

Vilniaus universiteto
Fizikos fakulteto
Lazerinių tyrimų centras

Gintarė Ždanaitė

FEMTOSEKUNDINIŲ LAZERIU INDUKUOTO PAŽEIDIMO DINAMIKOS TYRIMAS
SILICYJE ŽADINIMO-ZONDAVIMO METODU

Magistrantūros baigiamasis darbas

Lazerinės fizikos ir optinių technologijų
studijų programa

Studentas

Gintarė Ždanaitė

Leista ginti

2021-05-21

Darbo vadovas

doc. Domas Paipulas

Centro direktorius

prof. Aidas Matijošius

Vilnius 2021

Turinys

Ivadas	2
1 Literatūros apžvalga	4
1.1 Lazerinė abliacija	4
1.1.1 Impulsų trukmės įtaka abliacijai	4
1.1.2 Metalų, dielektrikų ir puslaidininkių abliacija	5
1.1.3 Abliacija pavieniais ir daugeliu impulsu	7
1.2 Impulsų vorų sąveika su medžiaga.....	8
1.2.1 Papliūpų režimo lazerinė abliacija.....	8
1.2.2 Burst tipo impulsų apdirbimo efektyvumas	9
1.3 Abliacija dvigubais skirtingų parametrų impulsais.....	13
1.3.1 Medžiagų apdirbimas dvigubais skirtingo bangos ilgio impulsais	13
1.3.2 Medžiagų apdirbimas dvigubais skirtingos trukmės impulsais	13
1.4 Pavienių impulsų ir impulsų vorų apdirbimo efektyvumo apibendrinimas ir prob- lematika	14
1.5 Paviršinio medžiagos pažeidimo dinamikos tyrimo metodika	15
1.5.1 Žadinimo-zondavimo spektroskopijos principas.....	15
1.5.2 Žadinimo-zondavimo spektroskopijos pritaikymas pažeidimo dinamikos tyrimams	17
1.5.3 Silicio savybės ir jo lazerinio mikroapdirbimo ypatybės	20
1.5.4 Metalų optinės savybės.....	21
2 Eksperimento įranga	24
3 Pagrindiniai rezultatai ir jų aptarimas	27
3.1 Chromo dangos pažeidimo dinamika	27
3.2 Silicio pažeidimo dinamika	28
3.2.1 Pavienio impulso indukuota pažeidimo dinamika	28
3.2.2 Dvigubų impulsų indukuota pažeidimo dinamika	30
3.2.3 Susiformavęs amorfinio silicio žiedas	34
Išvados	36
Literatūros sąrašas	37
Santrauka	40
Summary	41

Įvadas

Ultratrumpųjų impulsų lazeriai su būdingomis pikosekundinėmis ir femtosekundinėmis trukmėmis yra labai plačiai naudojami medžiagų apdirbime. Lazeriai pasižymi lanksčiu, labai aukštos kokybės įvairių medžiagų apdirbimu, kuris užtikrina gamybos tikslumą iki mikrometrinio lygio [1]. Konkurencingoje pramonėje apdirbimo našumas turi visuomet augti, todėl metai iš metų ieškomi būdai padidinti apdirbimo efektyvumą.

Apdirbimo efektyvumo padidinimui taip pat buvo kuriami didesnės galios ir didesnio pasikartojimo dažnio lazeriai. Padidėjus šiems parametrams pastebėta, kad visgi tikėtinas našumo padidėjimas nėra gautas, susidurta ir su problemomis. Tikėtinus kokybės ir efektyvumo pranašumus atsvėrė tokie trūkumai kaip šilumos kaupimasis. Impulsas po impulso paveikia medžiagą perduodamas šilumą ir sukeldamas negrįžtamus šiluminius pažeidimus, tokius kaip mikroįtrūkimai ar lydymasis. Pastarieji pablogina gamybos proceso kokybę ir tikslumą. Norint išspręsti šilumos kaupimosi problemas buvo atrastas papliūpų režimas.

Papliūpų režimo metu generuojami impulsai, kurie yra padalinti į tam tikro dažnio ir galios subimpulsus. Apdirbimas panaudojant impulsų voras pirmą kartą buvo atliktas Toronto universiteto mokslininkų prieš daugiau nei 20 metų [2]. Nuo to laiko mokslininkai dirbo prie šio režimo tobulinimo. Šiuo metu generuoti impulsų voras galima pasirenkant tiek subimpulsų skaičių, tiek subimpulsų bei impulsų vorų dažnį. Atlikus bandymus su ns trukme tarp impulso vorų buvo parodyta, kad tam tikromis eksperimento sąlygomis išsprendžiama neigiamus efektus turinti šilumos kaupimosi problema [3]. Visgi iki šiol papliūpų režimas nėra praradęs susidomėjimo, tyrimai atliekami su skirtingomis medžiagomis. Gaunami papliūpų režimo abliacijos efektyvumai skirtingoms medžiagoms skiriasi, todėl nėra lengva prognozuoti kokių parametrų reikia apdirbamai medžiagai. Taip pat nėra visiškai aišku kaip bandinio temperatūra kinta atliekant apdirbimą impulsų voromis. Nors apdirbimas papliūpų režime dar plačiai tyrinėjamas, bet gan plačiai jis jau yra pritaikomas.

Medžiagos apdirbimas pavieniais impulsais ir papliūpų režime skiriasi. Pavieniais impulsais paveikus medžiagą sukelta šiluma ima sklisti į gilesnius medžiagos sluoksnius, dėl to turime didesnę šilumos poveikio zoną. Naudojant didelio (>100 MHz) pasikartojimo dažnio impulsus pirmojo impulso sugeneruota šiluma dar nespėja difunduoti į gilesnius sluoksnius kuomet bandinį pasiekia antrasis impulsas, kuris papildomai dar paveikia jau įšilusią zoną ir taip daugiau medžiagos yra išgarinama. Norint padidinti apdirbimo efektyvumą svarbu susipažinti su pažeidimo dinamikos tendencijomis naudojant skirtingus spinduliuotės parametrus. Paveikus medžiagą impulsais galima stebėti temperatūrinius, atspindžio, krūvininkų tankio pokyčius. Poveikį medžiagai, naudojant skirtingus apdirbimo režimus, galima stebėti naudojantis žadinimo-zondavimo metodika. Silicis galėtų būti patogus indikatorius pažeidimo dinamikai stebėti, dėl jo savybės amorfizuotis ties tam tikru energijos įtekio verčių langu, kurį viršijus stebimas perlydimas ir abliacija. Pats silicis yra plačiai naudojamas fotovoltikoje, puslaidininių

pramonėje. Atkaitinimas, struktūrizavimas ir abliacija panaudojant trumpus ir ultratrumpus impulsus silicio apdirbime vis plačiau taikomi. Norint gauti konkrečius medžiagos pokyčius, kurie turi siaurą apdirbimo langą, svarbu tinkamai parinkti spinduliuotės parametrus.

Šio darbo tikslas - ištirti pavienių impulsų ir dvigubų impulsų su skirtingais vėlinimais poveikio ypatumus ir pažeidimo dinamiką silicyje.

1 Literatūros apžvalga

1.1 Lazerinė abliacija

Lazerinė abliacija labai plačiai taikoma mikroapdirbime, gaminant mikrometrinių matmenų detales, kiaurymes, ženklinant paviršius. Lazerinė abliacija – procesas, kurio metu intensyvios impulsinės arba nuolatinės veikos spinduliuotės pagalba pašalinami kietos medžiagos atomai. Paveikus nuolatinės veikos arba ilgos trukmės (nanosekundiniais) impulsais medžiagą, dėl sugertos energijos ji sušyla. Sugertai energijai pasiekus sublimacijos energiją dalelės išgaruoja. Naudojant trumpos (femtosekundinius) trukmės impulsus pluošto sąveikos su medžiaga laikas yra labai trumpas, todėl šiluma neturi laiko pasklisti medžiagos gardelėje per impulso poveikį [4]. Svarbu paminėti, kad esant dideliems intensyvumams ir ultratrumpiems impulsams susidare ekstremalūs slėgiai, tankiai ir temperatūra jonizuoja medžiagą ir ją įgreitina iki didelio greičio. Dėl trumpo sąveikos laiko visa medžiaga negali išgaruoti, todėl yra perkaitinto lydalo būsenoje. Visa tai susimaišo į aukšto slėgio skysčio lašelių ir garų mišinį, kuris greit plečiasi - įvyksta fazinis sproginimas [5]. Impulsų trukmė ne vienintelis labai svarbus parametras lazerinei abliacijai, svarbi ir vidutinė galia, pluošto diametras bei lazerio spinduliuotės bangos ilgis. Spinduliuotės bangos ilgis svarbus dėl medžiagos sugerties, sugerties koeficientas metaluose didėja esant trumpesniems bangos ilgiams [6]. Lazerio vidutinė galia taip pat lemia abliacijos procesą. Kiekviena medžiaga turi skirtingą abliacijos slenkstį, ties kurio energijos įtėkio verte energijos pakanka pašalinti medžiagai. Efektyviai, preciziškai abliacijai svarbu nustatyti optimalią vidutinę galia, kad jos būtų pakankamai abliacijai vyksti bet ir ne per daug, kuomet gaunami perlydytos medžiagos plotai.

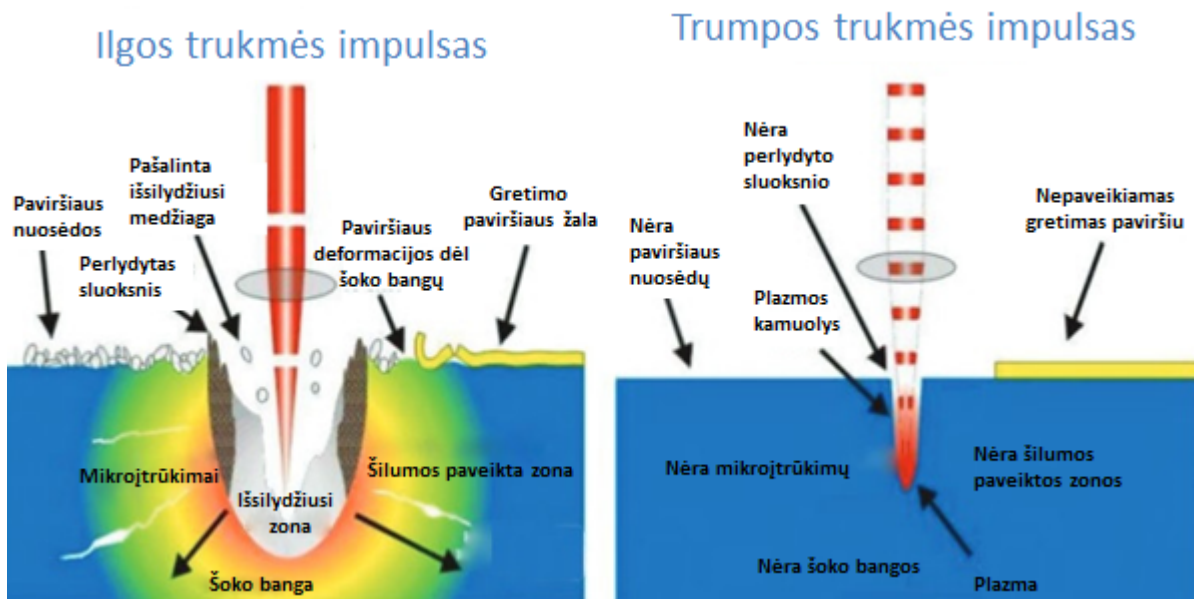
1.1.1 Impulsų trukmės įtaka abliacijai

Impulsų trukmė daro įtaką abliacijos slenkščiui ir prasiskverbimo gyliui. Ilgi impulsai didina abliacijos slenkstį bei mažina efektyvų prasiskverbimo gylį. Mažo intensyvumo ilgi impulsai pirmiausia sušildo bandinio paviršius ir tuomet dėl sugertos energijos medžiaga ima lydėtis ir garuoti. Jei impulsai palyginus su elektrono-fonono energijos perdavimo laiku yra pakankamai ilgi tuomet elektronų ir gardelės temperatūros susivienodina. Atsižvelgiant į temperatūrų skirtumą metalų lazerinė abliacija yra aprašoma dviejų temperatūrų modeliu, iš kurio seka tam tikros išvados naudojant skirtingos trukmės impulsus.

Nanosekundiniams impulsams sąveikaujant su medžiaga paviršius pirmiausia sušyla iki lydymosi temperatūros ir tik tuomet pasiekia garavimo būseną. Sąveikos metu dalis šilumos prarandama dėl medžiagos šiluminio laidumo, taip šilumos paveikta zona plečiasi, temperatūros gradientas mažėja, tuo pat metu mažėja ir šiluminis laidumas iki nulio. Abliacijai tokiaime režime impulso trukmė yra pakankamai ilga, kad sukurtų šilumos paveiktą zoną, kurioje pasireiškia įvairūs efektai (1 pav.). Apdirbant medžiagą nanosekundiniais impulsais garavimas vyksta iš

skystos metalo fazės, kuriai esant tikslus metalų apdirbimas vakuume yra sunkiai pasiekiamas.

Femtosekundiniame režime lazerio impulso trukmė yra trumpesnė už elektrono aušimo trukmę, todėl elektronų ir gardelės sąveika gali būti nepaisoma. Paveikus lazerio impulsu medžiagą, elektronai perduodami energiją gardelei greit atšąla. Šio proceso laikas yra pikosekundžių eilės. Trumpiems sąveikos laikams femtosekundinių impulsų abliacijai būdingas tiesioginis metalo garų fazinis perėjimas. Tokiu atveju gardelė yra įkaitinama per pikosekundes, susidaro stipriai besiplečiantys garai ir plazma. Šiuo atveju šilumos perdavimo medžiagai galima nepaisyti. Femtosekundiniame apdirbimo režime galima apdirbti medžiagas labai tiksliai, su minimaliu terminiu poveikiu.



1 pav. Ilgos trukmės impulso ir ultratrumpojo impulso sąveika su medžiaga. [7]

1.1.2 Metalų, dielektrikų ir puslaidininkių abliacija

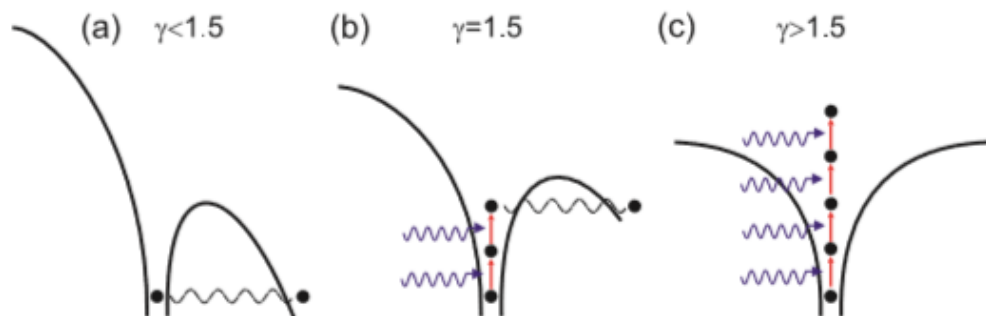
Mikroskopiniu požiūriu kietųjų kūnų ir lazerio spinduliuotės sąveika prasideda tuomet, kai medžiagos elektronai sugeria fotonų energiją ir yra sužadinti iš pusiausvyros padėties. Tačiau ne visos medžiagos turi vienodą kiekį laisvųjų elektronų, todėl vyksta skirtingi procesai. Metaluose laisvųjų elektronų tankis labai didelis, todėl sužadintų elektronų energija didėja. Svarbus parametras susijęs su metalo elektronų tankiu N_e yra plazmos dažnis $\omega_p = \sqrt{N_e e^2 / m_e \epsilon_0}$, kur m_e - elektrono masė, o ϵ_0 - vakuomo dielektrinė skvarba, o e - elektrono krūvis. Mažesniems už plazmos dažnį šviesos dažniams atspindžio koeficientas yra didelis, nes elektronai ekranuoja šviesos elektrinį lauką. Kai dažnis didesnis atspindžio koeficientas drastiškai krenta, elektronai negali sureaguoti taip greit, kad galėtų ekranuoti spinduliuotę [8]. Metalų atspindžio koeficientas artimame UV diapazone bei regimojo spektro srityje yra tarp 0,4 ir 0,95, o IR srityje 0,9-0,99. Metalų apdirbime svarbus ne tik atspindžio koeficientas, bet ir sugerties koeficientas

α , kuris parodo sugertos galios dalį vienetiniame terpės ilgyje. Pluoštui sklindant z kryptimi, o intensyvumui taške $z = 0$ esant I_0 intensyvumas $I(l)$ praėjus l ilgio terpę yra lygus: $I(l) = I_0 \exp(-\alpha l)$. Sugerties koeficientas priklauso nuo bangos ilgio, todėl vienus bangos ilgius medžiaga gali stipriai sugerti, o kitus praleisti su mažais nuostoliais. Todėl norint preciziškai apdirbti metalus reikia pasirinkti tinkamą bangos ilgį.

Dielektrikų ir puslaidininkių apdirbime situacija keblesnė. Dielektrikų ir puslaidininkių valentinė ir laidumo juosta yra atskirta draustiniu energijos tarpu, todėl mažo intensyvumo spinduliuotės tiesinė sugertis yra labai silpna. Puslaidininkiuose yra kažkoks kiekis laisvųjų elektronų, kuriuos galima sužadinti tiesine sugertimi, o dielektrikuose laisvųjų krūvininkų labai mažai. Elektronai iš valentinės juostos į laidumo juostą gali būti sužadinami naudojant daugiafotonę sugertį. Kai didelio intensyvumo femtosekundiniai impulsai sąveikauja su skaidriais dielektrikais surišti elektronai sugeria daugiafotonę energiją ir jų kinetinė energija pasiekia jonizacijos energiją. Elektronai tampa laisvais, peršokdami į laidumo juostą, toks procesas vadinamas daugiafotone jonizacija. Daugiafotonė jonizacija yra netiesinis procesas, o tokiam procesui sukelti reikia intensyvios spinduliuotės su dideliu fotonų tankiu. Priklausomai nuo lazerio spinduliuotės dažnio ir intensyvumo galimi trys jonizacijos režimai: daugiafotonė jonizacija, tunelinė jonizacija ir tarpinis režimas. Tunelinės jonizacijos metu lazerinės spinduliuotės elektrinis laukas iškreipia potencinę duobę. Režimui pasireikšti reikia nedidelio optinės spinduliuotės dažnio bet didelio intensyvumo, kuris iškreiptą potencinę duobę ir atsirastų nemaža tikimybė elektronui tuneliuoti. Daugiafotonės jonizacijos metu sugeriami daugiau nei vienas fotonas, kurių bendros energijos užtenka išlaisvinti elektroną. Tarpinės jonizacijos metu elektronas sugėręs keletą fotonų vienu metu tuneliuoja. Kuris režimas vyks galima įvertinti pagal Keldišo parametą:

$$\gamma = \frac{\omega}{e} \sqrt{\frac{mc n \epsilon_0 E_g}{I}}, \quad (1)$$

kur m ir e elektrono masė ir krūvis, ω - spinduliuotės dažnis, I - spinduliuotės intensyvumas, o E_g - draustinės energijos tarpas [9]. Apdirbant dielektrines medžiagas svarbus ne tik spinduliuotės dažnis, bet ir spinduliuotės intensyvumas. Svarbu paminėti ir smūginę jonizaciją, kurios



2 pav. Medžiagos jonizacijos režimai su būdingomis Keldišo parametro reikšmėmis: (a) tuneliavimas, (b) tarpinis režimas, (c) daugiafotonė jonizacija.

metu lazerio spinduliuotę sugėrę elektronai įgyja papildomai energijos. Tokie elektronai yra greitunami ir susidūrę su surištais elektronais gali juos išlaisvinti. Todėl net ir po sąveikos laiko su impulsu optinis pažeidimas gali didėti.

