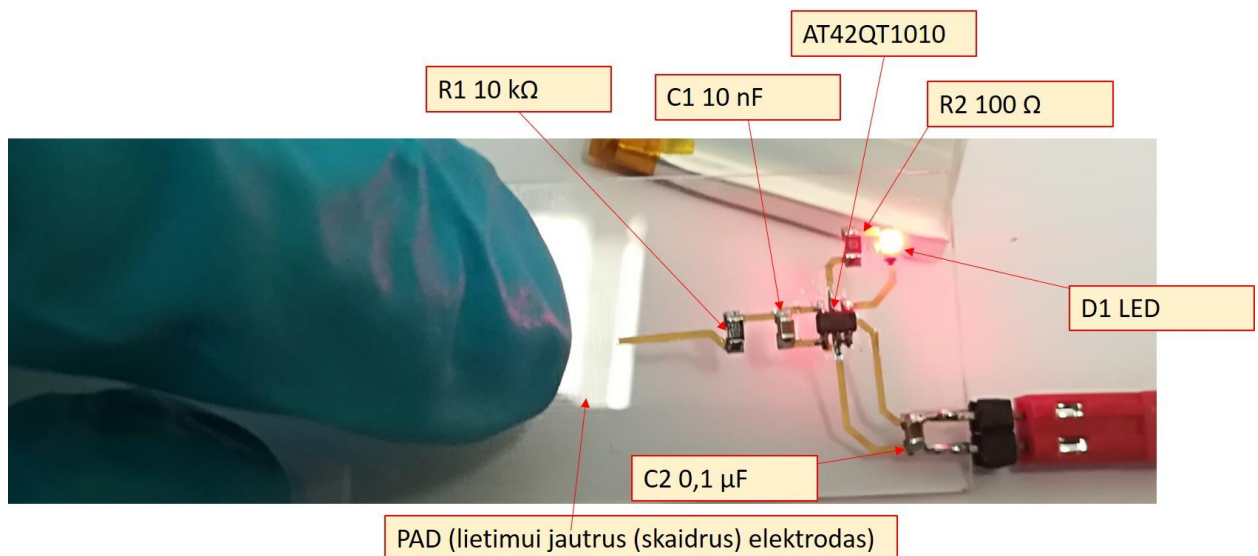
Elektroniniai komponentai, naudoti maketo formavime:

1. AT42QT1010 mikrokontroleris/ mikrolustas
2. 10 nF SMD keraminis kondensatorius (0805)
3. 100 nF SMD keraminis kondensatorius (0805)

4. 100 Ω SMD rezistorius (0805)
5. 10 k Ω SMD rezistorius (0805)
6. SMD šviesos diodas (0603)



Pav. 32. Lietimui jautrus „mygtuko“ su skaidriu elektrodu (PAD) principinė elektrinė schema.

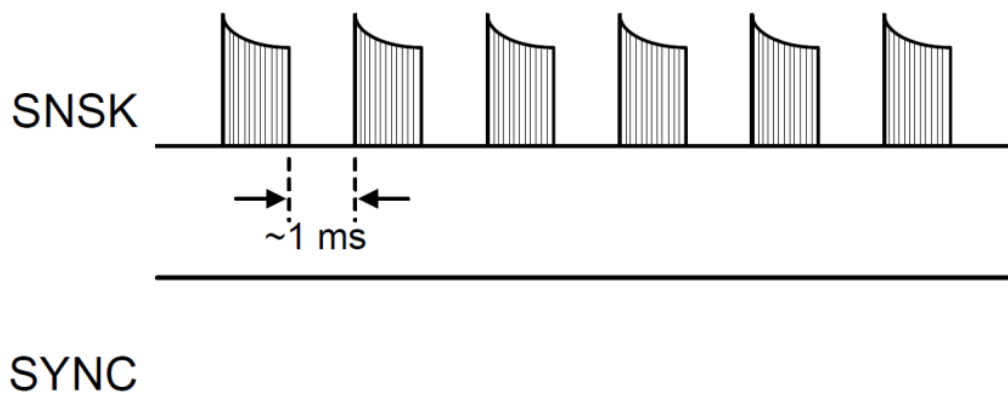


Pav. 33. Suformuotas elementas.

