



**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
MATEMATIKOS IR GAMTOS MOKSLŲ FAKULTETAS**

Orestas Ulčinas

**MIKROSTRUKTŪRŲ FORMAVIMAS FEMTOSEKUNDINE
LAZERINE MIKROAPDIRBIMO SISTEMA**

Magistro projektas

Vadovas

lekt. dr. Tomas Tamulevičius

KAUNAS, 2016

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
MATEMATIKOS IR GAMTOS MOKSLŲ FAKULTETAS

**MIKROSTRUKTŪRŲ FORMAVIMAS FEMTOSEKUNDINE
LAZERINE MIKROAPDIRBIMO SISTEMA**

Magistro projektas
Medžiagų mokslas (621J50005)

Vadovas

lekt. dr. Tomas Tamulevičius

Recenzentas

prof. dr. Diana Adlienė

Projektą atliko

Orestas Ulčinas

KAUNAS, 2016



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Matematikos ir gamtos mokslų

(Fakultetas)

Orestas Ulčinas

(Studento vardas, pavardė)

Medžiagų mokslas (621J50005)

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

„Mikrostruktūrų formavimas femtosekundine lazerine mikroapdirbimo sistema“

AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

20 16 m. gegužės 19 d.
Kaunas

Patvirtinu, kad mano, **Oresto Ulčino**, baigiamasis projektas tema „Mikrostruktūrų formavimas femtosekundine lazerine mikroapdirbimo sistema“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

Aš suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo faktui, man bus taikomos nuobaudos, remiantis Kauno technologijos universitete galiojančia tvarka.

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)

TURINYS

IŽANGA.....	9
1. LITERATŪROS APŽVALGA	10
1.1. Lazerinis mikroapdirbimas	10
1.2. Spinduliuotės ir medžiagos sąveikos parametrai	11
1.2.1. Optinės sugerties ir šilumos difuzijos gyiliai	11
1.2.2. Abliacijos slenkstis	12
1.3. Lazerio impulsus apibūdinantys dydžiai	13
1.4. Lazerių konstrukcija ir veikimas	15
1.5. Lazerių tipai ir jų charakteristikos	18
1.6. Lazerinio mikroapdirbimo metodai	19
1.7. Lazerinio mikroapdirbimo pritaikymas	20
1.8. Aliuminio oksido keramikos lazerinis mikroapdirbimas	22
2. DARBO TIKSLAS IR UŽDAVINIAI.....	25
3. MEDŽIAGOS IR TYRIMŲ METODAI	26
3.1. Mikroapdirbimo eksperimentai	26
3.2. Mikroapdirbimo ultrasparčia lazerine spinduliuote sistema “FemtoLAB”	29
3.3. Bandinių paviršiaus morfologijos analizė.....	32
3.3.1. Profilometras	32
3.3.2. Optinis mikroskopas	33
3.3.3. Skenuojantis elektronų mikroskopas	34
4. TYRIMŲ REZULTATAI IR JŲ APTARIMAS.....	37
4.1. Fokuso nustatymas	37
4.2. Slenkstinė energija	38
4.3. Apdirbimo kokybė	38
4.4. Fokuso gylis	43
4.5. Mikrostruktūrų realizavimas	46
4.5.1. Piramidės.....	47
4.5.2. Mikroskystinis prietaisas.....	49
4.5.3. Akustinio mikroskopo kalibracinis blokas.....	50
IŠVADOS.....	52
LITERATŪROS SĄRAŠAS.....	53

Ulčinas, Orestas. Mikrostruktūrų formavimas femtosekundine lazerine mikroapdirbimo sistema. Magistro baigiamasis projektas / vadovas lekt. dr. Tomas Tamulevičius; Kauno technologijos universitetas, Matematikos ir gamtos mokslų fakultetas.

Mokslo kryptis ir sritis: Medžiagų technologijos (08T), Technologijos mokslai

Reikšminiai žodžiai: *lazerinis mikroapdirbimas, aliuminio oksido keramika, mikrostruktūros, femtosekundiniai impulsai*

Kaunas, 2016. 55 p.

SANTRAUKA

Nors lazerinis medžiagų apdirbimas mokslininkų tyrinėjamas jau kelis dešimtmečius, jo populiarumas ir aktualumas tik auga. Pastarųjų dešimtmečių nauji moksliniai atradimai lazerinių technologijų srityje leidžia ultratrumpais lazerio impulsais medžiagoje suformuoti mikrometrines ir nanometrines struktūras, todėl šis mikroapdirbimo metodas randa vis platesnį panaudojimą šių dienų pramoniniuose ir moksliniuose taikymuose. Šiame darbe aptariamas lazerinis mikrostruktūrų formavimas, supažindinama su lazerio pluošto ir medžiagos sąveika, ją aprašančiais parametrais. Taip pat darbe kalbama apie lazerines sistemas, jų konstrukciją ir veikimą, lazerio tipus, apdirbimo metodus bei panaudojimą. Didžiausias dėmesys skiriamas lazeriniam aliuminio oksido keramikos mikroapdirbimui. Kadangi aliuminio oksido keramikos ir kitų medžiagų mikroapdirbimas priklauso nuo medžiagos ir lazerio pluošto savybių, „FemtoLAB“ femtosekundine lazerine mikroapdirbimo sistema aliuminio oksido keramikos paviršiuje buvo atlikti fokuso atstumo, abliacijos slenksčio, mikroapdirbimo kokybės ir išfokusavimo (angl. *defocusing*) mikroapdirbimo eksperimentai, kurių metu kito bandinio aukštis (fokusavimo sąlygos), abliacijos greitis, energijos tankis, impulsų persidengimas ir apdirbimo pakartojimų skaičius. Bandymų realizavimas šioje medžiagoje leido surasti optimalius lazerinio mikroapdirbimo parametrus, kurie buvo naudojami tolimesniam mikrostruktūrų formavimui. Eksperimentų metu sudarytų pažeidimų ir darbe suformuotų mikrostruktūrų paviršiaus morfologija ištirta optiniu mikroskopu „OPTIKA“ ir skenuojančiu elektroniniu mikroskopu (SEM) „FEI Quanta 200FEG“. Pažeidimų gylyai nustatyti profilometru „TR200“ ir vertikalia pozicionavimo sistema ANT130-5-V (Aerotech), kuri yra kartu su bandinio vaizdinimo CCD kamera ir mikroskopo objektyvu (50x Mitutoyo). Šiuo atveju pažeidimų aukščiai nustatomi atitinkamai atimant pozicionavimo sistemos koordinates, t.y. bandinio aukščius, kai sistema yra sufokusuota į pažeidimo dugną ir į nepažeistą bandinio vietą.

Aliuminio oksido keramikoje atliktais fokuso taško ir abliacijos slenksčio mikroapdirbimo eksperimentais buvo nustatytas bandinio aukštis, kuriame lazerio spindulio energija yra sukoncentruota į mažiausią dėmės plotą ir abliacijos slenkstinė vertė, nuo kurios prasideda

medžiagos pašalinimas – $1,69 \text{ J/cm}^2$. Apdirbimo kokybės eksperimentas parodė, kad apdirbto paviršiaus kokybė ir jo tolygumas stipriai priklauso nuo impulsų persidengimo ir energijos tankio. Geriausios kokybės paviršius gaunamas naudojant 84,4 % impulsų persidengimą ir $11,2 \text{ J/cm}^2$ energijos tankį. Bandinio aukščio kitimo eksperimentu apdirbant medžiagą keletą kartų buvo įvertintas fokuso gylis (angl. *depth of focus*), kuris buvo palygintas su teoriškai apskaičiuotu. Tolimesniam mikrostruktūrų formavimui buvo pasirinktas 9,5 - 19,5 μm bandinio aukščio kitimas per vieno lazerinio apdirbimo ciklo pakartojimą, nes ties didesnėmis vertėmis blogėja paviršiaus kokybė, susidaro perlydytas medžiagos sluoksnis.

Surasti optimalūs apdirbimo parametrai buvo panaudoti trimačių piramidžių, mikroskystinio prietaiso ir akustinio mikroskopo kalibracinio bloko mikrostruktūrų formavimui.

Ulčinas, Orestas. *Formation of Microstructures Using Femtosecond Laser Micromachining System*: Master's thesis in Materials Technology / supervisor lect. dr. Tomas Tamulevičius. The Faculty of Mathematics and Natural Sciences, Kaunas University of Technology.

Research area and field: Materials Technology (08T), Technological sciences

Key words: *laser micromachining, aluminum oxide ceramic, microstructures, femtosecond pulses*

Kaunas, 2016. 55 p.

SUMMARY

Even though laser micromachining has been investigated by scientists for years, interest of research in the field is still increasing. Recent advances in laser technology enabled machining of micro-nano scale structures employing ultrashort pulses, therefore this particular method is applied for wide range of industrial and scientific applications. Current work describes methods for patterning of microstructures employing lasers as well as discusses laser – material interactions and their parameters. Most popular laser systems and their constructions, operation principles, types, methods and applications are reviewed. The main focus is concentrated on micromachining of aluminum oxide ceramics using femtosecond laser pulses. Since micromachining of materials strongly depends on their properties as well as laser beam parameters, a number of experiments were carried out: determination of focal distance, ablation threshold, micromachining quality and defocusing under different ablation rate, energy density, pulse overlap and ablation cycles count were performed. These experiments enabled obtaining optimal laser micromachining parameters which were used for further formation of more complex microstructures. The surface morphology has been analyzed using optical microscope (“OPTIKA”) and scanning electron microscope (SEM) “FEI Quanta 200FEG”. The depth of microstructures was measured using profilometer (TR200), computer controlled vertical translation stage ANT130-5-V (AeroTech) and monitoring CCD camera view of the sample surface through a 50x and 0,42 NA microscope objective (Mitutoyo) of the “FemtoLAB” system. The height of the trenches was obtained by subtracting the translation stage coordinates at the focus of non-ablated surface and the bottom of the ablated crater surfaces respectively.

During the experiments optimal height of sample with respect to the lens was obtained where laser beam energy is concentrated into smallest area. The ablation threshold of aluminum oxide ceramics was found to be – 1,69 J/cm². Furthermore, the surface quality after micromachining depends on the pulse overlap and pulse density. Best surface quality was achieved using 84,4 % pulse overlap and 11,2 J/cm² energy density. Experimentally obtained depth of focus was

compared with the theoretical calculations. 9,5 – 19,5 μm variation in height between two ablation cycles was selected for further formation of microstructures because using higher values resulted in reduction of surface quality and formation of recast debris layer.