1.1.3 Abliacija pavieniais ir daugeliu impulsu

Nagrinėjant abliaciją pavieniais ar daugeliu impulsu svarbus parametras yra abliacijos slenkstis - minimali energijos tankio vertė, kuria paveikus medžiagą stebimas pažeidimas. Abliacijos slenkščio vertė priklauso nuo apdirbamos medžiagos savybių ir lazerio parametrų. Ultratrumpųjų impulsų pagalba medžiagos spinduliuotės poveikio zona yra mažesnė nei ilgesnių impulsų, todėl didesnė dalis energijos yra sugerama mažesniame medžiagos tūryje, abliacija yra efektyvesnė bei jos slenkstis yra žymiai mažesnis nei nanosekundinių impulsų. Galima padaryti labai tikslūs darinius, tačiau gaunamas taško dydis yra ribojamas Gauso pluošto difrakcijos.

Apdirbimo tikslumas, veikiant medžiagą lazerio Gauso pluoštu, priklauso nuo tokių parametrų: abliacijos slenkščio F_{th} , Gauso pluošto sąsmaukos radiusas ω_0 ($1/e^2$ lygyje), energijos tankio pluošto centre F_0 . Energijos tankis pluošto centre ir impulso energija siejama sąryšiu:

$$F_0 = \frac{2E_p}{\pi\omega_0^2}. \quad (2)$$

Abliacijos slenkščio radimui reikalingas išgarintos medžiagos kraterio diametras, kuris priklauso nuo abliacijos slenkščio ir energijos tankio pluošto centre:

$$D^2 = 2\omega_0^2 \ln \left(\frac{F_0}{F_{th}} \right). \quad (3)$$

Galima nagrinėti du abliacijos tipus: švelnią ir grubią abliacijas. Švelnios abliacijos sparta yra maža bei priklauso nuo spinduliuotės įsiskverbimo gylio α^{-1} , kur α - atitinkamam bangos ilgiui medžiagos sugerties koeficientas. Mažiams intensyvumams vieno impulso abliacijos gylis L apskaičiuojamas:

$$L = \alpha^{-1} \ln \left(\frac{F_0}{F_{th}^\alpha} \right), \quad (4)$$

kur F_{th}^α yra švelnios abliacijos slenkstis. Didesniems intensyvumams, kur $F_0 > 1 \text{ Jcm}^{-2}$ priklausomybė:

$$L = \gamma^{-1} \ln \left(\frac{F_0}{F_{th}^\gamma} \right), \quad (5)$$

kur γ elektronų šiluminės difuzijos ilgis, o F_{th}^γ grubios abliacijos slenkstis [10].

Medžiaga, paveikta keletu didelės energijos impulsų, pažeidžiama daug mažesniu intensyvumu, nei vieno impulso abliacijos slenkstis. Kiekvienas lazerio impulsas paveikiantis tą pačią vietą sukelia struktūrinius ar cheminius pokyčius, kurie mažina abliacijos slenkstį [11]. Inkuba-

cija aprašo pažaidos akumuliacijos mechanizmą, dėl kurio būtent ir mažėja abliacijos slenkstis. Pagal inkubacinį modelį abliacijos slenkstis kaip funkcija nuo impulsų skaičiaus aprašomas:

$$F_{th}(N) = F_{th}(1)N^{(S-1)}, \quad (6)$$

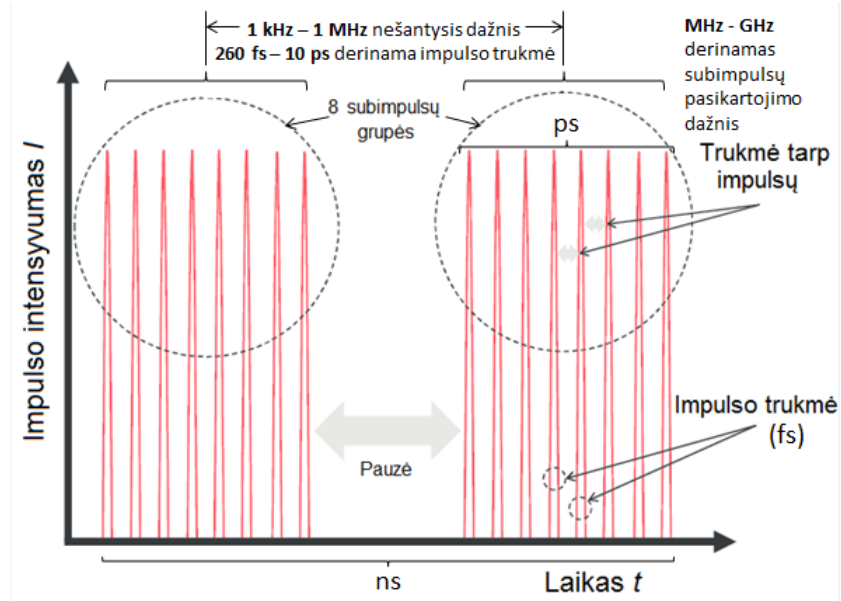
kur N - impulsų skaičius, o S - akumuliacijos koeficientas, kurio vertės $0 < S \leq 1$. Jei $S = 1$, tai inkubacija nevyksta ir abliacijos slenkstis nepriklauso nuo impulsų skaičiaus. Mažėjant akumuliacijos koeficientui inkubacijos efektas didėja.

Naudojant didelės vidutinės galios ir didelio pasikartojimo dažnio spinduliuotę stebimi du efektai: šilumos akumuliacija ir dalelių ekranavimas. Dėl šilumos akumuliacijos padidėja paviršiaus temperatūra, tai gali turėti teigiamą ir neigiamą efektą abliacijai. Kai paviršiaus temperatūra aukštesnė reikia mažiau energijos išgarinti medžiagai, dėl to didėja efektyvumas. Tačiau šis poveikis galimai pervertintas, nes savitoji lydymosi šiluma yra ne daug žemesnė už daugumos metalų savitąją garavimo šilumą. Jei impulsas paveikia visiškai išsilydžiusį paviršių, tai medžiagos išgarinimui reikia tik 10% mažiau energijos [12]. Šis šilumos akumuliacijos efektas yra nepageidaujamas dėl neigiamo lydymosi poveikio, kuris daro įtaką apdirbimo kokybei. Tačiau didėjant paviršiaus temperatūrai sumažėja paviršiaus atspindžio koeficientas ir padidėja sugertis [13]. Stebimas dalelių ekranavimas elgiasi priešingai - žymiai sumažina paviršių veikiančią impulsų energiją, nes ji yra sugerama ankstesnio impulso sužadintos medžiagos dalelėse ir lašeliuose. Šilumos akumuliacija skirtingoms medžiagoms pasireiškia esant skirtingiems lazerio pasikartojimo dažniams. Apdirbant stiklą fs impulsais akumuliaciniai efektai pasireiškia, kai lazerio pasikartojimo dažnis yra apie 200 kHz [14]. Apdirbant epoksidinius dažus ns impulsais šilumos akumuliacija prasideda nuo 10 kHz dažnio [15]. Taigi naudojant daugiau nei vieną impulsą apdirbimui prasideda šilumos akumuliacija, kuri vienais atvejais gali pagerinti apdirbimo efektyvumą lyginti su pavieniu impulsų apdirbimu, kitais atvejais pabloginti.

1.2 Impulsų vorų sąveika su medžiaga

1.2.1 Papliūpų režimo lazerinė abliacija

Nagrinėjant apdirbimą daugeliu impulsu svarbus atradimas įvyko daugiau nei prieš dešimtmetį - buvo sukurtas papliūpų režimas. Šio režimo metu generuojami impulsai, kurie yra padalinti į tam tikro dažnio ir energijos subimpulsus, kitaip vadinamus impulsų voromis, kurių pagalba buvo pašalintas neigiamą poveikį turintis šilumos kaupimasis, darantis įtaką mikroįtrūkimų atsiradimui ir lydymuisi. Atrasta dar viena preciziško apdirbimo technologija - papliūpų režimo lazerinė abliacija, kitaip vadinama šaltoji abliacija. Turint didelio pasikartojimo dažnio (>100 kHz) impulso voras taip pat galima kontroliuoti terminius ir kitus relaksacijos procesus. Generuoti impulsų voras galima skirtingais būdais: impulsų atrankos metodu panaudojant akustoptinį arba elektrooptinį moduliatorių [17], padalinant lazerio impulsus į subimpulsus



3 pav. Schematinis papliūpų režimo atvaizdavimas su tipiniais parametrais. [16]

Maikelsono interferometro principu [18] bei naudojant kitus metodus.

1.2.2 Burst tipo impulsų apdirbimo efektyvumas

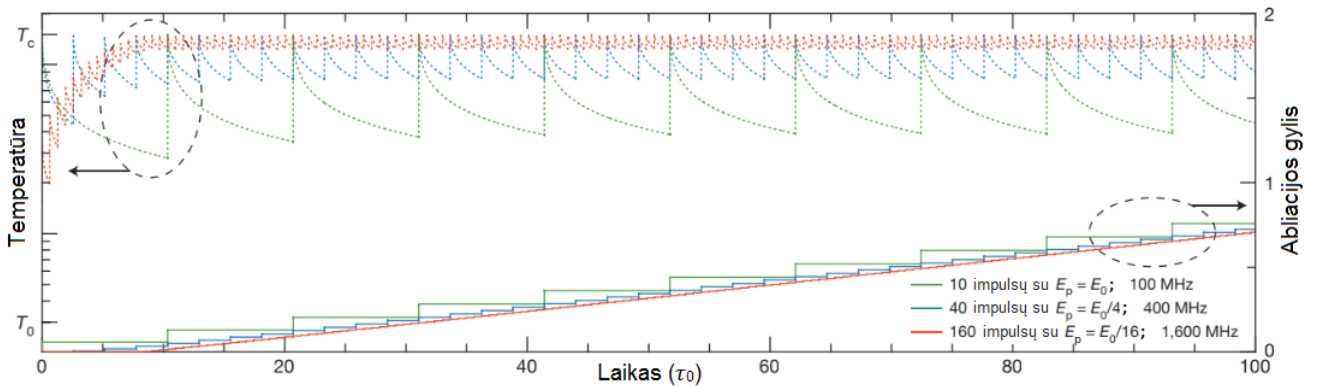
Viename pirmųjų tyrimų, parodžiusių, kad papliūpų režimas yra efektyvesnis, šaltosios abliacijos režimas buvo paašškintas remiantis žaislo modeliu (angl. toy model) [19]. Laikykite, kad kiekvienas impulsas sukelia temperatūros pokytį ΔT , kuris yra proporcingas impulso energijai E_p , o medžiaga šąla su šia priklausomybe - $1/\sqrt{1+t/\tau_0}$, kur t - laiko tarpas po sąveikos su impulsu, τ_0 - terminė relaksacija. Bandinio paviršiaus temperatūra po $(n+1)$ impulsų yra $T_{n+1} = T_n + \delta T$, kur $\delta T = \Delta T/\sqrt{1+\tau_R/\tau_0}$ parodo mažą bandinio temperatūros padidėjimą po vieno impulso, o τ_R yra atvirkštinis dydis pasikartojimo dažniui. Abliacija vyksta tuomet, kai temperatūra pasiekia kritinę T_c vertę. Tradiciniam abliacijos režimui pasikartojimo dažnis yra žemas ir kiekvienas impulsas turi pakankamai energijos sukelti abliaciją. Šaltosios abliacijos režimas vyksta, kai subimpulsų periodas yra mažesnis už relaksacijos laiką $\tau_R \leq \tau_0$. Šiame režime energija pavienių impulsų gali būti mažesnė nei abliacijos slenkstis. Kiekvienas lazerio impulsas paveikiantis tą pačią vietą sukelia struktūrinius ar cheminius pokyčius, kurie mažina abliacijos slenkstį [11]. Abliacija prasideda po m -tojo impulso, kur $m = (T_c - T_0 - \Delta T + \delta T)/\delta T$. Terminės energijos, kuri pasiskirsto bandinyje šaltosios abliacijos metu išraiška:

$$E_{heat} = \alpha(T_c - T_0) \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \tau_r/\tau_0}} \right) (N - m)E_p + \alpha(\Delta T - \delta T)mE_p. \quad (7)$$

Tradiciniame režime rezultatas artėja prie ribos:

$$\lim_{T_R \rightarrow \infty} E_{heat} = \alpha(T_c - T_0)NE_p. \quad (8)$$

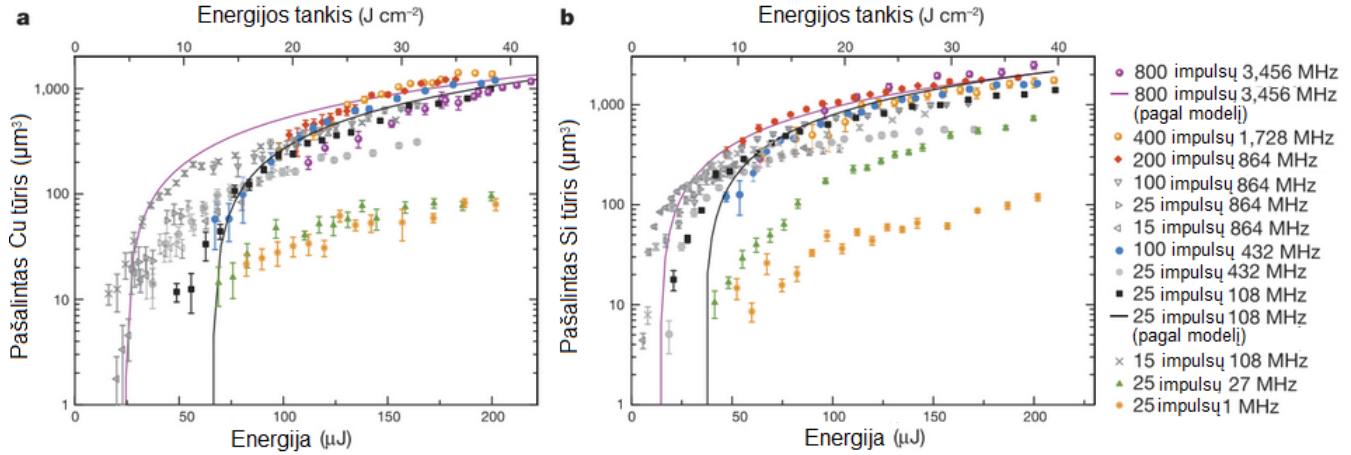
Remiantis šiuo modeliu gaunamos dvi hipotezės. Viena iš jų teigia, kad augantis pasikartojimo dažnis mažina nepaveiktos bandinio zonos šilumą, o tradiciniu abliacijos metodu nemaža dalis energijos sunaudojama šilumos difuzijai, todėl teigiama, kad papliūpų režime abliacijos efektyvumas yra didesnis. Antroji teigia, kad impulsų energija gali būti sumažinta, jei proporcingai padidinamas impulsų skaičius, taip neprarandant abliacijos efektyvumo. Iškeltooms hipotezėms



4 pav. Apskaičiuotas paviršiaus temperatūros bei nuabliuotos medžiagos kiekio kitimas esant skirtingam lazerio spinduliuotės pasikartojimo dažniui: 10 MHz (žalia linija), 400 MHz (mėlyna linija) ir 1600 MHz (raudona linija). [19]

įrodyti pirmiausia buvo matuojamos bandinio ir abliacijos metu pašalintos medžiagos temperatūros. Eksperimentui buvo naudojami $30\mu\text{J}$ energijos 800 fs trukmės impulsai su impulsų vorų pasikartojimo dažniu 0,2 MHz, subimpulsų dažniu 1,7 GHz, o tradicinio režimo abliacijai pasikartojimo dažnis 10 MHz. Iš gautų temperatūrų buvo gauta išvada, kad šaltosios abliacijos režimo metu bandinys šyla mažiau nei tradicinės abliacijos metu, nes didesnė dalis šilumos pašalinama kartu su išgarinta medžiaga. Remiantis modeliu buvo atlikti eksperimentai su vario ir silicio bandiniais. Bandiniai buvo apdirbami skirtingo pasikartojimo dažnio impulsų voromis. Pastebėta, kad abliacijos efektyvumas žymiai padidėja naudojant 100 MHz ar didesnio dažnio impulsus.

