

Vilniaus universiteto  
Fizikos fakulteto  
Lazerinių tyrimų centras

Mantas Gaidys

LAZERINĖS ABLIACIJOS EFEKTYVUMAS APDIRBANT METALUS ULTRATRUMPŲJŲ  
IMPULSŲ VOROMIS: GRĖŽIMAS IR FREZAVIMAS

Magistrantūros studijų baigiamasis darbas

Lazerinės technologijos  
studijų programa

Studentas

Mantas Gaidys

Leista ginti

2020-06-02

Darbo vadovas

dr. Mindaugas Gedvilas

Konsultantas

dr. Eugenijus Gaižauskas

Centro direktorius

doc. dr. Aidas Matijošius

Vilnius 2020

## **Turinys**

1 Įvadas.....	3
2 Literatūros apžvalga .....	4
2.1 Lazerinė abliacija.....	4
2.1.1 Impulsų trukmė.....	7
2.1.2 Abliacijos slenkstis .....	9
2.2 Abliacija naudojant impulsų voras .....	10
2.3 Lazerinis mikroapdirbimas .....	13
2.3.1 Lazerinis gręžimas.....	13
2.3.2 Lazerinis frezavimas.....	16
2.4 Efektyvi lazerinė abliacija .....	18
3 Eksperimentų apžvalga.....	20
3.1 Eksperimentinė įranga ir bandiniai.....	20
3.2 Eksperimentų parametrai .....	21
3.3 Pluošto dėmės dydžio valdymas ant bandinio paviršiaus.....	23
4 Tyrimo rezultatai .....	25
4.1 Lazerinis frezavimas.....	25
4.2 Lazerinis gręžimas.....	31
Pagrindiniai rezultatai ir išvados .....	34
Literatūros sąrašas .....	35
Santrauka .....	39
Summary.....	40
Rezultatų viešinimas.....	41

## 1 Įvadas

Sparčiai besivystančiose elektronikos, fotonikos, medicinos, automobilių ir kitose pramonės šakose auga mažų, mikrometrinių, matmenų struktūrų poreikis. Šį poreikį sėkmingai pildo lazerinis mirkoapdirbimas, nes tai yra itin tiksli, bekontaktė, greita ir universali technologija [1–3]. Naudojant lazerinę spinduliuotę galima pjauti ir gręžti net karščiui jautrias medžiagas, tokias kaip emalis [4]. Vienas didžiausių lazerinio mirkoapdirbimo privalumų yra apdirbamų medžiagų pasirinkimo laisvė. Įvairūs metalai ir jų lydiniai yra sėkmingai apdirbami ultratrumpaisiais lazeriniais impulsais, o tarp jų taip pat varis ir nerūdijantis plienas. Varis yra gana pigus ir ištekliais gausus metalas. Dėl savo naudingų savybių, tokių kaip: atsparumas korozijai ir didelis elektrinis ir šiluminis laidumas, jis plačiai naudojamas pramonėje [5–8]. Kita plačiai naudojama medžiaga yra nerūdijantis plienas. Jis pasižymi atsparumu korozijai bei rūdijimui ir dideliu kietumu [9,10]. Kadangi nerūdijantis plienas yra prastas šilumos ir elektros laidininkas, jis gali atlaikyti itin aukštas apdirbimo temperatūras bei būti taikomas vietose su ekstremaliomis sąlygomis [11]. Būtent šios medžiagos dėl savo skirtingų savybių bei plataus naudojimo buvo pasirinktos bandymams. Naudojant lazerinę spinduliuotę yra įmanoma gręžti [12–15], pjauti [16–18], keisti spalvą [19] bei formuoti dviejų su puse (2,5D) [20,21] ir trijų (3D) dimensijų struktūras [22] ant šių medžiagų. Tobulinant lazerinio apdirbimo technologijas buvo pradėtos naudoti didelio pasikartojimo dažnio impulsų voros [23]. Tai leido pasiekti didesnius abliacijos efektyvumus bei mažesnius paviršiaus šiurkštumus apdirbimo metu [24].

Tačiau, platų ultratrumpųjų impulsų lazerinės spinduliuotės naudojimą pramonėje vis dar stabdo nepakankamai didelė medžiagų apdirbimo sparta bei didelė pradinė investicijos kaina [25]. Lazerinės abliacijos efektyvumas priklauso nuo lazerio ir apdirbimo parametrų: pluošto skenavimo greičio, impulsų pasikartojimo dažnio, pluošto skersmens, vidutinės spinduliuotės galios bei kitų. Šiame darbe, naudojant energijos tankio optimizavimo teorinį modelį, buvo atlikti eksperimentiniai abliacijos tyrimai, vertinant impulsų voros įtaką lazerinio gręžimo ir frezavimo efektyvumui metaluose (pliene ir varyje).

Šio darbo tikslas eksperimentiškai ištirti lazerinio gręžimo ir frezavimo efektyvumą ir apdirbimo kokybę dirbant impulsų voros ir bivoros veikose bei nustatyti voroje esančių impulsų skaičiaus įtaką šiems procesams.

## 2 Literatūros apžvalga

### 2.1 Lazerinė abliacija

Naudojant lazerinę spinduliuotę medžiagą galima paveikti tam tikros trukmės impulsais su pasirinktu pasikartojimo dažniu. Lazerio aktyviojoje terpėje sukaupia energija yra išspinduliuojama per itin trumpą laiko tarpą, o tai leidžia pasiekti itin dideles smailines galias. Kadangi naudojant standartinę galvanometrinių skenerio optiką lazerio pluoštą galima sufokusuoti į skersmenis, kurie siekia 1 – 50  $\mu\text{m}$ , yra gaunami itin dideli energijos tankiai bei intensyvumai. Šiuo metu dauguma lazerinių sistemų gali nesunkiai pasiekti  $10^{17}$  -  $10^{22}$   $\text{W/m}^2$  intensyvumus, kurie nėra įmanomi naudojant kitas mikroapdirbimo technologijas. Taigi, pramonėje yra didelė įvairovė medžiagų, kurias įmanoma apdirbti lazerine spinduliuote [26]. Lazerio spinduliuotė yra labai stabili, o tai reiškia, jog lazerio ir medžiagos sąveika visada bus tokia pati esant pastoviems apdirbimo parametrams, o tai sąlygoja didelį pasiekiamą apdirbimo atkartojamumą. Taip pat reikia atkreipti dėmesį ir į fotonų energiją, nes ji taip pat įtakoja abliacijos mechanizmą. Pavyzdžiui, eksimeriniai lazeriai spinduliuoja ultravioletinę spinduliuotę, kurių fotonų energija yra beveik lygi puslaidininkių ir polimerų ryšių energijai. Taigi, naudojant tokius lazerius galima sparčiai abliuoti šias medžiagas beveik be jokio šiluminio poveikio [27]. Lazerinės spinduliuotės ir medžiagos sąveiką įtakoja keletas medžiagos charakteristikų. Efektyviausia lazerinė abliacija vyksta naudojant tokį bangos ilgį, kurį apdirbama medžiaga stipriai tiesiškai sugeria. Didesnė tiesinė sugertis reiškia spartesnę abliaciją. Vienas iš būdų padidinti sugertį yra bandinius dengti itin plonos dangos sluoksniais [28]. Dar viena svarbi charakteristika yra šiluminis laidumas. Šis fizikinis dydis lemia sugertos energijos sklidimą gilyn į medžiagą, energijos nuostolius, kurie nulemia abliacijos efektyvumą ir šilumos paveiktos zonos dydį. Jei, pavyzdžiui, turime keramikines medžiagas, jų lydymosi ir garavimo temperatūros yra labai didelės, o šiluminis laidumas mažas. Tuo tarpu metalus išgarinti sunku, bet lengva išlydyti [26].

Lazerinei spinduliuotei krintant į medžiagos paviršių dalis spinduliuotės yra atspindima, dalis išsklaidoma, dalis pereina kiaurai (jei metalo storis mažesnis už sugerties gylį), dalis sugerama [29]. Sugerta dalis skverbiasi gilyn ir slopsta pagal Lamberto – Bero – Bugerio dėsnį:

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

čia  $I_0$  – pradinis kritęs šviesos intensyvumas,  $R$  – medžiagos atspindžio koeficientas,  $\beta$  – tiesinės sugerties koeficientas,  $z$  – gylis.

Sugerties koeficientas  $\beta$  yra lygus [30]:

$$\beta = \frac{4\pi\kappa}{\lambda}, \quad (2)$$

čia  $\kappa$  – ekstinkcijos koeficientas,  $\lambda$  – spinduliuotės bangos ilgis.

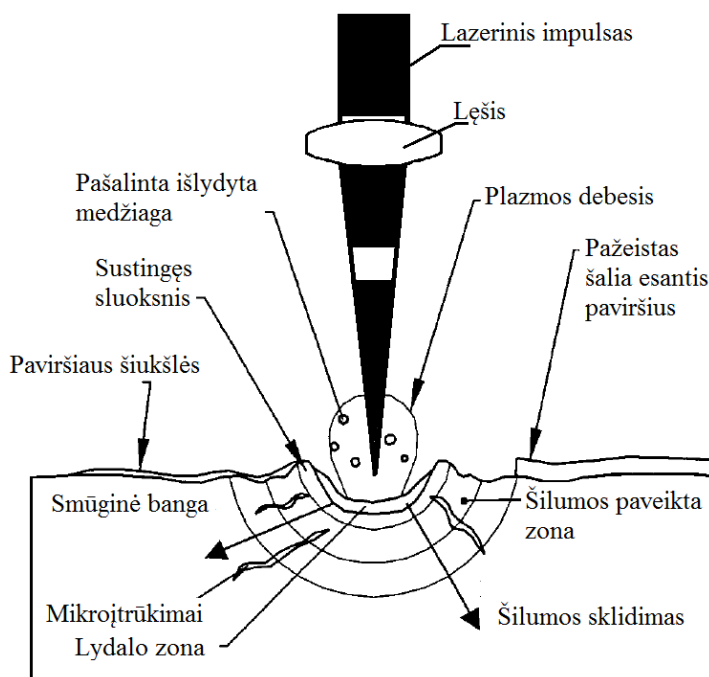
Iš (2) lygties matome, jog sugerties koeficientas nepriklauso nuo pradinio intensyvumo, bet šioje formulėje yra įskaitomi tik tiesinės optikos reiškiniai. Naudojant lazerinę spinduliuotę yra pasiekiami itin dideli intensyvumai, kurie sukelia sugertį didinančius netiesinius efektus. Pagal tiesinį sugerties modelį, elektronai yra sužadunami fotonų ir perduoda šilumą gardelei. Tai sukelia medžiagos lydymąsi ir garavimą. Naudojant ultratrumpuosius impulsus intensyvumai yra tokie dideli, jog medžiagos surištieji elektronai gali būti tiesiogiai išlaisvinti [31]. Gali pasireikšti daugiafotonė sugertis ir griūtinė jonizacija. Iš lazerio spinduliuotės paveiktos zonos, dėl medžiagos šiluminio laidumo, šiluma plinta gilyn ir atsiranda šilumos paveikta zona. Kadangi metalų valentinė ir laidumo juostos persikloja, jie gali sugerti net mažų energijų fotonus. Sugertis vyksta elektronuose, kurie yra laidumo juostoje, ties Fermi lygmeniu. Taigi, metalams lazerinės spinduliuotės sugertis nėra problema. Kiek kitaip yra su puslaidininkiais ir dielektrikais, kuriems priklauso tokios medžiagos, kaip polimerai. Tiek puslaidininkiai, tiek dielektrikai tarp valentinės ir laidumo juostos turi draustinį juostų tarpą. Elektronas turi sugerti tam tikrą energijos kiekį, kad galėtų pereiti draustinį juostų tarpą [32]. Esant tiesinei fotonų sugerčiai, šis energijos kiekis apriboja, kokios energijos fotonai bus sugerti. Tačiau dėl didelio lazerinės spinduliuotės intensyvumo galimi ir anksčiau minėti netiesiniai procesai: griūtinė jonizacija ir daugiafotonė sugertis. Griūtinės jonizacijos metu, laisvieji elektronai yra pagreitinami lazerinės spinduliuotės kuriamo elektrinio lauko. Pagreitinti laisvieji elektronai susiduria su surištaisiais elektronais ir suteikia jiems pakankamai energijos, kad juos išlaisvintų. Taigi, padidėja laisvųjų elektronų skaičius ir procesas gali kartotis. Daugiafotonės sugerties metu, elektronas sugeria daugiau nei vieną fotoną tam, jog pereitų iš valentinės į laidumo juostą. Kai medžiagoje yra pasiekiamas kritinis laisvų elektronų kiekis, dielektrinės medžiagos optinės savybės tampa panašios į metalų, prasideda tiesinė sugertis ir abliacija [31].

Naudojant impulsinę lazerinę spinduliuotę egzistuoja keletas medžiagos pašalinimo mechanizmų, kurie priklauso nuo impulso trukmės ir kitų medžiagos laikinių parametų. Šie laikiniai parametrai yra:  $\tau_e$  – elektronų atvėsimo laikas,  $\tau_i$  – gardelės įkaitimo laikas ir  $\tau_L$  – lazerinio impulso trukmė. Elektronų atvėsimo laikas yra žymiai trumpesnis nei gardelės įkaitimo laikas, kuris daugumai medžiagų yra pikosekundžių eilės dydis [12,33]. Egzistuoja trys skirtingi abliacijos mechanizmai priklausomai nuo impulsų trukmės:

- a) nanosekundinių ir ilgesnių trukmių,  $\tau_e < \tau_i < \tau_L$
- b) pikosekundinių,  $\tau_e < \tau_L < \tau_i$
- c) femtosekundinių,  $\tau_L < \tau_e < \tau_i$

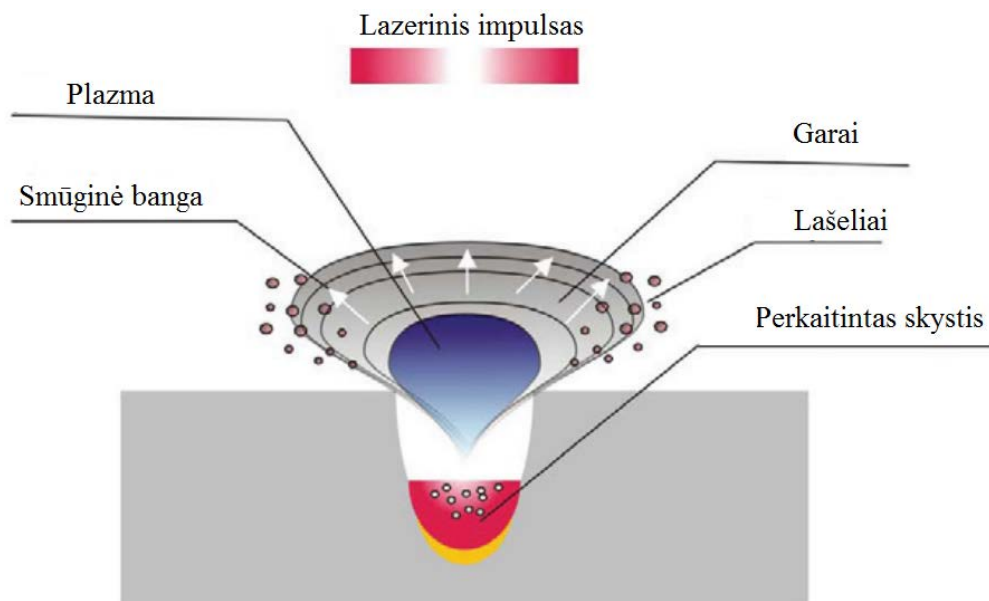
Nanosekundinių ir ilgesnių impulso trukmių atveju, abliacijos mechanizmas parodytas (1 pav.). Šiuo atveju, sugerta lazerinės spinduliuotės energija lydo medžiagą bei kelia lydalo temperatūrą iki virimo temperatūros. Šis laiko tarpas yra pakankamas, jog šiluma sklistų gilyn į medžiagą. Kai medžiaga pradeda garuoti, atsiradęs plazmos ir garų slėgis pašalina dalį išlydytos medžiagos iš

abliacijos erdmės, bet dalis lieka dėl paviršiaus įtempio jėgų. Impulsui pasibaigus, šiluma išsisklaido gilyn į medžiagą ir susiformuoja sustingęs lydalo sluoksnis [26]. Apdirbant medžiagas nanosekundiniais ir ilgesniais impulsais yra gaunami įvairūs antriniai abliacijos poveikiai: šilumos paveikta zona, sustingęs lydalo sluoksnis, paviršiaus pažeidimai dėl smūginės bangos ir didelis kiekis paviršiaus šiukšlių, kurios nusėda abliuojant medžiagą. Taip pat į garus paversta medžiaga suformuoja plazmą nuo impulso pradžios iki jo pabaigos. Dėl to pasireiškia plazmos ekranavimas – plazma sugeria dalį spinduliuotės ir medžiagą pasiekia mažesnis energijos tankis [34].



**1 pav.** Lazerinė abliacija naudojant nanosekundinių ir ilgesnių trukmių impulsus [26].

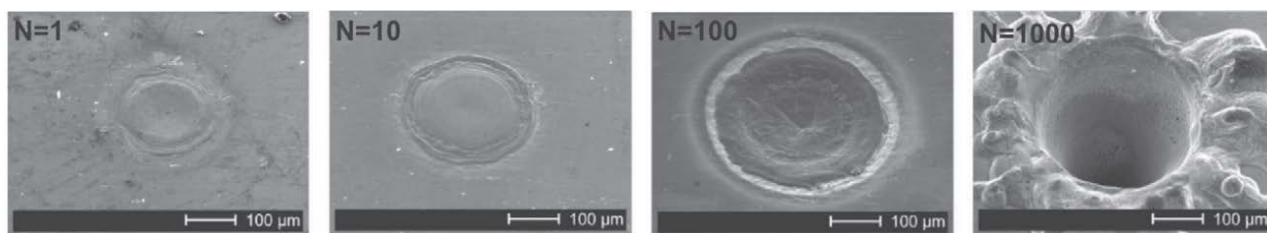
Lazerinės abliacijos mechanizmas naudojant pikosekundinius ir femtosekundinius impulsus yra gan panašus (2 pav.). Dėl trumpo medžiagos ir lazerinės spinduliuotės sąveikos laiko šiluma beveik nespėja pereiti gilyn į medžiagą ir smarkiai sumažėja šilumos paveiktos zonos [31,35]. Ultratrumpųjų impulsų metu yra pasiekiami ekstremalūs slėgiai ir temperatūros, o tai pagreitina jonizuotas daleles iki km/s greičių. Dėl trumpo sąveikos laiko medžiaga nespėja pilnai išgaruoti, bet yra paverčiama į perkaitintą skystį. Šis skystis susimaišo su garais į didelio slėgio garų ir lašelių mišinį, kuris sparčiai plečiasi. Šis mechanizmas yra vadinamas fazės sprogimu [36].