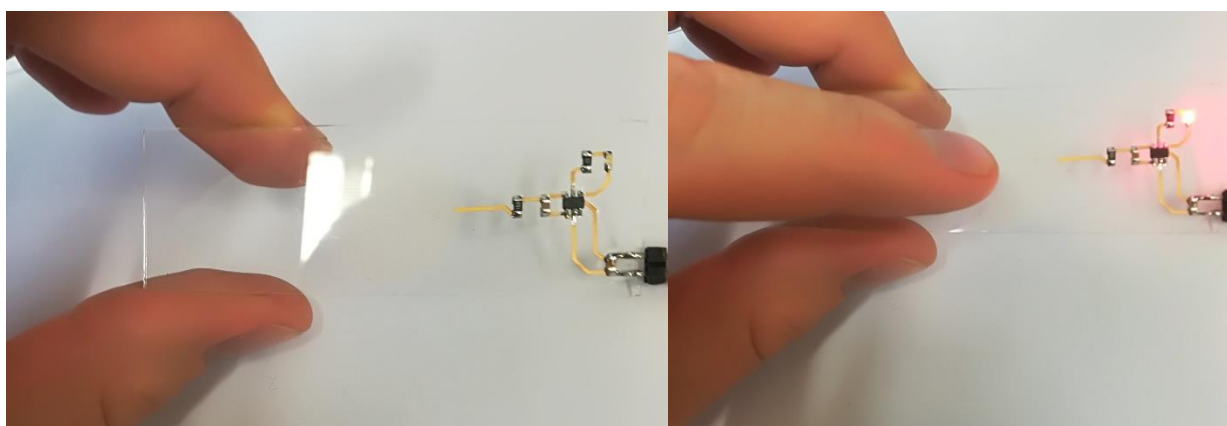
Schemoje svarbiausias elementas yra mikrolustas AT42QT1010, kuris aptinka prisilietimą. Svarbi yra kondensatoriaus C1 reikšmė, ji nustato jutiklio jautrumą. Makete naudojami 2–50 nF kondensatoriai. Rezistorius R1 ir kondensatorius C2 skirti apsaugoti grandinę nuo pašalinių elektromagnetinių trikdžių. Rezistorius R2 apriboja srovę šviesos diodui D1. Grandinė veikia esant nuolatiniams 3,3–5,5 V įtampai.

Veikimo principas

Lietimui jautrus jutiklis veikia kaip jungiklis, kai liečiant ar spaudžiant jutiklio paviršium, jis atveria elektros grandinę ir leidžia srovei tekėti. Šiuo atveju buvo naudotas AT42QT1010 talpuminis jutiklis (*capacitive sensor*), kuris fiksuoja lietimą, pasikeitus nustatytai talpai. Prilietus aikštelę „PAD“ žmogus paveikia grandinės talpą, todėl pasikeičia impulso plotis (Pav. 34).



Pav. 34. Mikroschemos generuojami impulsai



Pav. 35. Įgyvendintas lietimui jautrus mygtuko maketas

Pagrindiniai rezultatai ir išvados

- Metalizuoto takelio plotis, modifikuojant skaidrius dielektrikus lazerio spinduliuote, tiesiškai priklauso nuo impulso energijos tankio.
- Metalizuotas takelis suformuotas ant PET plastiko siaurėja didėjant skenavimo greičiui, stiklo atveju – plėtėja dėl susiformavusių mikro įtrūkimų.
- Tiesinė šviesos poliarizacija metalizuoto takelio suformuotam ant PET plastiko pločiui didelės įtakos neturėjo. Iki 20 proc. platesni takeliai gauti naudojant apskritiminę poliarizaciją.
- Naudojant didesnę impulsų pasikartojimo dažnį, metalizuoti takeliai yra platesni dėl galimos terminės akumuliacijos.
- Naudojant Beselio pluoštą pavyko suformuoti siauresnius nei 1 μm pločio metalizuotus takelius. Metalizuoto takelio plotis ant PET bei stiklo siaurėja didėjant skenavimo greičiui bei mažėjant impulso energijai.
- Suformuotas lietumui jautraus mygtuko maketas, skaidraus elektrodo pagrindu, kuris pagamintas suformavus siaurų varinių mikro-linijų tinkliuką, naudojant optimalius lazerinio rašymo parametrus