Sąveikai su impulsų voromis tyrinėti buvo atliekama ir daugiau bandymų. Naudojant 10 ps trukmės 1064 nm bangos ilgio impulsus su 20 ns vėlinimu tarp subimpulsų Knappe su kolegomis įrodė, kad įmanoma gauti didesnę abliacijos greitį nei pavieniais impulsais [20]. Bandiniai buvo apdirbami pašalinant (2×2) mm² tūrio medžiagą. Ta pati 50 W vidutinė lazerio galia buvo naudojama tiek paviniams impulsams, tiek papliūpų režimo impulsams. Rezultatai parodė, kad išskirsčius impulso energiją į daugiau impulsų galima padidinti abliacijos greitį tokioms medžiagoms kaip plienas, silicis ir volframo karbidas. Taip pat buvo pastebėta, kad didinant



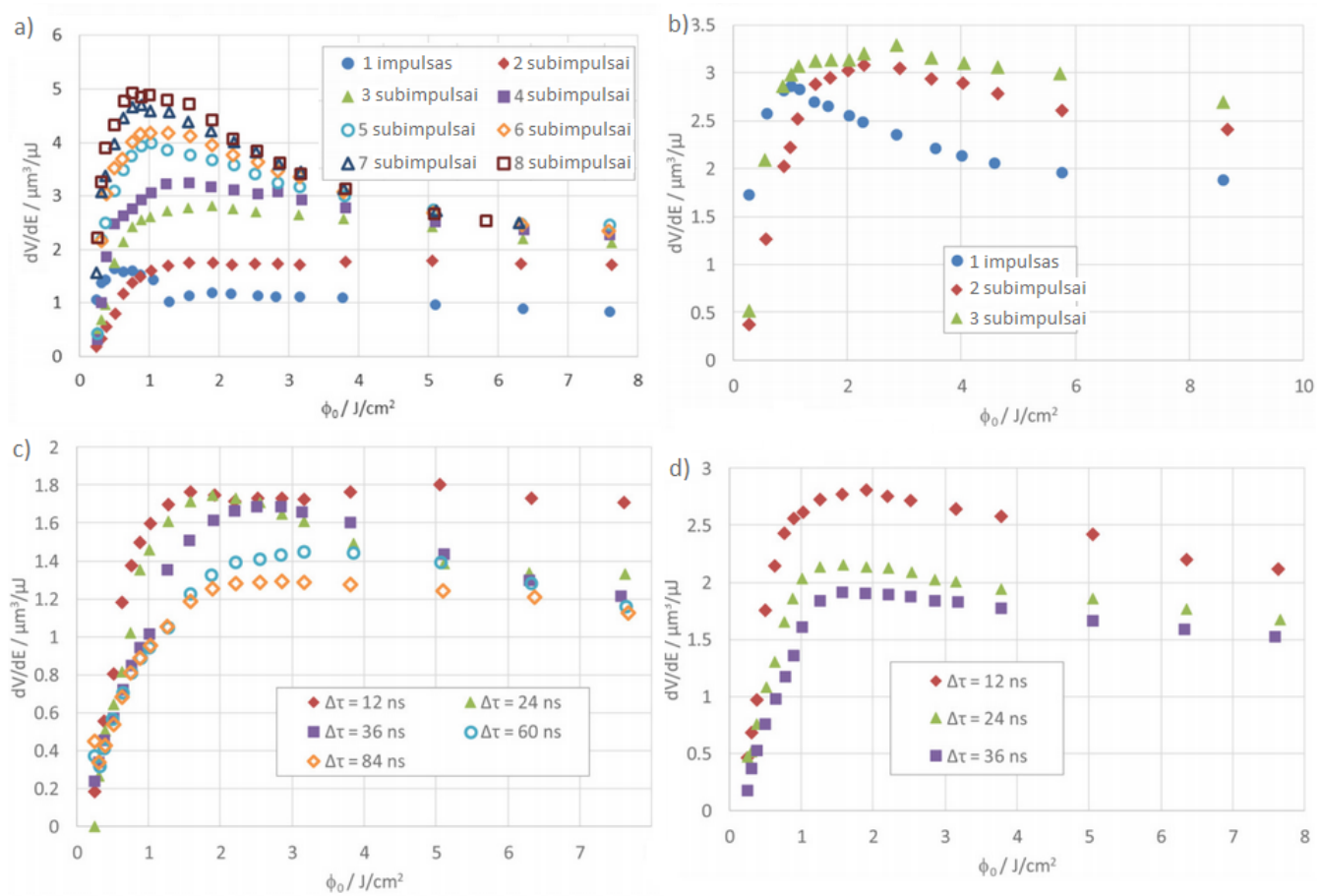
5 pav. Pašalintų Cu (a) ir Si (b) medžiagų tūrių, esant skirtingiems subimpulsų dažniams, priklausomybė nuo energijos ir energijos tankio. [19]

subimpulsų kiekį didėja ir pašalinamos medžiagos kiekis. Autoriai iškėlė idėją, kad egzistuoja maksimalus naudingas subimpulsų kiekis, kurį viršijant šilumos kaupimasis neigiamai veikia abliacijos greitį.

Förster su kitais kolegomis pastebėjo, kad naudojant trumpesnį nei 20 ns vėlinimą tarp subimpulsų susidaro ekranavimo efektas [21]. Jie tyrinėjo vario abliaciją apdirbant 532 nm bangos ilgio ir 10 ps impulso trukmės subimpulsais. Eksperimentui buvo naudojamos 2 ir 3 subimpulsų voros, tarp subimpulsų vėlinimo trukmė 12,2 ns. Ant objekto suformuoto šešėlio (angl. shadowgraphic) eksperimentų pagalba buvo tyrinėjamas abliacijos mechanizmas ir dinamika. Rezultatai parodė, kad pirmojo impulso pašalinta medžiaga ekranuoja antrąjį subimpulsą, o trečiasis subimpulsas, esantis tokios pat energijos kaip ir pirmieji, sukelia tolimesnę medžiagos abliaciją. Abliacijos proceso nuotraukos fiksuotos su 10 ns užlaikymu parodė, kad keletą nanosekundžių po antrojo subimpulso spinduliuojama intensyvi šviesa virš tankaus debesies. Šį efektą sukėlė išabliuotos medžiagos debesies sugertas antrasis impulsas, kuris paskatino plazmos sušilimą. Padidėjus slėgiui dalis debesyje esančios medžiagos nusodinamos atgal ant bandinio. Trečiasis impulsas praėjus 40 ns po pirmojo impulso sąveikos su bandiniu taip pat sukelia abliacijos debesį. Šis pašalintos medžiagos debesis gaunamas didesnis nei gauti naudojant mažiau impulsų, tai parodo, kad naudojant 3 subimpulsus pašalinama daugiau medžiagos. Autoriai šį rezultatą įvertino kaip abliacijos slenksčio mažėjimą.

Nueunschwander su kolegomis taip pat atliko tyrimus, eksperimentams buvo naudojamas silicis ir varis [22]. Tyrimai buvo atlikti naudojant 1064 nm bangos ilgio spinduliuotę, bei jos antrąją harmoniką 532 nm. Impulsų trukmė 10 ps, vėlinimas tarp subimpulsų 12 ns. Energijos kiekio, kuriuo yra veikiamas bandinys E_{in} , bei šios energijos dalies pasiliekančios medžiagoje E_{res} santykis yra proporcingas bandinyje likusiai šilumai, kuri apibūdinama $\eta_{res} = E_{res}/E_{in}$. Apdirbant varį 1064 nm bangos ilgio spinduliuote abliacijai buvo naudojami pavieniai impulsai

bei impulsų voros su 2 ir 3 subimpulsais. Įvertinus bandinyje pasilikusią šilumą, buvo pastebėta, kad mažiausia šiluma gaunama esant vienam impulsui. Spėjama, kad apdirbant papliūpomis



6 pav. dV/dE priklausomybė nuo energijos įtėkio verčių (Siliciui) esant skirtingiems kiekiams subimpulsų, kai spinduliuotės bangos ilgis a)1064 nm; b)532 nm. dV/dE priklausomybė nuo energijos įtėkio verčių (Siliciui) esant skirtingam laiko tarpui tarp subimpulsų, kai apdirbimui naudojami c)2 subimpulsai; d)3 subimpulsai ir 1064 nm spinduliuotė. [22]

su antruoju subimpulsu pašalinta medžiaga yra gražinama į paveiktą zoną dėl to η_{res} vertės šiek tiek padidėja apdirbant 2 ir 3 subimpulsais. Apdirbant varį antrąja harmonika situacija panaši, daugiausia medžiagos pašalinama naudojant vieną impulsą. Abliacijai naudojant impulsų voras su dviem subimpulsais pašalintos medžiagos tūris per energijos vienetą sumažėja daugiau nei 50%, o naudojant 3 subimpulsus padidėja, tačiau efektyvumas mažesnis nei apdirbant vienu impulsu. Paveikiant medžiagą dviem subimpulsais pirmojo sukelta plazma daro įtaką antrojo subimpulso medžiagos poveikiui. Plazma turi du efektus antrajam subimpulsui. Pirmasis padidina antrojo subimpulso sugertį, o kitas efektas blokuoja antrąjį subimpulsą dėl didelio plazmos atspindžio koeficiento. Balansas tarp šių efektų stipriai priklauso nuo impulso parametrų apdirbant skirtingas medžiagas [23]. Tyrinėjant silicį gauta kitokia situacija - esant lazerio spinduliuotės bangos ilgiui 1064 nm didėjant subimpulsų skaičiui didėja ir abliacijos

metu pašalinamos medžiagos kiekis, esant 2 subimpulsams $1,6 \mu\text{m}^2/\mu\text{J}$, o 8-niems $4,9 \mu\text{m}^2/\mu\text{J}$. Analogiškai rezultatai gauti naudojant 532 nm bangos ilgio spinduliuotę, tik šiuo atveju naudojant pavienius impulsus ir impulsus turinčius 2 subimpulsus pašalintos medžiagos kiekis gautas gerokai didesnis, nei naudojant 1064 nm spinduliuotę. Iš nagrinėtos pašalintos medžiagos kiekio priklausomybės nuo trukmės tarp subimpulsų, iš priklausomybių (6 pav. (c)(d)) matoma, kad kuo trukmė yra mažesnė tuo daugiau medžiagos pašalinama.

1.3 Abliacija dvigubais skirtingų parametrų impulsais

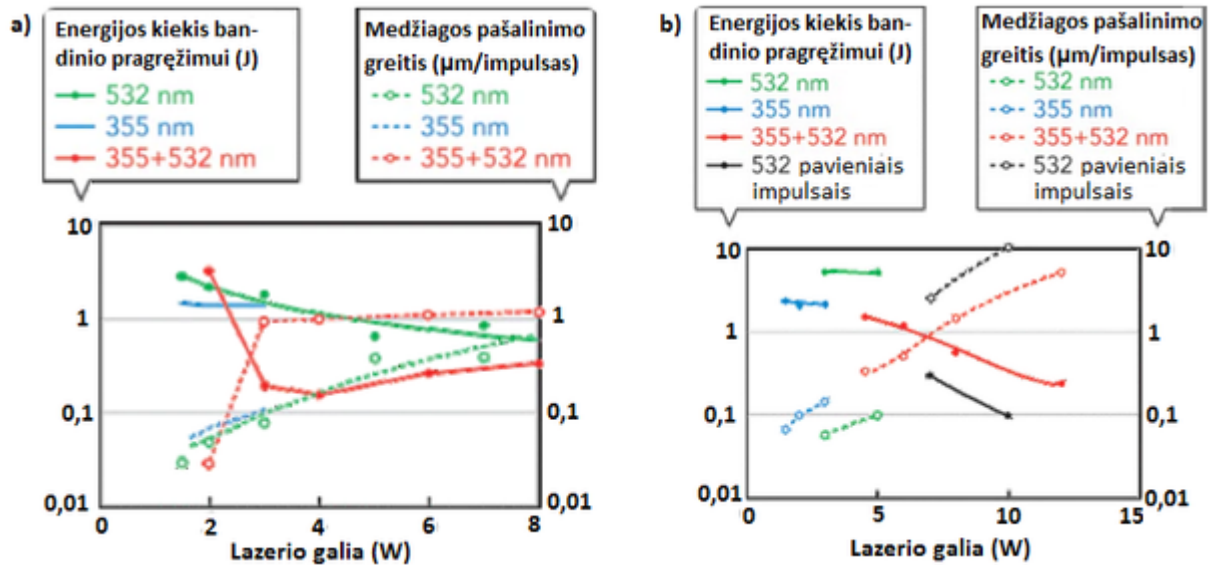
Abliacijos efektyvumui pagerinti naudojama ir dvigubų impulsų lazerinė abliacija. Šiuo būdu du skirtingų parametrų impulsai parinkus tam tikrą vėlinimą suvedami bei sufokusuojami ant apdirbamo bandinio. Panagrinėkime du atvejus, kai naudojamų impulsų bangos ilgiai yra skirtingi ir kai skirtingos impulsų trukmės.

1.3.1 Medžiagų apdirbimas dvigubais skirtingo bangos ilgio impulsais

Naudojant pirmąjį impulsą trumpo bangos ilgio, o antrąjį ilgo galima apdirbti medžiagas, kurios yra jautrios trumpabangiams impulsams naudojant mažesnę vidutinę galią. Taip yra gaunamas didesnis abliacijos greitis bei kokybė. Viena iš eksperimentų buvo naudojama antroji (532 nm) bei trečioji (355 nm) Nd:YAG lazerio harmonikos [24]. Pirmasis 4 ns trukmės impulsas veikiantis medžiagą 355 nm bangos ilgio, o vėlinimas tarp impulsų 80 ns. Bandy-mo metu buvo skaičiuojamas laikas per kurį 40 μm diametro pluoštas išgręš skylę bandinyje. Turint gręžimo trukmes apskaičiuotas medžiagos pašalinimo kiekis per impulsą bei energijos kiekis reikalingas pragręžti skylę. Pirmajam eksperimentui buvo naudojama 0,5 mm storio nerūdijančio plieno plokštelė. Iš rezultatų (7 pav.(a)) matyti, kad naudojant dviejų bangos ilgių spinduliuotę pragręžti galima žymiai greičiau. Ištirtas ir plastiko apdirbimas panaudojant 1 mm storio polietileno bandinį, kurio sugertis didesnė ties 355 nm bangos ilgiu, nei ties 532 nm. Apdirbus bandinį dvigubais impulsais plastiko apdirbimui geriausios kokybės ir efektyviausias apdirbimas gautas naudojant dviejų bangos ilgių impulsus. Palyginimui polietileno bandinys buvo apdirbtas pavieniais 532 nm impulsais, šiuo atveju medžiagos pašalinimo greitis didesnis, tačiau gaunama didesnė šilumos paveikta zona dėl kurios prastėja apdirbimo kokybė. Iš techninės pusės pastebėta, kad labai svarbu gerai sufokusuoti abi spinduliuotes, židinio plokštumos turi persikloti bent 90%.

1.3.2 Medžiagų apdirbimas dvigubais skirtingos trukmės impulsais

Medžiagų pašalinimo mechanizmas stipriai priklauso nuo impulso trukmės. Kaip jau aptar-ta trumpiems sąveikos laikams femtosekundinių impulsų abliacijai būdingas tiesioginis metalo-garų fazinis perėjimas ir femtosekundiniame apdirbimo režime galima apdirbti medžiagas labai tiksliai su minimaliu terminiu poveikiu [25]. Pramonės poreikiams fs impulsų našumas yra per



7 pav. Dvigubais skirtingo bangos ilgio impulsais apdirbtų a) 0,5 mm nerūdijančio plieno; b) 1 mm storio polietileno bandinių rezultatai. Ištiesos linijos žymi bandiniui pragręžti reikalingą energijos kiekį. Brūkšninės linijos žymi vidutinį medžiagos pašalinimo greitį. b) grafike juodomis linijomis pažymėtos pavienių impulsų priklausomybės. [24]

mažas, todėl dažniau naudojami ns impulsai. Tačiau susiduriama su problema, kai norima apdirbti dielektrines medžiagas, ns impulsai nėra tam tinkami. Norėdami padidinti dielektrinių medžiagų apdirbimo efektyvumą Lin ir Rao su kitais kolegomis nusprendė patyrinėti dvigubų skirtingos trukmės impulsų poveikį dielektrikams [26]. Fs-ns apdirbimo sistemai buvo naudojami 800 nm 120 fs Ti:safyro lazeris ir 355 nm 30 ns kieto kūno lazeris. Naudota tyrimui dielektrinė medžiaga - lydytas kvarcas. Eksperimento metu bandinys buvo apdirbtas pavieniais fs impulsais, pavieniais ns impulsais bei dvigubomis fs-ns impulsų poromis tarp kurių buvo keičiamos vėlinimo trukmės: +60 ns, +30 ns, 0 ns, -30 ns, -60 ns. Neigiami vėlinimo laikai parodo, kad pirmiausia medžiagą paveikia ns impulsas, o po to fs, teigiami - atvirkščiai. Nustatyta, kad maksimali abliacija gaunama, kai fs impulsas persikloja su ns impulso smaile. Palyginus rezultatus su pavieniais fs impulsais abliacijos gylis padidėja 13,4 karto, pašalintos medžiagos kiekis net 50,7 karto. Femtosekundinis impulsas padidinta laisvųjų elektronų tankį ir keičia lydyto kvarco savybes dėl to padidėja sugertis.

1.4 Pavienių impulsų ir impulsų vorų apdirbimo efektyvumo apibendrinimas ir problematika

Pramonės gamyboje apdirbimui naudojant lazerius labai svarbus yra proceso efektyvumas, darbo sąnaudos ir pan. Renkantis apdirbimo technologiją svarbu įvertinti esamas technologijas ir tinkamai pasirinkti. Tam tikruose pritaikymuose, tokiuose kaip medicinoje labai svarbi lazerinio apdirbimo sukelta šilumos paveikta zona, ją stengiamasi gauti kuo mažesnę, kad nepažeisti

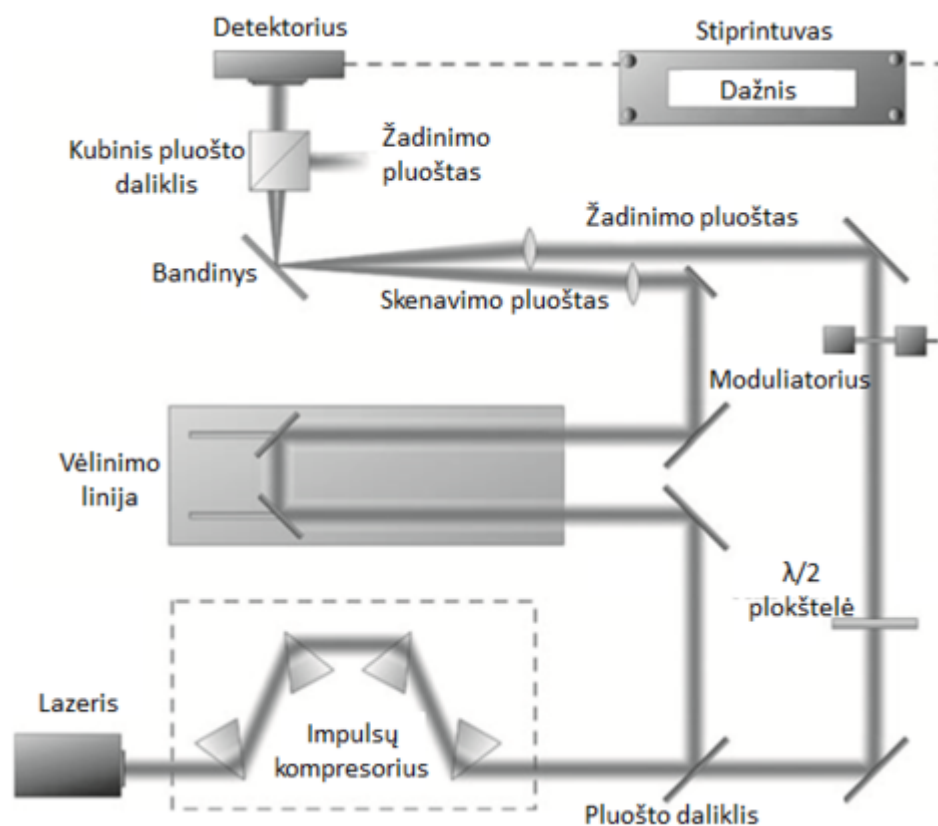
aplinkinių audinių. Apdirbimo efektyvumą ir preciziškumą galima kontroliuoti renkantis apdirbimo metodus, ankstesniuose šio darbo skyriuose panagrinėjome abliaciją naudojant pavienius impulsus ir impulsų voras. Išnagrinėjus publikacijų šia tematika nėra visiškai aišku kokį metodą reikia pasirinkti, norint padidinti abliacijos efektyvumą. Vienuose straipsniuose teigiama, kad naudojant impulsų voras abliacijos efektyvumas pagerėja [19], kituose teigiama, kad esant tam tikram skaičiui subimpulsų abliacijos efektyvumas mažesnis palyginus su pavienių impulsų apdirbimu [21] [22]. Abliacijos efektyvumo pagerinimui didelę įtaką turi ir apdirbama medžiaga, kiekvienai medžiagai reikalingas skirtingas subimpulsų pasikartojimo dažnis. Impulso vora sukelia skirtingus efektus: varį apdirbant, kai yra užlaikymas 12 ns, antrasis subimpulsas veikia plazmos debesėlį, esant didesniai užlaikymui 20 ns subimpulsas sąveikauja su paveikta medžiaga. Silicij apdirbant ir ties 12 ns vėlinimu subimpulsas sąveikauja su paveikta medžiaga. Sunku prognozuoti ties kokiais subimpulsų pasikartojimų dažniais skirtingoms medžiagoms bus stebimas geriausias abliacijos efektyvumas, o ties kuriais plazmos sugertis. Taip pat nėra aišku kaip medžiaga elgiasi paveikiama skirtingų konfigūracijų impulsų voromis. Apdirbimo impulso voromis tematika dar yra plačiai nagrinėjama, atliktų eksperimentų nėra daug, taip pat nėra aišku kaip kinta bandinio temperatūra papliūpų režimo metu. Šią sritį galima plačiau panagrinėti atlikus detalesnius sąveikos tyrimus, sugerties pokyčių matavimus bei jų priklausomybę nuo trukmės tarp impulsų.