**2 pav.** Lazerinė abliacija naudojant pikosekundinių ir femtosekundinių trukmių impulsus [37].

### 2.1.1 Impulsų trukmė

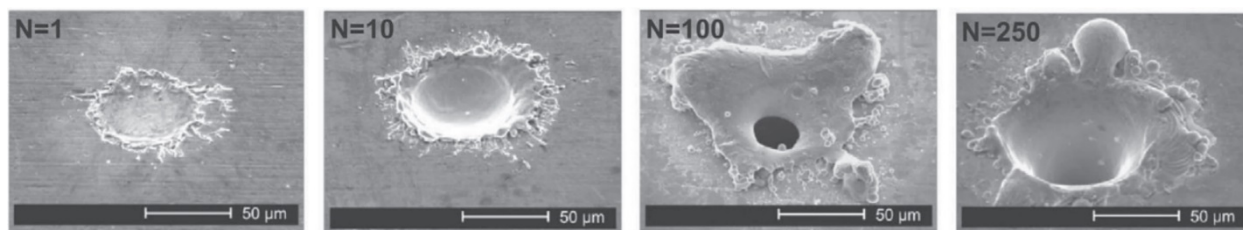
Lazerinei abliacijai ir jos kokybei didelę įtaką turi impulsų trukmė. Abliaciją ilgais, mikrosekundžių trukmės impulsais, galime matyti (3 pav.). Naudojant mikrosekundinės trukmės impulsus procesas yra šiluminis. Procese vyrauja vietinis lydymasis ir šilumos skverbimasis gilyn į medžiagą dėl šiluminio laidumo. Medžiagos garinimas beveik nepasireiškia ją veikiant vienu impulsu. Išabliuoto kraterio skersmuo stabiliai didėja iki 100 impulsų į viena tašką. Šovus 100 impulsų į vieną vietą jau galima išvelgti stiprų medžiagos garinimą dėl inkubacijos efekto. Toliau didinant impulsų skaičių vis labiau pasireiškia medžiagos pašalinimas dėl lydalo išstūmimo ir garinimo.



**3 pav.** Lazerinė abliacija naudojant mikrosekundinius impulsus [37].

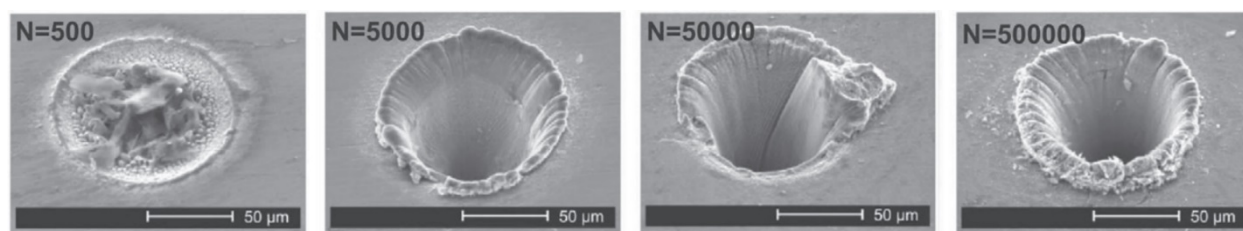
Nanosekundinių impulsų atveju (4 pav.) lazerinės abliacijos procesas susideda iš medžiagos lydymosi, garavimo ir plazmos susidarymo. Tačiau, lydalo pašalinimas dėl medžiagos garavimo pasireiškia esant mažesniai impulsų skaičiui, nei naudojant mikrosekundinius impulsus. Didinant impulsų skaičių, išabliuotas krateris gylėja. Krateriui gilėjant, lydalas vis sunkiau pasišalina nuo

dugno, todėl skysta medžiaga sėda ant kraterio vidinių sienelių ir dėl to pats krateris gali dalinai ar visiškai užakti. Dėl to mažėja abliacijos sparta ir efektyvumas.



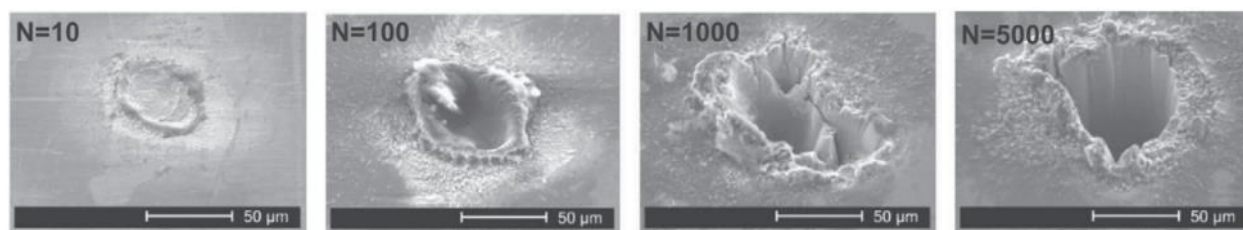
**4 pav.** Lazerinė abliacija naudojant nanosekundinius impulsus [37].

Pikosekundinių impulsų energijos yra gerokai mažesnės už nanosekundinių impulsų. Dėl to kraterio skersmuo beveik nedidėja didinant impulsų skaičių virš 500 į vieną tašką (5 pav.). Kraterio išabliuoto su 500 impulsais viduryje buvo matoma struktūra ir aplink ją esantys lydalo lašeliai susidarė dėl fazės sprogimo. Didinant impulsų skaičių aplink kraterį buvo matomos užvartos, kurios susidarė dėl sustingusio lydalo.



**5 pav.** Lazerinė abliacija naudojant pikosekundinius impulsus [37].

Kaip ir pikosekundinių impulsų atveju, lazerinei abliacijai naudojant femtosekundinius impulsus aplink kraterį buvo matomi sustingę lydalo lašai, kurie susidarė dėl fazės sprogimo (6 pav.). Femtosekundinių impulsų atveju aplink kraterio užvartas buvo matomos periodinės paviršiaus struktūros. Didinant impulsų skaičių užvartų aukštis didėjo. Užvartų augimas buvo nulemtas išabliuotos medžiagos kondensacijos.



**6 pav.** Lazerinė abliacija naudojant femtosekundinius impulsus [37].



### 2.1.2 Abliacijos slenkstis

Kad medžiagoje įvyktų lazerinė abliacija, lazerinės spinduliuotės energijos tankis turi viršyti ribinę  $F_{th}$  energijos tankio vertę vadinamą abliacijos slenksčiu. Lazerio impulsai, kurių energija yra mažesnė už slenkstinę, sukelia struktūrinius ir cheminius poveikius medžiagoje. Abliacijos slenkstis priklauso nuo medžiagos savybių ir lazerio spinduliuotės parametrų. Eksperimentiškai jis nustatomas iš sąryšio su lazerio spinduliuote išabliuoto kraterio diametru  $D$  [38]:

$$D^2 = 2w_0^2 \ln\left(\frac{F_0}{F_{th}}\right). \quad (3)$$

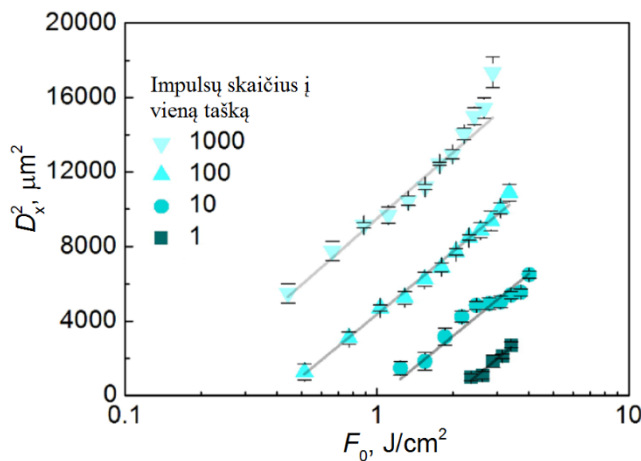
Yra brėžiamas  $D^2(\ln(F_0))$  grafikas, jis aproksimuojamas tiese ir vieta, kurioje tiesė kerta abscisių ašį, yra abliacijos slenkščio vertė (7 pav.).

Pagal Jee [39] akumuliacijos modelį abliacijos slenkstis taip pat priklauso nuo impulsų skaičiaus į vieną tašką:

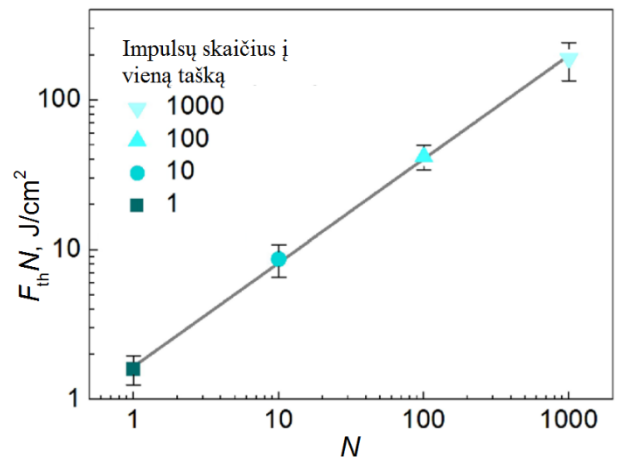
$$F_{th}(N) = F_{th}(1)N^{\zeta-1}. \quad (4)$$

čia  $N$  – impulsų skaičius,  $\zeta$  – akumuliacijos koeficientas.

Akumuliacijos koeficientas aprašo defektų kaupimąsi. Jei  $\zeta = 1$ , kaupimasis nevyksta. Jei  $\zeta$  vertė viršija vieneta, vadinasi vyksta lazerinis medžiagos grūdinimas. Metalams akumuliacijos koeficientas yra apie 0,7 - 0,9. Eksperimentiškai akumuliacijos koeficientą galima apskaičiuoti iš  $F_{th}(N)$  grafiko (8 pav.) [38].



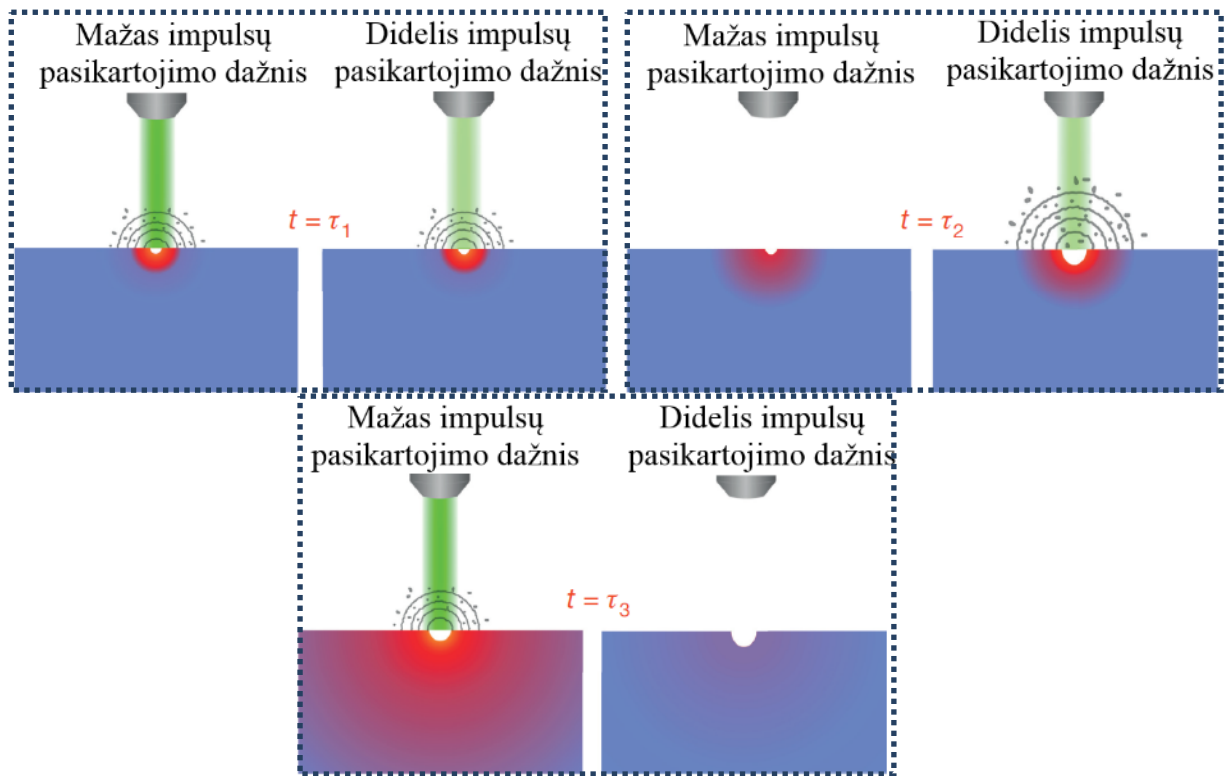
**7 pav.** Kraterių diametro priklausomybė nuo energijos tankio varijavus į vieną tašką šovus 1, 10, 100 ir 1000 impulsų. Eksperimentiniai taškai aproksimuoti (3) formule [40].



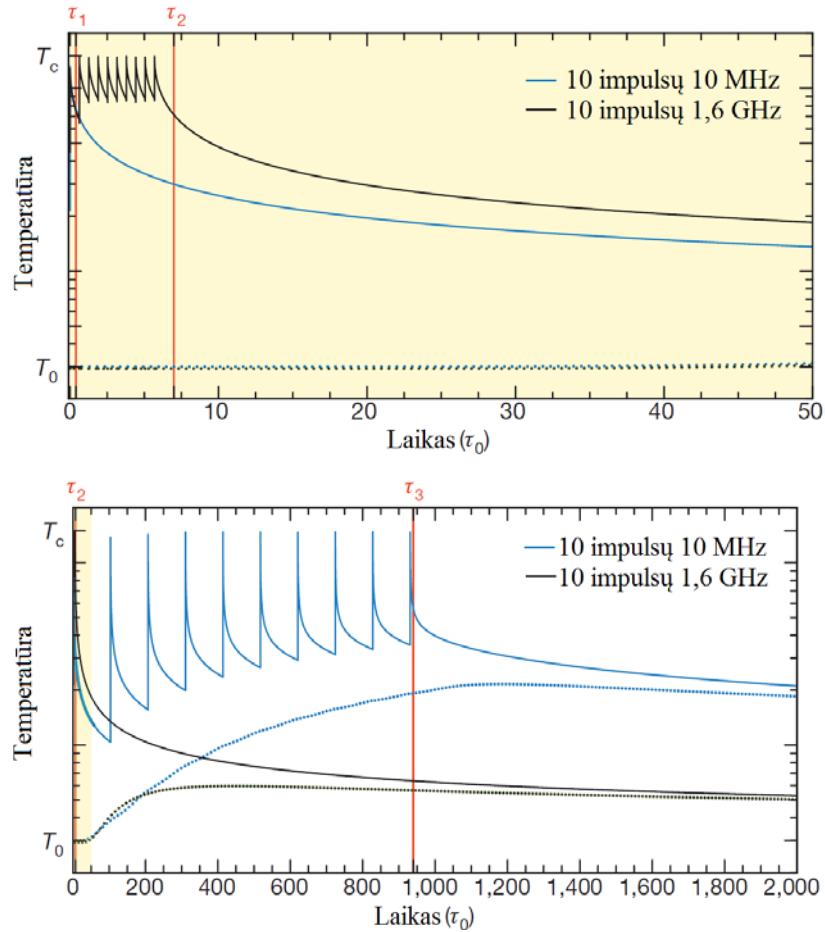
**8 pav.** Abliacijos slenkščio ir impulsų skaičiaus sandaugos priklausomybė nuo impulsų skaičiaus varijavus į vieną tašką šovus 1, 10, 100 ir 1000 impulsų. Eksperimentiniai taškai aproksimuoti (4) formule [40].