Optimal micromachining parameters were used for formation of 3D pyramids, microfluidic device and scanning acoustic microscope calibration block.

IŽANGA

Lazerinis mikroapdirbimas ultratrumpais impulsais atrandanti savo taikymus tiek pramonėje, tiek ir mokslo srityje medžiagų apdirbimo technologija. Dėl savo unikalių savybių, tokių kaip: apdirbimo kokybė, didelė skyra, precizika, universalumas, atkartojamumas, galimybė apdirbti įvairias medžiagas, ši technologija panaudojama daugelyje sričių: mikroskystiniai prietaisai, elektromechaninės sistemos, optiniai įrenginiai, elektronikos prietaisai, medicina ir kt.

Pastarųjų dešimtmečių mokslininkų atradimai lazerių srityje leido lazeriniu apdirbimu pasiekti mikrometrinius ir nanometrinius struktūrų matmenis - tai atvėrė galimybę konkuruoti su įprastinėmis elektronikos pramonėje naudojamomis litografijos technologijomis. Litografija paprastai yra daug laiko užimanti, reikalaujanti brangios ir sudėtingos įrangos technologija (ėsdinimo kaukės užnešimas, rezisto užnešimas, kaukės rašto formavimas, ryškinimas, ėsdinimo kaukės formavimas, plazminis ėsdinimas).

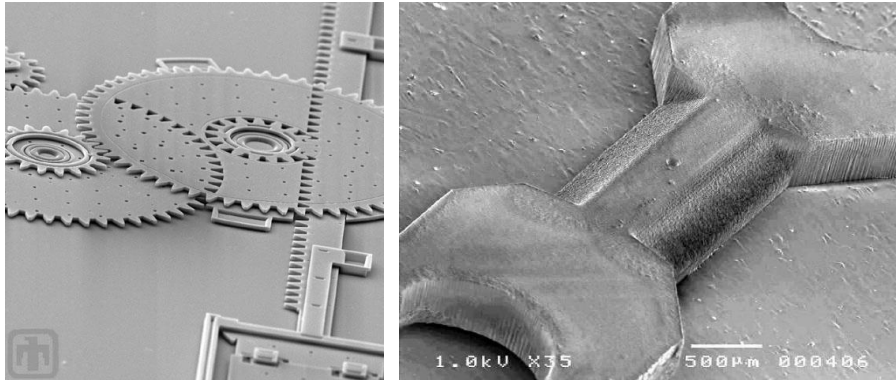
Lazerinis mikroapdirbimas ultratrumpais impulsais yra greitas, lankstus ir universalus vieno litografijos etapo (angl. „*one step lithography*“) metodas. Šis metodas gali būti naudojamas apdirbant visas žinomas skaidrias ir neskaidrias medžiagas. Pati apdirbimo proceso dinamika yra sudėtinga, priklausanti nuo daugelio spinduliuotės ir medžiagos parametrų: impulsų trukmės, jų persidengimo ir pasikartojimo dažnio, spinduliuotės galios, energijos tankio, apdirbimo greičio, optinės sugerties ir šilumos difuzijos gylių ir kt.

Norėdami pasiekti aukštą ultraspartaus lazerinio apdirbimo našumą, tikslumą ir preciziką reikia surasti optimalius apdirbimo parametrus, kurie užtikrintų proceso stabilumą ir valdomumą laike ir erdvėje.

1. LITERATŪROS APŽVALGA

1.1. Lazerinis mikroapdirbimas

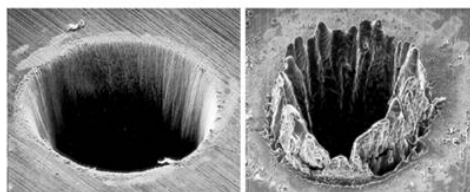
Lazerinis mikroapdirbimas, kuriame naudojami nanosekundiniai ir trumpesni impulsai, yra inovatyvus, lankstus tiesioginės litografijos metodas leidžiantis sudaryti įvairias mikro ir nano matmenų struktūras (žr. 1 pav.), tokias, kaip optinių ar akustinių mikroskopų kalibraciniai blokai, mikroskystiniai prietaisai, mikroelektromechaninės sistemos ir t.t., tai vienas iš efektyviausių fizikinių medžiagos apdirbimo metodų.



1 pav. Lazerinio mikroapdirbimo galimybės [1-2]

Lazerinio apdirbimo metu vyksta lokalus vietos šildymas, t.y. dėl aukštos temperatūros medžiaga patiria fazinius virsmus iš kietos į skystą ir iš skystos į dujinę būsenas. Kadangi lazerio pluoštas gali būti sufokusuotas (sutelktas) į labai mažą dėmę (plotą), tai intensyvumo vertė šiame taške gali išaugti iki 10^6 - 10^8 kartų. Tokios lazerio spindulio intensyvumo vertės sudaro sąlygas medžiagos lazerinei abliacijai. Abliacijos metu vyksta tiesioginis kietos-dujinės būsenos virsmas. Medžiagos šalinimo greitis, šiuo atveju, siekia vieną – dešimt monosluoksnių per impulsą, tai reiškia medžiagos paviršiaus forma, struktūra yra modifikuojama labai ploname paviršiaus sluoksnyje [3].

Aplink lazerio paveiktas zonas gali susidaryti pakitusios medžiagos sluoksnis (žr. 2 pav.). Sluoksnyje dėl staigaus persilydimo ir kt. reiškinių atsiranda įtempiai, defektai, įtrūkimai, kurie blogina lazerinio apdirbimo preciziką, tikslumą ir kokybę. Apdirbimo našumui, kokybei ir kitoms charakteristikoms pagerinti yra ieškomi apdirbimo parametrų rinkiniai, kurie suteikia optimalią lazerio ir medžiagos sąveiką [4].



2 pav. Femtosekundiniu (kairėje) ir nanosekundiniu (dešinėje) lazeriais išgręžtos skylės pliene. Nanosekundiniu lazeriu išgręžtoje skylutėje pastebimas persilydymas [5]

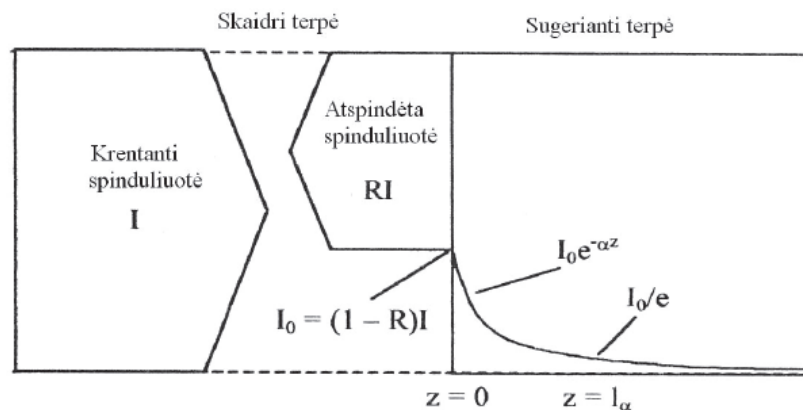
1.2. Spinduliuotės ir medžiagos sąveikos parametrai

1.2.1. Optinės sugerties ir šilumos difuzijos gyiliai

Vieni pagrindinių mikroapdirbimo procesą apibūdinančių parametru yra lazerinės spinduliuotės sugerties (α) ir šilumos difuzijos (D) gyiliai. Medžiagos apdirbimas lazeriu pagrįstas lazerio spinduliuotės sugertimi (žr. 3 pav.). Spinduliuotės prasiskverbimas į medžiagą aprašomas Beero-Lamberto dėsniumi [6]:

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

čia $I(z)$ – spinduliuotės intensyvumas praėjus medžiagos storį z , R – paviršiaus atspindžio koeficientas, α – sugerties koeficientas, I_0 – krintančios į medžiagos paviršių spinduliuotės intensyvumas.



3 pav. Lazerinės spinduliuotės atspindys ir sugertis medžiagoje [3]

Medžiagos pašalinimas vyksta dėl atomų sąveikos su prasiskverbusia lazerio pluošto energijos dalimi ($I_0(I - R)$). Tuo tarpu, atsispindėjusios spinduliuotės dalis nedalyvauja medžiagos kaitinime (IR). Sugerties gylius priklauso nuo medžiagos temperatūros ir naudojamo bangos ilgio. Gylius, kuriame šviesos intensyvumas sumažėja e kartų vadinamas optiniu pralaidumu arba sugerties gyliu (l_a), jame sugeriama didžiausia energijos dalis [3]:

$$l_a = \frac{1}{\alpha}. \quad (2)$$

Kita labai svarbi sąveikos savybė – šilumos difuzijos gylius [3]:

$$D = 2 \cdot \sqrt{z \cdot t}. \quad (3)$$

Jis nusako šilumos difuzijos atstumą nuo lazerio spinduliuotės apšviestos zonos per lazerio impulso trukmę t . Didėjant impulso trukmei - šilumos prasiskverbimas taip pat didėja [3].

Paviršiaus temperatūros kitimui impulso metu skiriami du atvejai: a) $l_a < D$ ir b) $l_a > D$. Jei turime stačiakampį impulsą, tai pirmuoju atveju temperatūros kitimas medžiagos paviršiuje išreiškiamas [3]:

$$\Delta T = \frac{2(1 - R)I_0\sqrt{zt}}{\sqrt{\pi}K}. \quad (4)$$

Tai atitinka optimalias mikroapdirbimo sąlygas, šilumos paveiktos zonos storis yra minimizuotas [3].