1.5 Paviršinio medžiagos pažeidimo dinamikos tyrimo metodika

1.5.1 Žadinimo-zondavimo spektroskopijos principas

Žadinimo-zondavimo spektroskopiniai metodai yra gan paprasti norint atlikti ultragreitus optinius matavimus su femtosekundine skyra. Matavimo metu naudojamas didelio intensyvumo žadinantis impulsas, kuris sužadina bandinį, tuomet po kurio laiko mažo intensyvumo zondavimo impulsu matuojami bandinio pokyčiai. Pokyčiai gali būti matuojami registruojant bandinio pralaidumą arba atspindį. Žadinimo-zondavimo spektroskopijos metodas leidžia apieiti elektronikos atsako laiko ribojimus ir matavimus atlikti aukšta laikine skyra, kuri priklauso nuo impulso trukmės.

Principinė žadinimo-zondavimo ultratrumpaisiais impulsais schema, skirta matuoti bandinio atspindžio skirtumui pateikta 8 pav. Lazerio pluoštas pirmiausia sklinda per dviejų arba keturių prizmių sistemą, tam kad būtų gauta reikalinga anomali dispersija, kompensuojanti optikos elementų įnešamą normalią dispersiją. Tai garantuoja mažiausią žadinimo ir zondavimo impulsų laikinį plotį ties bandiniu. Toliau sklindantis pluoštas pluošto daliklio pagalba yra padalinamas į du. Praėjęs pro daliklį žadinimo pluoštas yra didesnės galios ir yra naudojamas bandinio sužadimui. Atsispindėjęs pluoštas vadinamas zonduojančiu ir naudojamas tirti bandinio elektroninei konfigūracijai tam tikru vėlinimo laiku, priklausančiu nuo atstumo tarp žadinančio ir zonduojančio pluošto. Žadinančio pluošto poliarizacija su $\lambda/2$ plokštele pasukama



8 pav. Principinė žadinimo-zondavimo schema, skirta matuoti bandinio atspindžio skirtumui. [27]

tam kad būtų statmena zondavimo pluoštui. Optinis modulatorius žinomu dažniu moduliuoja žadinimo pluoštą. Toliau pluoštui ant tiriamo bandinio sufokusuoti naudojamas lęšis arba parabolinis veidrodis, norint išvengti dispersijos. Zonduojančio pluošto galia turi būti mažesnė nei žadinančio, idealiu atveju 10 kartų mažesnė, nes labai svarbu, kad zonduojanti pluoštas nepakeistų tiriamo bandinio savybių. Zonduojantis pluoštas atsispindėjęs nuo pluošto daliklio sklinda per kintamo ilgio vėlinimo liniją. Minimalus vėlinimo linijos žingsnis ir impulso trukmė nusako tokios sistemos laikinę skyrą. Pluoštas po vėlinimo linijos sufokusuojamas ant bandinio toje pačioje vietoje kur ir žadinantis pluoštas. Jei eksperimente abu pluoštai naudojami vienodo bangos ilgio, tuomet detektorius registruos abu tiek žadinimo tiek zondavimo pluoštus atsispindėjusius nuo bandinio, o stiprintuvas neatskirs kur yra kuris, nes taip pat ir zondavimo pluoštas bus moduluojamas tuo pačiu dažniu kaip ir žadinimo. Pluoštams atskirti naudojama poliarizacinė optika, žadinančio pluošto poliarizacija yra pasukama 90 laipsnių, o po bandinio sklindančių pluoštų kelyje pastatomas poliarizacinis pluošto daliklis, kuris praleidžia zonduojantį pluoštą, o atspindi žadinantį pluoštą. Zonduojantis pluoštas registruojamas detektoriumi ir paverčiamas elektriniu signalu. Pats detektorius nebūtinai turi turėti laikinę skyrą, tik svarbu, kad galėtų atkurti signalą moduliacijos dažniu.

Norint stebėti tiriamo bandinio atspindžio pokyčius kiekvienai bandinio pozicijai atliekami du matavimai. Pirmasis matavimas atliekamas blokuojant žadinimo pluoštą, gaunama at-

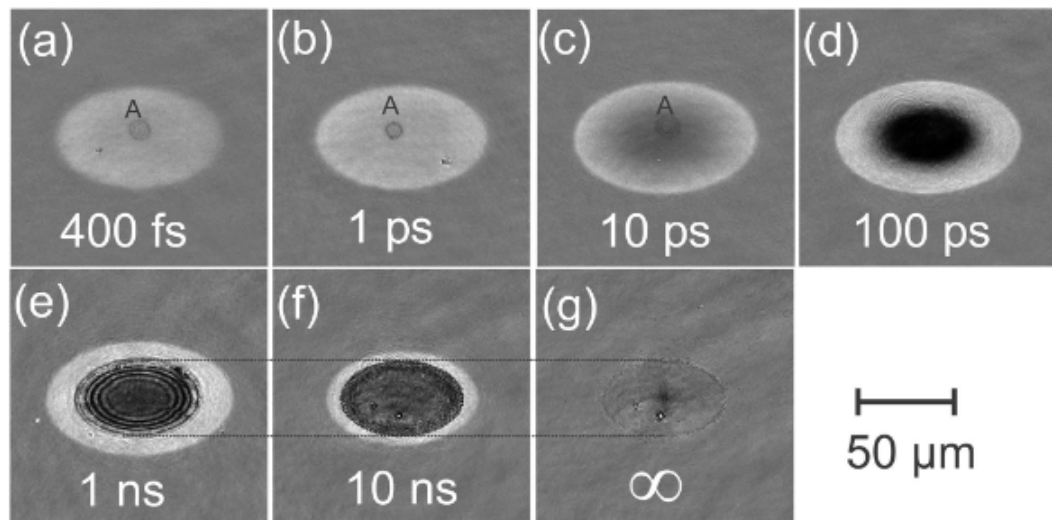
spindžio nuotrauka nesužadinto bandinio $R_0(x, y)$. O kitas matavimas atliekamas sužadintus bandinį, gaunama nuotrauka $R(\tau, x, y)$. Suskaičiuojamas normuotas atspindžio pokytis:

$$\frac{\Delta R}{R}(\tau, x, y) = \frac{R(\tau, x, y) - R_0(x, y)}{R_0(x, y)} \quad (9)$$

Normuotas pokytis suskaičiuojamas atimant nesužadinto bandinio atspindžio vertes ir normuojant į šias vertes. Taip sutvarkius gautus rezultatus atsižvelgiama į erdvinį pluošto profilį bei įvairių paviršiaus teršalų ir nelygumų sukeltą atspindį [28].

1.5.2 Žadinimo-zondavimo spektroskopijos pritaikymas pažeidimo dinamikos tyrimams

Aptartas žadinimo-zondavimo spektroskopijos metodas taikomas pažeidimo dinamikoms tirti. J. Siegel su kolegomis ištyrė germanio apdirbimą [28]. Bandymai buvo atlikti ant poliruotų kristalinių germanio plokštelių. Apdirbimui naudojamas Ti:safyro lazeris, generuojantis 130 fs trukmės 800 nm bangos ilgio impulsus. Eksperimento metu gautos fs laiko skyros nuotraukos (9 pav.) esant energijos tankiui $\Phi_0 = 3,10 \text{ J/cm}^2$. Nuotraukose (9(a-c)) matomas žiedelis pažymėtas



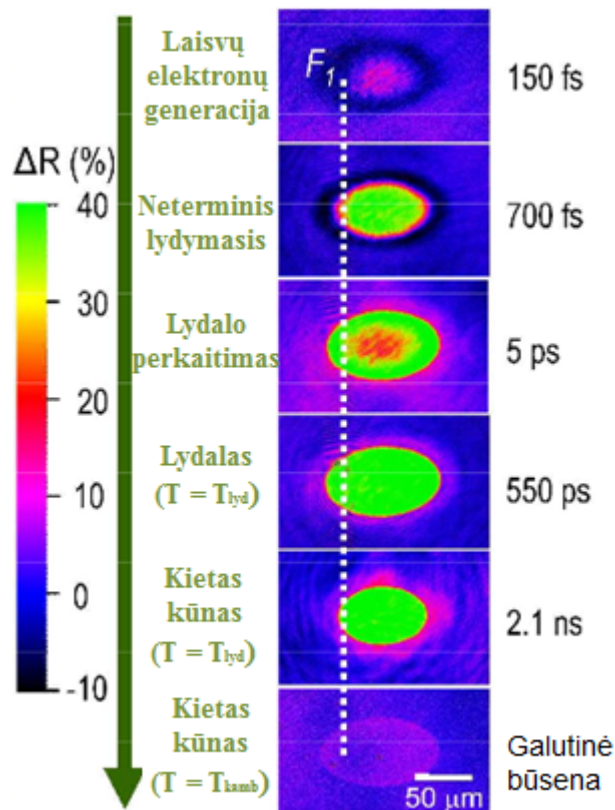
9 pav. Germanio paviršiaus nuotraukos esant skirtingiems zonduojančio pluošto vėlinimams po sužadavimo. [28]

A raide yra defektas likęs po normavimo procedūros, jis nėra susijęs su jokia fizikiniu procesu bandinio paviršiuje.

Paveikus bandinį žadinančiu impulsu, po 400 fs stebimas paviršiaus atspindžio padidėjimas ties centru. Procesas stebimas dėl elektronų sužadavimo sukeltos elektronų-skylių plazmos, kuri paveikia gardelės struktūrą. Po 1 ps visos impulsu paveiktos zonos atspindžio koeficientas padidėja iki tokios pat vertės, kaip po 400 fs stebima vertė centre, todėl gaunamas ryškus, aštoriai apibrėžtas elipsės plotas. Efektas siejamas su plono išlydyto metalinio germanio sluoksnio

formavimusi. Po 10 ps (9(c) pav.) visos zonos atspindžio koeficientas sumažėja, galimai dėl perkaitusio skysčio. Praėjus 100 ps galima pastebėti net atsirandančias tamsesnes zonas, kurios parodo, kad stipriai sumažėja medžiagos atspindys. Šis efektas parodo abliacijos pradžia. Po 1 ns atsiranda žiedai, kurie bėgant laikui iš centro slenkasi link kraštų. Stebimi žiedai susiję su interferenciniu efektu (Niutono žiedais), kuris susidaro dėl atsirandančio besiplečiančio plono abliacijos sluoksnio. Šis sluoksnis plonesnis nei prasiskverbimo gylis, todėl dalis spinduliuotės atsispindi nuo šio sluoksnio, o kita dalis nuo paviršiaus esančiu po abliacijos sluoksniu ir taip susiformuoja interferenciniai žiedai. Zonduojant po 10 ns žiedų nebesimato, galimai dėl medžiagos tankio tolygaus susiskirstymo. Tačiau vis dar stebimas didelis atspindžio koeficientas aplink paveiktą zoną, kuris parodo, kad medžiaga toje vietoje dar yra karšta. Galima pastebėti, kad išsilydęs žiedas laikui bėgant mažėja. O palyginus su liekamaisiais reiškiniais (9(g) pav.) akivaizdu, kad zonduojantis pluoštas vis dar sąveikauja su paveikta medžiaga. Sužadinus Ge plokštelę pirmiausia normuotas atspindžio koeficientas auga per pirmąsias pikosekundes, tuomet iki 100 ps ima kristi, o po to vėl atspindys ima didėti ties nanosekundėmis.

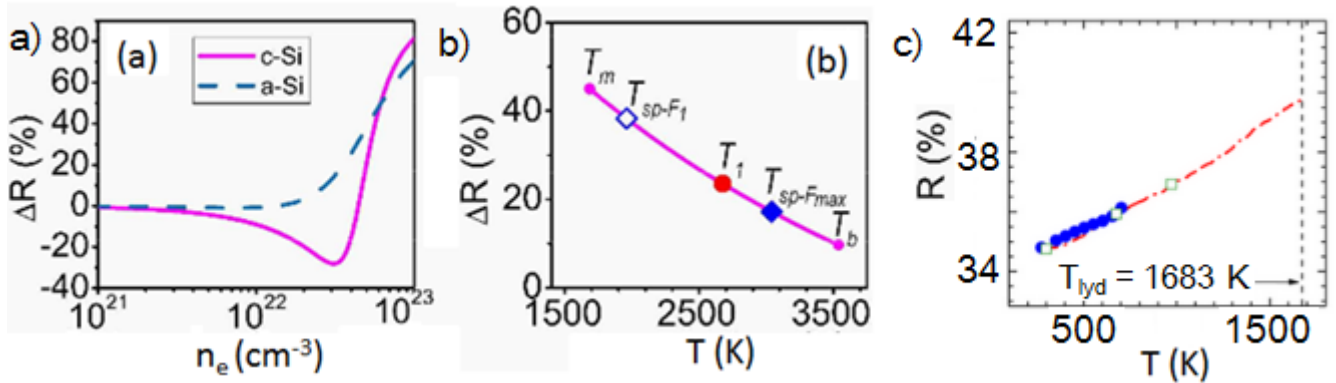
J. Siegel su kolegomis taip pat ištyrė ir silicio apdirbimo dinamiką pavieniais impulsais [29]. Tyrimas buvo atliktas panaudojant Ti:safyro lazerį, kuris spinduliuoja 120 fs trukmės ir 800 nm



10 pav. Nestruktūrizuoto kristalinio silicio paviršiaus nuotraukos esant skirtingiems zonduojančio pluošto vėlinimams po sužadavimo. [29]

bangos ilgio impulsus. 10 paveiksle pateikta sužadinto silicio abliacijos dinamika zonduojant

bandinį skirtingomis vėlinimo trukmėmis. Praėjus 150 fs po sužadavimo nežymiai padidėja atspindžio koeficientas. Šis optinis medžiagos atsakas stebimas dėl laisvų krūvininkų generacijos, kurią sukelia didelis lazerio intensyvumas. Pasinaudojant Drude modeliu buvo apskaičiuota

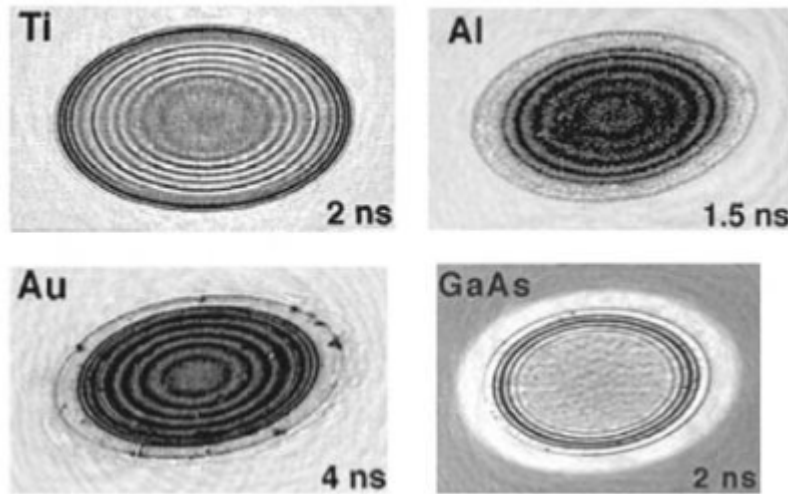


11 pav. a) Pagal Drude modelį suskaičiuoto paviršiaus atspindžio koeficiento priklausomybė nuo elektronų tankio (c-Si kristalinio silicio; a-Si amorfinio silicio); b) Išlydyto silicio atspindžio koeficiento priklausomybė nuo lydalo temperatūros [29]; c) Kristalinio silicio atspindžio koeficiento priklausomybė nuo temperatūros zondavimo pluošto bangos ilgiui $\lambda = 632,8$ nm, temperatūrų intervale nuo kambario temperatūros iki lydymosi [30].

kristalinio silicio paviršiaus atspindžio koeficiento priklausomybė nuo laisvų elektronų tankio n_e . Rezultatai pateikti 11(a) paveiksle parodo pradinį atspindžio sumažėjimą, o po to staigų padidėjimą ties kritiniu elektronų tankiu. Pagal grafiką galima nustatyti, kad pažeidimo centre elektronų tankis $n_e = 4 \times 10^{22}$ cm^{-3} , o sumažėjusio atspindžio žiede $n_e = 1 \times 10^{22}$ cm^{-3} . Po 700 fs stebimas itin didelis atspindžio padidėjimas, kuriam daro įtaką nestabilios gardelės sukeltas neterminis lydymasis. Kai zondavimo vėlinimas yra 5 ps galime pastebėti atspindžio koeficiento sumažėjimą, tačiau tai neparodo paviršiaus abliacijos, nes ilgesniam vėlinimui esant dar nėra suformuotas krateris, o atspindžio koeficientas atsistato. Šis atspindžio sumažėjimas parodo aukštos temperatūros lydala, stebimas efektas panašus į procesus kai yra kaitinamas metalas. Šiam efektui panagrinėti panaudotas modifikuotas Drude modelis, jo pagalba nustatyta atspindžio koeficiento priklausomybė nuo temperatūros. 11(b) paveiksle pavaizduota ši priklausomybė nuo lydymosi temperatūros (T_m) iki garavimo (T_b) temperatūros. Jei naudojamas energijos tankis $F_1 = 170$ mJ/cm^2 tuomet gaunama 280 K (T_{sp-F_1}) aukštesnė temperatūra nei lydymosi, jei $F_{max} = 240$ mJ/cm^2 - 1360 K ($T_{sp-F_{max}}$) aukštesnė už lydymosi, bet vis dar žemesnė už garavimo, todėl medžiagoje krateris esant ir tokiai įtėkio vertei nesusiformuoja. Bėgant laikui bandinys vėsta, o vėsimas greitis priklauso nuo pluošto parametrų. Ties 550 ps vėlinimu medžiaga dar yra lydalo fazėje ties lydymosi temperatūra, o esant 2,1 ns vėlinimui medžiaga sukietėja, galiausiai atšąla iki kambario temperatūros.