## 2.2 Abliacija naudojant impulsų voras

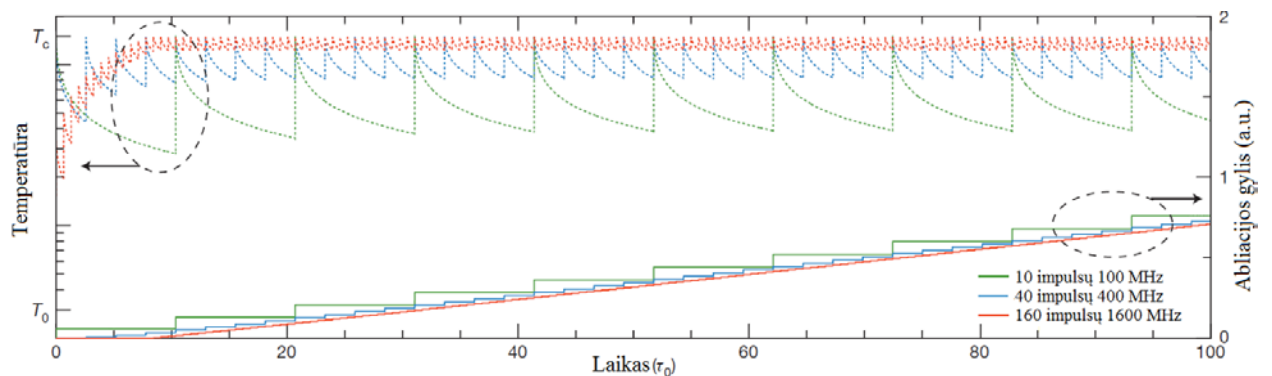
Lazerinė abliacija naudojant femtosekundinius impulsus leidžia pasiekti itin tikslų medžiagos apdirbimą su labai mažomis šilumos paveiktomis zonomis [41]. Tačiau platų femtosekundinių impulsų panaudojimą pramonėje riboja maža abliacijos sparta bei didelė technologijos kaina [42]. Šiuolaikinės lazerinės technologijos leidžia femtosekundiniams lazeriams pasiekti aukštus energijos tankius, kurie yra reikalingi efektyviai lazerinei abliacijai. Apdirbant medžiagas ultratrumpaisiais lazerio impulsais pasireiškia šalutiniai neigiami abliacijos efektyvumą ir apdirbimo kokybę mažinantys reiškiniai, tokie kaip lazerio pluošto ekranavimas abliacijos produktais – medžiagos dalelėmis ir plazma, bei terminiai reiškiniai medžiagos paviršiuje dėl šilumos akumuliacijos. Norint išspręsti šias problemas, buvo panaudotos ultratrumpųjų impulsų voros [23]. Laiko tarpas tarp voroje esančių impulsų yra pakankamai trumpas, jog šiluma medžiagoje nespėtų išsisklaidyti. Šis procesas buvo pavadintas vėsinimas abliacija (angl. *ablation cooling*). Sąveikos metu medžiagos temperatūra yra pakeliama iki virimo temperatūros, todėl vyksta abliacija. Kadangi laiko tarpas tarp dviejų impulsų voroje yra trumpesnis už trukmę, reikalingą šilumai difunduoti iš sąveikos zonos, pirmojo impulso sugeneruota šiluminė energija yra pašalinama kartu su antrojo impulso išabliuota medžiaga. Kerse [23] parodė, jog naudojant GHz pasikartojimo dažnio impulsų voras įmanoma pasiekti vėsinimo abliacija efektą. Tai leidžia naudoti mažesnius energijos tankius lazerinei abliacijai, o abliacijos sparta padidėja beveik per eilę. Naudojant lazerį nanosekundinių impulsų veikos režimu, medžiaga vėsta dėl šiluminio laidumo žymiai sparčiau nei dėl vėsinimo abliacija. Dėl šiluminio laidumo šiluma pereina iš apdirbimo vietos gilyn į medžiagą ir tai yra besitęsiantis procesas tol, kol medžiaga yra veikiamą lazeriniais impulsais. Tam, jog vėsinimo abliacija efektas taptų reikšmingas, laiko tarpas tarp impulsų (dydis atvirkščiai proporcingas impulsų pasikartojimo dažniui) turi būti sumažintas iki tiek, kad apdirbimo vieta nespėtų reikšmingai atvėsti (9 pav.). Naudojant impulsų vorų režimą ir didelį impulsų pasikartojimo dažnį, pavienių impulsų energijos tankis gali būti mažesnis nei, tiesiog, impulsinėje veikoje, nes dėl vėsinimo abliacija efekto bandinio paviršiuje esanti šiluma nespėja pereiti gilyn į bandinį lazerio – medžiagos sąveikos metu. Yra du pagrindiniai impulsų voros privalumai. Pirmas, jog padidinus impulsų pasikartojimo dažnį sumažėja šilumos žala aplink apdirbimo zoną, nes beveik visa šiluma pašalinama iš apdirbimo zonos su abliacijos produktais (10 pav.). Šiluminiai nuostoliai į medžiagos turį sumažėja, todėl padidėja abliacijos efektyvumas. Antrasis privalumas yra tas, jog galima naudoti mažesnę energijos tankį, atitinkamai išdalinus jį keliems impulsams, nes abliacijos efektyvumas išlieka toks pat (11 pav.). Tai leidžia išvengti dalelių ekranavimo [23]. Jeigu impulsų pasikartojimo dažnis būtų didinamas nekeičiant impulsų energijos, pasireikštų žymiai stipresnis pluošto ekranavimas dalelėmis, nes abliacijos metu susidariusi plazma ir išabliuotos dalelės atspindi, sugeria ir sklaido lazerinę spinduliuotę [43].



**9 pav.** Principinė vėsinimo abliacija schema. Mažas impulsų pasikartojimo dažnis (MIPD) – 10 MHz, per mažas vėsinimui abliacija. Didelis impulsų pasikartojimo dažnis (DIPD) – 1,6 GHz, pakankamas vėsinimui abliacija. Schemoje atvaizduota bandinio temperatūra skirtingais laiko intervalais.  $t = \tau_1$  laikas, kai abejais atvejais baigiasi pirmas impulsas,  $t = \tau_2$  MIPD atveju laikas prieš pat antrą impulsą, DIPD atveju laikas iškart po paskutinio (dešimto) impulso,  $t = \tau_3$  laikas iškart po paskutinio (dešimto) impulso MIPD atveju. Bandinio temperatūra sumodeliuota pagal (10 pav.) [23].



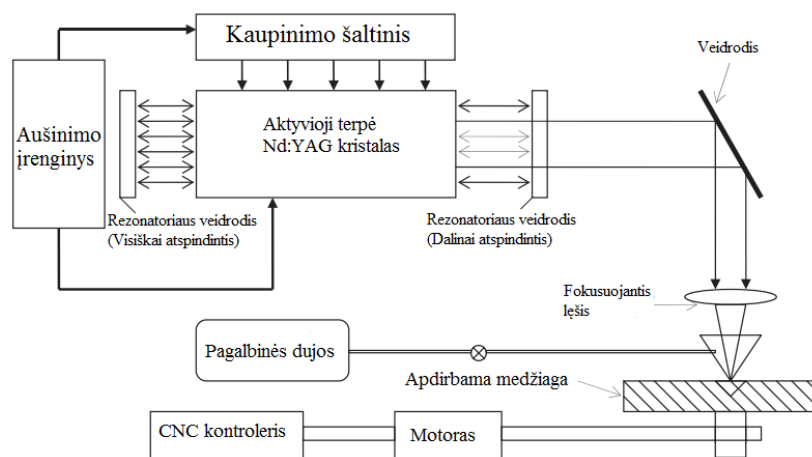
**10 pav.** Sumodeliuotos bandinio temperatūros abliacijos metu. Ištininė linija – temperatūra bandinio paviršiuje, punktyrinė linija – bandinio temperatūra gilyje, kuris yra trisdešimt kartų didesnis už sugerties gylį. Viso bandymo metu impulsų energijos yra vienodos. Bandinio temperatūra buvo mažesnė naudojant didesnę impulsų pasikartojimo dažnį dėl vėsinimo abliacija efekto. Viršutinis grafikas išdidinta apačioje esančio grafiko geltona zona [23].



**11 pav.** Sumodeliuota bandinio temperatūra (punktyrinė linija) ir išabliuotas kiekis (ištininė linija) naudojant skirtingus impulsų skaičius ir impulsų pasikartojimo dažnius. Išabliuotas gylis išlieka beveik toks pat [23].

## 2.3 Lazerinis mikroapdirbimas

Medžiagos pašalinimas lazerinio mikroapdirbimo metu apima kelis skirtingus etapus: medžiagos lydymąsi, garavimą ir cheminius jos pokyčius, kai yra nutraukiami cheminiai ryšiai tarp molekulių. Kai didelio energijos tankio sufokusuota lazerinė spinduliuotė pasiekia apdirbamą paviršių, į medžiagą yra perduodama šiluminė energija, kuri lydo ir garina medžiagą. Šis išabliuotos medžiagos tūris garų pavidalu greitai pasišalina iš apdirbimo vietos. Pašalinimo procesą gali paspartinti didelio slėgio pagalbinės dujos [44]. Tokios sistemos principinė schema yra pavaizduota (12 pav.)



12 pav. Lazerinės mikroapdirbimo sistemos, naudojant Nd:YAG lazerį, principinė schema [44].

Lazerinis mikroapdirbimas yra šiluminis procesas. Šio proceso efektyvumui didžiausią įtaką turi ne mechaninės, o šiluminės ir optinės medžiagos savybės. Taigi, medžiagos, kurios pasižymi dideliu trapumu ar kietumu, bet turi geras termines savybes, tokias kaip: maža šiluminė difuzija ir laidumas, yra itin tinkamos lazeriniam mikroapdirbimui. Kadangi energijos perdavimas tarp lazerio ir medžiagos vyksta lazerine spinduliuote, apdirbimas yra bekontaktis. Taigi, nėra jokių mechaninių apdirbimo jėgų, kurios veikia medžiagą. Taip pat dėl to nėra tokių apdirbimo trūkumų kaip: medžiagos mechaniniai pažeidimai, įrankių nusidėvėjimas ir įrangos vibracijos. Lazerinis mikroapdirbimas yra labai universalus. Jei lazerinę spinduliuotę valdys daugiaašė sistema, tos pačios staklės gali būti naudojamos gręžimui, pjovimui, virinimui ir frezavimui [45].

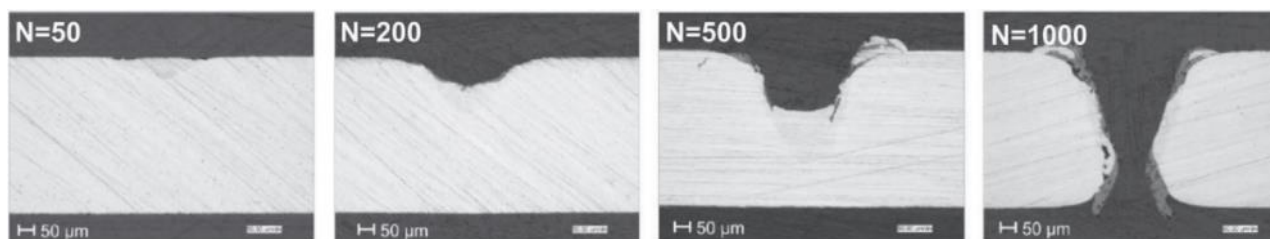
Lazerinis mikroapdirbimas dažniausiai skirstomas į tris pagrindines dalis: lazerinis gręžimas (1D), lazerinis pjovimas (2D) ir lazerinis frezavimas (3D).

### 2.3.1 Lazerinis gręžimas

Lazerinis gręžimas jau dabar plačiai naudojamas pramonėje, kaip ekonomišką procesą, kurio metu yra gręžiama tūkstančiai skylių arti viena kitos. Yra išskiriami 4 pagrindiniai lazerinio gręžimo tipai: pavienio impulso, perkusinis, trepanuojantis ir spiralinis. Pavienio impulso gręžimo metu vienas medžiagos taškas yra paveikiamas vienu impulsu. Yra pasiekiamas apie 1:15 gylis su pločiu santykis.

Dažniausiai šis būdas taikomas medžiagų paviršių trinties didinimui. Perkusinis gręžimas vienas plačiausiai naudojamų lazerinio gręžimo tipų pramonėje. Jo metu ta pati vieta yra paveikiama keletą ar keliais tūkstančiais impulsų. Nors tai pats greičiausias lazerinis gręžimo būdas galintis pergręžti medžiagas, jis turi ir trūkumų. Gręžiant gilesnę skylę medžiaga nusėda ant skylės sienelių, ten sustingsta ir ją reikia dar kartą išabliuoti. Taip pat gali susidaryti užvartos ties gręžimo vietomis. Dar vienas trūkumas yra skylės siaurėjimas. Dėl vidaus atspindžių ir sustingusio lydalo medžiagą pasieka ne visas energijos tankis, todėl skylė siaurėja. Šį procesą įtakoja ir pluošto išsifokusavimas, kai pasiekiami gyliai didesni nei lazerio pluošto Relėjaus ilgis. Trepanuojantis gręžimas yra naudojamas, kai norima pašalinti cilindro formos medžiagos tūrį. Jis taikomas skylėms, kurių skersmuo yra apie 500  $\mu\text{m}$ . Šis metodas veikia taip pat kaip perkusinis gręžimas, tačiau skylės yra gręžiamos apskritimu, jog būtų gaunama didesnio skersmens skylė. Tai leidžia sumažinti skylės siaurėjimą, tačiau kiti trūkumai išlieka ir negalima gręžti keleto mikrometrų skersmens skylių. Spiralinis gręžimas visą gręžimo procesą padaliną į kelias dalis tam, jog būtų gautas didžiausias tikslumas ir geriausia apdirbimo kokybė. Iš pradžių sukant lazerinį pluoštą yra išgręžiamas norimo skersmens apskritimas, tada bandinys yra pakeliamas per išabliuotos medžiagos storį ir procesas yra kartojamas. Šiuo metodu yra gaunamas mažiausias išabliuotos medžiagos nusėdimas ant skylės sienelių [46].

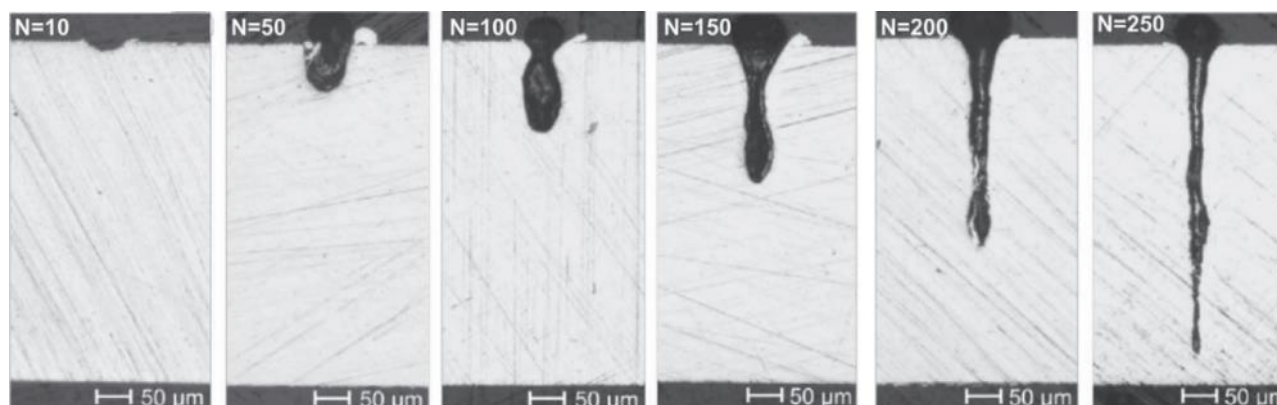
Kadangi lazerinio gręžimo metu medžiaga yra abliuojama, apdirbimo kokybei ir pačiam procesui didelę įtaką turi impulsų trukmė. Lazeriniam gręžimui panaudojus keliasdešimt mikrosekundinių impulsų (13 pav.) buvo matyti, jog abliacija nevyksta. Buvo matomas tik vietinis metalo lydymasis. Padidinus impulsų skaičių iki kelių šimtų dėl inkubacijos efekto buvo matomas medžiagos garinimas ir įvykusi abliacija. Lydalo pašalinimas įvyksta, kai garų slėgis paveikia išlydytą medžiagą ir ją išstumia. Abliacijos mikrosekundiniais impulsais atveju, iš pradžių šis procesas beveik nepasireiškia. Tik kai medžiaga yra visiškai pragręžiama lydalo pašalinimas tampa akivaizdus ir suteikia skylei kūgio formą tiek vienoje, tiek kitoje skylės pusėje [37].



**13 pav.** Lazerinis gręžimas naudojant mikrosekundinės trukmės impulsus [37].

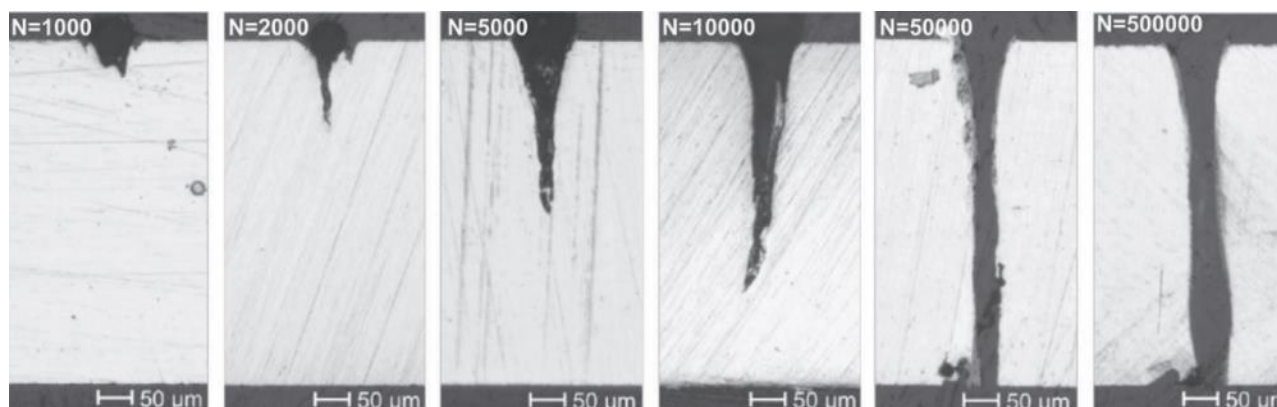
Nanosekundinių impulsų atveju (14 pav.) buvo matomas gręžiamos skylės gylio didėjimas didinat impulsų skaičių. Naudojant 10 – 50 impulsų gręžiama skylė yra plati, jos forma apvali. Aplink buvo matomos atplaišos ir sustingęs lydalas. Naudojant 100 – 150 impulsų buvo matomas gręžiamos

skylės siaurėjimas. Šiame etape lydalo pašalinimo efektyvumas stipriai sumažėja ir žymus lydalo kiekis liko skylėje. Toliau didinant impulsų skaičių smarkiai sumažėjo gręžiamos angos diametras ir ji tapo smailesnė [37].



**14 pav.** Lazerinis gręžimas naudojant nanosekundinės trukmės impulsus [37].

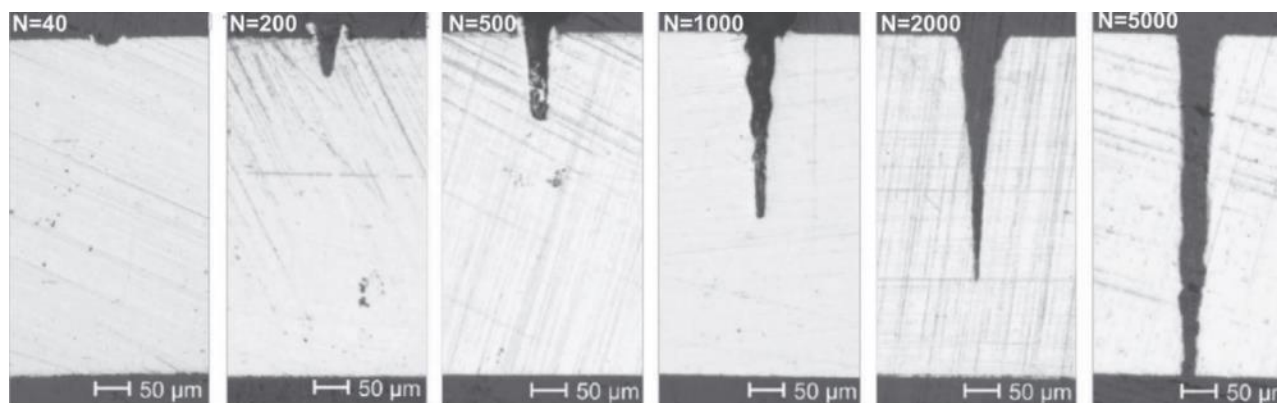
Naudojant pikosekundinės trukmės impulsus gręžiamos skylės dugnas iš pradžių yra skeltas – susidaro keletas mažesnių ertmių (15 pav.). Šis efektas yra aiškinamas tuo, jog jei yra naudojamas pakankamai didelis impulsų pasikartojimo dažnis, pavyzdžiui 50 kHz, impulsas sąveikauja su ankstesniojo impulso išabliuotomis medžiagos dalelėmis ir pačią medžiagą pasiekia mažesnis energijos tankis nei išeina iš lazerinio šaltinio [47]. Toliau didinant impulsų skaičių, gręžiama skylė gilėja ir smailėja. Esant 10000 impulsų buvo matoma varveklės formos skylė, o ant sienelių sustingęs lydalas. Ši forma gaunama dėl daugybinių lazerinės spinduliuotės vidaus atspindžių skylėje bei pačios spinduliuotės sąveikos su išabliuotomis dalelėmis [48].