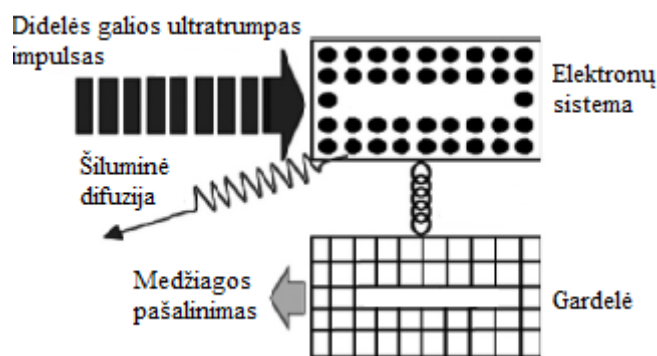
Kai $l_a > D$, temperatūros kitimas paviršiuje aprašomas [3]:

$$\Delta T = \frac{(1 - R)I_0\alpha z}{K}. \quad (5)$$

Ši nelygybė apibūdina lazerio spinduliuotės sugėrimą dideliame medžiagos gylyje. Norint, kad medžiagos mikroapdirbimo kokybė būtų maksimizuota, parametrų l_a ir D vertės turi būti daug mažesnės už 1 μm . l_a ir D reikšmės gali būti keičiamos parenkant impulso trukmę ir lazerio bangos ilgį [3].

1.2.2. Abliacijos slenkstis

Impulso energijos perdavimas medžiagai vyksta dėl šviesos fotonų ir elektronų sąveikos. Elektronai sugėrę energiją yra sužadunami - peršoka į aukštesnį energetinį lygmenį, tačiau dėl susidūrimų ją greitai praranda ($<10^{-12}$ s). Energija susidūrimų metu perduodama gardelei, vyksta termalizacija (žr. 4 pav.). Gardelė yra šildoma, medžiaga ima garuoti [6].

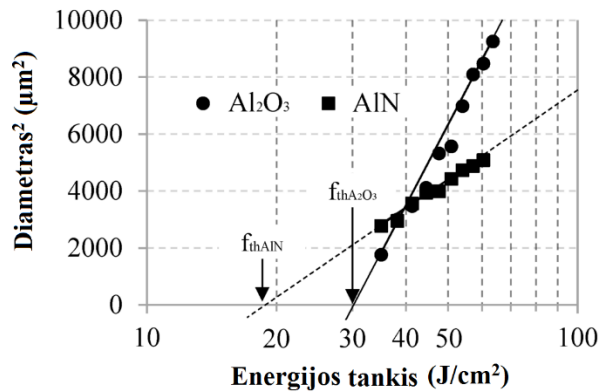


4 pav. Lazerio impulso ir medžiagos sąveikos schema [7]

Lazerinė abliacija prasideda nuo diskrečios energijos tankio vertės. Ši reikšmė vadinama abliacijos slenkščiu ir yra skirtinga įvairioms medžiagoms. Slenkstinė energija priklauso ne tik nuo sugerties mechanizmo, medžiagos savybių, mikrostruktūros, paviršiaus morfologijos, defektų, bet ir nuo lazerio parametrų: bangos ilgio, impulsų trukmės ir t.t [8]. Tipinės abliacijos slenkščio vertės metalams – 1 – 10 J/cm^2 , neorganiniams izoliatoriams (angl. *inorganic isolators*) 0,5 – 2 J/cm^2 ir organinėms medžiagoms – 0,1 – 1 J/cm^2 [6]. Jei abliacijos metu yra naudojamas keletas impulsų (angl. *multiple pulses*), abliacijos slenkstis sumažėja dėl pasireiškiančio inkubacijos (angl. *incubation*) efekto. Vieno impulso ir keleto impulsų abliacijos slenkščiai susiję išraiška [6]:

$$F_{th}(N) = F_{th}(1)N^\xi. \quad (6)$$

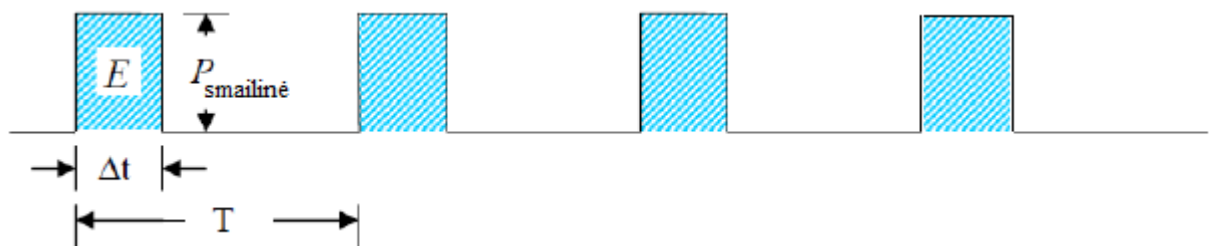
čia ζ – inkubacijos laipsnis. ζ gali būti randamas iš $\log(NF_{th}(N))$ ir $\log N$ priklausomybės polinkio kampo. Slenkstinės vertės surandamos sudarant pažeidimų masyvą, kuriame didinamos energijos tankio reikšmės – gaunami skirtingo diametro pažeidimai. Abliacijos slenkstis identifikuojamas nubrėžus pažeidimų diametrų kvadratu ir energijos tankio priklausomybę (žr. 5 pav.). Slenkstinis energijos tankis priskiriamas vertei, kurią grafiko liestinė atkerta absčių ašyje [8,9].



5 pav. Al_2O_3 ir AlN abliacijos slenkščiai [9]

1.3. Lazerio impulsus apibūdinantys dydžiai

Lazerinio mikroapdirbimo vykdomų procesų greitis, tikslumas, paviršiaus apdirbimo kokybė, pašalinami medžiagos kiekiai priklauso nuo lazerio impulsų parametrų: galios, trukmės, energijos, persidengimo, dėmės dydžio, Relėjaus nuotolio, energijos tankio, pasikartojimo dažnio ir kt.



6 pav. Stačiakampių lazerio impulsų vora [10]

Galia ir energija, tai parametrai nuo kurių priklauso impulsų generuojami procesai medžiagoje. 6 pav. pavaizduota dažniu $f = 1/T$ pasikartojanti impulsų vora, kur kiekvieno impulso energija E yra vienoda. Tada šių impulsų energijos srauto kitimą per laiko vienetą arba periodą galima aprašyti smailine (angl. *peak*) ir vidutine galiomis. Kiekvieno impulso smailinė galia išreiškiama [10]:

$$P_{\text{smailinė}} = \frac{E}{\Delta t}. \quad (7)$$

Tuomet vidutinė galia per periodą [10]:

$$P_{vidutinė} = \frac{E}{T}. \quad (8)$$

Smailinę ir vidutinę galias sieja tokia išraiška [10]:

$$P_{smailinė} \Delta t = P_{vidutinė} T. \quad (9)$$

Vieno impulso energija priklauso nuo impulsų pasikartojimo dažnio ir vidutinės galios:

$$E = \frac{P_{vidutinė}}{f}. \quad (10)$$

Žinodami impulso energiją ir efektyvų lazerio dėmės plotą, galima apskaičiuotą kitą svarbų parametą – energijos tankį [8]:

$$\Psi = \frac{E}{\pi w_0^2}. \quad (11)$$

čia w_0 – lazerio dėmės spindulys (angl. *beam waist*) (žr. 7 pav.).

Kadangi lazeriniam apdirbimui reikia labai didelių intensyvumų, lazerio pluošto dėmę siekiama fokusuoti į kuo mažesnę tašką. Naudojant optines sistemas dėmės diametras gali būti sumažintas šimtus ar net tūkstančius kartų. Tai leidžia smarkiai padidinti spinduliuotės intensyvumą poveikio zonoje. Fokusuojamo Gausinio lazerio pluošto dėmės dydis, kuris ribojamas šviesos difrakcijos, yra aprašomas formule [11,12]:

$$2w_0 = \frac{M^2 4\lambda F}{\pi d_0}. \quad (12)$$

čia λ – naudojamas bangos ilgis, F – židinio nuotolis, d_0 – spindulio diametras ties apertūra ir M^2 -koeficientas aprašantis spindulio kokybę Gauso pluošto atžvilgiu.

Tuo tarpu dėmės dydžio ir intensyvumo kitimas išilgai spindulio ašies išreiškiamas [6,8]:

$$w(z) = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_R}\right)^2}; \quad (13)$$

$$I(r, z) = I_0 \left(\frac{w_0}{w(z)}\right)^2 e^{\frac{-2r}{w(z)}}; \quad (14)$$

$$I(0, z) = \frac{2P_0}{\pi w^2(z)}. \quad (15)$$

čia z_R – Relėjaus nuotolis, I_0 – spindulio intensyvumas centre, r – radialinis atstumas nuo spindulio ašies iki nagrinėjamos dėmės spindulio vietos ir P_0 – vidutinė pluošto galia.

Medžiagą apdirbant didelės galios pasikartojančiais impulsais, jų persidengimas ir išdėstymas erdveje turi labai didelę įtaką medžiagos paviršiaus morfologijai.

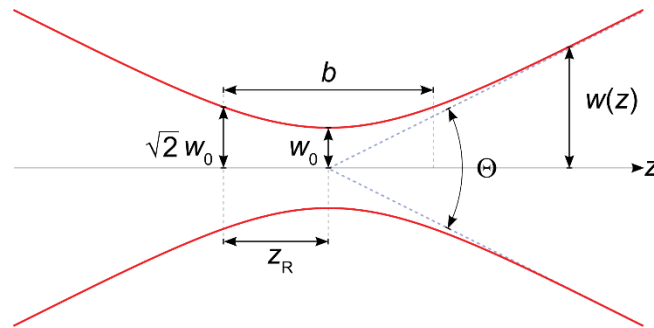
Impulsų persidengimas savo ruožtu išreiškiamas formule [13]:

$$O_f = \left(1 - \frac{v}{2w_0 + vt} \right) \cdot 100. \quad (16)$$

čia v – pluošto judėjimo greitis, f – impulsų pasikartojimo dažnis, t – impulso trukmė.