Dar viename tyrime eksperimentas buvo atliktas naudojant 100 fs trukmės 620 nm bangos ilgio žadinimo spinduliuotę [31]. Eksperimente buvo atlikti bandymai ne tik silicio medžia-

gai bet ir plonomis plėvelėms (Ti, Al, Au ir GaAs) bei stebimi pokyčiai praėjus 1,5-4 ns po žadinančio impulso poveikio medžiagai. Eksperimente stebimi analogiškai jau aptartam germanio pavyzdžiui efektai. Iš 12 paveikslėlio matome, kad galime ir metaluose stebėti atspindžio koeficiento pokytį, kas būtent leidžia nagrinėti šilumos judėjimą.

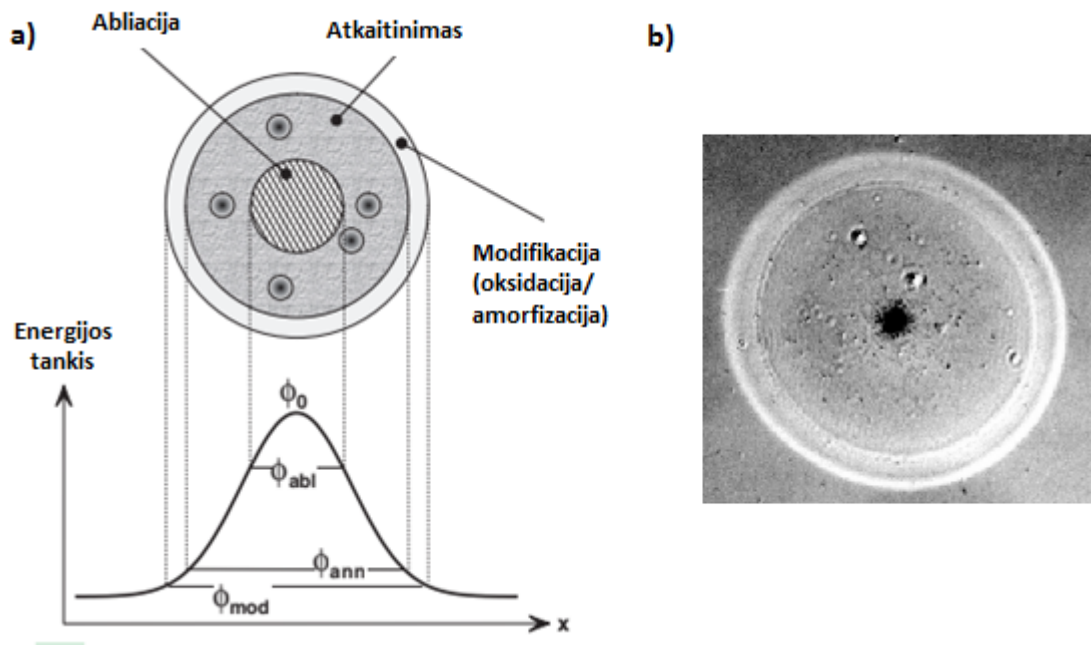


12 pav. Atspindžio pokyčio žiedinių struktūrų pavyzdžiai įvairiose medžiagose, esant skirtingai zondojo impulso vėlinimo trukmei. [31]

1.5.3 Silicio savybės ir jo lazerinio mikroapdirbimo ypatybės

Silicis yra labai plačiai naudojama medžiaga elektronikos industrijoje. Jis labai populiarus dėl savo puslaidininkinių savybių bei dėl dviejų skirtingų kietų būsenų (kristalinės ir amorfinės) egzistavimo, kurios pasižymi skirtingomis fizikinėmis savybėmis. Verta paminėti, kad amorfinė būsena gali būti suformuota keliais būdais: cheminiais, fizikiniais garų nusodinimo metodais, jonų implantacija ir lydalo greitu aušimu. Kadangi silicis toks populiarus daug tyrimų atliekama būtent su čia medžiaga. Nagrinėjant lazerinės spinduliuotės sąveiką su siliciu svarbūs yra šie procesai: amorfizacija, lydymasis, rekristalizacija, garavimas bei abliacija. Paveikus silicį trumpu lazerio impulsu, kietėjant išsilydžiusiai medžiagai galima stebėti amorfizaciją arba rekristalizaciją. Kurį procesą stebėsime priklausomai nuo medžiagos sugerto energijos kiekio, kitaip tariant nuo medžiagos temperatūros bei nuo aušimo greičio. Esant žemesnei temperatūrai medžiaga neturi pakankamai laiko rekristalizacijai, todėl puslaidininkis lieka amorfinėje būsenoje. Amorfinėje būsenoje atomai nėra išsidėstę tvarkingai, o įvykus rekristalizacijai medžiagos atomai vėl išsidėsto tvarkingai, bet naujoje struktūroje. Svarbu paminėti, kad silicis amorfinėje būsenoje turi didesnį atspindžio koeficientą, nei kristalinėje [33]. Kai silicio temperatūra aukšta vėsimas yra lėtas ir medžiaga rekristalizuojasi.

13 paveiksle pavaizduoti principiniai fizikiniai procesai (abliacija, atkaitinimas, modifikacija) atsirandantys po silicio sąveikos su Gausiniu impulsu. Energijos tankio slenksčiai visiems



13 pav. a) Vykstantys fizikiniai procesai apdirbant silicį femtosekundiniais impulsais ir procesams būdingi slenkstiniai energijos tankiai. b) Silicio pažeidimo, indukuoto vienu impulsu ($\lambda = 800$ nm, $t = 130$ fs, $\phi = 1,5$ J/cm²), Nomarskio režime užfiksuotas atvaizdas. Išorinio žiedo diametras 45 μ m. [32]

šioms procesams yra skirtingi. Juos galima nustatyti analogiškai abliacijos slenksčio nustatymui. Suformavus pažeidimus pavieniais 800 nm bangos ilgio ir 130 fs trukmės impulsais nustatyti modifikuoto paviršiaus ir atkaitinto paviršiaus slenksčiai, $\Phi_{mod} = 0,26$ J/cm² ir $\Phi_{at} = 0,55$ J/cm² [32].

Apibendrinant galima teigti, kad silicis tinkamas atlikti sąveikos su lazerio pluoštu tyrimams, dėl savybės amorfizuotis ties tam tikru energijos įtėkio slenksčiu. Silicyje šilumos paveiktą zoną galima stebėti ir po apdirbimo, nes pasiekus tam tikrą temperatūrą siliciui pakeitus būseną į amorfinę atspindžio koeficientas pakinta visam laikui.

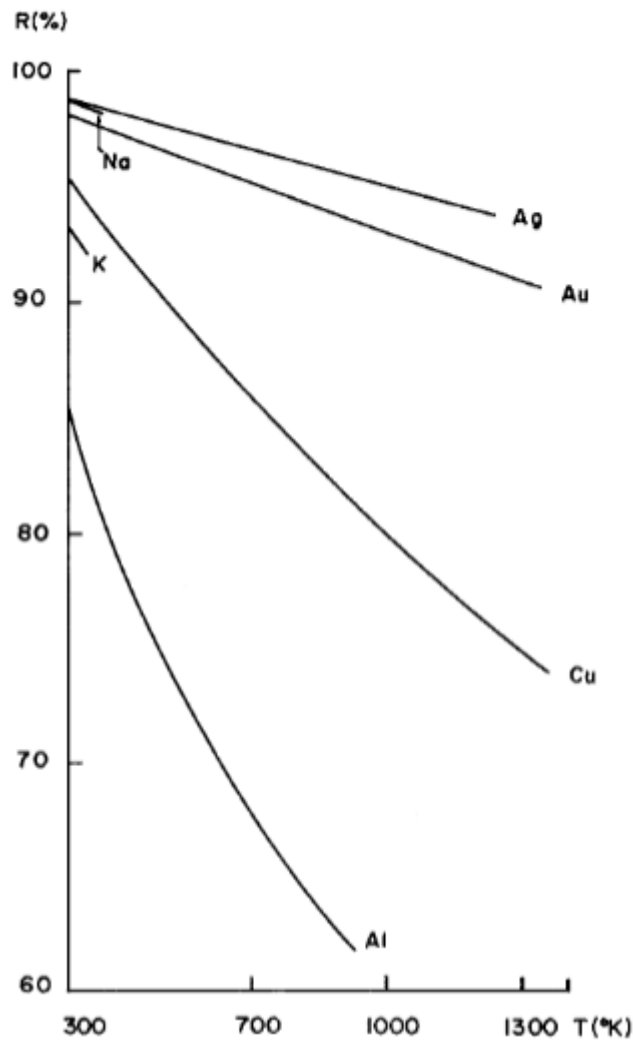
1.5.4 Metalų optinės savybės

Trumpai aptarėme metalų abliaciją, tačiau panagrinėkime plačiau metalų atspindžio koeficientą R , kuris priklauso nuo medžiagos kompleksinio lūžio rodiklio \tilde{n} :

$$\tilde{n} = n + i\kappa, \quad (10)$$

$$R = \frac{(n - 1)^2 + \kappa^2}{(n + 1)^2 + \kappa^2}, \quad (11)$$

kur κ - ekstinkcijos koeficientas (kompleksinio lūžio rodiklio menama dalis). Kadangi parametrai n ir κ stipriai priklauso nuo bangos ilgio ir temperatūros, tai medžiagos sugertis priklauso nuo λ ir T . Svarbu atkreipti dėmesį į atspindžio koeficiento priklausomybę nuo temperatūros.



14 pav. Metalų atspindžio koeficiento priklausomybės nuo temperatūros, kai bangos ilgis $\lambda = 1,06 \mu\text{m}$. [34]

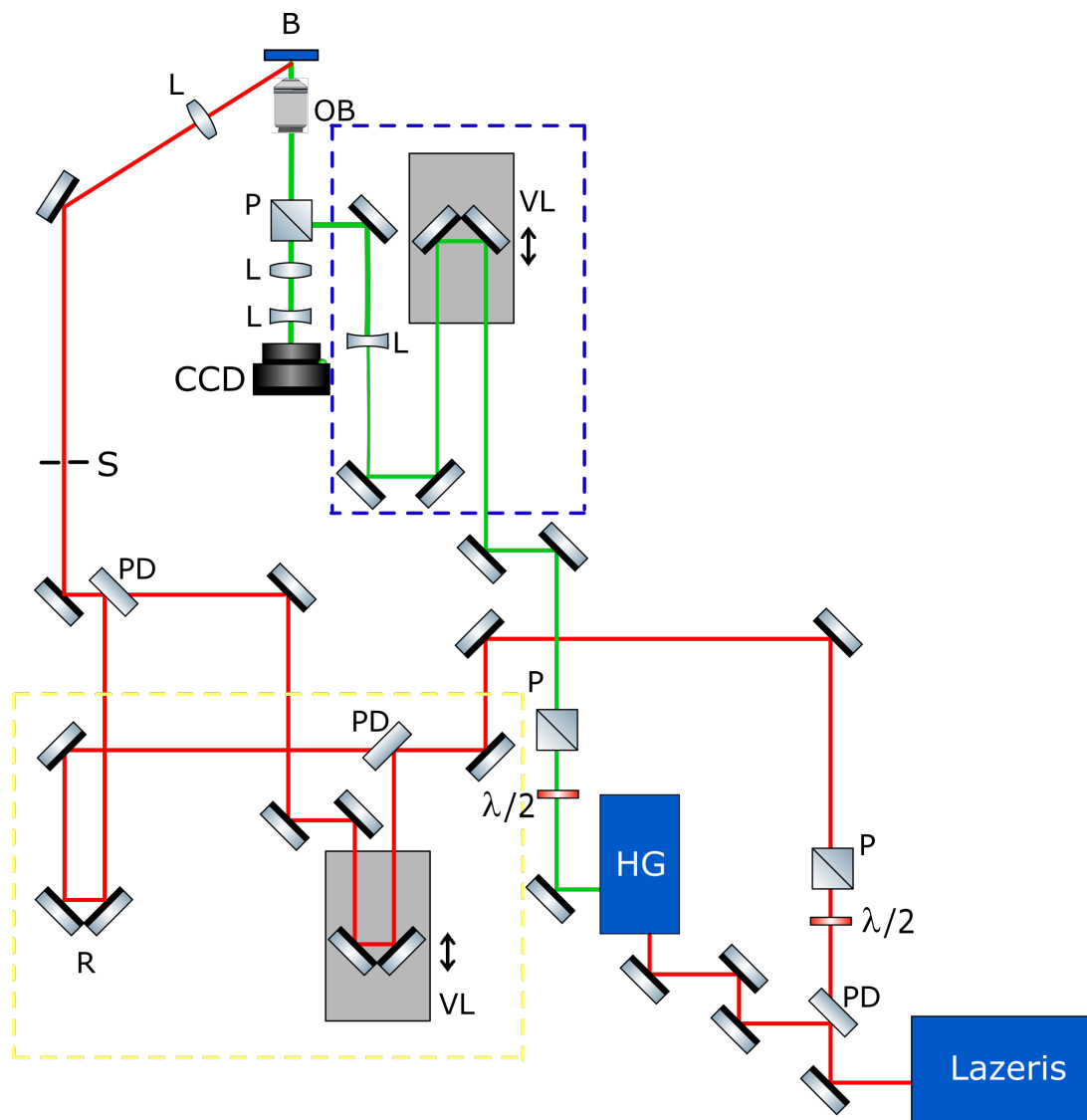
Ujihara nagrinėjo ir aptarė kompleksinio lūžio rodiklio koeficiento priklausomybę nuo temperatūros, temperatūrų intervale nuo kambario temperatūros iki lydymosi [34]. Remiantis Drude teorija, metalo optinės savybės nustatomos trimis dydžiais: metalo plazmos dažniu, optiniu dažniu ir elektronų relaksacijos trukme metalo. Elektronų relaksacijos trukmė yra susijusi su elektronų-fononų susidūrimo dažniu, kuris yra proporcingas fononų populiacijai metalo. O būtent fononų populiacija ir nulemia metalo temperatūrą. Taigi temperatūros didėjimas daro didelę įtaką elektronų-fononų susidūrimo dažniui, o tai turi įtakos metalo optinėms savybėms. Žinoma, kad elektronų-fononų susidūrimo dažnis proporcingas temperatūrai ($\omega_c \sim T^5$), todėl didėjant temperatūrai didėja ir ω_c . Kalbant apie atspindžio koeficiento išraiškos priklausomybę nuo ω_c , tai išraiška gan sudėtinga, bet parodanti atspindžio koeficiento mažėjimą didėjant temperatūrai. Skaičiavimai buvo atlikti natriui, kaliui, variui, sidabru ir aliuminiui, ties trimis bangos ilgiais - $0,69 \mu\text{m}$, $1,06 \mu\text{m}$ ir $10,6 \mu\text{m}$. Atspindžio koeficiento mažėjimo priklausomybė

nuo temperatūros, esant $\lambda = 1,06 \mu\text{m}$, pavaizduota 14 paveiksle.

Visgi patogus variantas pažeidimo dinamikos tyrimui naudoti metalą, kadangi metalo apdirbimas yra paprastesnis nei puslaidininkių ar dielektrikų. Žinant, kad kylant metalų temperatūrai atspindžio koeficientas mažėja galima nustatyti ne tik temperatūrą pakeitusį plotą bet ir galimai tikslią temperatūros vertę, kurią pasiekia tam tikros apdirbamos medžiagos vietos.

2 Eksperimento įranga

Lazeriu indukuoto pažeidimo dinamikos tyrimui buvo naudojama 15 paveiksle pateikta schema. Naudojamas Yb:KGW *Pharos* lazeris (gamintojas UAB MGF "Light Conversion"), spinduliuojantis 320 fs 1030 nm bangos ilgio spinduliuotę. Lazero pluoštas pluošto dalik-



15 pav. Lazero indukuoto pažeidimo dinamikos tyrimo principinė eksperimento schema. Mėlyna brūkšninė linija žymi žonduojantį užlaikymo zoną, geltona brūkšninė linija žymi dvigubo impulso voros generavimo zoną.

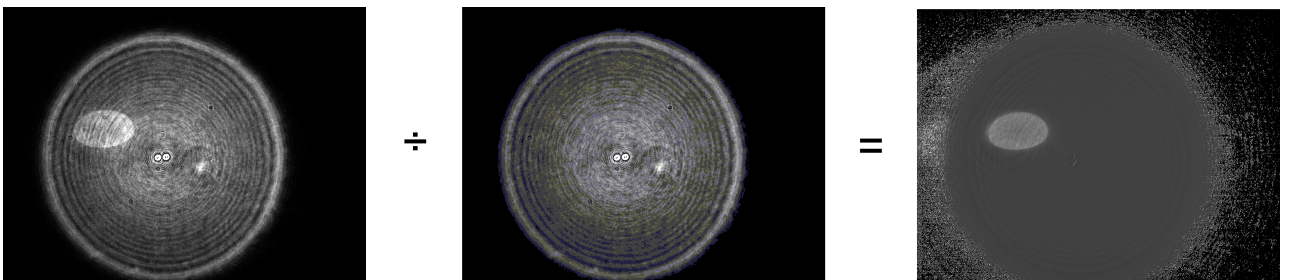
liu yra padalinamas į žadinantį bei žonduojantį pluoštą. Žadinančios spinduliuotės pluoštas pirmiausia praeina atenuatorių – fazinės $\lambda/2$ plokštelės ir Briusterio kampu pastatyto poliarizatoriaus (P) junginį, kuriuo kontroliuojama lazerio galia. Tuomet pluoštas veidrodžiais nukreipiamas iki pluošto daliklio (PD), kuris žadinantį impulsą padalina į du. Vienas jų sklinda per retroreflektorių, kuris yra pritvirtintas ant vėlinimo linijos (VL), kitas veidrodžių ir retroreflektoriaus (R) pagalba yra užvėlinamas taip, kad būtų suvienodintas optinių kelių skir-

tumas. Abu žadinimo pluoštai, atskirti laike tam tikra vėlinimo verte, sklinda per sklendę (S), tuomet veidrodžiais nukreipiami iki lęšio (L) $F = 10$ cm, ir jo pagalba spinduliuotė 45° kampu sufokusuojama bandinio plokštumoje, kuris pritvirtintas prie pozicionavimo staliukų. Zonduojantis pluoštas praėjęs pluošto daliklį patenka į harmonikų generatorių *Hiro*, kuriame sugeneruojama antroji harmonika - 515 nm. Tuomet sklindant per atenuatorių sumažinama antrosios harmonikos galia. Zonduojantis pluoštas toliau sklinda iki vėlinimo linijos, kurios pagalba pluoštas vėlinamas žadinančių impulsu atžvilgiu. Pluoštas išplečiamas sklaidomuoju lęšiu (L) ir veidrodžio bei daliklio pagalba nukreipiamas iki objektyvo (OB) $NA = 0,4$. Zonduojantis pluoštas objektyvo pagalba sufokusuojamas ant bandinio. Atsispindėjusi spinduliuotė nuo paveikto žadinimo impulsu bandinio sklinda atgal per objektyvą, daliklį, lęšius ir patenka į CCD kamera, kuri registruoja atspindžio koeficiento pokyčius. Atliekant eksperimentus su vienu impulsu, žadinančio pluošto atšaka su vėlinimo linija nebuvo naudojama.