**15 pav.** Lazerinis gręžimas naudojant pikosekundinės trukmės impulsus [37].

Lazeriniam gręžimui naudojant iki 500 femtosekundinių impulsų, gaunama skylė turi stačius kraštus, o dugnas yra pusrutulio formos (16 pav.). Esant mažam impulsų skaičiui į vieną vietą matomos užvartos dėl išabliuotų dalelių kondensacijos. Esant didesniam impulsų skaičiui, užvartos dingsta dėl fazės sprogimo sugeneruotos smūginės bangos, kuri pašalina užvartą [49]. Taip pat, pati

skylė smailėja, o jos sienelės tampa banguotos. Šis bangavimas atsiranda dėl daugybinių vidaus atspindžių skylėje [37,48].



**16 pav.** Lazerinis gręžimas naudojant femtosekundinės trukmės impulsus [37].

### 2.3.2 Lazerinis frezavimas

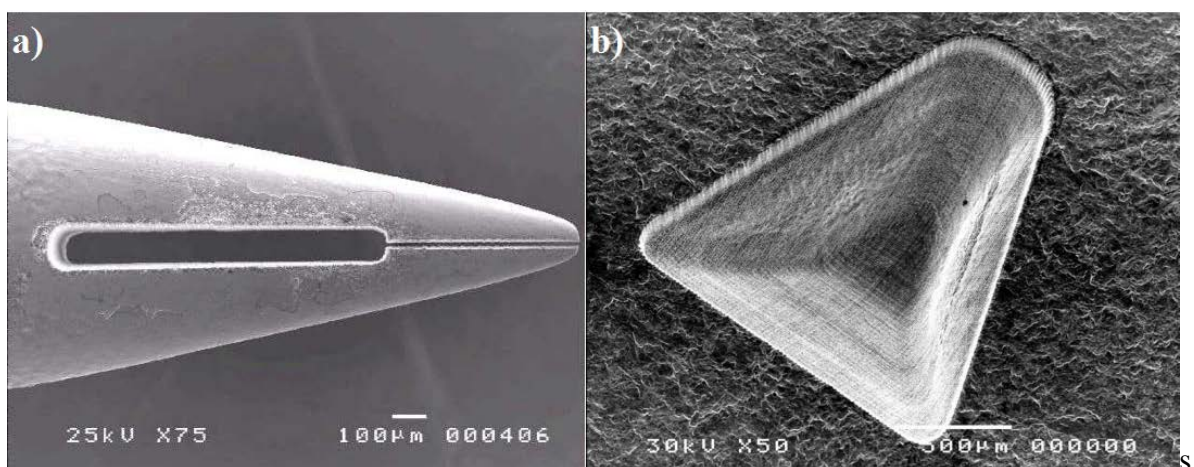
Lazerinis frezavimas po truputį tampa labai svarbia technologija, kuri atveria kelią pramonei mikroįrenginių gamybai. Nors pradinė investicija kainuoja daugiau už įprastai naudojamas mechanines frezavimo technologijas, pats gamybos procesas yra pigesnis, greitesnis, švaresnis ir tikslesnis [50]. Tai naudinga technologijos verslo plėtrai, nes sumažėja rizika ir produkto patekimo į rinką trukmė. Taigi padidėja gaminio konkurencingumas. Naujų technologijų paieška lemia nuolatinį produkto funkcionalumo ir patikimumo augimą. Impulsinis lazerinis frezavimas ypač patrauklus, kadangi dideli impulsų pasikartojimo dažniai siekiantys iki 1 MHz, bei pikosekundinės ir femtosekundinės impulsų trukmės leidžia submikrometrinį tikslumą bei vidutinę apdirbimo spartą. Šiuolaikinės lazerinės sistemos sugeba valdyti įvairius lazerinius parametrus įskaitant ir spinduliuotes bangos ilgį. Taigi galima apdirbti ne tik metalus, bet ir skaidrias medžiagas, tokias kaip stiklą ar fluoropolimerus. Tai yra didelis pranašumas, nes kituose mikroapdirbimo būduose, tokiuose kaip litografija ar frezavimas jonais, medžiagų pasirinkimas ribotas [51]. Teisingai parinkus lazerinius parametrus, esant didžiausiai apdirbimo spartai gaunama ir didžiausia apdirbimo kokybė [40,52].

Yra du pagrindiniai lazerinio frezavimo sistemų tipai. Pirmasis susideda iš stacionaraus lazerinio pluošto ir kompiuteriu kontroliuojamos XY ašių platformos. Tokia sistema yra naudojama nuo pat lazerinio frezavimo atsiradimo [53]. Kompiuteriu kontroliuojama platforma yra integruojama į lazerinę sistemą. Taigi, lazeris ir visa reikalinga optika yra stacionari, juda tik platforma, ant kurios yra pritvirtintas bandinys. Šis apdirbimo būdas leidžia tiksliai pozicijuoti bandinį lazerinio pluošto atžvilgiu, bet dėl platformos inercijos yra tinkamas naudojimui tik su mažais skenavimo greičiais. Pagrindiniai šio metodo pranašumai yra, jog pluoštas gali būti aštriai fokusuojamas ant bandinio paviršiaus, bandinys yra itin tiksliai pozicijuojamas pluošto atžvilgiu ir frezavimo metu yra gaunamas vienodas sufokusuotos dėmės dydis bei energijos tankis visame bandinio plote. Tai leidžia



išabliuoti itin lygius paviršius. Tokia sistema yra naudojama ir dabar, jei dėl didelės lazerio galios negalima naudoti skenavimo optikos [54]. Taip pat dėl didelio tikslumo, ši sistema yra plačiai naudojama ir lazeriniame gręžime. Antroji sistema susideda iš kompiuterio kontroliuojamo lazerio pluošto skenerio. Šis metodas buvo sugalvotas kiek vėliau nei pirmasis. Tai tikslus ir universalus metodas, leidžiantis didelius skenavimo greičius, o tai padidina sistemos produktyvumą. Tokioje sistemoje plačiausiai naudojamas galvanoskeneris, kurio kompiuteriu kontroliuojami veidrodžiai leidžia valdyti lazerio pluoštą tam tikrame plote iki kelių metrų per sekundę greičiu. Tačiau vienas iš sistemos trūkumų yra tas, jog pluoštas yra fokusuojamas F-teta lęšiu, todėl energijos tankis ant bandinio paviršiaus priklausys nuo kampinio nuokrypio nuo optinės ašies. Norint spręsti šią problemą yra naudojami telecentriniai lęšiai, tačiau jų kainos yra didelės ir apdirbimo plotas yra mažesnis nei įprastų F-teta lęšių, tad apdirbant didesnes detales vis tiek reikia keistų jų padėti. Tai į sistemą įneša papildomas paklaidas [26].

Nors lazeriniam frezavimui tinka daugelis medžiagų naudojamų pramonėje, kiekviena iš jų skirtingai reaguoja į lazerinę spinduliuotę. Metalų atveju sunkumai iškyla dėl didelio abliacijos slenksčio ir didelio atspindžio koeficiento ties populiariausiais kietojo kūno lazerių fundamentiniais bangų ilgiais. Naudojant ilgesnės trukmės, mikro ir nano trukmės impulsus, lazerinė spinduliuotė lydo metalą, kuris nėra iki galo pašalinamas ir sustingsta apdirbamoje vietoje dėl ko gaunama ne tik maža abliacijos sparta, bet ir prasta apdirbimo kokybė. Ši problema yra sprendžiama naudojant ultratrumpuosius impulsus arba keičiant energijos tankį apdirbamos figūros kraštuose ir dugne, jog būtų pasiektas norimas paviršiaus šiurkštumas. Kernakis [51] būtent tokiu būdu pasiekė  $10^6 \mu\text{m}^3/\text{s}$  abliacijos spartą ir gerą apdirbimo kokybę net ant tokio kieto metalo kaip volframas (17 pav.). Dėl didelio šio metalo kietumo mokslininkams teko naudoti  $2 \text{ kJ}/\text{cm}^2$  energijos tankio vario garų lazerį.



**17 pav.** Skenuojančio elektronų mikroskopo nuotrauka: lazerinis volframo frezavimas. Lazerio galia siekė 45 W, impulsų pasikartojimo dažnis 10 kHz, o pluošto dėmės dydis  $8,7 \mu\text{m}$  [51].

## 2.4 Efektyvi lazerinė abliacija

Vienas dažniausiai naudojamų efektyvios abliacijos modelių yra paremtas Furmanski [55] atliktais tyrimais. Kaip ir kiekviename modelyje, yra tam tikrų prielaidų ar artinių. Furmanski modelyje nėra įskaičiuoti jokie pluošto atspindžiai, pavyzdžiui nuo išabliuoto kraterių sienų. Visa lazerio energija paveikia ploną medžiagos sluoksnį, o šią sąveiką aprašo Lamberto – Bero – Bugerio dėsnis. Nėra įskaitomi jokie energijos nuostoliai dėl šiluminio laidumo ar plazmos ekranavimo. Ši prielaida yra gan teisinga ultratrumpųjų impulsų atveju, kai šilumos sklidimas gilyn į medžiagą impulso metu yra mažesnis už sugerties gylį [56]. Vienu impulsu išabliuoto kraterio gylį galima aprašyti šia formule [55]:

$$z(x, y) = \delta \ln \left( \frac{F(x, y)}{F_{th}} \right), \quad (5)$$

čia  $z$  – kraterio gylis,  $\delta$  – efektinis energijos sugerties gylis,  $F(x, y)$  – energijos tankio erdvinis pasiskirstymas  $x$  ir  $y$  ašyse,  $F_{th}$  – slenkstinis abliacijos energijos tankis.

Išabliuoto kraterio diametras priklauso nuo energijos tankio, jei yra naudojamas Gauso pluoštas. Lazerinio energijos tankio pasiskirstymas priklauso nuo keleto lazerinių parametrų ir gali būti išreiškiamas [56]:

$$F_0 = \frac{2E_p}{\pi w_0^2}, \quad (6)$$

čia  $F_0$  – energijos tankis pluošto centre,  $E_p$  – impulso energija,  $w_0$  – pluošto spindulys.

Gauso pluošto erdvinį energijos tankio pasiskirstymą galime išreikšti:

$$F(r) = F_0 e^{-\frac{r^2}{a^2}}, \quad (7)$$

čia  $F_0$  – energijos tankis pluošto centre,  $r$  – atstumas nuo pluošto centro,  $a$  – pluošto spindulys  $\frac{1}{e}$  lygyje.

Įrašę (7) formulę į (5) gauname, kad išabliuotas krateris turi parabolės formą:

$$z(r) = \delta \left( \ln \frac{F_0}{F_{th}} - \frac{r^2}{a^2} \right), \quad (8)$$

Suintegravus (8) formulę galima gauti išabliuoto kraterio tūrį vienu impulsu [56]:

$$dV = \frac{\pi w_0^2 \delta}{4} \ln \left( \frac{F_0}{F_{th}} \right)^2, \quad (9)$$

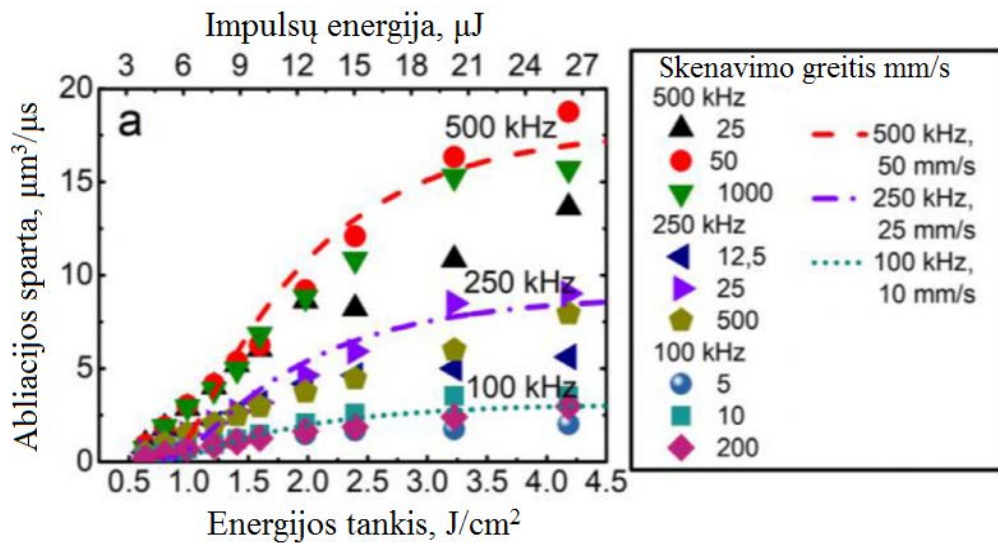
Žinant lazerio impulsų pasikartojimo dažnį, galima suskaičiuoti abliacijos spartą, tai yra dydį, kuris nusako, kiek medžiagos tūrio yra pašalinama per laiko vienetą [57]:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{1}{2} \frac{\delta P_{av}}{F_0} \ln \left( \frac{F_0}{F_{th}} \right)^2, \quad (10)$$

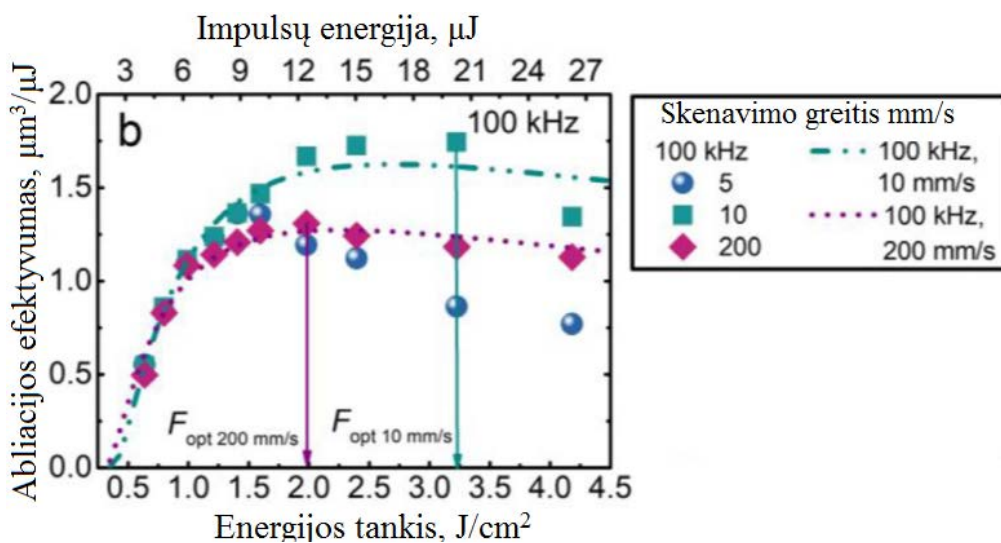
Iš (10) formulės matyti, kad didinant vidutinę lazerio galią, abliacijos sparta nuolatos auga (18 pav.). Abliacijos spartos priklausomybė nuo impulso energijos nėra tiesinė, o tai reiškia jog egzistuoja optimali impulso energijos vertė, kuriai esant abliacijos efektyvumas, tai yra medžiagos tūris pašalintas su vienetine impulso energija, bus didžiausias (19 pav.).

Abliacijos efektyvumas yra skaičiuojamas padalinus abliacijos spartą (10) iš vidutinės lazerio galios [22].

$$\frac{dV}{dE} = \frac{dV}{dt P_{av}} = \frac{1}{2} \frac{\delta}{F_0} \ln \left( \frac{F_0}{F_{th}} \right)^2. \quad (11)$$



**18 pav.** Abliacijos spartos priklausomybė nuo energijos tankio. Abliacijos sparta didėja, kai didinama impulso energija, kartu ir lazerio vidutinė galia. Punktyrinės linijos (10) formulės aproksimacijos [22].



**19 pav.** Abliacijos efektyvumo priklausomybė nuo energijos tankio. Punktyrinės linijos (11) formulės aproksimacijos [22].

### 3 Eksperimentų apžvalga

Šiame darbe buvo atlikti du eksperimentai, kurių metu skirtingais būdais lazeriu buvo abliuojamos vario ir nerūdijančio plieno plokštelės. Abiejuose eksperimentuose buvo naudojami impulsų voros ir bivoros režimai.

Pirmuoju atveju buvo atliekamas lazerinis frezavimas. Skenuojant lazerio pluoštą metalų plokštelėse lazeriu buvo išabliuotos stačiakampės duobutės.

Antruoju atveju buvo atliekamas lazerinis gręžimas. Nekeičiant pluošto padėties vario plokštelėse lazeriu buvo išgręžiamos parabolės formos duobės.

Eksperimento metu buvo keičiamas pluošto dėmės dydis ant bandinio paviršiaus, taip keičiant bandinį pasiekiantį energijos tankį. Išmatavus išabliuotos medžiagos tūrius, buvo apskaičiuoti abliacijos efektyvumai ir jų priklausomybės nuo energijos tankio.

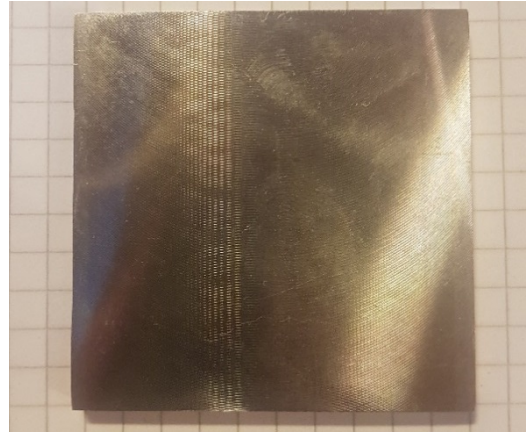
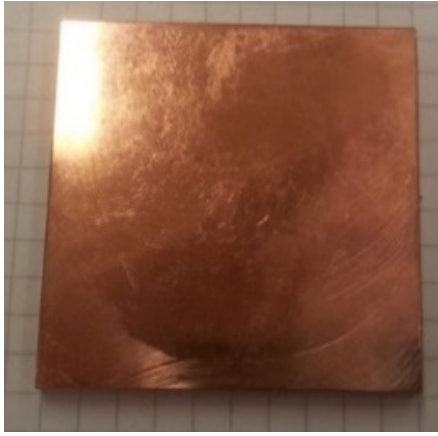
#### 3.1 Eksperimentinė įranga ir bandiniai

Eksperimentui atlikti buvo naudojamas femtosekundinis lazerinės spinduliuotės šaltinis Pharos (Light Conversion), galintis veikti impulsų voros ir bivoros režimu, galvanometriniis skeneris Intelliscan 14 (ScanLab) lazerio pluoštui pozicionuoti ir 100 mm židinio nuotolio F-teta lęšis pluoštui sufokusuoti. Buvo naudojama pirmosios harmonikos 1030 nm bangos ilgio spinduliuotė (1 lentelė).