Literatūros sąrašas

- [1] K. Ratautas, Laser-assisted formation of electro-conductive circuit traces on dielectric materials by electroless metal plating technique, daktaro disertacija, Vilniaus universitetas, 2019.
- [2] Jorg Franke, *Three-Dimensional Molded Interconnect Devices (3D-MID): Materials, Manufacturing, Assembly and Applications for Injection Molded Circuit Carriers*. (Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2014).
- [3] F. Marcori, M. Antonipieri, I. Di Vora, S. Padovani, and I. Riolino, Study of MID technologies for automotive lighting and light signaling devices, in *Advanced Materials Research*, 2014, vol. 1038, pp. 97–103, <https://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1038.97>.
- [4] D. Kaddour, S. Tedjini, and A. Djamel, 3D antenna for UHF RFID Tag on Molded interconnect device, in *IEEE Antennas and Propagation Society, AP-S International Symposium (Digest)*, 2013, pp. 1502–1503, <https://dx.doi.org/10.1109/APS.2013.6711410>.
- [5] A. Islam, H. N. Hansen, P. T. Tang, and J. Sun, Process chains for the manufacturing of molded interconnect devices, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 42, no. 9–10, pp. 831–841, Aug. 2009, <https://dx.doi.org/10.1007/s00170-008-1660-9>.
- [6] M. Sadauskas, Lazeriu asistuojamas selektyvus metalinės dangos nusodinimas ant stiklo, bakalauro studijų baigiamasis darbas, Vilniaus universitetas, 2019.
- [7] R. Ramakrishnan, N. Saran, and R. J. Petcavich, Selective inkjet printing of conductors for displays and flexible printed electronics, *IEEE/OSA J. Disp. Technol.*, vol. 7, no. 6, pp. 344–347, 2011, <https://dx.doi.org/10.1109/JDT.2010.2096650>.
- [8] P. Serra, J. M. Fernández-Pradas, M. Colina, M. Duocastella, J. Domínguez, and J. L. Morenza, Laser-induced forward Transfer: A direct-writing technique for biosensors preparation, *J. Laser Micro Nanoeng.*, vol. 1, no. 3, pp. 236–242, 2006, <https://dx.doi.org/10.2961/jlmm.2006.03.0017>.
- [9] E. Gaižauskas and V. Sirutkaitis, *Kietojo kūno lazeriai*. (Vilnius: Vilniaus universiteto leidykla, 2008).
- [10] O. Balachninaitytė *et al.*, *Lazeriai ir jų taikymų laboratoriniai darbai*. (Vilnius: Vilniaus universiteto leidykla, 2016).
- [11] O. Balachninaitytė, A. Bargelis, D. Aleksandr, R. Jonušas, G. Račiukaitis, and V. Sirutkaitis, *Lazerinė technologija*. (Vilnius: Vilniaus universiteto leidykla, 2008).
- [12] C. B. Schaffer, A. Brodeur, and E. Mazur, Laser-induced breakdown and damage in bulk transparent materials induced by tightly focused femtosecond laser pulses, *Meas. Sci. Technol.*, vol. 12, no. 11, pp. 1784–1794, 2001, <https://dx.doi.org/10.1088/0957-0233/12/11/305>.
- [13] G. Račiukaitis, *Lazerinio mikroapdirbimo laboratoriniai darbai TEV*. (Vilnius: TEV, 2008).
- [14] B. N. Chichkov, C. Momma, S. Nolte, F. Von Alvensleben, and A. Tünnermann, Femtosecond, picosecond and

- nanosecond laser ablation of solids, *Appl. Phys. A Mater. Sci. Process.*, vol. 63, no. 2, pp. 109–115, 1996, <https://dx.doi.org/10.1007/BF01567637>.
- [15] F. C. Burns and S. R. Cain, The effect of pulse repetition rate on laser ablation of polyimide and polymethylmethacrylate-based polymers, *J. Phys. D. Appl. Phys.*, vol. 29, no. 5, pp. 1349–1355, 1996, <https://dx.doi.org/10.1088/0022-3727/29/5/034>.
- [16] F. Brygo, C. Dutouquet, F. Le Guern, R. Oltra, A. Semerok, and J. M. Weulersse, Laser fluence, repetition rate and pulse duration effects on paint ablation, *Appl. Surf. Sci.*, vol. 252, no. 6, pp. 2131–2138, 2006, <https://dx.doi.org/10.1016/j.apsusc.2005.02.143>.
- [17] J. Ion, *Laser Processing of Engineering Materials*. (Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005).
- [18] J. Durnin, J. Miceli, and J. H. Eberly, Diffraction-free beams, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 58, no. 15, pp. 1499–1501, 1987, <https://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.58.1499>.
- [19] A. Curatolo Bsc, Characterising and improving image quality in Optical Coherence Tomography and Elastography by means of optical beam shaping and simulations, The University of Western Australia, 2017.
- [20] P. Wu, C. Sui, and W. Huang, Theoretical analysis of a quasi-Bessel beam for laser ablation, *Photonics Res.*, vol. 2, no. 3, p. 82, 2014, <https://dx.doi.org/10.1364/prj.2.000082>.
- [21] Andrius Dubietis, *Netiesinė optika*. (Vilnius: Vilniaus universiteto leidykla, 2011).
- [22] M. Šalkauskas and A. Vaškėlis, *Electroless Deposition on Plastics*. (Russia, 1985).
- [23] A. Vaškėlis and M. Šalkauskas, *Plastics Finishing and decoration*. (New York: Van Nostrand Reinhold Company Inc, 1986).
- [24] R. C. Alkire, D. M. Kolb, J. Lipkowski, and P. N. Ross, *Advances in electrochemical science and engineering*, vol. 13. 2013).
- [25] M. Paunovic, Electroless Deposition of Copper, in *Modern Electroplating: Fifth Edition*, 2011, pp. 433–446.
- [26] V. Kepėnienė, Cheminio variavimo sistemų, Cu(II) ligandais naudojant hidroksikarboksirūgštis, ypatumų tyrimas., daktaro disertacija, Vilniaus universitetas, 2012.
- [27] K. Prušinskas, Autokatalizinių Cu(II) redukcijos procesų tyrimas cheminio variavimo sistemose ligandais naudojant gamtinius polihidroksilius junginius, daktaro disertacija, Vilniaus universitetas, 2013.
- [28] K. Ratautas, M. Andrėlevičius, A. Jagminienė, I. Stankevičienė, E. Norkus, and G. Račiukaitis, Laser-assisted selective copper deposition on commercial PA6 by catalytic electroless plating – Process and activation mechanism, *Appl. Surf. Sci.*, 2019, <https://dx.doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.11.091>.