Bandinio padėtis ir vėlinimo linija valdoma žingsniniais transliaciniais staliukais, kurių žingsnio atstumas yra $1,25 \mu\text{m}$. Su vėlinimo linija, per kurią sklinda žadinantis pluoštas galima pasiekti iki 600 ps vėlinimo vertę, o zonduojančio pluošto vėlinimo linijos pagalba impulsą galima užvėlinti 1,7 ns trukme su 300 fs skiriamąja geba. Eksperimentui naudojamas *ArduinoUno* kontroleris ir *Labview* programa, kurių pagalba judinami pozicionavimo staliukai, vėlinimo linijos bei kontroliuojamas lazerio ir CCD kameros įjungimas. Taip pat kontrolerio ir programos pagalba valdoma ir sklendė, kuriai užsidarius užfiksuojama bandinio nuotrauka nepaveikus jo žadinančiu impulsu, atsidarius - nuotrauka po sąveikos. Vidutinė lazerio pluošto galia buvo matuojama galios matuokliu *NOVAII*, patalpinus detektorių prieš glaudžiamąjį lęšį, o žadinančių pluoštų diametrai įvertinti naudojant *OphirSpiriconSP620U* pluošto profilio CCD kamerą. Pasinaudojus gautomis vertėmis įvertintas pluošto diametras židinio nuotolyje ir remiantis juo apskaičiuotos energijos įtėkio vertės. Atlikus eksperimentus silicio bandinių vizualinei analizei buvo naudojamas optinis mikroskopas *OLYMPUS - BX51*.

Eksperimente buvo naudojami du bandiniai: chromo danga dengtas veidrodis ir nelegiruotas kristalinis silicis.

Vykstant eksperimentui lazeris vienoje bandinio vietoje užfiksuoja dvi nuotraukas: pir-



16 pav. Nuotraukų apdorojimo pavyzdys.

mąją - su uždaryta sklende, tik bandinį apšviestą antros harmonikos pluoštu, o kita nuotrauka

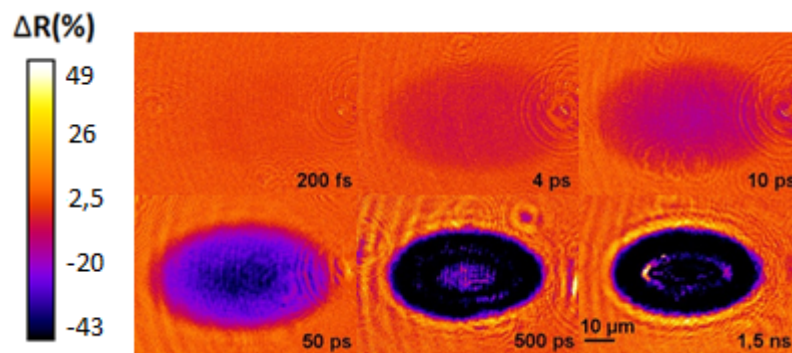
užfiksuoja jau pro atidarytą sklendę praėjusio žadinančio pluošto poveikį medžiagai tam tikru vėlinimo momentu. Užfiksavus dvi nuotraukas, pozicionavimo staliuko pagalba, bandinys pastumiamas ir procesas kartojamas, taip pat keičiant ir zondavimo vėlinimą. Norint gauti kuo kokybiškesnį vaizdą pažeidimo nuotrauka padalinama iš fono nuotraukos, tačiau visgi išelimi nuoti visų dulkių ir naudojamų optikos komponentų pažeidimų sukeltų interferencinių žiedų tokiu būdu nepavyksta, todėl rezultatų nuotraukose matomi tam tikri su tikruoju pažeidimu nesusiję elementai. Nuotraukų dalyba, o ne atimtis atliekama tam, kad galima būtų įvertinti atspindžio koeficiento pokyčius. Atliekant eksperimentą ne visuomet vienodai bandinys yra apšviečiamas, todėl nuotraukos papildomai dar yra sunormuojamos.

3 Pagrindiniai rezultatai ir jų aptarimas

Eksperimentinėje darbo dalyje tyrimai daryti bandinius paveikiant pavieniais impulsais bei dvigubais impulsais su skirtingomis vėlinimo trukmėmis tarp jų. Norint pagerinti medžiagų apdirbimo efektyvumą lazeriais svarbu iširti impulsų poveikį medžiagai ir atrasti tinkamus apdirbimo režimus bei spinduliuotės parametrus, todėl darbo metu siekiama pamatyti naudojamų skirtingų konfigūracijų sukeltų poveikių skirtumus. Pirmiausia eksperimentai buvo atlikti su chromu, kadangi metalai turi daug laisvųjų elektronų juos paprasčiau yra nagrinėti. Chromo pažeidimai buvo indukuojami pavieniais impulsais ir zondavimo impulso pagalba užfiksuojamos bandinio nuotraukos, esant skirtingam zonduojančio impulso vėlinimui. Gautos dinamikos nuotraukos palygintos su literatūroje aptartais eksperimentais patvirtino, kad su 15 pav. pateikta eksperimento schema gan neblogai pavyksta pažeidimo dinamiką užfiksuoti. Kiti eksperimentai buvo atlikti su kristalinio silicio plokšte, pažeidimai buvo indukuojami tiek pavieniais impulsais, tiek dvigubais impulsais su skirtinga vėlinimo trukme tarp jų.

3.1 Chromo dangos pažeidimo dinamika

Chromo dangos pažeidimo dinamika pateikta 17 pav. Paveikus chromo bandinį žadina-



17 pav. Chromo pažeidimo dinamika, kai energijos įtėkio vertė $0,74 \text{ J/cm}^2$, pavaizduota naudojant spalvotą skalę atspindžio koeficiento pokyčiui atvaizduoti.

nčiu impulsu su įtėkio verte $0,74 \text{ J/cm}^2$, jau nuo 200 fs galime stebėti labai neryškų atspindžio koeficiento mažėjimą, kurį sąlygoja spinduliuotės energiją sugeriantys kaistantys laisvieji elektronai. Atspindžio koeficientas ties 4 ps pasiskirsto tolygiai paveiktame plote. Kaip nagrinėta literatūroje augant metalo temperatūrai atspindys ima mažėti ir daugiau spinduliuotės energijos sugeriama, todėl po 10 ps stebimas spartesnis atspindžio koeficiento mažėjimas centre, kas atitinka pluošto formos Gausinį pasiskirstymą. Po 50 ps atspindžio koeficientas centre stipriai sumažėja, tai parodo medžiagos perkaitimą. Praėjus 500 ps galima pastebėti atspindžio koeficiento padidėjimą centre ir vieną papildomą besiformuojantį didesnio atspindžio koeficiento žiedą. Ties 1,5 ns vėlinimu jau matoma ryškesnė struktūra su daugiau žiedų. Tokia intenferencinių

žiedų struktūra parodo, kad vyksta abliacija, nes dalis spinduliuotės atsispindi nuo plono abliacijos sluoksnio, o kita dalis nuo paviršiaus po juo ir taip susidaro interferenciniai žiedai, kurie kinta laikui bėgant.

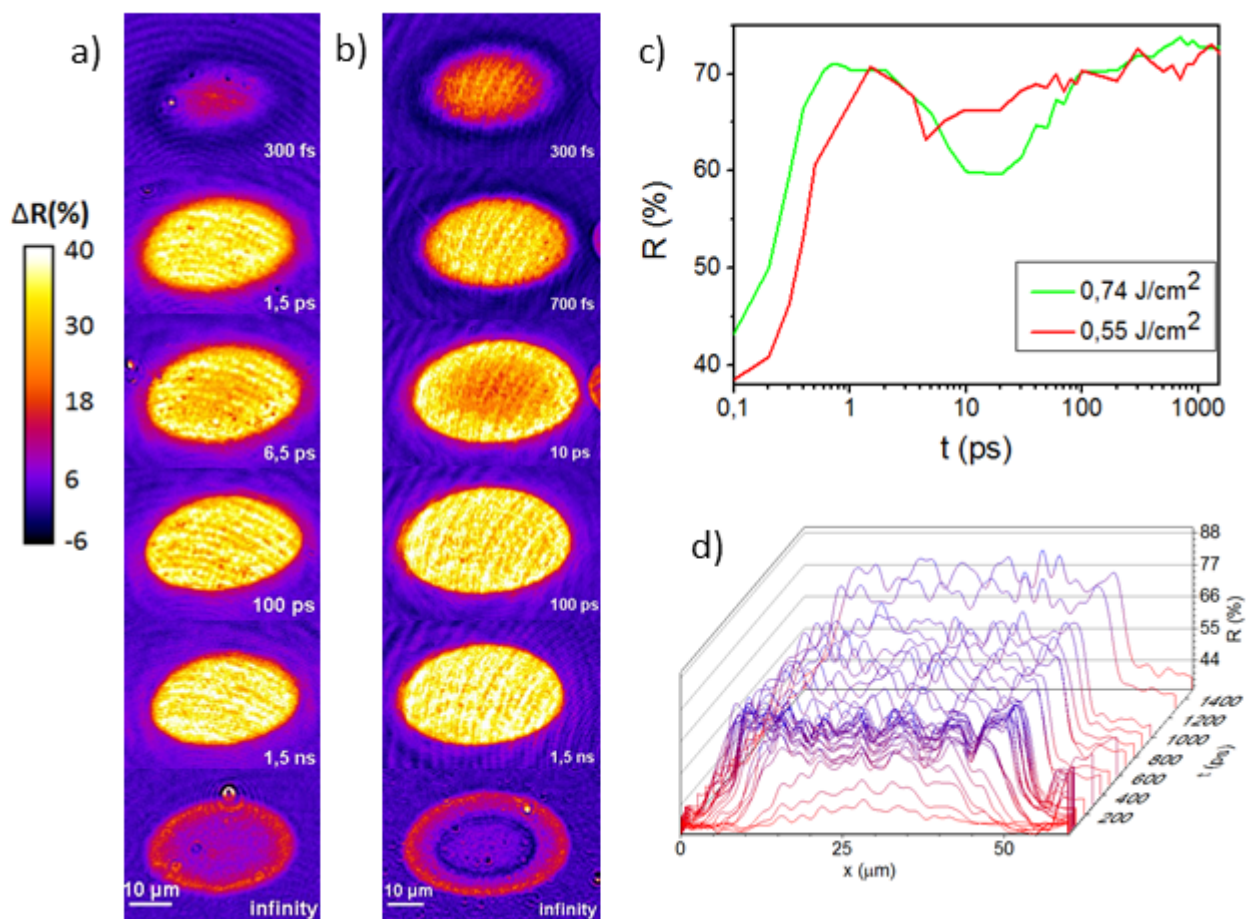
Gautoje dinamikoje stebimi efektai būdingi chromo apdirbimui. Mažėjantis atspindžio koeficientas po sąveikos su impulsu stebėtas kituose chromo dangos atspindžio kitimo tyrimuose [35]. O metalų, tokių kaip aliuminio ir nerūdijančio plieno, pažeidimo dinamikose taip pat stebimi interferenciniai žiedai po 500 ps, parodantys abliacijos procesą [36]. Palyginus su literatūroje pateiktais tyrimais įvertinta, kad žadinimo-zondavimo sistema gerai veikia ir jos pagalba galima registruoti indukuotų pažeidimų dinamikas.

3.2 Silicio pažeidimo dinamika

Silicis palyginus su metalais turi geresnį temperatūrinį indikatorių, nes ties tam tikromis energijos įtėkio vertėmis (0,26-0,55 J/cm² [32]) amorfizuoja, todėl net po eksperimento medžiagos būseną lieka pakitusi ir turi padidėjusį atspindžio koeficientą. Viršijus nustatytą energijos tankių rėžį, silicis rekristalizuojasi, o viršijus abliacijos slenkstį dalis medžiagos pašalinama. Tad po sąveikos su impulsu, jei pakankama impulso energija amorfizacijai, poveikio vietoje susiformuoja didesnio atspindžio koeficiento žiedo formos sritis. Šią sritį ir galime laikyti temperatūriniu indikatoriumi, nes tik sugėrus pakankamai energijos, dėl kurios pakyla temperatūra, silicis amorfizuoja. Silicio pažeidimų dinamiką nuspręsta panagrinėti plačiau, ne tik apdirbant pavieniais impulsais, bet ir dvigubais impulsais su skirtinga vėlinimo verte.

3.2.1 Pavienio impulso indukuota pažeidimo dinamika

Iš eksperimentų su pavieniais impulsais gautų dinamikos nuotraukų parinktos keleta charakteringų laikų, ties kuriais matosi ryškiausi pokyčiai. Charakteringos nuotraukos pavaizduotos 18 pav. Atlikti keli bandymai esant skirtingoms energijos įtėkio vertėms: a) 0,74 J/cm² b) 0,55 J/cm². Abiejose dinamikose po 300 fs matyti atspindžio koeficiento padidėjimas centre dėl sugeneruotų laisvųjų krūvininkų, o aplink centrą atspindžio koeficiento sumažėjimas dėl mažesnio elektronų tankio. Kristaliniame silicyje atspindžio koeficientas priklauso nuo krūvininkų koncentracijos, pirmiausia atspindžio koeficientas krenta, o pasiekus plazmos dažnį, ties tam tikra kritine krūvininkų koncentracija jis staigiai kyla [29]. Iš tokio pasiskirstymo galime pasakyti, kad po 300 fs daugiau krūvininkų sužadinama centre nei paveiktos zonos kraštuose. Taip pat matoma, kad esant mažesnei įtėkio verte krūvininkų sužadinama mažiau. Naudojant impulsus su energijos įtėkio verte 0,74 J/cm² didžiausia atspindžio koeficiento vertė centre pasiekama ties 700 fs vėlinimu, kai tuo tarpu naudojant mažesnę energijos tankį didžiausias atspindžio koeficientas stebimas ties 1,5 ps. Silicio atspindžio koeficientas didėja augant temperatūrai iki lydymosi temperatūros vertės [30]. Toks efektas gaunamas dėl nestabilios gardelės neterminio lydymosi. Siliciui pasiekus lydymosi temperatūrą tolimesnis lydalo kaitimas atspin-



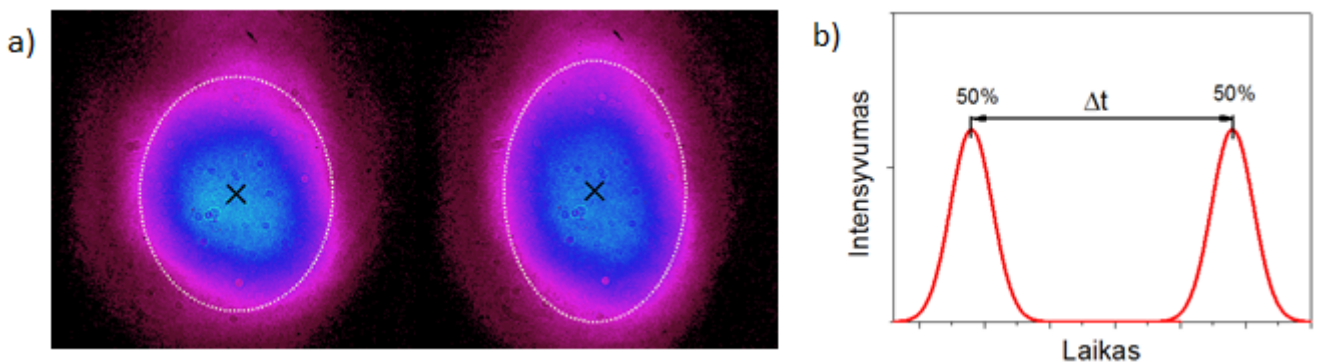
18 pav. Silicio pažeidimo dinamika pavieniais impulsais, kai energijos įtėkio vertė a) $0,55 \text{ J/cm}^2$; b) $0,74 \text{ J/cm}^2$, pavaizduota naudojant spalvotą skalę atspindžio koeficiento pokyčiui atvaizduoti. c) Centrinės indukuotų pažeidimų dalies atspindžio koeficiento kitimo priklausomybė nuo vėlinimo. d) Indukuoto pažeidimo su energijos tankiu $0,74 \text{ J/cm}^2$ skerspjūvio profilio kitimas laikui bėgant.

džio koeficientą veikia priešingai - jis ima mažėti [29]. Gautų rezultatų nuotraukose matome, kad atspindžio koeficientas ima mažėti ir pasiekia mažiausias atspindžio koeficiento vertes po 10 ps (18 pav.(b)) ir po 6,5 ps (18 pav.(a)), kurios parodo, kad būtent tuo metu yra pasiekiamas aukščiausia paveiktos zonos temperatūra su naudota žadinimo galia. Iš 18 paveiksle (c) pateikto grafiko bei nuotraukų galime matyti, kad naudojant mažesnę impulso energiją silicis įkaista mažiau. Toliau bėgant laikui po sužadavimo atspindžio koeficientas ima vėl augti, o medžiaga vėsti. Abiem atvejais atspindžio koeficientas vėl tolygiai pasiskirsto visame paveiktame plote po 100 ps. O po 1,5 ns abiejuose bandymuose matome, kad pakitusio atspindžio koeficiento plotas ima mažėti ir bandinys toliau aušta. Galutinėse būsenose stebime didesnio atspindžio koeficiento žiedus. Tačiau visgi žieduko formavimasis pažeidimo dinamikoje iki 1,7 ns vėlinimo nėra stebimas. Palyginus 18 pav.(b) dinamikos perkaitintą sritį ties 10 ps, ir galutinę nuotrauką galima pastebėti, kad galimai likusi neperkaitinta sritis koreliuoja su susiformavusio žiedo zona, tačiau atspindžio koeficiento pokytis nėra ryškus, todėl sudėtinga lyginti. Naudojant

didesnį energijos tankį taip pat matomas ir mažesnio atspindžio koeficiento žiedas galutinėje būsenoje. Mažų energijos tankių režime apdirbant silicį pavieniais impulsais gaunamos dvi skirtingai modifikuotos zonos: didesnio atspindžio koeficiento žiedas ir tamsesnė nei žiedas zona centre. Literatūroje teigiama, kad ties tam tikromis vertėmis $0,5-0,78 \text{ J/cm}^2$ stebimas ir antras sumažėjusio atspindžio koeficiento žiedas [37]. Didesnio atspindžio koeficiento žiedas susidaro siliciui amorfizavusis, centrinė zona identifikuojama kaip persilydžiusi, o tamsus žiedas atsiranda dėl plono lydalo fronto judėjimo, kuris vėliau vėl sukietėja. Abi dinamikos stebimomis būsenomis panašios, tik naudojant mažesnį energijos tankį silicis įkaista mažiau, tačiau apibendrinant poveikio dinamiką galima teigti, kad silicis įkaista per pirmąsias 10 ps, o vėliau atvėsta iki lydymosi temperatūros dar praėjus 90 ps.