**1 lentelė.** Lazerinės sistemos parametrai.

Lazeris	Pharos, Light Conversion
Bangos ilgis	1030 nm
Impulso trukmė	210 fs
Impulsų pasikartojimo dažnis	100 kHz
Maksimali vidutinė galia	7,3 W @ 100 kHz
Pluošto pozicionavimas	Intelliscan 14, (ScanLab)
F-teta lęšis	100 mm

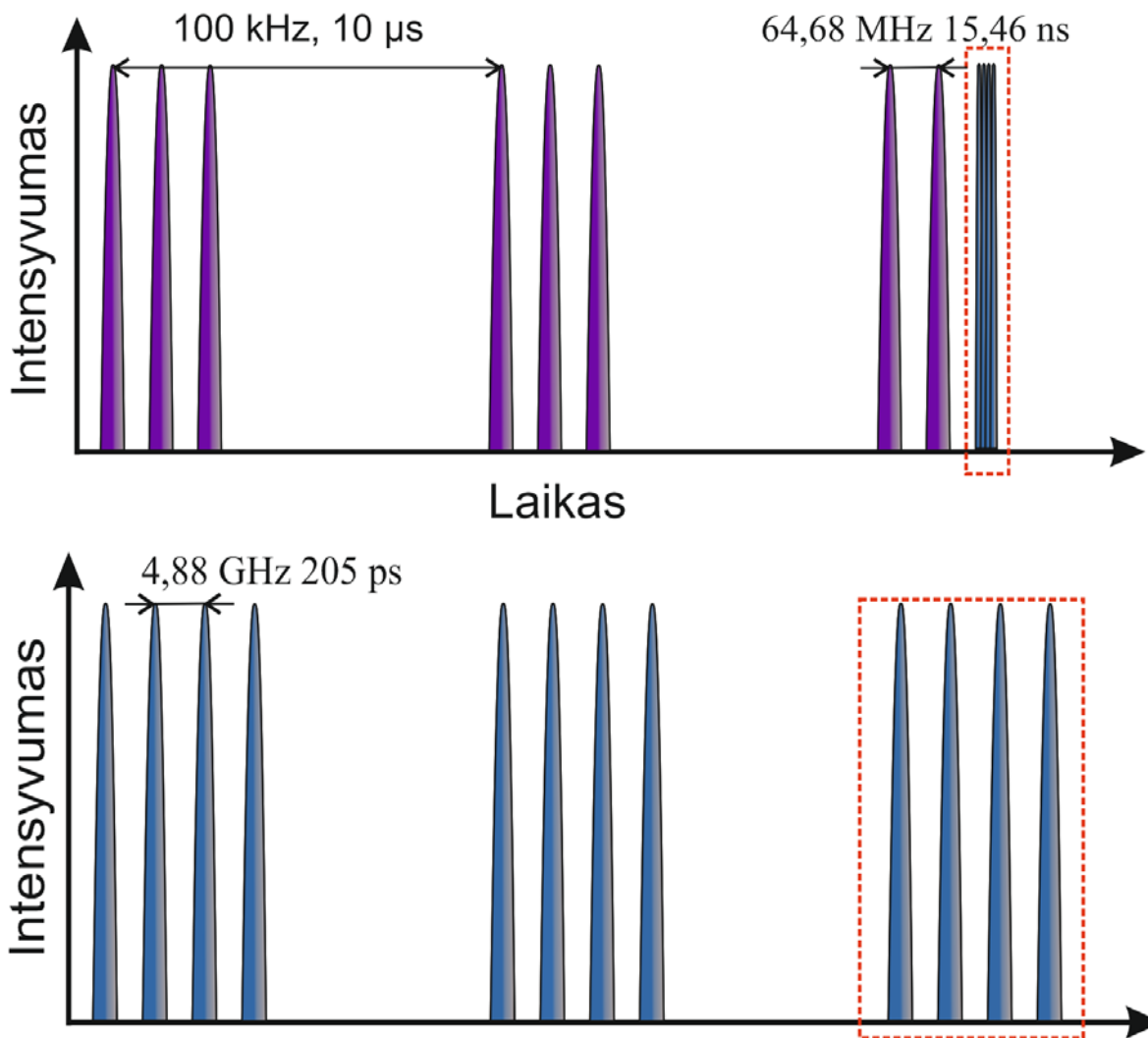
Naudojami bandiniai –  $50 \times 50 \times 5$  mm<sup>3</sup> vario bei nerūdijančio plieno plokštelės (20 pav.). Bandiniai buvo analizuojami adatiniu profilometru Dektakt 150+ (Veeco), optiniu mikroskopu BX51 (Olympus), skenuojančiu elektronų mikroskopu JSM-6490LV (Jeol) bei optiniu profilometru S Neox (Sensofar).



**20 pav.** Eksperimentams naudoti bandiniai. Kairėje – vario, dešinėje – nerūdijančio plieno plokštelė.

### 3.2 Eksperimentų parametrai

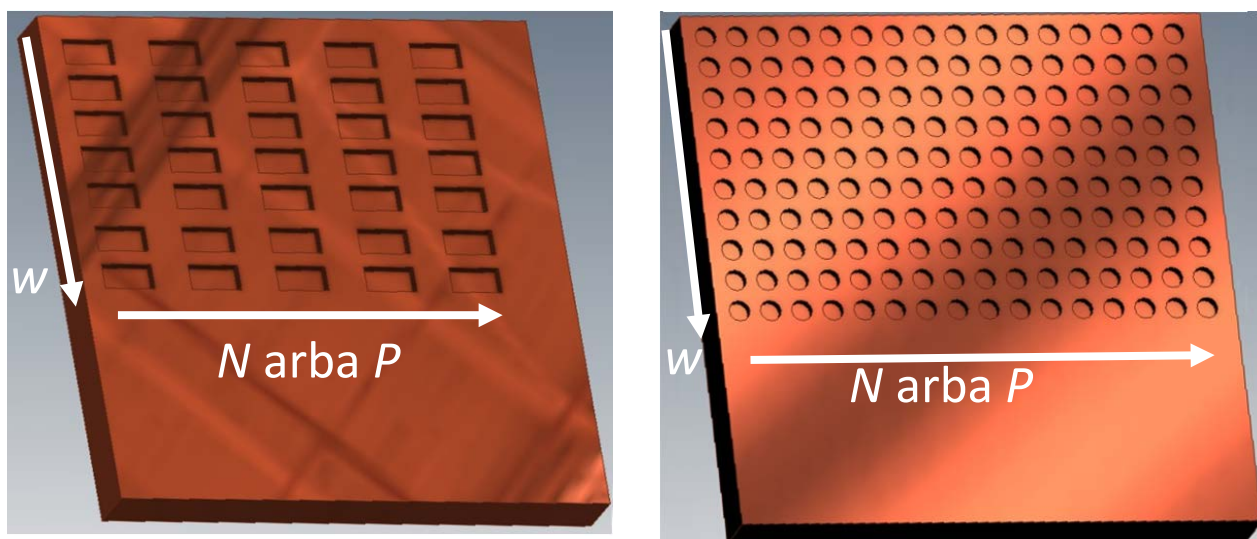
Bandymams atlikti buvo naudojama impulsų voros bei impulsų bivoros veika. Lazeriui veikiant 100 kHz impulsų pasikartojimo dažniu, kas 10  $\mu$ s yra išspinduliuojamas vienas impulsas. Lazeriui veikiant impulsų voros režimu, šis impulsas gali būti išdalintas į keletą impulsų, tarpusavyje atskirtų 15,46 ns arba 205 ps (64,68 MHz arba 4,88 GHz). Tokios impulsų voros suminė energija yra lygi vieno impulso energijai, kai jis veikia įprasta, 100 kHz veika. Tada tokia impulsų vora pasikartoja kas 10  $\mu$ s, o režimas vadinamas impulsų vora. Režimą vadinsime nanosekundine vora, esant 15,46 ns atskiriami tarp impulsų, o dydis  $N$  nusakys femtosekundinių impulsų skaičių nanosekundinėje voroje. Kai nanosekundinė vora bus sudaryta iš impulsų vorų, kurias sudarys impulsai atskirti 205 ps, tokį režimą vadiname bivoros arba voros voroje veika. Laikinis atstumas tarp impulsų bivoroje yra 205 ps, tai atitinka 4,88 GHz pasikartojimo dažnį. Dydis  $P$  – nusako femtosekundinių impulsų skaičių pikosekundinėje voroje (21 pav.).



**21 pav.** Principinė voros ir bivoros schema. Viršuje – nanosekundinė vora: 15,46 ns laiko atstumas tarp pikosekundinių vorų,  $N = 3$ . Apačioje – pikosekundinė impulsų vora: 210 fs trukmės impulsai, tarp kurių yra 205 ps laiko atstumas,  $P = 4$ . Jei  $P = 1$  tai yra voros veika, jei  $P > 1$ , tai yra bivoros veika.

Lazerinio frezavimo metu buvo abliuojamos  $2 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$  ploto stačiakampės duobės varyje bei nerūdijančiame pliene. Tam buvo naudojama 1030 nm, 210 fs impulsų trukmės, 100 kHz pasikartojimo dažnio ir 7,3 W vidutinės galios lazerinė spinduliuotė. Skenavimo greitis siekė 333 mm/s, o atstumas tarp skenavimo linijų buvo laikomas pastovus – 10 μm. Vieno stačiakampio skenavimas buvo kartojamas nuo 3 iki 21 karto, jog išabliuotą gylį lengvai būtų galima išmatuoti adatiniu profilometru. Eksperimento metu buvo keičiamas pluošto dėmės dydis ant bandinio paviršiaus taip keičiant energijos tankį bandinio paviršiuje. Tai buvo daroma keičiant bandinio  $z$  poziciją. Lazerinio gręžimo metu buvo gręžiamos parabolinės duobės vario plokštelėse šaudant impulsų voras ir bivoras į vieną tašką naudojant tuos pačius lazerinius parametrus. Kaip ir pirmuoju atveju buvo keičiamas pluošto dėmės dydis ant bandinio paviršiaus taip keičiant energijos tankį, kuris pasiekia bandinį.

Abu eksperimentai buvo atlikti naudojant impulsų voros ir bivoros režimus. Tiriant voros režimą buvo keičiamas dydis  $N$  – nanosekundinės voros impulsų skaičius voroje, esant skirtingiems pluošto spindulio dydžiams. Tiriant bivoros režimą buvo keičiamas dydis  $P$  – pikosekundinės voros impulsų skaičius voroje, esant skirtingiems pluošto spindulio dydžiams. Šio bandymo metu, eksperimentas buvo kartojamas esant skirtingiems  $N$ . Šis dydis buvo keičiamas nuo 1 iki 9. Eksperimentiniai modeliai parodyti (22 pav.)



**22 pav.** Eksperimentų modeliai. Horizontalioje kryptyje buvo keičiamas impulsų skaičius voroje, o vertikaloje pluošto spindulys. Kairėje pusėje lazerinis frezavimas, dešinėje lazerinis grėžimas.

### 3.3 Pluošto dėmės dydžio valdymas ant bandinio paviršiaus

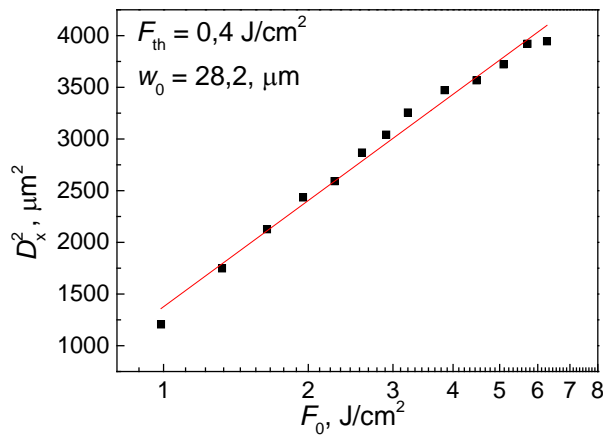
Prieš atliekant pagrindinį eksperimentą, buvo atliktas pluošto spindulio priklausomybės nuo bandinio padėties matavimas. Stiklas, kuris padengtas plonu chromo sluoksniu buvo abliuojamas pavieniais impulsais mažinant lazerio galią. Stiklo storis buvo parinktas 5,0 mm, kad sutaptų su vario ir nerūdijančio plieno bandinių paviršiaus storiais. Chromu dengtas stiklas buvo pasirinktas pluošto spindulio bandinio paviršiuje charakterizavimui dėl aiškiai matomų lazeriu nuvalyto chromo kraterių naudojant optinį mikroskopą, stiklą apšviečiant iš apačios. Optiniu mikroskopu buvo matuojamas nuvalyto chromo sluoksnio dėmės skersmuo  $D$ . Po to buvo nubraižomas nuvalyto chromo sluoksnio skersmens priklausomybės nuo energijos tankio grafikas (23 pav.), iš kurio buvo gauta pluošto spindulio vertė. Eksperimentas buvo kartojamas keičiant bandinio padėtį pluošto sąsmaukos atžvilgiu.

Gausinio pluošto spindulio priklausomybė nuo sąsmaukos atstumo iki bandinio išreiškiama šia formule:

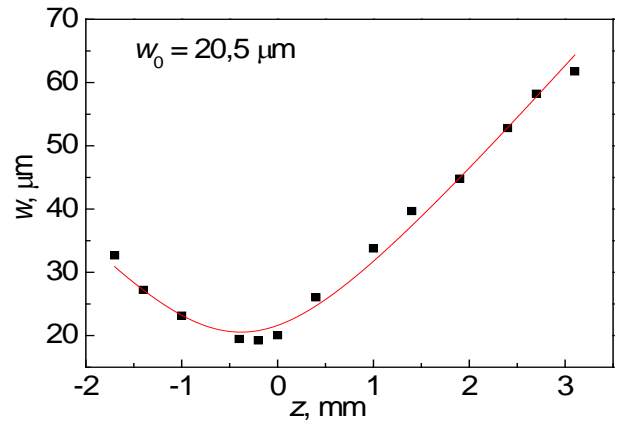
$$w(z) = w_0 \sqrt{1 + \left( (z - z_0) \frac{\lambda M^2}{\pi w_0^2} \right)^2}. \quad (12)$$

čia  $w(z)$  – pluošto spindulio priklausomybė nuo bandinio padėties,  $z$  – bandinio padėtis,  $z_0$  – bandinio padėtis, kai pluošto sąsmauka yra ant bandinio paviršiaus,  $\lambda$  – bangos ilgis,  $M^2$  – lazerinio pluošto kokybės parametras,  $w_0$  – pluošto spindulys sąsmaukoje.

Išmatuota pluošto spindulio priklausomybė nuo bandinio padėties atvaizduota grafiškai (24 pav.).



**23 pav.** Nuvalyto chromo sluoksnio dėmės skersmens priklausomybė nuo energijos tankio, kai pluošto sąsmauka yra 1,2 mm žemiau už bandinio paviršių. Raudona linija – ištisinės tiesės aproksimacija naudojant (3) formulę.



**24 pav.** Pluošto spindulio priklausomybė nuo pluošto sąsmaukos padėties bandinio atžvilgiu. Raudona linija – (12) formulės aproksimacija.



## 4 Tyrimo rezultatai

### 4.1 Lazerinis frezavimas

Eksperimento metu buvo išmatuoti išabliuotų duobių gyliai bei jų dugno šiurkštumas naudojant adatinį profilometrą. Išabliuotos medžiagos tūrį (25 pav.) galima skaičiuoti pagal šią formulę:

$$dV = ald, \quad (13)$$

čia  $dV$  – išabliuotas tūris medžiagoje,  $a$  – stačiakampės duobės plotis,  $l$  – stačiakampės duobės ilgis,  $d$  – išabliuotos stačiakampės duobės gylis.

Metalas buvo veikiamas lazerine spinduliuote (25 pav.) tam tikrą laiką, kurį galime apskaičiuoti pagal šią formulę:

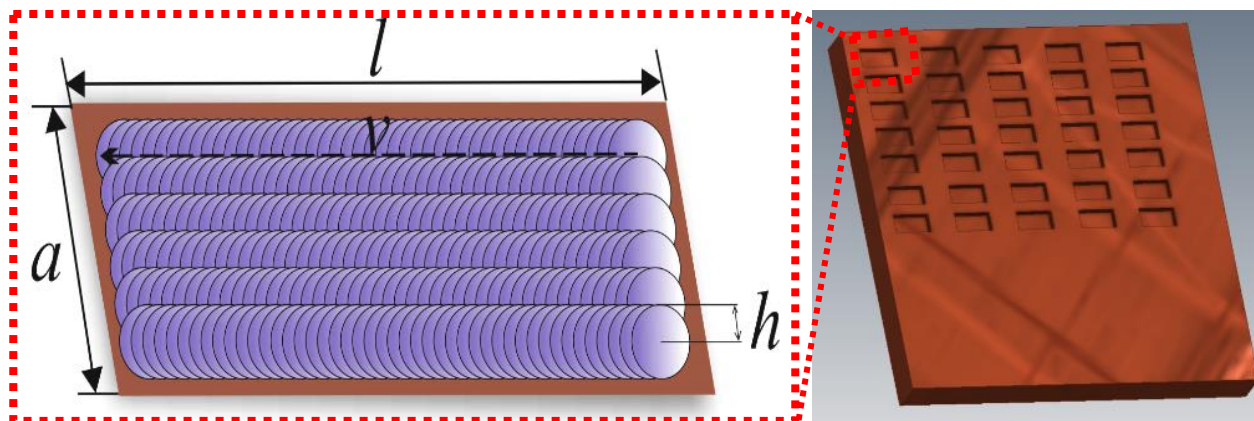
$$dt = \frac{alN}{hv}, \quad (14)$$

čia  $dt$  – laikas, per kurį yra išabliuojama duobė,  $h$  – atstumas tarp skenuojamų linijų,  $v$  – pluošto skenavimo greitis,  $N$  – pakartojimų skaičius.