SELEKTYVUS METALINIŲ MIKRO STRUKTŪRŲ CHEMNIS NUSODINIMAS ANT
SKAIDRAUS DIELEKTRIKO PAVIRŠIAUS, PANAUDOJANT PIKOSEKUNDINIUS IR
FEMTOSEKUNDINIUS LAZERIO IMPULSUS

SANTRAUKA

Šio darbo tikslas – ištirti kaip metalizuoto takelio plotis priklauso nuo lazerinių parametų bei suformuoti siauresnius nei 5 μm pločio elektrinio laidumo takelius ant „soda lime“ stiklo bei plastiko PET (*polyethylene terephthalate*) naudojant femtosekundinių impulsų lazerį PHAROS.

Dielektrikų paviršius buvo modifikuojamas keičiant įvairius lazerinius parametrus: impulso trukmę (340 fs bei 1 ps), impulso energiją (124 nJ – 21,47 μJ), skenavimo greitį (0,1 – 300 mm/s), šviesos poliarizaciją (statmena/lygiagreči skenavimo kryptčiai bei apskritiminė), spinduliuotės intensyvumo pasiskirstymą (Gauso bei Beselio pluoštai).

Modifikavus dielektriko paviršių lazerio spinduliuote, šis yra nuplaunamas ultragarsinio valymo vonelėje, aktyvuojamas joniniu kataliziniu tirpalu bei panardinus visą bandinį variavimo tirpale atliekamas besrovis vario nusodinimas (SSAIL technologija). Metalizuotų takelių plotis matuojamas optiniu mikroskopui.

Pastebėta, jog metalizuotas takelis plėtėja didėjant impulso energijai bei impulsų persiklojimui. Taip pat naudojant didesnę impulsų pasikartojimo dažnį stebima terminė akumuliacija.

Naudojant Beselio pluoštą buvo suformuotos siauresnės nei 1 μm pločio metalizuotos linijos. Technologijos taikymas buvo pademonstruotas suformuojant lietimui jautraus „mygtuko“ maketą.

SELECTIVE CHEMICAL DEPOSITION OF METALLIC MICROSTRUCTURES ON A
TRANSPARENT DIELECTRIC SURFACE USING PICOSECOND AND FEMTOSECOND
LASER PULSES

SUMMARY

The aim of this work was to investigate dependency of a copper plated micro-traces width on different laser parameters and to fabricate traces narrower than 5 μm in a width on soda lime glass and PET (*polyethylene terephthalate*) polymer surface using PHAROS femtosecond laser.

Dielectric surface was modified by different laser parameters: pulse duration (340 fs or 1 ps), pulse energy (124 nJ – 21,47 μJ), scanning speed (0,1 – 300 mm/s), light polarization (linear – perpendicular/parallel to scanning direction or circular), light intensity distribution (Gauss or Bessel beam).

Samples were rinsed in ultrasonic cleaning bath after surface modification by laser, following was activated in chemical catalytic solution and finally plated in electroless copper bath (SSAIL technology). Copper plated micro-traces width was measured with optical microscope.

It was demonstrated that copper plated micro-traces appear wider with increased laser fluence and laser pulse overlapping. A thermal accumulation phenomenon has been observed when higher pulse repetition rate was used.

Narrower than 1 μm in width traces were formed on soda lime glass and PET plastic by using Bessel beam. The potentiality of the technology was demonstrated by creating a touch-sensitive button.