3.2.2 Dvigubų impulsų indukuota pažeidimo dinamika

Susipažinus su pavienių impulsų indukuotų pažeidimų dinamikomis tapo įdomu kaip gi vyksta apdirbimas ir kaip medžiaga reaguoja į daugiau impulsų. Eksperimentai buvo atlikti su dvigubais impulsais, kurie gauti lazerio spinduliuotę padalinant pluošto dalikliu. Literatūros apžvalgoje aptartas papliūpų režimas, kurio metu galima sumažinti impulso energiją proporcingai didinant impulsų kiekį ir taip neprarandant abliacijos efektyvumo. Pasirinktos impulsų energijos vertės yra dvigubai mažesnės nei pavienių impulsų eksperimente, norint įvertinti aptartą efektą. Gautų pluoštų profiliai pavaizduoti 19 paveiksle. Eksperimentai buvo atlikti su dviem



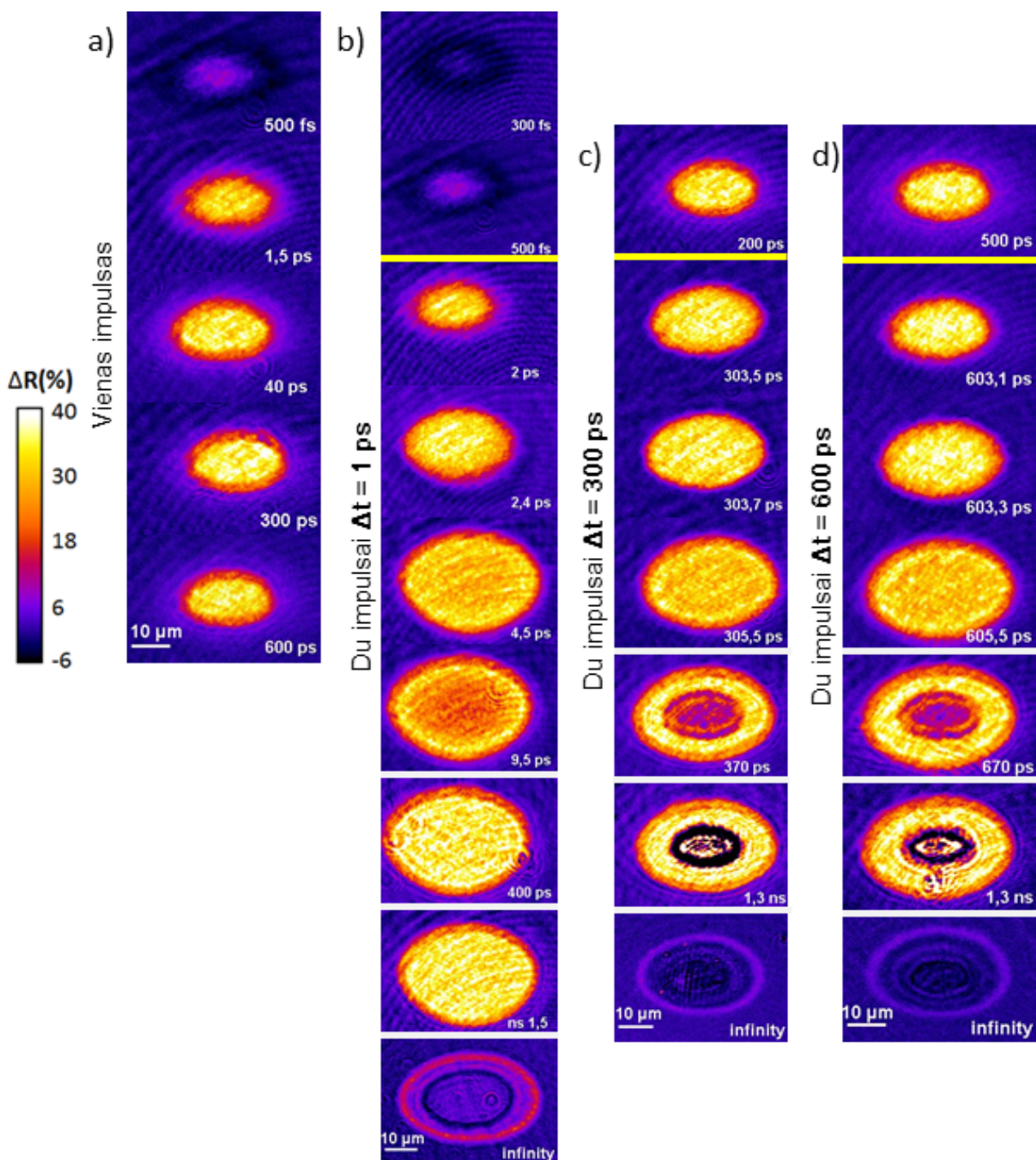
19 pav. a) Žadinančių pluoštų profiliai. Dešinėje pluošto sklindančio per vėlinimo linija profilis, pluošto diametras $1/e^2$ lygyje $y = 2,77 \text{ mm}$, $x = 3,02 \text{ mm}$. Kairėje pluošto diametras $y = 3,21 \text{ mm}$, $x = 3,16 \text{ mm}$. b) Principinis pluoštų intensyvumo ir laikinio vėlinimo atvaizdavimas.

pluošto dalikliu išskirtais impulsais, kurių spinduliuotės galia padalinta į dvi lygias dalis, o eksperimentams naudotos skirtingos impulso energijos tankių vertės: $0,37 \text{ J/cm}^2$ ir $0,27 \text{ J/cm}^2$. Silicio pažeidimų dinamikos užfiksuotos esant skirtingoms vėlinimo vertėms tarp žadinančių impulsų: 1 ps, 300 ps ir 600 ps. 1 ps vėlinimo vertė pasirinkta, nes iš pavienių impulsų dinamikos eksperimentų ties šia vertė gaunamas didžiausias sugeneruotų elektronų tankis, o 300 ps ir 600 ps trukmės pasirinktos dėl tipinių komercinių lazerių papliūpų režimo naudojamo dažnio.

20 pav.(b) pavaizduotoje dinamikoje, su 1 ps vėlinimu tarp žadinančių impulsų, po sužadavimo praėjus 300 fs matomas neryškus atspindžio koeficiento padidėjimas centre ir susidaręs mažesnio atspindžio koeficiento žiedas, kurio storis ties 500 fs mažėja, o centrinės dalies atspindžio koeficientas auga. Ši dinamika analogiška aptarties pavienių impulsų rezultatams. Po 1 ps silicij pasiekia antrasis impulsas, bet net po 2 ps stebimas dar tik pirmojo impulso poveikis medžiagai. Praėjus 2,4 ps jau matomas paveiktos zonos plėtimasis ir staigus atspindžio koeficiento padidėjimas iki maksimalios reikšmės po kurios atspindys centre ima kristi, kas būtent parodo, kad ties šia vėlinimo trukme pasiekama lydymosi temperatūra pažeidimo centre. Nors pasiekta lydymosi temperatūra paveikta zona plečiasi toliau, o temperatūra tolygiai pasiskirsto visoje paveiktoje zonoje po 4,5 ps. Toliau lydalo temperatūra ima augti, dėl to matomas atspindžio koeficiento mažėjimas centre, kuris minimalią vertę pasiekia ties 9,5 ps. Praėjus 400 ps po sužadavimo atspindžio koeficientas atsistato ir laikui bėgant bandinys vėsta. Galutinėje būsenoje matoma susiformavusi struktūra analogiška apdirbant vienu impulsu: susiformavę didesnio atspindžio koeficiento bei mažesnio atspindžio koeficiento žiedai. Visa gauta dinamika su 1 ps vėlinimu tarp impulsų analogiška vieno impulso indukuotai pažeidimo dinamikai, aukščiausia temperatūra pasiekama panašiu metu - po 10 ps ir abliacija abiem atvejais nevyksta. Tai parodo, kad naudojant dvigubus impulsus su 1 ps užlaikymu apdirbimo efektyvumas ir poveikio zona praktiškai nesiskiria nuo apdirbimo pavieniais impulsais. Nors krūvininkų koncentracija po vieno impulso smarkiai išaugo, didelės įtakos spinduliuotės sugerčiai nėra.

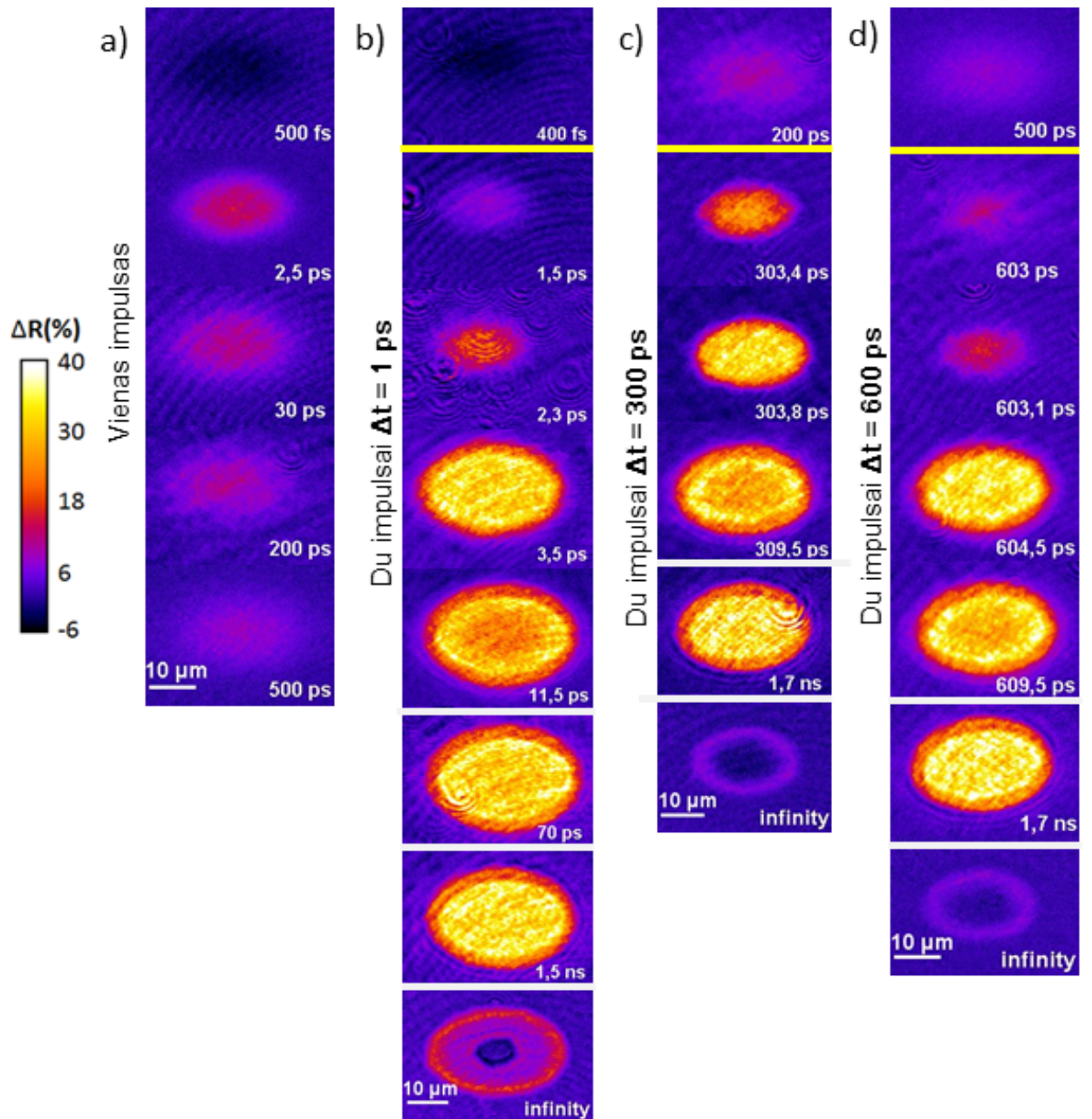
Kitokias dinamikas galime stebėti, kai antrąjį žadinimo impulsą užvėliname 300 ps (20 pav.(b)) ir 600 ps (20 pav.(c)) trukmėmis. Iš rezultatų 20 pav.(a) galima matyti, kad prieš atsklindant antrajam impulsui, pirmojo impulso indukuotas atspindžio koeficiento pokytis ties 300 ps jau būna pasiskirstęs tolygiai visame plote ir daugiau nebeauga, o ties 600 ps paveikta zona šiek tiek sumažėjusi. Po antrojo impulso sąveikos su medžiaga stebimas staigus pažeidimo augimas praėjus 303,5 ps, kai tuo tarpu esant antrojo žadinančio impulso vėlinimui 600 ps pažeidimas ima augti ties 603,1 ps verte, tačiau stebimas augimas lėtesnis, o maksimalus atspindys centrinėje dalyje abiem atvejais pasiekiamas praėjus dar 0,2 ps. Abiem atvejais praėjus 5,5 ps po antrojo impulso atspindžio koeficientas ima mažėti, lydalas perkaista. O praėjus 70 ps po antrojo impulso sąveikos atspindžio koeficientas staigiai krenta, toks staigus kritimas parodo abliacijos pradžia. Taip pat centre galima įžiūrėti pradedančius besiformuoti Niutono žiedus, kurie ties 1,3 ns vėlinimais dar labiau išryškėja ir patvirtina vykstantį abliacijos procesą. Galutinai susiformavus pažeidimui matomas didesnio atspindžio koeficiento žiedas. Pažeidžiant silicij su dvigubais impulsais, kurių vėlinimo vertės tarp impulsų 300 ps ir 600 ps susiformavusių pažeidimų/modifikacijų dydžiai gaunami vienodi, mažesni nei apdirbant pavieniais ar 1 ps vėlinimo dvigubais impulsais.

Naudojant mažesnį impulso energijos tankį $0,27 \text{ J/cm}^2$ dinamikos kitokios, jos pavaizduotos 21 pav. Po vieno impulso sukulto sužadavimo praėjus 400 fs atspindžio koeficientas sumažėja ir padidėja zonduojančio impulso sugertis. Naudojant mažesnį energijos tankį krūvininkų ge-



20 pav. a) Vieno impulso pokyčių dinamika. Dvigubais impulsais, tarp kurių vėlinimo trukmė b) 1 ps; c) 300 ps; d) 600 ps, silicije indukuotų pažeidimų dinamikos. Naudota impulso energijos įtėkio vertė $0,37 \text{ J/cm}^2$. Geltona juostelė žymi laiko momentus, kai silicij paveikia antrasis impulsas.

neravimo sparta lėtesnė. Jų tankis visame plote nepasiekia kritinio tankio, būdingo plazmos dažniui, kurį viršijus atspindžio koeficientas ima augti. Eksperimento su 1 ps žadinančio impulso vėlinimu dinamikoje ties 1,5 ps stebimas dar tik pirmojo impulso sukeltas poveikis medžiagai, sužadintų krūvininkų tankis jau yra viršijęs kritinį tankį visame paveiktame plote, todėl ma-



21 pav. a) Vieno impulso pokyčių dinamika. Dvigubais impulsais, tarp kurių vėlinimo trukmė b) 1 ps; c) 300 ps; d) 600 ps, silicyje indukuotų pažeidimų dinamikos. Naudota impulso energijos įtėkio vertė $0,27 \text{ J/cm}^2$. Geltona juostelė žymi laiko momentus, kai silicį paveikia antrasis impulsas.

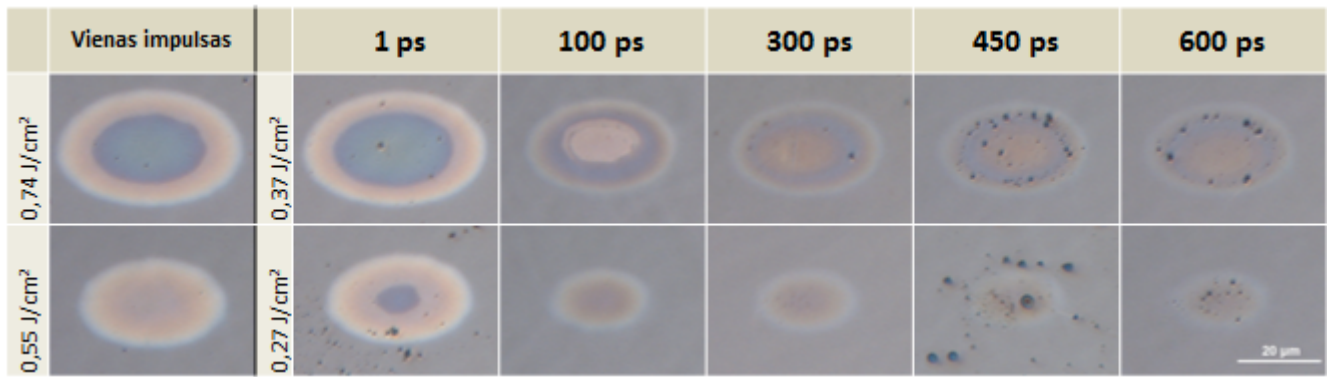
tomas atspindžio koeficiento padidėjimas. Ties 2,3 ps dėl antrojo impulso įtakos atspindžio koeficientas ima augti. Ir maksimali atspindžio koeficiento vertė pasiekama ties 3,5 ps. Palyginus su anksčiau aptarta dinamika, naudojant $0,37 \text{ J/cm}^2$ impulso energijos tankį, maksimali atspindžio koeficiento vertė pasiekama greičiau, po 2,4 ps. Esant 4,5 ps vėlinimui atspindžio koeficientas pasikeičia visame paveiktame plote, o jo vertė ima mažėti, išsilydęs silicis kais-ta. Naudojant mažesnę impulso energiją medžiagos šilimas lėtesnis, o aukščiausia temperatūra pasiekama ties 11,5 ps trukme, trukmė 2,5 ps ilgesnė už pirmojo bandymo trukmes. Tolimes-

niais vėlinimo momentais matoma, kad atspindys atsistato ir abliacija nevyksta. Galutinėje būsenoje stebimas amorfinio silicio žiedas ir mažesnio diametro patamsėjęs žiedas parodantis, kad tik maža dalis pažeidimo zonos persilydė. Šiuo atveju, esant vėlinimui tarp žadinančių impulsų 300 ps ir 600 ps dinamikos gaunamos panašios. 21 pav.a) dinamikoje galime pastebėti, kad prieš atsklindant antrajam impulsui, paveikta pirmojo impulso zona jau yra pradėjusi vesti, po 200 ps dar matomas šiek tiek didesnis atspindžio koeficientas centre, o po 500 ps atspindžio koeficientas ir paveikta zona dar labiau sumažėję. Antrojo impulso poveikis siliciui vėlgi greičiau pasireiškia esant 600 ps vėlinimui tarp žadinančių impulsų, jį galima stebėti jau po 3,1 ps, o kai vėlinimas 300 ps prireikia 3,4 ps trukmės. Visgi lydymosi temperatūros vertė, kai atspindys didžiausias, greičiau pasiekiamas esant 300 ps vėlinimui tarp impulsų. O labiausiai sąveikos vieta įkaista tuo pačiu metu, praėjus 9,5 ps po antrojo impulso. Beje, naudojant 25% mažesnę įtėkio vertę su vėlinimo vertėmis tarp impulsų 300 ps ir 600 ps abliacija nebevyksta, stebimas tik persilydymas.