Bandinio paviršiaus aukščio svyravimai lazerio pluošto atžvilgiu keičia fokusavimo sąlygas (kinta dėmės dydis ir intensyvumas). Svarbu, kad šie paviršiaus netolygumai neviršytų Relėjaus nuotolio (žr. 7 pav.). Relėjaus nuotolyje lazerio dėmės spindulys sumažėja $\sim \sqrt{2}$ kartų, o intensyvumas - e kartų. Relėjau nuotolis išreiškiamas [14]:

$$z_R = \frac{\pi w_0^2}{\lambda}. \quad (17)$$



7 pav. Relėjaus nuotolis (θ – pluošto skėstis, b – dvigubas Relėjaus nuotolis) [15]

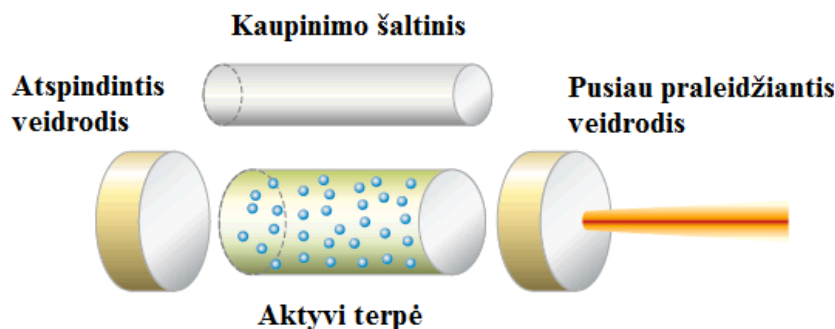
Kitas labai svarbus impulso parametras – jo trukmė. Tai laikas per kurį impulso energija sugeriama medžiagoje. Išskirtini du atvejai: nanosekundinė ir femtosekundinė trukmės. Kai impulso sąveikos laikas yra nanosekundės – išlaikoma pusiausvyra tarp gardelės ir elektronų sistemos, nes medžiagoje vykstančių procesų ir impulso trukmės yra panašios. Tačiau šiuo atveju pasireiškia ir kiti reiškiniai, kadangi pašalinta (garuojanti) medžiagos forma sąveikauja su vėlesniais impulsais – susidaro spinduliuotė sugerianti plazma. Norint išvengti šių nepageidaujamų papildomų sąveikos tipų, reikia naudoti femtosekundinius impulsus (<1 ps), tada termalizacija, medžiagos kaitinimas ir plazma nepasireiškia impulso trukmės metu [16].

Norint gauti atitinkamos trukmės impulsus, naudojamos skirtingos lazerių konstrukcijos, užtikrinančios reikiamą intensyvumo moduliaciją.

1.4. Lazerių konstrukcija ir veikimas

Visų lazerio tipų veikimo principas yra panašus. Mikroapdirbime naudojami lazeriai turi aktyvią terpę, kuri patalpinta tarp dviejų vienas kitam lygiagrečių veidrodžių (žr. 8 pav.). Vienas iš veidrodžių yra stipriai atspindintis, o kitas iš dalies praleidžiantis. Taip pat sistemoje turi būti ir kaupinimo šaltinis. Aktyvioji terpė gali būti kieta, skysta ar dujinė. Terpė sužadinama elektriniu

arba optiniu būdu – pasiekama užpildos apgraža. Du lygiagretūs veidrodžiai, kas kartą šviesai pereinant aktyviają terpę, turi užtikrinti šviesos osciliaciją. Taip sudaromas grįžtamasis optinis ryšys. Šviesai osciliuojant tokioje sistemoje, ji sustiprinama dėl stimuliuotosios emisijos. Pasiekus reikiamas intensyvumo vertes, šviesos pluoštas išspinduliuojamas lazerio išvade [17].

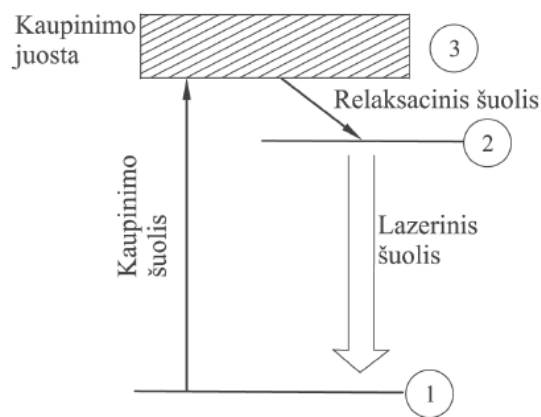


8 pav. Lazerio osciliatorius principinė schema [18]

Detaliau panagrinėsime kietakūnio lazerio aktyviosios terpės sužadinimą ir kas vyksta joje. Kaip žinome, norint gauti šviesos stiprinimo efektą, reikia, kad aktyviojoje terpėje būtų sudaryta užpildos apgraža, t.y. sužadintų dalelių skaičius turi būti didesnis už pagrindinės būsenos dalelių skaičių. Todėl kietakūnio lazerio aktyvi terpė sudaroma iš dielektrinės kristalinės arba amorfinės matricos į kurią įterpiama jonų aktyvatorių: pereinamųjų metalų arba retųjų žemės elementų. Skirtingi jonai pasižymi atitinkamu energetinių lygmenų išsidėstymu, kuris reikalingas užpildos apgrāžai pasiekti. Nuo jonų energetinių lygmenų struktūros priklauso generuojamas lazerio pluošto bangos ilgis. Skiriamos trijų ir keturių energetinių lygmenų sistemos [3].

Trijų lygmenų sistemoje (žr. 9 pav.) galimi trys aktyvatorių jonų energetiniai lygmenys. Norint sužadinti jonus reikia suteikti jiems papildomos energijos, tai pasiekama išoriniu optiniu kaupinimu. Optinis kaupinimas pasirenkamas todėl, kad juo galime užtikrinti sužadinimo atrankumą (sugeriami tik tie fotonai, kurių energija atitinka lygmenų energijų skirtumą). Trijų lygmenų sistemoje galimi 1-3, 3-2 ir 2-1 energetiniai šuoliai. Nesant išorinio kaupinimo, visi aktyvatoriai yra pagrindiniame 1 lygmenyje. Įjungus optinį kaupinimą viršutiniai 2 ir 3 lygmenys pradeda užpildyti. Tuo pat metu pagrindinio lygmens užpilda mažėja. Užpildo apgrāžai pasiekti reikia, kad šuolių tikimybė iš 3-2 lygmenų būtų didesnė nei iš 2-1, kadangi pastarasis atsakingas už lazerinį perėjimą. Jei tenkinama ši sąlyga, 2-ajame lygmenyje užpilda tampa didesnė nei pagrindinėje (1-oje) [3].

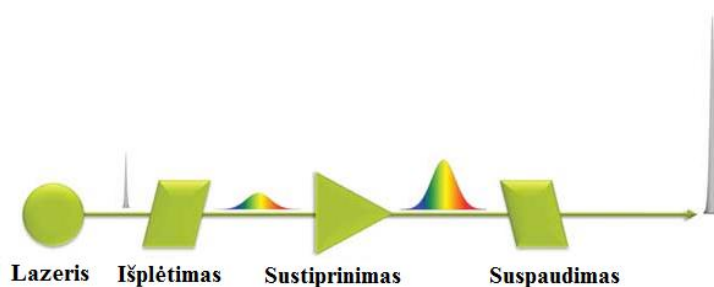
Fotono sklidimas terpe, kurioje sudaryta užpildo apgrāža, gali sukelti stimuliuotą emisiją. Dėl fotono sąveikos su sužadinta dalele, ji pereina į pagrindinį 1 lygmenį išspinduliuodama identišką tokios pačios fazės, dažnio ir poliarizacijos fotoną kaip ir sąveikaujantysis. Toks šviesos fotonų „dauginimasis“ ir sukelia stiprinimo efektą.



9 pav. Supaprastinta trijų energijos lygmenų sistema reikalinga užpildos apgrąžai sudaryti [3]

Ilgą 2-1 lygmenų šuolio trukmė leidžia kietakūniuose lazeriuose realizuoti įvairius laikinius režimus: nuo pavienių impulsų su labai didele energija iki nuolatinės veikos. Impulsiniai lazeriai gali būti: laisvos veikos, moduluotos kokybės arba sinchronizuotų modų. Šie skirtingi veikos tipai generuoja skirtingas impulsų trukmes. Laisvos veikos lazeriuose impulsų trukmė yra tarp 10^{-2} ir 10^{-4} s, moduluotos kokybės – tarp 10^{-10} ir 10^{-7} , o sinchronizuotų modų lazeriuose impulsų trukmė siekia 10^{-15} – 10^{-10} s. Impulsiniai lazeriai gali generuoti pavienius arba pasikartojančius impulsus. Impulsų pasikartojimo dažnis gali kisti nuo 1 Hz iki 100 MHz. Lazeriniam mikroapdirbimui plačiausiai taikomi moduluotos kokybės ir sinchronizuotų modų lazeriai [3,18].

Modų sinchronizavimas lazeriuose sudaro sąlygas generuoti femtosekundinius impulsus. Tai susiję su netiesiniu medžiagos lūžio rodiklio kitimu esant dideliems spinduliuotės intensyvumams (Kero lęšio modų sinchronizavimo metodas). Kadangi lūžio rodiklis priklauso nuo sklindančios bangos intensyvumo, medžiagoje atsiranda lūžio rodiklio kitimas laike ir erdvėje. Tai sukelia fazinę moduliaciją ir fokusavimąsi, dėl to įvairios impulso dalys jaučia skirtingus lūžio rodiklius, sukeldami fazės kitimą išilgai impulso. Intensyvumo svyravimai skersai lazerio pluošto indukuoja skersinius lūžio pokyčius – atsiranda pluošto fokusavimasis ir defokusavimasis. Kero terpė tampa kaip fokusuojantis lęšis, kurio veikimas priklauso nuo spinduliuotės intensyvumo. Suderinus ją su tam tikra erdvine apertūra, galime sukurti optinį moduliatorių, kurio laidumas priklauso nuo spinduliuotės intensyvumo [3].



10 pav. Impulsų stiprinimo schema [19]

Kero lęšio sinchronizavimo metodu gaunamų pavienių impulsų energija yra tik ~10-100 nJ. Tokios energijos neužtenka medžiagos mikroapdirbimui, todėl šie impulsai yra papildomai sustiprinami naudojant spektriškai moduluotų (čirpuotų) impulsų stiprinimą (žr. 10 pav.). Ši procesų seka leidžia pasiekti aukštas smailines galias neviršijant stiprintuvo optinių elementų pažeidimo slenksčių [20].