Tada abliacijos efektyvumas yra lygus (13) ir (14) formulių santykiui padalintam iš vidutinės spinduliuotės galios:

$$\frac{dV}{dE} = \frac{dV}{dtP_{av}} = \frac{dhv}{NP_{av}}. \quad (15)$$

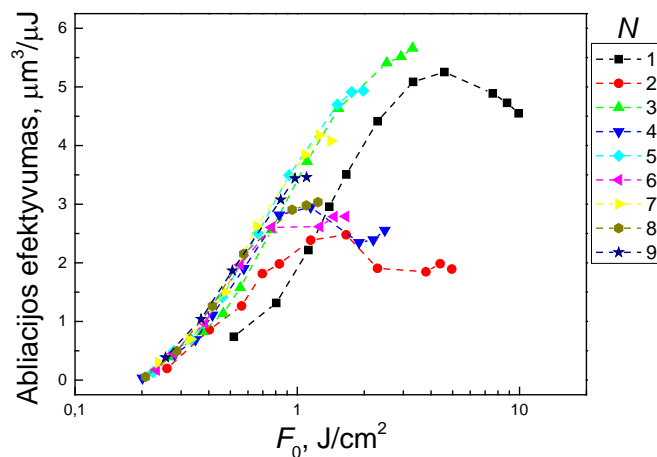
čia  $P_{av}$  – vidutinė lazerinės spinduliuotės galia



**25 pav.** Išabliuotos stačiakampės duobės abliacijos modelis. Violetiniai taškai – lazerinės spinduliuotės impulsų dėmės ant bandinio paviršiaus, punktyrinė linija – pluošto skenavimo kryptis.

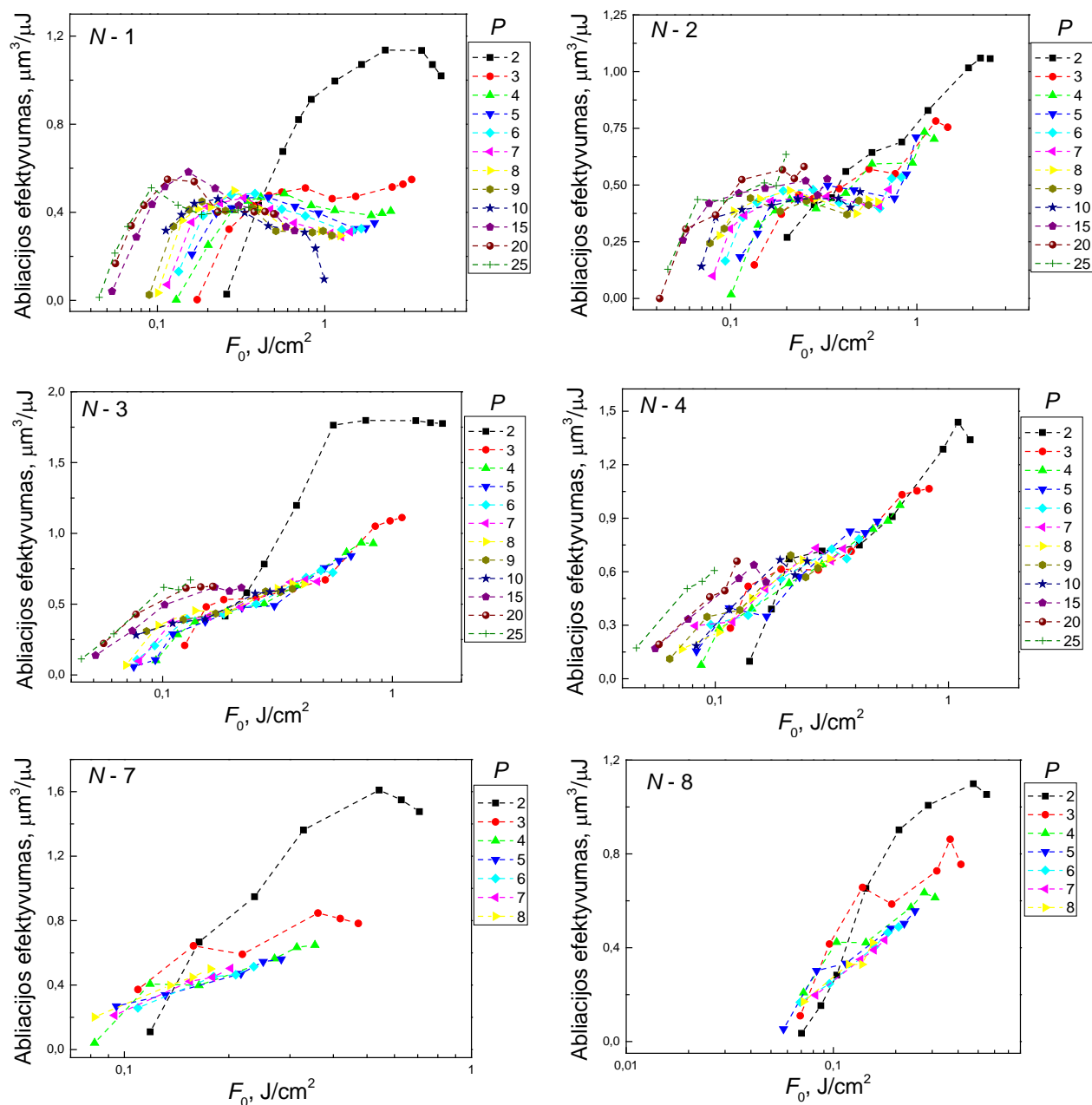
Apskaičiuotas abliacijos efektyvumas atvaizduotas grafiškai (26 pav.). Kai  $N = 1$ , varis yra abliuojamas femtosekundiniais impulsais, 100 kHz impulsų pasikartojimo dažniu. Didžiausias abliacijos efektyvumas pasiektas 3 – 5 J/cm<sup>2</sup> intervale ir siekė 5,3 μm<sup>3</sup>/μJ. Naudojant impulsų voros

veiką, kai  $N = 2$  abliacijos efektyvumas staigiai nukrito daugiau nei dvigubai iki  $2,5 \mu\text{m}^3/\mu\text{J}$ . Kai  $N = 3$ , abliacijos efektyvumas pasiekė didžiausią vertę –  $5,8 \mu\text{m}^3/\mu\text{J}$ . Taigi, naudojant impulsų vorą iš 3 impulsų abliacijos našumas padidėjo apie 10%. Abliacijos efektyvumo mažėjimą esant dviem impulsais ir didėjimą esant trimis galima aiškinti keliais efektais. Kadangi voroje laiko tarpas tarp impulsų yra tik 15,46 ns, išabliuotos medžiagos dalelės nespėja pasišalinti iš apdirbimo vietos. Išabliuotos dalelės gali pasiekti greičius iki 2 km/s [58], kas atitinka 31  $\mu\text{m}$  atstumą. Šis išabliuotų dalelių debesis ekranuoja ateinančią lazerinę spinduliuotę ir mažina abliacijos efektyvumą. Abliacijos efektyvumas padidėja ties  $N = 3$ , nes nusėdusios karštos dalelės pakelia vario temperatūrą, dėl ko padidėja medžiagos sugertis [58,59]. Moksliniame darbe atlikti kolorimetriniai matavimai parodė, jog sugertis varėje esant impulsų voroje trimis impulsams buvo beveik dvigubai didesnė [60]. Toliau didinant impulsų skaičių nanosekundinėje voroje, abliacijos efektyvumas mažėja.



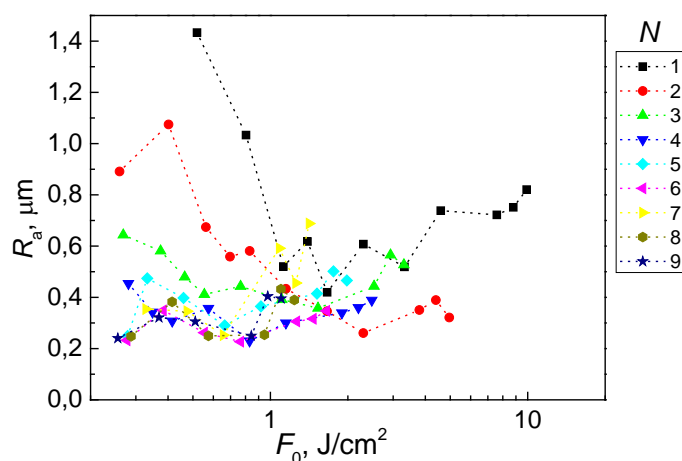
**26 pav.** Abliacijos efektyvumo priklausomybė nuo impulso energijos tankio esant skirtingiems impulsų skaičiams nanosekundinėje voroje.

Abliacijos efektyvumas varėje dirbant bivoros režimu sumažėja daugiau nei 3 kartus (27 pav.). Dėl itin didelio impulsų persiklojimo greitai viršijamas abliacijos slenkstis, yra išabliuojamas didelis kiekis medžiagos dalelių, kurios nespėja pasitraukti iš apdirbimo lauko ir pasireiškia itin stiprus dalelių ekranavimas, kuris mažina abliacijos efektyvumą [61]. Didžiausias abliacijos efektyvumas matomas tada, kai  $N = 3$  dėl priežasčių, kurios buvo aptartos anksčiau. Naudoti bivoros veiką vario abliacijai nebuvo efektyvu.

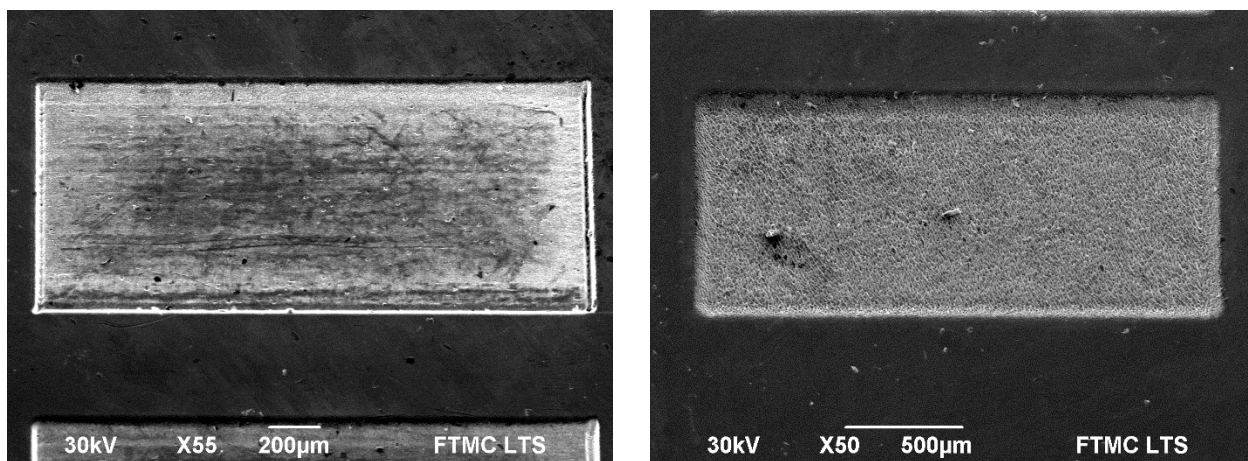


**27 pav.** Abliacijos efektyvumo priklausomybė nuo energijos tankio varjje bivoros veikoje esant skirtingiems impulsų skaičiams nanosekundinėje ir pikosekundinėje vorose.

Apdirbant varį impulsų voros veikoje esant optimaliam energijos tankiui yra gaunama ir didžiausia apdirbimo kokybė (28 pav.). Duobės šiurkštumas šiame intervale siekia nuo 0,3 iki 0,6  $\mu\text{m}$ . Našus ir prastas režimas taip pat palygintas skenuojančio elektronų mikroskopo nuotraukomis (29 pav.). Naudojant optimalius parametrus gautas duobės paviršius yra labai lygus, nesimato jokio sustingusio lydalo ar aplink nusėdusių medžiagos dalelių. Naudojant ne optimalius parametrus gautas šiurkštus duobės paviršius. Matoma jog abliaciją dominavo lydymasis, o ne garinimas ir dėl sustingusio lydalo buvo gautas prastos kokybės duobės dugnas.

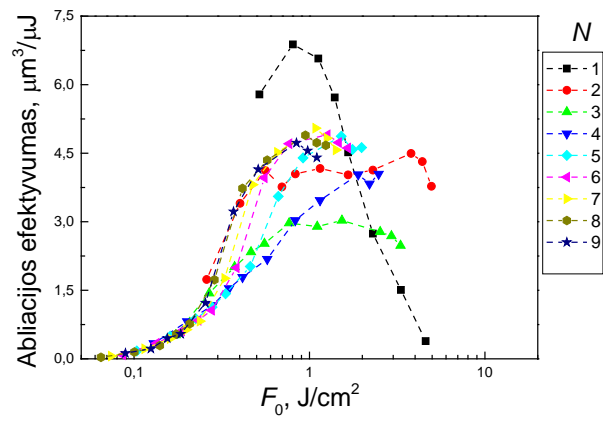


**28 pav.** Šiurkštumo priklausomybė nuo energijos tankio varijuje impulsų voros veikoje esant skirtingiems impulsų skaičiams nanosekundinėje voroje.



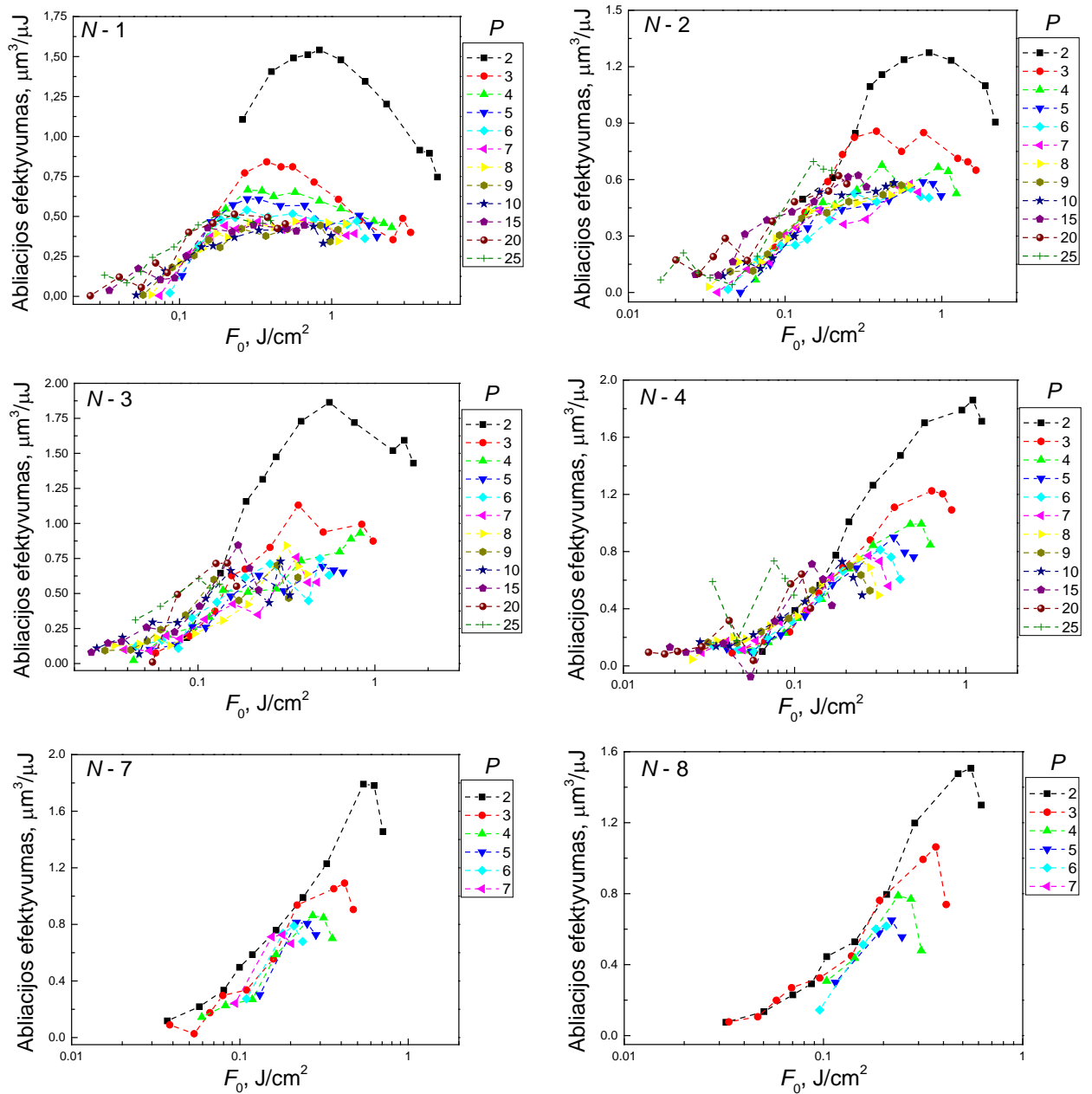
**29 pav.** Abliacijos kokybės palyginimas naudojantis skenuojančiu elektronų mikroskopu. Kairėje efektyvi abliacija: impulsų voros veika, kai  $N = 3$ , energijos tankis  $3,3 \text{ J/cm}^2$ , abliacijos efektyvumas  $5,8 \mu\text{m}^3/\mu\text{J}$ , duobės gylis  $36,2 \mu\text{m}$ , paviršiaus šiurkštumas  $0,4 \mu\text{m}$ . Dešinėje impulsų voros veika, kai  $N = 2$ , energijos tankis  $0,3 \text{ J/cm}^2$ , abliacijos efektyvumas  $1,1 \mu\text{m}^3/\mu\text{J}$ , duobės gylis  $26,3 \mu\text{m}$ , paviršiaus šiurkštumas  $1,1 \mu\text{m}$ .

Apskaičiuotas abliacijos efektyvumas impulsų voros veikoje nerūdijančiame pliene pavaizduotas grafiškai (30 pav.). Didžiausias efektyvumas buvo  $6,9 \mu\text{m}^3/\mu\text{J}$ , esant  $0,6 - 1 \text{ J/cm}^2$  dirbant įprastiniu režimu t.y. kai  $N = 1$ . Abliacijos efektyvumas sumažėjo padidinus impulsų skaičių iki dviejų ir dar labiau sumažėjo padidinus iki 3. Toliau didinant impulsų skaičių voroje abliacijos efektyvumas nusistovėjo ties  $4,5 \mu\text{m}^3/\mu\text{J}$ . Abliuojant nerūdijantį plieną abliacijos efektyvumas yra beveik 20% didesnis, nei abliuojant varį. Kadangi nerūdijantis plienas yra prastas šilumos laidininkas, didesnis šilumos kiekis lieka apdirbimo zonoje ir vėliau medžiagą pasiekiantiems impulsams reikia mažesnių energijos tankių išabliuoti medžiagą.