Apžvelgus rezultatus galima teigti, kad naudojant du dvigubai mažesnės energijos impulsus su 1 ps vėlinimu pažeidimo dinamika gaunama analogiška pavienio impulso dinamikai bei modifikuotas plotas panašaus dydžio, tačiau centre stebimas skirtingas persilydžiusio silicio plotas. Paviršiaus kaitimo ir tarpinių būsenų laiko intervalai šiek tiek skiriasi, bet galutinai gautas rezultatas panašus. Kitokios dinamikos stebimos esant didesnėms vėlinimo trukmėms tarp žadinančių impulsų: 300 ps ir 600 ps. Esant vėlinimui 300 ps po antro impulso poveikio paveikto ploto zona padidėja greičiau, bet pats medžiagos kaitimas ir pasiekiamas aukščiausia temperatūra gaunami vienodomis vėlinimo vertėmis po sąveikos su antruoju impulsu. Galutinėse būsenose modifikuotos zonos dydis panašus, bet stebimos modifikacijos ir jų plotai skiriasi. Abiem atvejais stebime amorfinio silicio žieduką, kurį panagrinėsime šiek tiek vėliau. Be žieduko dar matome atspindžio koeficiento sumažėjimo zonas bei abliacijos metu susiformavusius pažeidimus. Iš galutinių nuotraukų vaizdų matyti, kad didesnis abliacijos ir perlydytos medžiagos plotas gaunamas, kai vėlinimas tarp impulsų 300 ps. Tai parodo, kad esant 300 ps vėlinimui medžiaga geriau sugeria impulso energija ir daugiau medžiagos pašalinama.

3.2.3 Susiformavęs amorfinio silicio žiedas

Atliktas papildomas eksperimentas, užfiksuojant tik galutinės silicio būsenos nuotraukas. Šiam eksperimentui naudota šiek tiek daugiau vėlinimo verčių tarp žadinimo impulsų: 1 ps, 100 ps, 300 ps, 450 ps, 600 ps. Iš gautų rezultatų pateiktų 22 pav. galime matyti, kad visais atvejais matomas didesnio atspindžio žiedukas, kuris būtent leidžia identifikuoti amorfizavusį silicį. Taip pat galutinėse nuotraukose viduje žiedo matomos ir tamsesnės zonos, kurios atsiranda dėl perlydytos medžiagos. Kai impulso energijos įtėkis $0,37 \text{ J/cm}^2$ didesnėmis nei 1 ps vėlinimo vertėmis matoma ir centre didesnio atspindžio koeficiento zona. 300 ps, 400 ps ir 600 ps galutinėse nuotraukose centre padidėjusio atspindžio koeficiento zona žymi abliacijos paveiktą plotą. Kai tuo tarpu esant 100 ps vėlinimui tarp žadinančių impulsų centre matomas atspindžio



22 pav. Susiformavusio pažeidimo silicyje nuotraukos po sąveikos su pavieniais ir dvigubais impulsais su skirtingomis vėlinimo trukmėmis tarp jų.

pokytis kitoks, pagal atspindį galima manyti, kad galimai tai dar viena amorfinio silicio zona, kurią reikėtų patyrinėti detaliau.

Atsirandantis po sąveikos su impulsu didesnio atspindžio koeficiento amorfinis žiedukas iš dalies leidžia pamatyti medžiagos pokyčius, tačiau nėra visiškai aišku ar jis tinkamas temperatūros indikatorius, padedantis idetifikuoti visą šilumos paveikto ploto profilį. Silicio pokyčių dinamikose nėra stebimas žiedo formavimasis bent iki 1,7 ns, todėl negalima tvirtinti, kad jis atitinka šilumos paveiktą zoną. Žieduko formavimąsi galimai galima stebėti vėlesniais vėlinimo laikais.

Išvados

1. Naudojant žadinimo-zondavimo sistemą atspindžio režime stebėta sugeriančių medžiagų (chromo dangos ir silicio) pažeidimo formavimosi dinamika. Metalų dangoje stebėti patamsėjimai iki abliacijos, dėl spinduliuotės energiją sugėrusių laisvųjų elektronų kaitimo, tuo tarpu silicyje atspindžio kitimo dinamika yra sudėtingesnė ir yra sąlygota laisvųjų krūvininkų generacijos, jų kaitimo ir paviršiaus lydymosi efektų.
2. Silicio paviršių veikiant vienu impulsu atspindžio koeficientas išauga iki 70% ir pasiekia didžiausią vertę ties 1 ps dėl smarkiai išaugusio krūvininkų skaičiaus, o didžiausia krūvininkų temperatūra pasiekama po 10 ps.
3. Veikiant silicio paviršių dvigubu lazerio impulsu, kurio pavienio impulso įtėkis dvigubai mažesnis nei prieš tai nurodytu atveju, su 1 ps vėlinimu tarp žadinančių impulsų gaunamas identiškas rezultatas pavienio impulso atveju.
4. Vėlinimui tarp žadinančių impulsų padidėjus iki 300 ps ir daugiau, stebimas ryškus sugerties pokytis, ko pasekoje 70 ps po poveikio prasideda abliacija. Šie rezultatai rodo, kad spinduliuotės energija efektyviau yra perduodama tada, kai kristalinė gardelė jau yra įkaitus.
5. Amorfizuoto žiedo dydis ir forma skiriasi keičiant vėlinimo trukmes ir impulsų energiją ir galėtų būti vienas iš indikatorių, nurodančių medžiagos terminės būsenos istoriją, tačiau šių pokyčių nepavyksta detektuoti stebint pažeidimo kitimo dinamiką iki 1,7 ns.

Literatūros sąrašas

- [1] D. Farson, J. Ready, and T. Feeley, *LIA Handbook of Laser Materials Processing* (Springer Berlin Heidelberg, 2001).
- [2] P. Herman, A. Öttl, K. Chen, and R. Marjoribanks, Laser micromachining of transparent fused silica with 1-ps pulses and pulse trains, *Proc. of SPIE*, **3616**, 416–978 (1999).
- [3] B. Neuenschwander, T. Kramer, B. Lauer, and B. Jaeggi, Burst mode with ps- and fs-pulses: Influence on the removal rate, surface quality, and heat accumulation, *Proc. of SPIE*, **9350** (2015).
- [4] D. Zhang and L. Guan, *Comprehensive Materials Processing* (Elsevier, Oxford, 2014).
- [5] K.-H. Leitz, B. Redlingshöfer, Y. Reg, A. Otto, and M. Schmidt, Metal ablation with short and ultrashort laser pulses, *Phys. Procedia*, **12**, 230 – 238 (2011).
- [6] O. Balachnaitė, A. Bargelis, A. Dementjev, R. Jonušas, G. Račiukaitis, and V. Sirutkaitis, *Lazerinė technologija : Vilniaus universiteto vadovėlis*. (Vilniaus universiteto I-kla, Vilnius, 2008).
- [7] A. H. Hamad, *High Energy and Short Pulse Lasers* (IntechOpen, Rijeka, 2016).
- [8] K. Sugioka, M. Meunier, and A. Piqué, *Laser Precision Microfabrication* (Springer Berlin Heidelberg, 2010).
- [9] A. Dubietis, *Netiesinė optika : universiteto vadovėlis*. (Vilniaus universiteto leidykla, Vilnius, 2011).
- [10] P. T. Mannion, J. Magee, E. Coyne, G. M. O'Connor, and T. J. Glynn, The effect of damage accumulation behaviour on ablation thresholds and damage morphology in ultrafast laser micro-machining of common metals in air, *Appl. Surf. Sci.*, **233**, 275–287 (2004).
- [11] G. Račiukaitis, *Lazerinio mikroapdirbimo laboratoriniai darbai / Gediminas Račiukaitis*. (Leidykla TEV, Vilnius, 2008).
- [12] B. Neuenschwander, B. Jaeggi, M. Zimmermann, and G. Hennig, Influence of particle shielding and heat accumulation effects onto the removal rate for laser micromachining with ultra-short pulses at high repetition rates, *ICALEO*, **2014**(1), 218–226 (2014).
- [13] N. Dahotre and S. Harimkar, *Laser Fabrication and Machining of Materials* (Springer US, 2008).

- [14] S. M. Eaton, H. Zhang, P. R. Herman, F. Yoshino, L. Shah, J. Bovatsek, and A. Y. Arai, Heat accumulation effects in femtosecond laser-written waveguides with variable repetition rate, *Opt. Express*, **13**(12), 4708–4716 (2005).
- [15] F. Brygo, C. Dutouquet, F. L. Guern], R. Oltra, A. Semerok, and J. Weulersse, Laser fluence, repetition rate and pulse duration effects on paint ablation, *Appl. Surf. Sci.*, **252**(6), 2131 – 2138 (2006).
- [16] C. Emmelmann and J. Calderón Urbina, Analysis of the influence of burst-mode laser ablation by modern quality tools, *Physcs Proc*, **12**, 172–181 (2011).
- [17] R. R. Gattass, L. R. Cerami, and E. Mazur, Micromachining of bulk glass with bursts of femtosecond laser pulses at variable repetition rates, *Opt. Express*, **14**(12), 5279–5284 (2006).
- [18] O. G. Andrusyak, M. Bubelnik, J. Mares, T. McGovern, and C. W. Siders, Single-pulse and burst-mode ablation of gold films measured by quartz crystal microbalance, *Proc. SPIE*, **5647**, 61 – 71 (2005).
- [19] C. Kerse, H. Kalaycıoğlu, and P. Elahi, Ablation-cooled material removal with ultrafast bursts of pulses, *Nature*, **537**, 84–88 (2016).
- [20] R. Knappe, H. Haloui, A. Seifert, A. Weis, and A. Nebel, Scaling ablation rates for picosecond lasers using burst micromachining, *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **7585**, 150 – 155 (2010).
- [21] D. Förster, S. Faas, S. Gröninger, F. Bauer, A. Michalowski, R. Weber, and T. Graf, Shielding effects and re-deposition of material during processing of metals with bursts of ultra-short laser pulses, *Applied Surface Science*, **440**, 926–931 (2018).
- [22] B. Neuenschwander, B. Jaeggi, D. Förster, T. Kramer, and S. Remund, Influence of the burst mode onto the specific removal rate for metals and semiconductors, *J. Laser Appl.*, **31**, 022203 (2019).
- [23] K. Sugioka and Y. Cheng, *Ultrafast Laser Processing: From Micro- to Nanoscale* (Jenny Stanford Publishing, 2013).
- [24] B. Johnson, A. Forsman, and S. Benda, Dual-wavelength double-pulse laser machining, *Industrial Laser Solutions*, **22**(11), 24–26 (2007).
- [25] B. N. Chichkov, C. Momma, S. Nolte, F. von Alvensleben, and A. Tünnermann, Femtosecond, picosecond and nanosecond laser ablation of solids, *Appl. Phys. A*, **63**(2), 109–115 (1996).

- [26] C.-H. Lin, Z.-H. Rao, L. Jiang, W.-J. Tsai, P.-H. Wu, C.-W. Chien, S.-J. Chen, and H.-L. Tsai, Investigations of femtosecond-nanosecond dual-beam laser ablation of dielectrics, *Opt. Lett.*, **35**, 2490–2 (2010).
- [27] R. Prasankumar and A. Taylor, *Optical Techniques for Solid-State Materials Characterization* (Taylor & Francis, 2011).
- [28] J. Bonse, G. Bachelier, J. Siegel, and J. Solis, Time- and space-resolved dynamics of melting, ablation, and solidification phenomena induced by femtosecond laser pulses in germanium, *Phys. Rev. B*, **74**, 134106 (2006).
- [29] M. Garcia-Lechuga, D. Puerto, Y. Fuentes-Edfuf, J. Solis, and J. Siegel, Ultrafast moving-spot microscopy: Birth and growth of laser-induced periodic surface structures, *ACS Photonics*, **3**(10), 1961–1967 (2016).
- [30] M. Diez, M. Ametowobla, and T. Graf, Time-resolved reflectivity and temperature measurements during laser irradiation of crystalline silicon, *J. Laser Micro Nanoen.*, **12**(3) (2017).
- [31] Е. Яковлев, Г. Червяков, М. Либенсон, В. Вейко, *Взаимодействие лазерного излучения с веществом* (ЛитРес, 2018).
- [32] J. Bonse, S. Baudach, and J. Krüger, Femtosecond laser ablation of silicon—modification thresholds and morphology, *Appl. Phys. A*, **74**, 19–25 (2002).
- [33] Y. Fuentes, M. Garcia-Lechuga, D. Puerto, C. Florian, A. Garcia-Leis, S. Sanchez-Cortes, J. Solis, and J. Siegel, Fabrication of amorphous micro-ring arrays in crystalline silicon using ultrashort laser pulses, *Appl. Phys. Lett.*, **110**, 211602 (2017).
- [34] K. Ujihara, Reflectivity of metals at high temperatures, *J. Appl. Phys.*, **43**, 2376 —2383 (1972).
- [35] T. Wu, C. Zhou, E. Dai, and J. Xie, Experimental study of the time-resolved reflectivity of chromium film, *Chin. Opt. Lett.*, **7**, 653–655 (2009).
- [36] M. Spellauge, J. Winter, S. Rapp, C. McDonnell, F. Sotier, M. Schmidt, and H. P. Huber, Ultrafast pump-probe ellipsometry and microscopy reveal the surface dynamics of femtosecond laser ablation of aluminium and stainless steel, *Appl. Surf. Sci.*, **511**, 145514 (2020).
- [37] R. Moser, M. Domke, J. Winter, H. P. Huber, and G. Marowsky, Single pulse femtosecond laser ablation of silicon – a comparison between experimental and simulated two-dimensional ablation profiles, *Adv. Opt. Techn.*, **7**(4), 255–264 (2018).

FEMTOSEKUNDINIŲ LAZERIU INDUKUOTO PAŽEIDIMO DINAMIKOS TYRIMAS SILICYJE ŽADINIMO-ZONDAVIMO METODU

Gintarė Ždanaitė

Santrauka

Konkurencingoje pramonėje apdirbimo našumas turi visuomet augti, todėl metai iš metų ieškomi būdai padidinti apdirbimo efektyvumą. Lazerinio apdirbimo efektyvumo padidinimui buvo sukurtas papliūpų režimas, kurio metu generuojami impulsai, kurie yra padalinti į didelio pasikartojimo dažnio subimpulsus. Gaunami papliūpų režimo abliacijos efektyvumai skirtingoms medžiagoms skiriasi, todėl iki šiol nėra lengva prognozuoti kokių parametrų reikia apdirbamai medžiagai. Norint padidinti apdirbimo efektyvumą svarbu susipažinti su pažeidimo dinamikos tendencijomis naudojant skirtingas apdirbimo konfigūracijas.

Šiame darbe tiriamas impulso sąveikos poveikis kristaliniam nelegiruotam siliciui, naudojant žadinimo-zondavimo metodą. Tyrimui naudota Yb:KGW lazerinė sistema, spinduliuojanti 1030 nm, 320 fs bangos ilgio spinduliuotę, kurios pluoštas buvo naudojamas bandinio žadinimui, o sugeneruota antroji harmonika - 515 nm bandinio zondavimui. Norint įsitikinti ar sistema tinkamai veikia pirmiausia buvo užregistruota vienu impulsu indukuoto pažeidimo dinamika chrome. Dinamikoje buvo stebimi metalui būdingi atspindžio koeficiento pokyčiai užregistruoti skirtingais vėlinimo laikais. Įsitikinęs, kad sistema yra tinkama dinamikos registravimui kiti eksperimentai buvo atlikti su siliciu. Žadinant silicį pavieniais impulsais, su $0,74 \text{ J/cm}^2$ ir $0,55 \text{ J/cm}^2$ energijos tankiais, abliacija nebuvo stebima, tačiau dinamikos pagalba galima stebėti tokius procesus: kintantį sužadintų krūvininkų tankį, temperatūros augimą, lydymąsi, lydalo perkaitimą ir aušimą. Galutinėje būsenoje stebėtas susiformavęs amorfinio silicio žiedas, kuriam būdingas didesnis atspindžio koeficientas. Tokie pat eksperimentai atlikti su dvigubais žadinančiais impulsais, kurie vienas kito atžvilgiu užvėlininti trukmėmis: 1 ps, 300 ps, 600 ps. Užfiksuotose dinamikose matyti, kad apdirbant pavieniais impulsais ir dvigubais impulsais su 1 ps vėlinimu stebimi vienodi procesai, o galutinės silicio modifikacijos bei paveikta zona panašios. Naudojant didesnes vėlinimo vertes sužadinta zona mažesnė, o naudojant didesnę impulsų energiją galima stebėti abliaciją. Visų eksperimentų metu galutinėse būsenose susiformavo amorfinio silicio žiedukas, kuris galimai gali būti kaip geras temperatūros indikatorius.

Registruojant indukuoto pažeidimo dinamikas galima stebėti kaip kinta medžiagos atspindžio koeficientas ir susieti kitimą su vykstančiais procesais. Visgi atlikto eksperimento metu nėra įrodyta, kad ilgalaikis silicio savybių pokytis amorfizuojantis gali būti tinkamas temperatūros indikatorius, padedantis identifikuoti visą šilumos paveikto ploto profilį.

INVESTIGATION OF FEMTOSECOND-LASER-INDUCED DAMAGE DYNAMICS IN SILICON USING PUMP-PROBE TECHNIQUE

Gintarė Ždanaitė

Summary

In a competitive industry, efficiency of material processing must constantly increase, so various methods to achieve that are being sought. A burst mode, which generates pulses that are divided into high-repetition frequency sub pulses, was invented as one of the ways to increase processing efficiency. The resulting ablation efficiencies of the burst mode vary for different materials, so it is not yet easy to predict what parameters are required for the material being processed. In order to increase material processing efficiency, it is important to get acquainted with the trends of damage dynamics using different processing configurations.

In this paper, the effect of pulse interaction on crystalline unalloyed silicon using pump-probing method is investigated. The study used a Yb:KGW laser system emitting 1030 nm, 320 fs wavelength radiation, which beam was used to excite the sample, and a second harmonic was generated to probe the sample at 515 nm. To verify that the system was functioning properly, the dynamics of single-pulse-induced damage in chrome was first recorded. In the dynamics, metal-specific changes in the reflection coefficient were observed and recorded at different delay times. After making sure that the system was suitable for recording the dynamics, other experiments were performed with silicon. No ablation was observed when silicon was excited by single pulses with energy densities of 0,74 J/cm² and 0,55 J/cm², but the processes like changing density of excited carriers, temperature rise, overheating and cooling of the melt can be observed with the help of dynamics. In the final state, the formation of an amorphous silicon ring with a higher coefficient of reflection was observed. The same experiments were performed with double excitation pulses, which were delayed with respect to each other by durations: 1 ps, 300 ps, 600 ps. The observed dynamics show that the same processes are observed during single pulse and double pulse processing with a 1 ps delay, and the final modifications of silicon and the affected area are similar. With higher delay values, the excited zone is smaller, and with higher pulse energy, ablation can be observed. During all experiments, an amorphous silicon ring was formed in the final states, which could potentially serve as a good indicator of temperature.

By recording the dynamics of the induced damage, it is possible to observe the change of the reflection coefficient of the material and to relate the change to the ongoing processes. However, it has not been demonstrated in the experiment that a long-term change in the amorphizing properties of silicon can be a suitable indicator of temperature to help identify the entire heat-affected area profile.