1.5. Lazerių tipai ir jų charakteristikos

Priklausomai nuo konstrukcinių ypatybių ir naudojamos aktyvios terpės lazeriai gali būti: kieto kūno, dujiniai, dažų, puslaidininkiniai, šviesolaidiniai ir kt. Kiekviena lazerių klasė pasižymi specifinėmis savybėmis:

- 1) CO₂ lazeris yra molekulinis lazeris, kurio aktyvi terpė CO₂ dujos. Lazerio aktyvioji terpė žadinama elektriniu išlydžiu. Sužadinta CO₂ molekulė relaksuoja išspinduliuodama šviesos kvantą. Energijos perdavimui CO₂ molekulei padidinti į aktyvias dujas įmaišoma azoto. Šiuose lazeriuose generuojamas 9-11 μm bangos ilgis, su stipriausia 10,6 μm linija. Keramikoms ir polimerams apdirbti gerai tinka radio dažniu sužadinami CO₂ lazeriai [21].
- 2) Eksimeriniai lazeriai skirti pjovimui, įvairių struktūrų sudarymui. Jais galima apdirbti daugelį medžiagų: keramikas, stiklą, polimerus ir t.t.. Eksimeriniai lazeriai yra impulsiniai dujiniai lazeriai, kurių generuojami bangos ilgiai yra ultravioletiniame diapazone (193 – 351 nm). Lazerio bangos ilgis priklauso nuo naudojamų dujų sudėties. Dažniausiai abliavimui naudojami bangos ilgiai - 248 nm (KrF) ir 193 nm (ArF). Eksimeriniai lazeriai paprastai naudojami kartu su kaukėmis [22,23].
- 3) Kieto kūno lazeriai generuoja nuo 400 nm iki 3 μm bangos ilgio spinduliuotę. Diodu kaupinami Nd:YAG (neodimiu legiruotas itrio aliuminio granatas) lazeriai pasižymi gera optine sugertimi ir aukštu abliacijos našumu. Aktyvią terpę sudaro dielektrinės kristalinės arba amorfinės medžiagos legiruotos pereinamųjų metalų arba retųjų žemės elementų jonais. Plačiausiai naudojamos kieto kūno lazereo matricos yra neodimiu legiruoti Nd:YAG, Nd:YVO₄ (YVO₄ - itrio vanadatas), įterbiu legiruoti Yb:YAG ir Yb:silicis. Ši lazerių klasė kelia didelį susidomėjimą dėl savo puikių impulsų valdymo galimybių [7,22]
- 4) Šviesolaidiniuose lazeriuose aktyvioji terpė yra šviesolaidis legiruotas retųjų žemės elementų jonais: erbiu (Er⁺³), neodimiu (Nd⁺³), įterbiu (Yb⁺³) ar tuliu (Tm⁺³). Kaupinimas vyksta vienu arba dviem diodais. Šviesolaidiniai lazeriai gali moduluoti skirtingos trukmės impulsus. Visa energija perduota šviesolaidiniu lazeriu priklauso tik nuo impulso trukmės, norint padidinti energijos perdavimą, impulso trukmė

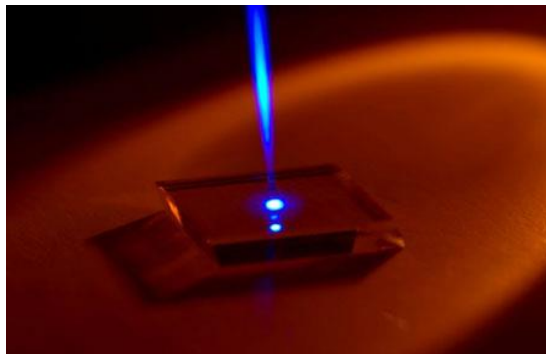
ilginama. Šviesolaidiniai lazeriai yra stabilūs, aukšto našumo, puikių pluošto savybių, turi mažus šiluminius triukšmus ir nežymius netiesinius efektus [18].

- 5) Didelės galios puslaidininkiniai lazeriai pasižymi kompaktiškumu, dideliu efektyvumu, plačiu generuojamų bangų ilgių srities spektru, patikimumu ir t.t. Diodinis lazeris yra diodas, kuriame sudaryti rezonatorius, šviesolaidis, aktyvi terpė ir p – n sandūra aktyviai terpei kaupinti. Tipiniuose puslaidininkiniuose dioduose pasiekiami bangos ilgiai: 405 nm – 3,33 μm [8].

1.6. Lazerinio mikroapdirbimo metodai

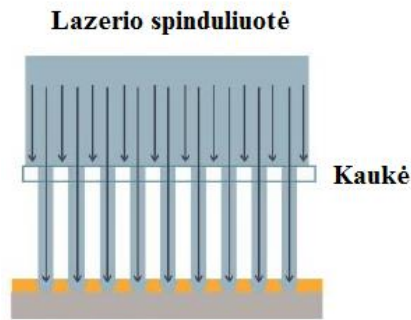
Lazerinis mikroapdirbimas gali būti realizuojamas trimis būdais: tiesioginiu poveikiu, poveikiu per kaukę ir naudojant spindulių interferencijos reiškinių [24].

Pirmuoju atveju, medžiagos paviršius skenuojamas tiesiogiai lazerio pluoštu (žr. 11 pav.). Viso apdirbamo paviršiaus ploto skenavimas gali būti atliktas lazerio arba bandinio atžvilgiu, t.y. keičiant bandinio padėtį arba valdant spindulį. Apdirbant medžiagą šiuo metodu reikia atkreipti dėmesį į valdomus parametrus: apdirbimo laukas, skenavimo greitis, dėmės dydis, fokuso gylis ir kt. Automatiniam bandinio transliavimui ar pluošto skenavimui yra naudojamos mikropozicionavimo sistemos ar galvoskeneriai. Tiesioginis lazerio poveikis naudojamas pjauti, gręžti ar žymėti įvairias medžiagas [25].



11 pav. Tiesioginis ultravioletinės lazerinės spinduliuotės poveikis sintetiniam deimantui [26]

Kitas metodas - naudojant kaukę. Išplėstu lazerio pluoštu veikiant visą kaukę, pažeidimai sudaromi tik tam tikrose tiksliai apibrėžtose kaukės vietose. Sistemos skyrai įtakos turi kaukės kokybę, matmenų tikslumas ir lazerio pluošto savybės. Apdirbant medžiagą šiuo metodu, lazerio pluoštas visame plote turi būti homogeniškas, t.y. išlaikyti vienodą intensyvumą. Keletas sistemos pranašumų: gera skyra, gylis kontrolė, atkartojamumas ir galimybė apdirbti didelius bandinio plotus [27].



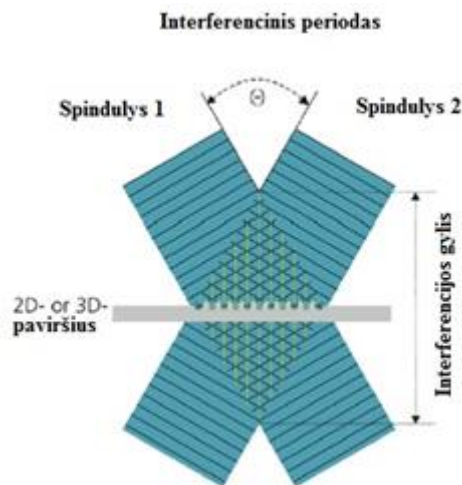
12 pav. Lazerinis mikroapdirbimas naudojant kaukę

Ir trečiasis – panaudojant spindulių interferenciją. Spindulių interferencija pasiekama pradinį pluoštą padalijant į du koherentinius pluoštus, kuriuos perklojant bandinio paviršiuje gaunamas interferencinis raštas (žr. 13 pav.) [28].

Šis metodas leidžia daryti greitą periodinių struktūrų mikrofabrikavimą. Interferencinio lauko periodas priklauso nuo kampo Θ tarp dviejų lazerio pluoštų ir išreiškiamas formule [28]:

$$p = \frac{\lambda}{2 * n * \sin\left(\frac{\Theta}{2}\right)} \quad (18)$$

čia λ - bangos ilgis, n - dangos lūžio rodiklis.

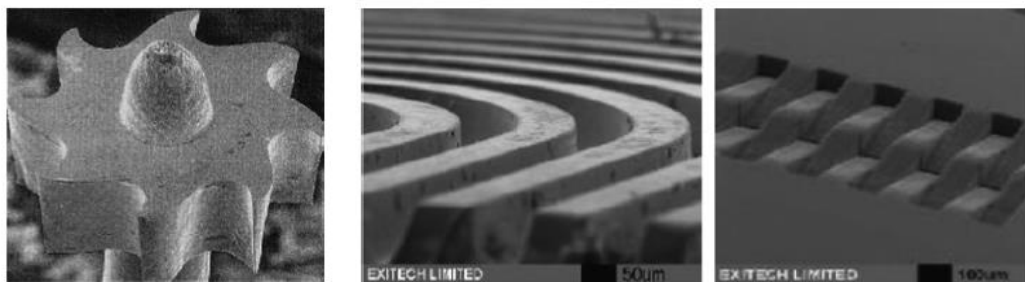


13 pav. Tiesioginis lazerinis poveikis interferenciniu lauku [28]

1.7. Lazerinio mikroapdirbimo pritaikymas

Pastaruoju metu, lazerinis mikroapdirbimas (LMA) vis plačiau taikomas labai plonų metalo lakštų (folijos) preciziniam pjaustymui, kuris atveria plačias galimybes taikymams mikro ir nano sistemose. Kadangi LMA yra lankstus metodas, juo apdirbamos ir aukštos kokybės taikymams reikalingos optinės medžiagos: galio arsenidas, ličio niobatas, ličio tantalatas ir kt. Kitos būdingos lazerinio mikroapdirbimo panaudojimo sritys [29]:

a) Biomedicina. Skylės kateteriuose, skenuojančiuose zonduose, mikroelektromechaninės sistemos (naudojamos implantuojamuose slėgio jutikliuose), vaistų tiekimo sistemos, vaistų tiekimas mikroskystiniais prietaisais, optinių, elektrinių ir cheminių jutiklių integravimas [8,30].