**30 pav.** Ablacijos efektyvumo priklausomybė nuo energijos tankio nerūdijančiame pliene voros veikoje esant skirtingiems impulsų skaičiams nanosekundinėje voroje.

Kaip ir vario atveju impulsų bivoros režime pasireiškė stiprus dalelių ekranavimas. Ablacijos efektyvumas sumažėjo apie 4 kartus (31 pav.).



**31 pav.** Ablacijos efektyvumo priklausomybė nuo energijos tankio nerūdijančiame pliene bivoros veikoje esant skirtingiems impulsų skaičiams nanosekundinėje ir pikosekundinėje vorose.

## 4.2 Lazerinis gręžimas

Naudojant optinio profilometro programinę įrangą SensoMap (Sensofar) buvo apskaičiuoti išgręžtų parabolinių duobių tūriai. Laikas, per kurį buvo išgręžiamos parabolinės duobės buvo skaičiuojamas pagal šią formulę:

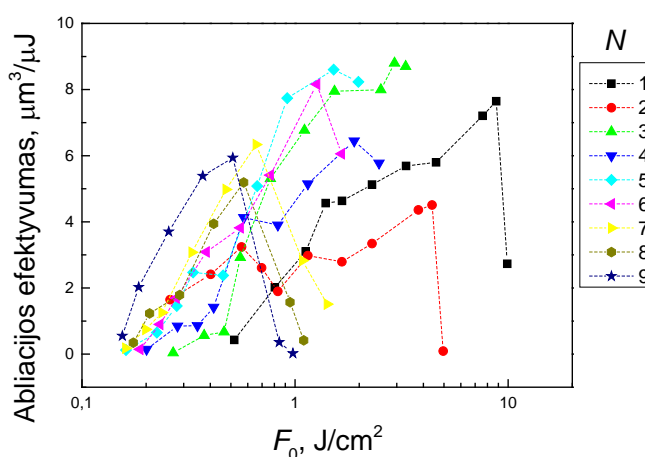
$$dt = \frac{R}{f}, \quad (16)$$

$f$  – impulsų pasikartojimo dažnis,  $R$  – gręžimui naudojamų impulsų skaičius.

Tada abliacijos efektyvumas yra lygus:

$$\frac{dV}{dE} = \frac{dV}{dtP_{av}} = \frac{dVf}{RP_{av}}. \quad (17)$$

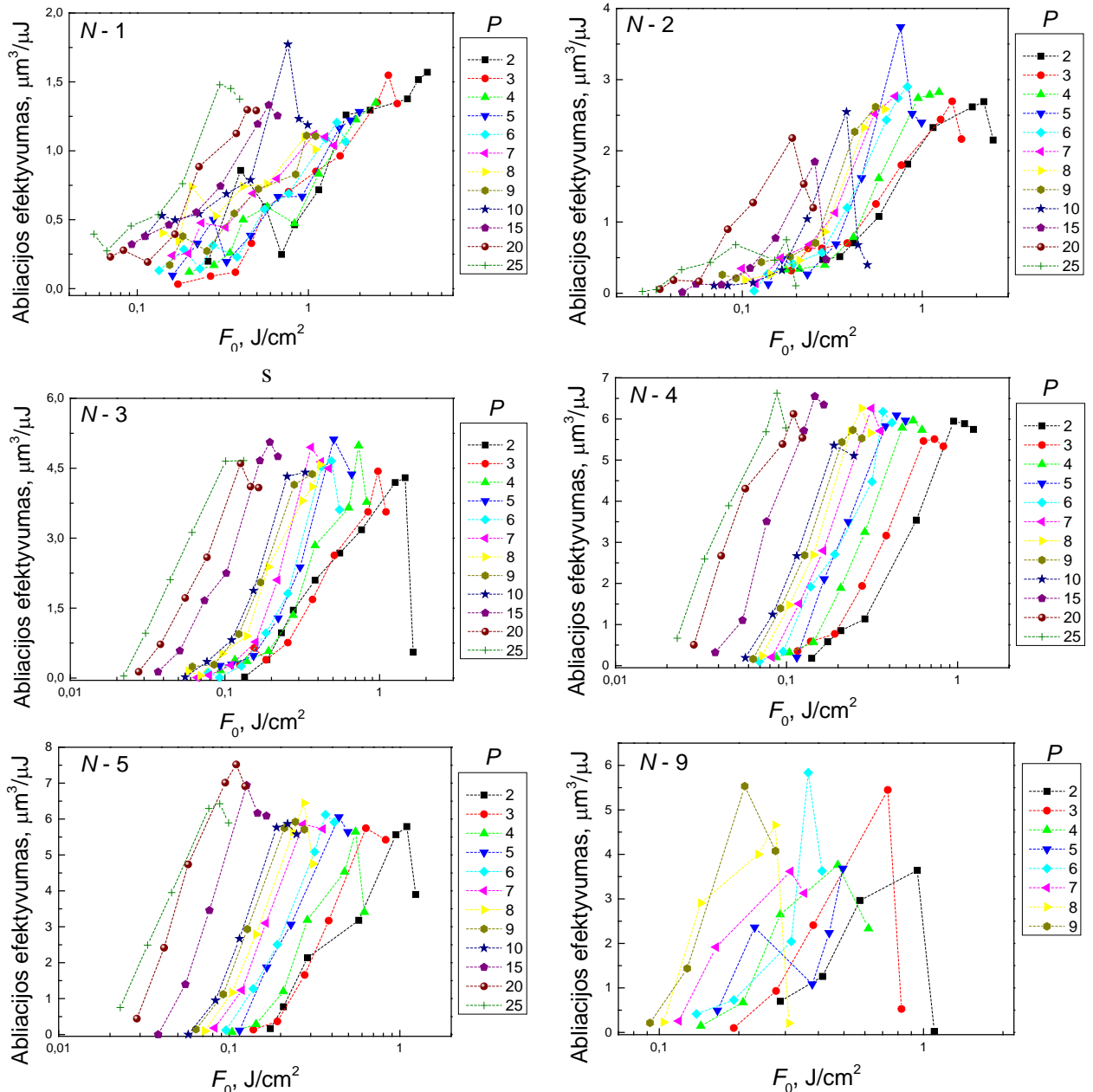
Apskaičiuotas abliacijos efektyvumas atvaizduotas grafiškai (32 pav.). Kai  $N = 1$ , varis yra gręžiamas femtosekundiniais impulsais, 100 kHz impulsų pasikartojimo dažniu. Didžiausias abliacijos efektyvumas pasiektas 8 – 9 J/cm<sup>2</sup> intervale ir siekė 7,6 μm<sup>3</sup>/μJ. Naudojant impulsų voro veiką, kai  $N = 2$  abliacijos efektyvumas nukrito beveik dvigubai iki 4,5 μm<sup>3</sup>/μJ. Kai  $N = 3$ , abliacijos efektyvumas pasiekė didžiausią vertę – 8,8 μm<sup>3</sup>/μJ esant 2 – 3 J/cm<sup>2</sup>. Taigi, naudojant impulsų vorą iš 3 impulsų abliacijos efektyvumas padidėja apie 16%. Abliacijos efektyvumo mažėjimas esant dviem impulsais ir didėjimas esant trimis jau buvo aptartas anksčiau. Abliacijos efektyvumas gręžimo metu yra daugiau nei 50% didesnis, nei lazerinio frezavimo metu. Taip yra dėl to, jog gręžimo metu abliacijos mechanizmą dominuoja ne medžiagos garinimas, o lydymasis, kuriam reikia žymiai mažiau energijos. Medžiaga yra išlydoma ir lydalis yra išstumiamas iš gręžiamos parabolinės duobės [24].



**32 pav.** Abliacijos efektyvumo priklausomybė nuo impulso energijos tankio esant skirtingiems impulsų skaičiams nanosekundinėje voroje.

Lazerinio gręžimo metu naudojant impulsų bivoros režimą taip pat kaip ir lazerinio frezavimo metu abliacijos efektyvumas sumažėjo daugiau nei du kartus, kai nanosekundinėje voroje buvo du

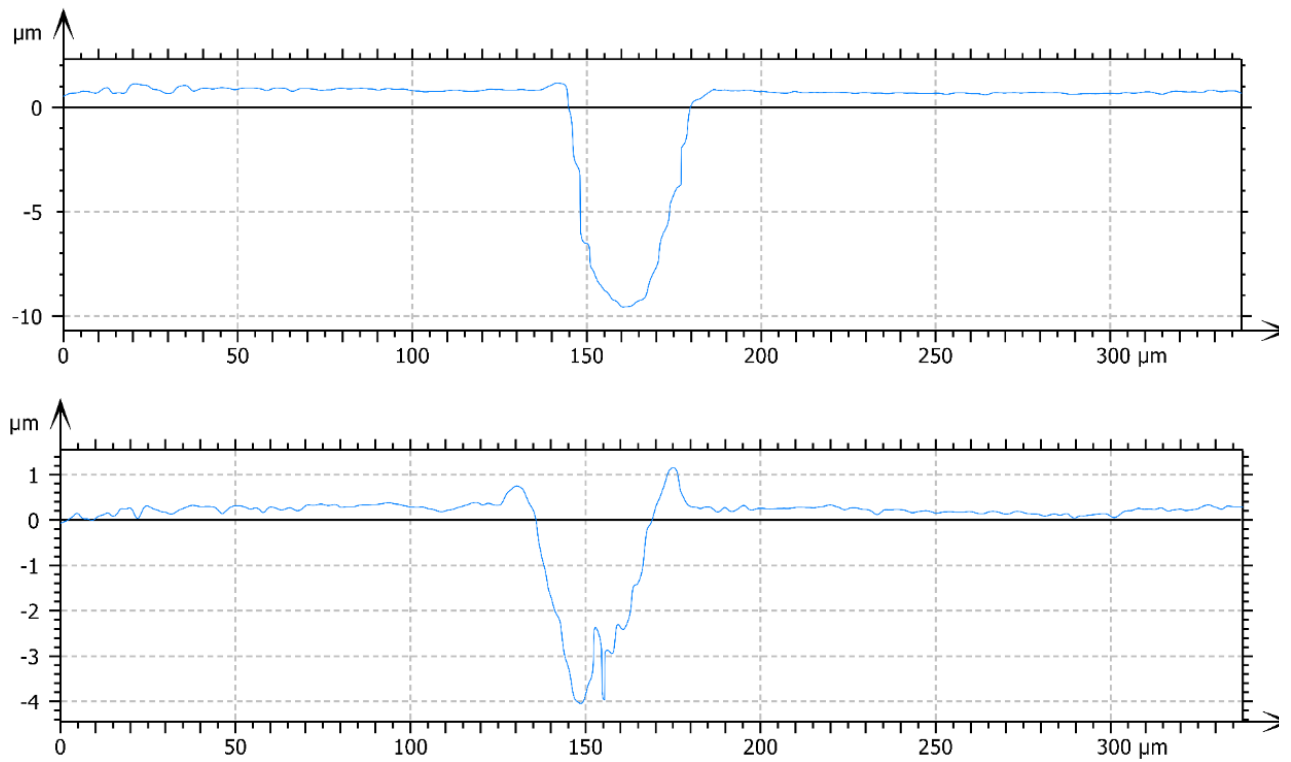
impulsai. Didinant impulsų voroje esančių impulsų skaičių toliau, abliacijos efektyvumas padidėja, bet niekada neviršija gauto naudojant vien impulsų voras (33 pav.).



**33 pav.** Abliacijos efektyvumo priklausomybė nuo energijos tankio varijė bivoros veikoje esant skirtingiems impulsų skaičiams nanosekundinėje ir pikosekundinėje vorose.

Išgręžtų parabolinių duobių profiliai parodyti (34 pav.). Naudojant optimalius parametrus išgręžta parabolinė duobė yra plati per visą parabolinės duobės gylį, paviršiuje užvartos siekia mažiau nei 0,5  $\mu\text{m}$ . Naudojant ne optimalius parametrus parabolinės duobės dugnas labai nelygus, paviršiuje esančios užvartos viršija 1  $\mu\text{m}$ . Gręžiant parabolinę duobę buvo naudota 10 impulsų vorų, bet dėl per mažo energijos tankio naudojant ne optimalius parametrus ir vidaus atspindžių [37] išgręžtas gylis buvo daugiau nei du kartus mažesnis.





**34 pav.** Optiniu profilometru išmatuoti išgręžtų parabolinių duobių profiliai varėje. Viršuje efektyvi abliacija: impulsų voros veika, kai  $N = 3$ , energijos tankis  $2,9 \text{ J/cm}^2$ , abliacijos efektyvumas  $8,8 \text{ μm}^3/\text{μJ}$ , išgręžtos parabolinės duobės gylis  $9,7 \text{ μm}$ . Apačioje neefektyvi abliacija: impulsų voros veika, kai  $N = 2$ , energijos tankis  $0,8 \text{ J/cm}^2$ , abliacijos efektyvumas  $1,9 \text{ μm}^3/\text{μJ}$ , išgręžtos parabolinės duobės gylis  $4,0 \text{ μm}$ .

## **Pagrindiniai rezultatai ir išvados**

1. Lazerinio frezavimo efektyvumas variui buvo padidintas 10%, nuo  $5,3 \mu\text{m}^3/\mu\text{J}$  iki  $5,8 \mu\text{m}^3/\mu\text{J}$ , o lazerinio gręžimo metu 16%, nuo  $7,6 \mu\text{m}^3/\mu\text{J}$  iki  $8,8 \mu\text{m}^3/\mu\text{J}$ , kuomet buvo naudojamas trijų impulsų nanosekundinės voros apdirbimas dėl dvigubai didesnės vario sugerties šiame režime.
2. Didžiausia lazerinio frezavimo efektyvumo vertė nerūdijančiam plienui buvo pasiekta įprasta lazerio veika ir siekė  $6,9 \mu\text{m}^3/\mu\text{J}$ , nes tai atitiko optimalų teorinį energijos tankį.
3. Kuomet varis ir plienas buvo apdirbti lazerine spinduliuote su optimaliu energijos tankiu abliacijos efektyvumui, buvo pasiekta geriausia apdirbimo kokybė.
4. Lazerinio gręžimo metu buvo pasiektas daugiau nei 50% didesnis abliacijos efektyvumas nei lazerinio frezavimo metu dėl energetiškai naudingesnio lazerinės abliacijos mechanizmo.
5. Bivoros režimas dėl didelio impulsų persiklojimo ir išabliuotų dalelių ekranavimo mažino abliacijos efektyvumą tiek varyje, tiek nerūdijančiame pliene.

## Literatūros sąrašas

- [1] S. Mishra and V. Yadava, "Laser Beam MicroMachining (LBMM) – A review," *Opt. Lasers Eng.* **73**, 89–122 (2015).
- [2] K. C. Phillips, H. H. Gandhi, E. Mazur, and S. K. Sundaram, "Ultrafast laser processing of materials: a review," *Adv. Opt. Photonics* **7**, 684 (2015).
- [3] J. Mur, J. Petelin, N. Osterman, and R. Petkovšek, "High precision laser direct microstructuring system based on bursts of picosecond pulses," *J. Phys. D Appl. Phys.* **50**, 325104 (2017).
- [4] Z.-Z. Li, J. Code, and W. Van De Merwe, "Er:YAG laser ablation of enamel and dentin of human teeth: determination of ablation rates at various fluences and pulse repetition rates," *Lasers Surg Med.* **12**, 625–630 (1992).
- [5] M. B. Petrović Mihajlović and M. M. Antonijević, "Copper corrosion inhibitors. Period 2008–2014. A review," *Int. J. Electrochem. Sci.* **10**, 1027–1053 (2015).
- [6] H. R. Watling, "The bioleaching of sulphide minerals with emphasis on copper sulphides - A review," *Hydrometallurgy* **84**, 81–108 (2006).
- [7] K. Yoshida and H. Morigami, "Thermal properties of diamond/copper composite material," *Microelectron. Reliab.* **44**, 303–308 (2004).
- [8] R. M. Tilaki, A. Irajizad, and S. M. Mahdavi, "Size, composition and optical properties of copper nanoparticles prepared by laser ablation in liquids," *Appl. Phys. A* **88**, 415–419 (2007).
- [9] N. Ackerl, G. Fisch, J. Auerswald, and K. Wegener, "Evolution of microstructures on stainless steel induced by ultra-short pulsed laser ablation," *SN Appl. Sci.* **2**, 652 (2020).
- [10] A. Y. Vorobyev and C. Guo, "Multifunctional surfaces produced by femtosecond laser pulses," *J. Appl. Phys.* **117**, 1033–1040 (2015).
- [11] D. Piloni, "Ferritic Stainless Steels for High Temperature Applications in Oxidizing Environments," *Recent Patents Mater. Sci.* **2**, 27–31 (2010).
- [12] A. Luft, U. Franz, A. Emsermann, and J. Kaspar, "A study of thermal and mechanical effects on materials induced by pulsed laser drilling," *Appl. Phys. A* **63**, 93–101 (1996).
- [13] M. Von Allmen, "Laser drilling velocity in metals," *J. Appl. Phys.* **47**, 5460–5463 (1976).
- [14] A. Weck, T. H. R. Crawford, D. S. Wilkinson, H. K. Haugen, and J. S. Preston, "Laser drilling of high aspect ratio holes in copper with femtosecond, picosecond and nanosecond pulses," *Appl. Phys. A Mater. Sci. Process.* **90**, 537–543 (2008).
- [15] W. Zhang, Y. L. Yao, and K. Chen, "Modelling and Analysis of UV Laser Micromachining of Copper," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* **18**, 323–331 (2001).
- [16] D. Lee, R. Patwa, H. Herfurth, and J. Mazumder, "Computational and experimental studies of laser cutting of the current collectors for lithium-ion batteries," *J. Power Sources* **210**, 327–338 (2012).
- [17] A. Riveiro, F. Quintero, F. Lusquiños, R. Comesaña, and J. Pou, "Effects of processing parameters on laser cutting of aluminium-copper alloys using off-axial supersonic nozzles," *Appl. Surf. Sci.* **257**, 5393–5397 (2011).
- [18] D. Lee, R. Patwa, H. Herfurth, and J. Mazumder, "High speed remote laser cutting of