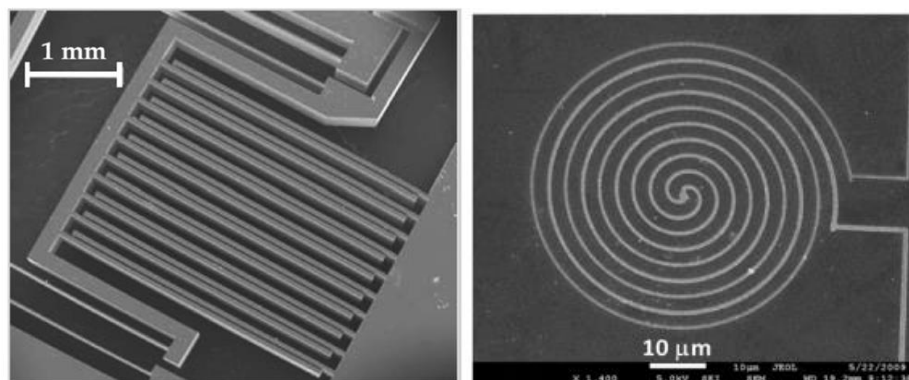
a)

b)

c)

14 pav. a) 470 mm diametro; 130 mm aukščio nikelio mikroturbinos rotorius; b), c) mikroskystinio prietaiso kanalai polimere [8,31,32]

b) Mikroelektronika. Mikroplokštės, magnetiniai kietieji diskai, deimanto dangų apdirbimas, spaudų gamyba, elektroninės grandinės, defektų šalinimas, organinių ir neorganinių biologinių medžiagų apdirbimas, įvairių mikroįrenginių sudarymas (kondensatoriai, rezistoriai, biojutikliai, cheminiai jutikliai, plonų sluoksnių tranzistoriai, organiniai diodai ir kt.) [8,30].

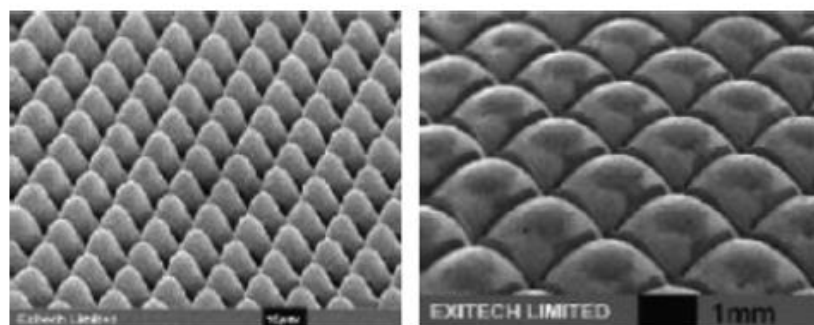


a)

b)

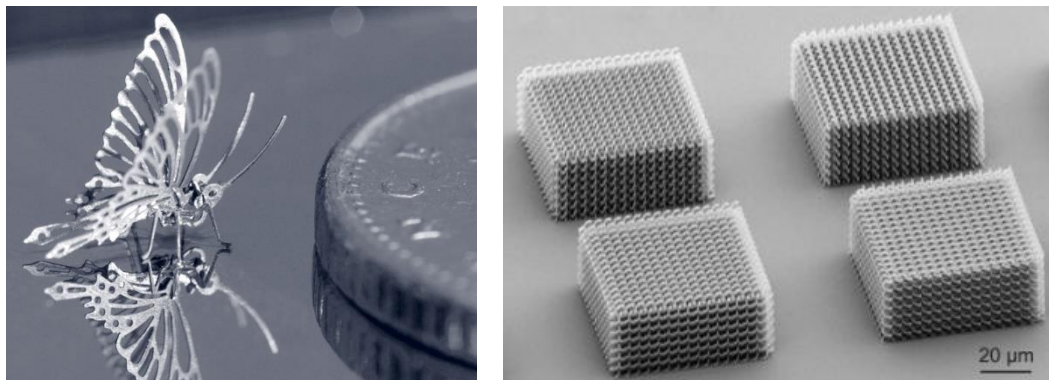
15 pav. a) mikropavara ,b) sidabro grandynai [33]

c) Fotonika. Optinės mikrostruktūros: mikrolęšiai, bangolaidžiai, prizmės, difrakcinės gardelės, įvairių raštų perkėlimas ant optinių paviršių, žymėjimas ir t.t. [8].



16 pav. Mikrooptinis paviršius [8,31]

d) Precizinė inžinerija. Labai aukšto tikslumo reikalaujančių medžiagų apdirbimas, mažų skylių grėžimas (2 μm), kaukės [8,30].



a)

b)

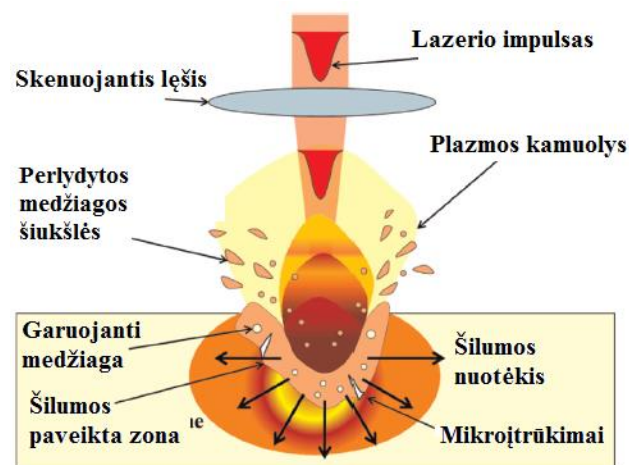
17 pav. a) drugelis tantale, b) 3D kvadratėliai su pasikartojančia struktūra [34]

Plačiau panagrinėsime aliuminio oksido keramikos mikroapdirbimą ultratrumpais impulsais. Šios medžiagos itin plačiai naudojamos kaip apsauginės dangos, elektronikos ir plonų dangų pagrindai, aukštos įtampos izoliatoriai ir t.t. [35,36].

1.8. Aliuminio oksido keramikos lazerinis mikroapdirbimas

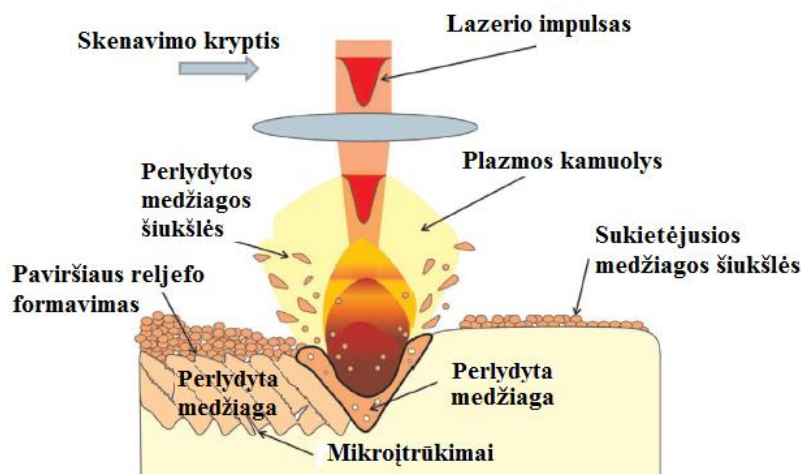
Kaip žinome yra sukurta begalė įvairiausių lazerinių sistemų, kurios turi skirtingas konstrukcijas, naudoja skirtingus lazerius ir pasižymi specifinėmis savybėmis. Plačiau panagrinėsime aliuminio oksido keramikos mikroapdirbimą nanosekundiniu Nd:YAG kietakūniu lazeriu.

Aliuminio oksido keramikos ir nanosekundinio lazerio poveikio zonoje susidaro šilumos paveiktas sluoksnis, medžiagos šiukšlės, mikroįtrūkimai, paviršiaus pažeidimai dėl smūginių bangų, plazma (žr. 18 pav.). Plazmos generacija susijusi su apdirbamos medžiagos garų jonizacija. Susikūrusi plazma absorbuoja krintančią spinduliuotę bei ją defokusuoja [37,38].



18 pav. Lazerio impulso ir aliuminio oksido keramiko sąveikos mechanizmas [38]

Skenuodami lazerio pluoštu aliuminio oksido keramikos paviršių, tarsi pakartojame šią sąveiką kiekviename apdirbamo paviršiaus taške. Tai sukelia papildomus efektus: susiformuoja paviršiaus reljefas, perlydytos medžiagos sluoksnis, paviršiuje sukietėjusios šiukšlės (žr. 19 pav.).



19 pav. Valdomo lazerio pluošto sukelti efektai aliuminio oksido keramikos paviršiuje [38]

Spinduliuotės sąveiką su apdirbamu paviršiumi apibūdina impulso energija ir galia. Šių parametų kitimas keičia energijos tankį, kuris nusako lazerio ir medžiagos sąveikos mechanizmą, pašalintą medžiagos kiekį. Pravartu pakartoti, kad apdirbant medžiagą lazeriniais impulsais, svarbu jų trukmė, persidengimas vertikalia ir horizontalia kryptimis, apdirbimo greitis, impulsų pasikartojimo dažnis, apdirbimo žingsnis ir t.t. Visa lazerio pluošto energija tenkanti pašalintam plotui gali būti išreikšta [38]:

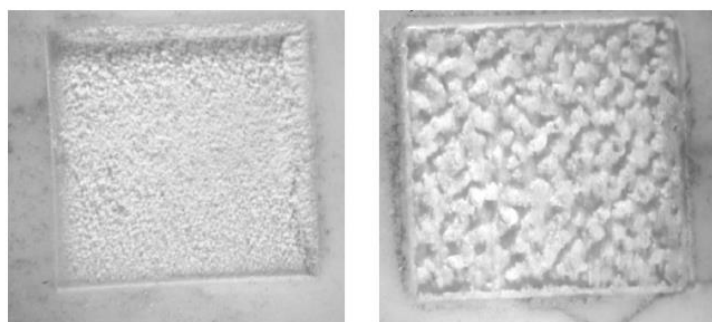
$$E_t = \frac{P_m t_i}{M}. \quad (13)$$

čia P_m – vidutinė pluošto galia, t_i – apdirbimo laikas, M – apdirbimo plotas.

Norint tiksliai ir kokybiškai apdirbti bet kokią medžiagą reikia išsiaiškinti lazerio ir medžiagos sąveikos mechanizmą, kritinius proceso parametrus. Prieš apdirbant medžiagą reikia atlikti įvairius eksperimentus [38].

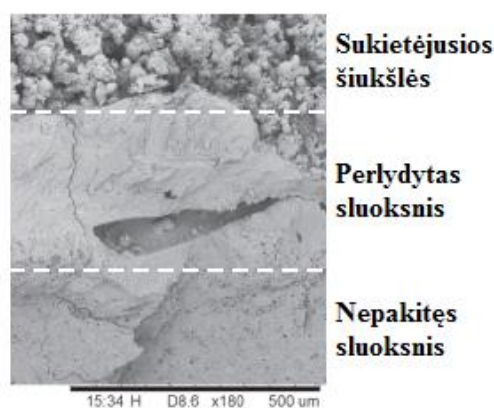
Paveikus aliuminio oksido keramiką galingu impulsiniu lazerio pluoštu pasireiškia abliacija. Sugerti impulsai selektyviai kaitina medžiagos paviršių. Pasiekus kritinę temperatūrą, medžiaga ima garuoti. Garuojanti medžiaga veikiamą vėlesnių impulsų jonizuojasi. Susidaręs plazmos kamuolys sudaro slėgio bangą, kuri pašalina apdirbamą medžiagą [38].

Tokiu pluoštu lėtai skenuojant medžiagos paviršių dėl aukšto impulsų persidengimo ir didelės pluošto galios pasireiškia akumuliacijos efektas - stipriai padidėja perlydytas medžiagos sluoksnis. Toliau didėjant apdirbamo paviršiaus temperatūrai, išgarintos medžiagos kiekis auga – pasireiškia atatrunkos banga kuri medžiagos paviršių aptaško perlydytomis šiukšlėmis. Atatrunkos bangos išvengti galima naudojant mažesnius pasikartojimo dažnius [38].



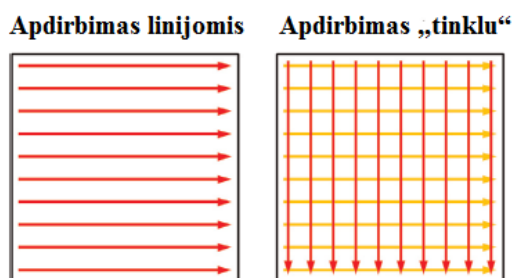
20 pav. 25 mm/s skenavimo greičiu apdirbtos aluminio oksido keramikos paviršiai: a) $f = 80 \text{ kHz}$, $P_{\text{smailinė}} = 7,6 \text{ kW}$, b) $f = 30 \text{ kHz}$, $P_{\text{smailinė}} = 20 \text{ kW}$ [38].

Po mikroapdirbimo galime išskirti tris sluoksnius. Viršutiniame sluoksnyje pilna sukietėjusių šiukšlių, viduriniame – perlydyta medžiaga, trečiasis – nepakitęs (žr. 21 pav.) [38].



21 pav. Po mikroapdirbimo proceso susidarę skirtingi sluoksniai [38]

Padidinus apdirbimo greitį (sumažinamas impulsų persidengimas) išvengiama akumuliacijos efekto, tačiau šiomis sąlygomis apdirbimo procesas yra lėtas ir nestabilus. Apdirbimo greičiui pasiekus kritinę vertę, abliacijos procesas nepasireiškia. Pakartojant abliavimo procesą keletą kartų gaunamas vis gilesnis pažeidimas. Kiekvieno pakartojimo metu sudaryto pažeidimo gylis priklauso nuo apdirbimo greičio, impulso galios. Optimaliausias apdirbimo greičių intervalas 60-120 mm/s. Lazeriniu mikroapdirbimu galima pasiekti iki 3-6 μm dydžio paviršiaus šiurkštumą. Šiurkštumo minimizavimas galimas medžiagą apdirbant „tinklu“ (žr. 22 pav.) [38].



22 pav. Skirtingi apdirbimo metodai [38]

2. DARBO TIKSLAS IR UŽDAVINIAI

Magistro projekto tikslas. Parinkti femtosekundinio lazerinio mikroapdirbimo sąlygas trimačių mikrostruktūrų formavimui aliuminio oksido keramikoje.

Magistro projekto uždaviniai.

1. Sukurti mikroapdirbimo lazerine abliacija metodiką, kuri leistų parinkti optimalius lazerinio mikroapdirbimo parametrus pasirinktai medžiagai bei atlikti eksperimentinių struktūrų formavimą aliuminio oksido keramikoje;
2. Ištirti lazeriu suformuotų pažeidimų paviršiaus morfologiją bei linijinius matmenis (profilometru, optiniu ir skenuojančiu elektronų mikroskopais) ir įvertinti slenkstines lazerinės abliacijos sąlygas ir medžiagos pašalinimo spartą aliuminio oksido keramikai;
3. Naudojant efektyviausius lazerinio mikroapdirbimo parametrus aliuminio oksido keramikoje suformuoti trimates mikrostruktūras: piramidę, mikroskystinį prietaisą ir akustinio mikroskopo kalibracinį bloką.

3. MEDŽIAGOS IR TYRIMŲ METODAI

Šiame skyrelyje trumpai apžvelgsime eksperimentams naudotas medžiagas, jų tyrimo bei apdirbimo sistemas ir veikimo principus.

3.1. Mikroapdirbimo eksperimentai

Aliuminio oksido keramika yra kieta ir įprastiniais metodais sunkiai apdirbama medžiaga, todėl buvo pasirinkta mikrostruktūrų formavimui. Pagrindinės aliuminio oksido keramikos savybės pateiktos 1 lentelėje.

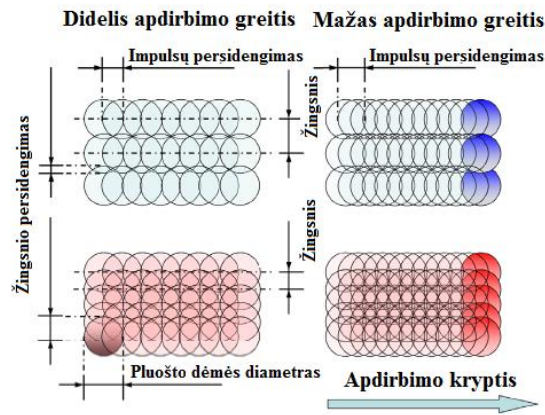
1 lentelė. Aliuminio oksido keramikos savybės [39,41]

Keramikos pavadinimas	VC 100-1
Keramikos grynumas	Al ₂ O ₃ 99,6-99,9%
Spalva	Balta
Spūdos modulis (GPa)	228
Tankis (g/cm ³)	3,89
Šiurkštumas (Ra, μm)	< 0,01
Kietumas (Kg/mm ²)	1440
Terminis laidumas W/(m·K)	30-35

Prieš sudėtingesnių mikrostruktūrų formavimą aliuminio oksido keramikoje buvo atlikti 4 eksperimentai: fokuso aukščio radimo, slenkstinės energijos nustatymo, mikroapdirbimo kokybės nustatymo ir fokuso gylio vertinimo. Bandymai realizuoti 30x48 mm² ploto ir 0,48 mm storio Policor VC100-1 poliruotoje plokštelėje. Preliminarūs eksperimentai atlikti norint išsiaiškinti lazerio ir medžiagos sąveikos mechanizmą, apdirbimo slenkstinę vertę ir kritinius parametrus susijusius su medžiagos apdirbimo greičiu ir kokybe. Visi eksperimentai sudaryti elementų matricos pagrindu. Matricos eilutėse ir stulpeliuose kito skirtingi parametrai:

- impulsų persidengimas (60,9 – 92,2 %);
- apdirbimo greitis (50 - 250 mm/s);
- energijos tankis (0,56 – 11,2 J/cm²);
- apdirbimo pakartojimo skaičius (5 – 20);
- bandinio aukščio kitimas fokuso taško atžvilgiu (0 – 58,5 μm).

Tolygus impulsų išsidėstymas erdvėje išlaikytas keičiant atstumus (žingsnius) tarp jų (žr. 23 pav.). Šių bandymų atlikimas leido valdyti medžiagos apdirbimą tiek laike, tiek ir erdvėje. Eksperimentų parametrai ir vaizdinės iliustracijos pateiktos 2 lentelėje ir 24 pav.

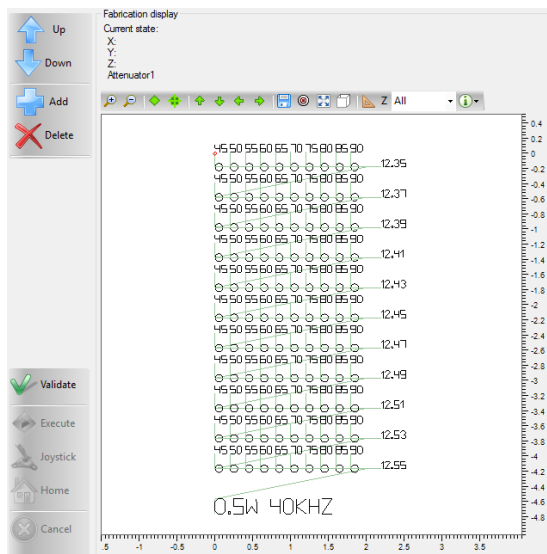


23 pav. Žingsnis, impulso persidengimas ir žingsnio persidengimas mažo ir didelio apdirbimo greičio metu [38]

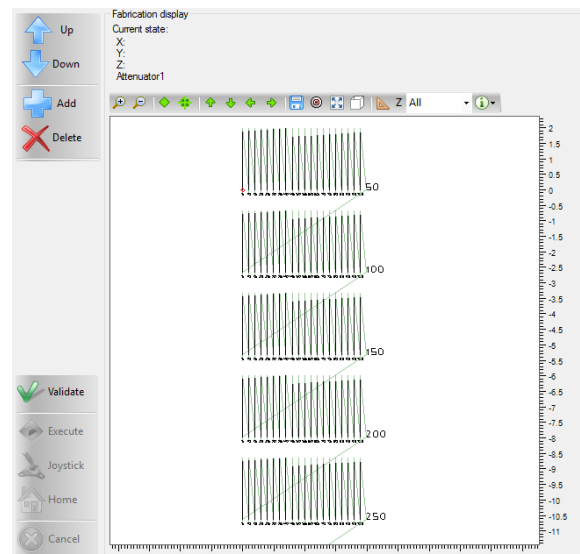
Lazerio pluošto vidutinė galia išmatuota Nova OPHIR II matuokliu su 3A pirometriniu jutikliu. Po kiekvieno atlikto testo, plokštelės dėl susidariusių nepageidaujamų šiukšlių buvo valomos ultragarsinėje vonelėje (10min).

Pažeidimų aukštis nustatytas naudojant kompiuteriu valdomą vertikalią pozicionavimo sistemą ANT130-5-V (Aerotech) kartu su bandinio vaizdinimo CCD kamera - vaizdą stebint pro mikroskopo objektyvą (50x Mitutoyo). Pažeidimų aukščiai nustatomi atitinkamai atimant pozicionavimo sistemos koordinatas, t.y. bandinio aukščius, kai sistema yra sufokusuota į pažeidimo dugną ir į nepažeistą bandinio vietą.