- electrodes for lithium-ion batteries: Anode,” *J. Power Sources* **240**, 368–380 (2013).
- [19] Z. Ou, M. Huang, and F. Zhao, “Colorizing pure copper surface by ultrafast laser-induced near-subwavelength ripples,” *Opt. Express* **22**, 17254 (2014).
- [20] S. L. Campanelli, A. D. Ludovico, C. Bonserio, P. Cavalluzzi, and M. Cinquepalmi, “Experimental analysis of the laser milling process parameters,” *J. Mater. Process. Technol.* **191**, 220–223 (2007).
- [21] M. R. H. Knowles, G. Rutterford, D. Karnakis, and A. Ferguson, “Micro-machining of metals, ceramics and polymers using nanosecond lasers,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* **33**, 95–102 (2007).
- [22] A. Žemaitis, M. Gaidys, P. Gečys, G. Račiukaitis, and M. Gedvilas, “Rapid high-quality 3D micro-machining by optimised efficient ultrashort laser ablation,” *Opt. Lasers Eng.* **114**, 83–89 (2019).
- [23] C. Kerse, H. Kalaycıoğlu, P. Elahi, B. Çetin, D. K. Kesim, Ö. Akçaalan, and S. Yavaş, “Ablation-cooled material removal with ultrafast bursts of pulses,” *Nat. Publ. Gr.* **537**, 84–88 (2016).
- [24] T. Hirsiger, M. Gafner, S. M. Remund, M. W. Chaja, A. Urniezius, S. Butkus, and B. Neuenschwander, “Machining metals and silicon with GHz bursts: Surprising tremendous reduction of the specific removal rate for surface texturing applications,” *Laser Appl. Microelectron. Optoelectron. Manuf.* **XXV** **6**, 27 (2020).
- [25] S. Hou, S. Qi, D. A. Hutt, J. R. Tyrer, M. Mu, and Z. Zhou, “Three dimensional printed electronic devices realised by selective laser melting of copper/high-density-polyethylene powder mixtures,” *J. Mater. Process. Technol.* **254**, 310–324 (2018).
- [26] D. T. Pham, S. S. Dimov, P. V Petkov, and S. P. Petkov, “Laser milling,” *Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf.* **216**, 657–667 (2002).
- [27] J. Ihlemann, B. Wolff, and P. Simon, “Nanosecond and femtosecond excimer laser ablation of fused silica,” *Appl. Phys. A Solids Surfaces* **54**, 363–368 (1992).
- [28] M. Geiger, W. Becker, T. Rebhan, J. Hutfless, and N. Lutz, “Increase of efficiency for the XeCl excimer laser ablation of ceramics,” *Appl. Surf. Sci.* **96–98**, 309–315 (1996).
- [29] M. Stafe, A. Marcu, and N. N. Puscas, *Pulsed Laser Ablation of Solids*, in *B. - Pulsed Laser Ablation Solids*, Springer, Ed. (London, 2014).
- [30] S. Mishra and V. Yadava, “Laser Beam MicroMachining (LBMM) - A review,” *Opt. Lasers Eng.* **73**, 89–122 (2015).
- [31] M. D. Shirk and P. A. Molian, “A review of ultrashort pulsed laser ablation of materials,” *J. Laser Appl.* **10**, 18–28 (1998).
- [32] O. Balachinaitė, A. Bargelis, A. Dementjev, V. Sirutkaitis, and G. Račiukaitis, *Lazerinė technologija* (Vilniaus universiteto leidykla, Vilnius, 2008).
- [33] B. Jaeggi, B. Neuenschwander, J. Zuercher, T. Meier, M. Zimmermann, and G. Hennig, “High precision and high surface structuring by synchronizing mechanical axes with an ultrashort pulsed laser system in MOPA arrangement,” *Proc. ICALAO* **41**, 1046–1053 (2012).
- [34] W. Kautek and J. Krueger, “Femtosecond pulse laser ablation of metallic, semiconducting, ceramic, and biological materials,” in *Laser Mater. Process. Ind. Microelectron. Appl.* **2207**,

(1994).

- [35] D. von der Linde and K. Sokolowski-Tinten, “The physical mechanisms of short-pulse laser ablation,” *Appl. Surf. Sci.* **154–155**, 1–10 (2000).
- [36] A. Miotello and R. Kelly, “Laser-induced phase explosion: new physical problems when a condensed phase approaches the thermodynamic critical temperature,” *Appl. Phys. A Mater. Sci. Process.* **69**, S67–S73 (1999).
- [37] K. H. Leitz, B. Redlingshöer, Y. Reg, A. Otto, and M. Schmidt, “Metal ablation with short and ultrashort laser pulses,” *Phys. Procedia* **12**, 230–238 (2011).
- [38] G. Račiukaitis, *Lazerinio mikroapdirbimo laboratoriniai darbai* (TEV, Vilnius, 2008).
- [39] Y. Jee, M. F. Becker, and R. M. Walser, “Laser-induced damage on single-crystal metal surfaces,” *J. Opt. Soc. Am. B* **5**, 648 (1988).
- [40] A. Žemaitis, M. Gaidys, M. Brikas, P. Gečys, G. Račiukaitis, and M. Gedvilas, “Advanced laser scanning for highly-efficient ablation and ultrafast surface structuring: experiment and model,” *Sci. Rep.* **8**, 1–14 (2018).
- [41] B. N. Chichkov, C. Momma, S. Nolte, F. Alvensleben, and A. Tünnermann, “Femtosecond, picosecond and nanosecond laser ablation of solids,” *Appl. Phys. A Mater. Sci. Process.* **63**, 109–115 (1996).
- [42] F. H. Loesel, J. P. Fischer, M. H. Götz, C. Horvath, T. Juhasz, F. Noack, N. Suhm, and J. F. Bille, “Non-thermal ablation of neural tissue with femtosecond laser pulses,” *Appl. Phys. B* **66**, 121–128 (1998).
- [43] A. Ancona, F. Röser, K. Rademaker, J. Limpert, S. Nolte, and A. Tünnermann, “High speed laser drilling of metals using a high repetition rate, high average power ultrafast fiber CPA system,” *Opt. Express* **16**, 8958 (2008).
- [44] A. K. Dubey and V. Yadava, “Laser beam machining—A review,” *Int. J. Mach. Tools Manuf.* **48**, 609–628 (2008).
- [45] D. T. Pham, S. S. Dimov, and P. V. Petkov, “Laser milling of ceramic components,” *Int. J. Mach. Tools Manuf.* **47**, 618–626 (2007).
- [46] S. Dhar, N. Saini, and R. Purohit, “A review on laser drilling and its Techniques,” *Int. Conf. Adv. Mech. Eng.* **8**, 1–6 (2006).
- [47] J. König and T. Bauer, “Fundamentals and industrial applications of ultrashort pulsed lasers at Bosch,” in *Front. Ultrafast Opt. Biomed. Sci. Ind. Appl. XI* **7925**, (2011).
- [48] S. Döring, S. Richter, S. Nolte, and A. Tünnermann, “In-situ observation of the hole formation during deep drilling with ultrashort laser pulses,” in *Front. Ultrafast Opt. Biomed. Sci. Ind. Appl. XI* **7925**, (2011).
- [49] A. Michalowski, “Melt Dynamics and Hole Formation during Drilling with Ultrashort Pulses,” *J. Laser Micro/Nanoen.* **3**, 211–215 (2008).
- [50] J. Fleischer and J. Kotschenreuther, “The manufacturing of micro molds by conventional and energy-assisted processes,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* **33**, 75–85 (2007).
- [51] D. Karnakis, G. Rutterford, M. Knowles, T. Dobrev, P. Petkov, and S. Dimov, “High quality laser milling of ceramics, dielectrics and metals using nanosecond and picosecond lasers,” in

*Phot. Process. Microelectron. Photonics V 6106*, (2006).

- [52] M. Gaidys, A. Žemaitis, P. Gečys, and M. Gedvilas, “Efficient picosecond laser ablation of copper cylinders,” *Appl. Surf. Sci.* **483**, 962–966 (2019).
- [53] D. Schubart, F. Vollertsen, and M. Kauf, “Process modelling of laser ablating ferrous materials,” *Model. Simul. Mater. Sci. Eng.* **5**, 79–92 (1997).
- [54] H. K. Toenshoff, C. Graumann, H. Hesener, and M. Rinke, “NC-controlled production of smooth 3-D surfaces in brittle materials with 193 nm-Excimer Laser,” *Micromach. Microfabr. Process Technol. IV* **35**, 56–66 (1998).
- [55] J. Furmanski, A. M. Rubenchik, M. D. Shirk, and B. C. Stuart, “Deterministic processing of alumina with ultrashort laser pulses,” *J. Appl. Phys.* **102**, 73112 (2007).
- [56] G. Račiukaitis, M. Brikas, P. Gečys, B. Voisiat, and M. Gedvilas, “Use of High Repetition Rate and High Power Lasers in Microfabrication: How to Keep the Efficiency High?,” *J. Laser Micro/Nanoen.* **4**, 186–191 (2009).
- [57] M. Schmid, B. Neuenschwander, V. Romano, B. Jaeggi, and U. W. Hunziker, “Processing of metals with ps-laser pulses in the range between 10ps and 100ps,” *Laser Appl. Microelectron. Optoelectron. Manuf.* **79**, 973–979 (2011).
- [58] B. Jäggi, D. J. Förster, R. Weber, and B. Neuenschwander, “Residual heat during laser ablation of metals with bursts of ultra-short pulses,” *Adv. Opt. Technol.* **7**, 175–182 (2018).
- [59] A. Žemaitis, P. Gečys, M. Barkauskas, G. Račiukaitis, and M. Gedvilas, “Highly-efficient laser ablation of copper by bursts of ultrashort tuneable (fs-ps) pulses,” *Sci. Rep.* **9**, 12280 (2019).
- [60] B. Neuenschwander, B. Jaeggi, D. J. Foerster, T. Kramer, and S. Remund, “Influence of the burst mode onto the specific removal rate for metals and semiconductors,” *J. Laser Appl.* **31**, 22203 (2019).
- [61] J. König, S. Nolte, and A. Tünnermann, “Plasma evolution during metal ablation with ultrashort laser pulses.,” *Opt. Express* **13**, 10597–10607 (2005).

## LAZERINĖS ABLIACIJOS EFEKTYVUMAS APDIRBANT METALUS ULTRATRUMPŲJŲ IMPULSŲ VOROMIS: GRĘŽIMAS IR FREZAVIMAS

### Santrauka

Dėl sparčiai besivystančių technologijų, vis dažniau atsiranda mikrostruktūrų poreikis ant įvairių medžiagų. Šį poreikį sėkmingai pildo lazerinis mikroapdirbimas, nes tai yra itin tikslus, greitas ir universalus metodas. Abliacijos efektyvumas priklauso nuo daugybės parametų, tokių kaip: vidutinė galia, impulsų pasikartojimo dažnis, impulsų trukmė ir k.t.

Šiame moksliniame darbe buvo atliktas tyrimas, kurio metu, naudojant lazerį impulsų voros ir bivoros režimuose buvo ieškoma optimalių lazerinių parametų norint pasiekti didžiausią abliacijos efektyvumą gręžiant ir frezuojant metalus. Eksperimente buvo keičiamas impulsų skaičius voroje ir bivoroje. Impulsų trukmė buvo 210 fs, pasikartojimo dažnis 100 kHz, o voroje esančių impulsų pasikartojimo dažnis 64,68 MHz. Bivoros impulsų pasikartojimo dažnis siekė 4,88 GHz. Taip pat, bandinio paviršius buvo išvedamas iš pluošto sąsmaukos padėties, taip keičiant medžiagą pasiekiantį energijos tankį. Eksperimentai buvo atlikti ant dviejų itin plačiai pramonėje naudojamų metalų – vario ir nerūdijančio plieno.

Lazerinio frezavimo varyje metu abliacijos efektyvumas buvo padidintas 10%, nuo  $5,3 \mu\text{m}^3/\mu\text{J}$  iki  $5,8 \mu\text{m}^3/\mu\text{J}$ , kai trys impulsai sudarė nanosekundinę vorą lyginant su įprastu lazerio veikos režimu. Šis padidėjimas išmatuotas  $2 - 3 \text{ J/cm}^2$  energijos tankio srityje. Šioje srityje taip pat gauta ir didžiausia abliacijos kokybė, apdirbto paviršiaus šiurkštumas buvo  $R_a = 0,3 \mu\text{m}$ . Bivoros režimas nebuvo efektyvus vario abliacijai. Abliuojant nerūdijantį plieną įprasta pavienių impulsų veika buvo pasiektas  $6,9 \mu\text{m}^3/\mu\text{J}$  abliacijos efektyvumas, tačiau nei impulsų voros, nei bivoros veika nepagerino šio rezultato. Lazerinio gręžimo varyje metu abliacijos efektyvumas buvo padidintas 16%, nuo  $7,6 \mu\text{m}^3/\mu\text{J}$  iki  $8,8 \mu\text{m}^3/\mu\text{J}$ , kai trys impulsai sudarė nanosekundinę vorą. Gręžiant varį buvo pasiektas 50% didesnis abliacijos efektyvumas nei lazerinio frezavimo dėl energetiškai naudingesnio lazerinės abliacijos mechanizmo.

EFFICIENT LASER ABLATION OF METALS USING ULTRASHORT BURSTS: DRILLING AND MILLING

**Summary**

The need for various microstructures in different materials increases because of the rapidly improving technologies. This need is met mostly by laser micro-machining, which is a fast, precise and universal method. Ablation efficiency depends on many laser parameters, such as: average laser power, pulse repetition rate, pulse duration, pulse overlap and others.

Several experiments were carried out in this work, during which a state-of-the-art laser was used. This laser was able to work in burst and bi-burst regimes, which were used to find a set of optimal parameters for the highest ablation efficiency in laser drilling and milling processes. During the experiment the pulse number in the burst and bi-burst regimes were changed. The pulse duration was 210 fs, pulse repetition rate was 100 kHz and pulse repetition rate inside the burst was 64.68 MHz. If each of the laser pulses inside the burst consists of a burst themselves, then the mode was bi-burst. Pulse repetition rate inside the bi-burst mode was 4.88 GHz. Moreover, the beam waist radius was increased by moving the sample surface out of the focal position to change the fluence. The experiment was carried on two metals copper and stainless steel, that are frequently used in various industries.

Using the burst regime, the ablation efficiency was increased by 10% on copper when 3 pulses were inside the burst. The ablation efficiency was increased from  $5.3 \mu\text{m}^3/\mu\text{J}$  to  $5.8 \mu\text{m}^3/\mu\text{J}$ , when the fluence was  $2 - 3 \text{ J/cm}^2$ . The highest machining quality was also inside this fluence region, which corresponded to a surface roughness of  $0.3 \mu\text{m}$ . Using the bi-burst method the ablation rate dramatically decreased. Ablation efficiency of  $6.9 \mu\text{m}^3/\mu\text{J}$  was achieved on stainless steel. However, no further improvements were seen while using burst and bi-burst regimes. During laser drilling on copper the ablation efficiency was increased by 16% from  $7.6 \mu\text{m}^3/\mu\text{J}$  to  $8.8 \mu\text{m}^3/\mu\text{J}$  when 3 pulses were inside the burst. Laser drilling was 50% more efficient than laser milling due to the more favorable ablation mechanism.



## Rezultatų viešinimas

### Tiesiogiai su darbu susijusios publikacijos

- [P1] **M. Gaidys**, A. Žemaitis, P. Gečys, M. Gedvilas, “Efficient picosecond laser ablation of copper cylinders“ *Appl. Surf. Sci.* **483**, 962–966 (2019).
- [P2] A. Žemaitis, J. Mikšys, **M. Gaidys**, P. Gečys, M. Gedvilas, “High-efficiency laser fabrication of drag reducing riblet surfaces on pre-heated Teflon“ *Mater. Res. Express* **6**, 065309 (2019).

### Kitos publikacijos

- [P3] A. Žemaitis, **M. Gaidys**, M. Brikas, P. Gečys, G. Račiukaitis, M. Gedvilas, “Advanced laser scanning for highly-efficient ablation and ultrafast surface structuring: experiment and model“ *Sci. Rep.* **8**, 1-14 (2018).
- [P4] A. Žemaitis, **M. Gaidys**, P. Gečys, G. Račiukaitis, M. Gedvilas, “Rapid high-quality 3D micro-machining by optimised efficient ultrashort laser ablation“ *Opt. Lasers Eng.* **114**, 83–89 (2018).

### Tiesiogiai su darbu susiję pranešimai konferencijose

- [K1] A. Žemaitis (pranešėjas), **M. Gaidys**, P. Gečys, M. Gedvilas, Novel burst ultrafast laser ablation: burst-in-burst regime, The 21th International Symposium on Laser Precision Microfabrication (LPM 2020), Dresden, Germany (2020).
- [K2] A. Žemaitis (pranešėjas), **M. Gaidys**, M. Gedvilas, Efficient ultrashort pulsed laser ablation for 3D engraving, 61th International Conference for Students of Physics and Natural Sciences „Open Readings 2018“, Vilnius, Lithuania (2018).
- [K3] M. Gedvilas (pranešėjas), A. Žemaitis, **M. Gaidys**, P. Gečys, G. Račiukaitis, Efficient Laser Scanning Ablation Procedure for Ultrafast Surface Structuring, 11th International Conference on Photo-Excited Processes and Applications (ICPEPA 11), Vilnius, Lithuania (2018).
- [K4] **M. Gaidys (pranešėjas)**, A. Žemaitis, P. Gečys, G. Račiukaitis, M. Gedvilas, Efficient picosecond laser ablation on cylindrical surfaces, 11th International Conference on Photo-Excited Processes and Applications (ICPEPA 11), Vilnius, Lithuania (2018).
- [K5] **M. Gaidys (pranešėjas)**, A. Žemaitis, P. Gečys, M. Gedvilas, Study of efficient copper laser ablation, 61th International Conference for Students of Physics and Natural Sciences “Open Readings 2018”, Vilnius, Lithuania (2018).

### Kiti pranešimai

- [K6] A. Abakevičienė (pranešėja), M. Lukauskas, D. Jucius, A. Lazauskas, V. Grigaliūnas, M. Gedvilas, **M. Gaidys**, G. Račiukaitis, *Structural Properties of Temperature-UV Affected Fluorinated Ethylene Propylene Film*, “Nanotechnology and Innovation in the Baltic Sea Region” (NIBS2017), Kaunas, Lithuania (2017).
- [K7] I. Beleckaitė (pranešėja), R. Adomavičius, A. Krotkus, M. Gedvilas, **M. Gaidys**, G. Račiukaitis, *Laser induced periodic surface structures on the GaAs surface investigated by THz emission measurements*, 19-th International Conference-School “Advanced Materials and Technologies” (AMT2017), Palanga, Lithuania (2017).