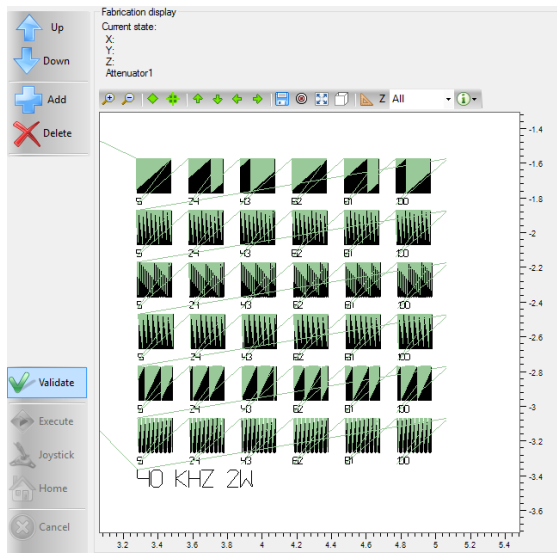
Bandymai realizuoti naudojant „FemtoLAB“ femtosekundinę lazerinę mikroapdirbimo sistemą (žr. 3.2. skyrių), pluošto skenavimui bandinio atžvilgiu naudojant galvoskenerį.



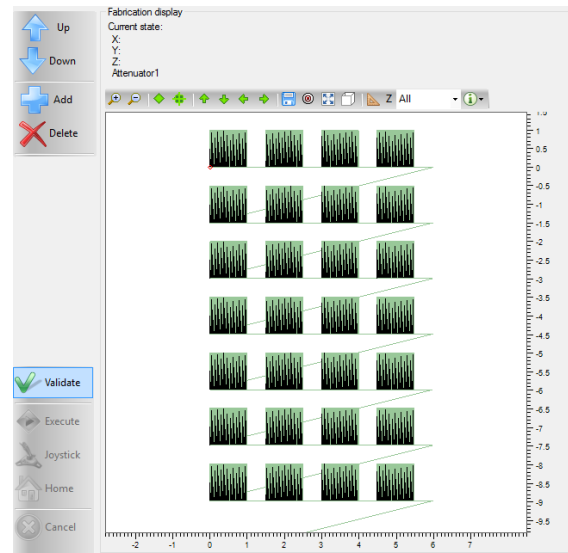
a)



b)



c)



d)

24 pav. Lazerinės sistemos valdymo programos vartotojo sąsajos langai, kuriuose vaizduojami piešiniai, kurie bus suformuoti įvykdžius komandą. a) I eksperimentas (fokuso aukščio radimas), b) II eksperimentas (slenkstinės energijos nustatymas), c) III eksperimentas (mikroapdirbimo kokybės nustatymas) ir d) IV eksperimentas (fokuso gylio vertinimas)

2 lentelė. Mikroapdirbimo eksperimentus aprašantys parametrai

I eksperimentas (fokuso aukščio radimas)	
Apskritimų matricos elementų skaičius	10x11
Galia (matricos stulpeliai), W	0,1 – 0,19 žingsniu 0,1
Bandinio aukštis (matricos eilutės), mm	12,35 – 12,55 žingsniu 0,02
II eksperimentas (slenkstinės energijos nustatymas)	
Matricos elementų skaičius	1x5
Linijų ilgis, mm	2
Matricos elemento dydis, mm	3,8
Galia (linijos), W	0,05-0,9 žingsniu 0,045
Apdirbimo greitis (eilutės), mm/s	50-250 žingsniu 50
III eksperimentas (mikroapdirbimo kokybės nustatymas)	
Matricos elementų skaičius	6x5
Kvadratėlio matmenys, μm	500x500
Kvadratėlių sudarančių linijų skaičius (eilutės)	400,200,133,100,80
Atstumas tarp kvadratėlių sudarančių linijų, μm	1,25 – 6,25 žingsniu 1,25
Energijos tankis (linijos), J/cm^2	0,56 – 11,2 žingsniu 2,1
Apdirbimo greitis (eilutės), mm/s	50, 60, 76, 92, 100, 108, 124, 140, 150, 200, 250
Impulsų persidengimas (eilutės), %	60,9; 68,8; 76,6; 78,1; 80,6; 83,1; 84,4; 85,6; 88,1; 90,6; 92,2
IV eksperimentas (fokuso gylio vertinimas)	
Matricos elementų skaičius	4x7
Kvadratėlio matmenys, μm	900x900
Kvadratėlių sudarančių linijų skaičius	360
Atstumas tarp kvadratėlių sudarančių linijų, μm	2,5
Energijos tankis (linijos), J/cm^2	11,2
Apdirbimo greitis (eilutės), mm/s	100
Impulsų persidengimas (eilutės), %	84,4
Bandinio aukščio kitimas (eilutės), mm	0-58,5 žingsniu 9,75
Apdirbimo pakartojimų skaičius (stulpeliai)	5-20 žingsniu 5

3.2. Mikroapdirbimo ultrasparčia lazerine spinduliuote sistema „FemtoLAB”

„FemtoLAB” (Altechna R&D, 3 lentelė) sistema, kurioje naudojamas femtosekundinis Yb:KGW lazeris „Pharos” (Light Conversion, 3 lentelė), yra skirta greitam ir tiksliam 2D ir 3D mikroapdirbimui. Trumpi femtosekundiniai impulsai (<260 fs) leidžia perduoti spinduliuotės energiją per labai trumpą laiką, todėl sumažėja šilumos paveikta zona. Šie didelės galios femtosekundiniai impulsai sudaro naujas galimybes lazerio ir medžiagos sąveikai: maža sąveikos zona, gera erdvinė skiriamoji geba, galimybė dirbti su daugeliu medžiagų ir t.t.

Mikroapdirbimo sistemoje bandinio skenavimą galima atlikti fokusuoto pluošto atžvilgiu (XYZ bandinio pozicionavimo sistema Aerotech) arba pluošto skenavimą bandinio atžvilgiu (galvoskenneris SCANcube III 14). Pirmasis mikroapdirbimo tipas užtikrina didžiausią įmanomą skiriamąją gebą (iki 1 μm), tačiau lėtą atlikimo procesą (iki 300 mm/s). Antrasis – žymiai spartesnis (iki 14 m/s), bet turintis virš 10 kartų mažesnę skyrą (16 μm).

„FemtoLAB” sistemą sudaro:

- 1) Didelės galios femtosekundinis lazeris „Pharos”. Lazerio impulsų pasikartojimo dažnis gali būti keičiamas nuo 1 iki 500 kHz, tai sudaro palankias sąlygas didelio pasikartojimų dažnio reikalaujantiems mikroapdirbimo taikymams. Pharos lazeris: trumpi impulsai (osciliatoriuje <80fs, stiprintuve <260fs), 4 W vidutinė galia, lazerio valdymas kompiuteriu (Pharos programa) bei išoriniu valdikliu (žr. 25 pav.). Pharos programa leidžia valdyti lazerio galią, pasikartojimų dažnį, impulsų trukmę ir kitas pluošto savybes bei sekti lazerio pagrindinių savybių kitimą laike;



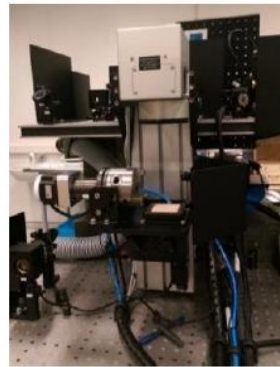
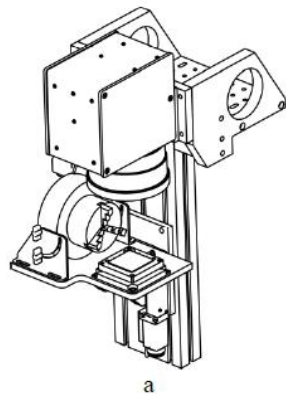
a)

b)

25 pav. (a) Pharos lazerio valdymo programos vartotojo sąsajos langas, (b) lietimui jautraus išorinio valdiklio pagrindiniai vartotojo sąsajos langai (RA – regeneratyvinio stiprintuvo nustatymai, OSC – lazerio osciliatoriaus nustatymai)

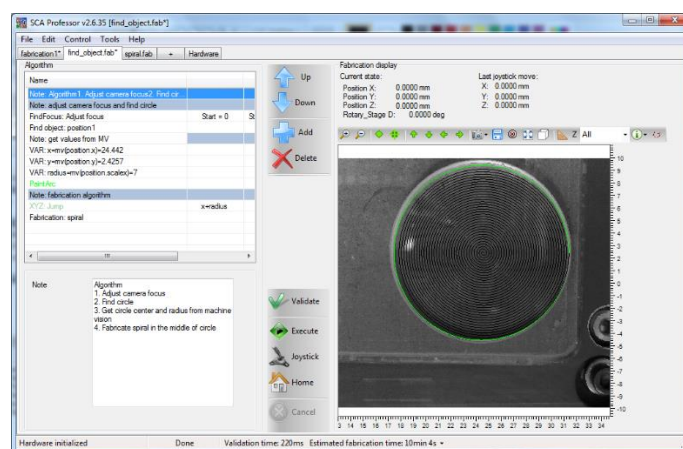
- 2) Pozicionavimo sistema (XYZ Aerotech). Įrenginys sinchronizuotas su lazerio impulsų išėjimu (galima valdyti pavienius impulsus). Ši sistema ir impulsų parinkimas lazeryje suteikia pilną apdirbimo kontrolę laike ir erdvėje;

- 3) Bandinio paviršiaus optinio vaizdinimo sistema. Skirta lazerio poveikio apdirbamai medžiagai stebėjimui realiu laiku;
- 4) Atenuatoriai. Kontroluoja lazerio galią;
- 5) Galvoskenneris SCANcube II 14. Ši sistema turi du elektromagnetais valdomus veidrodžius, kurie dideliu greičiu ir reikiama kryptimi nukreipia lazerio pluoštą. Greitas, tikslus ir kryptingas lazerio pluošto valdymas leidžia pasiekti didelius skenavimo ir apdirbimo greičius, precizišką, sumažinti laiko bei kitus proceso kaštus.



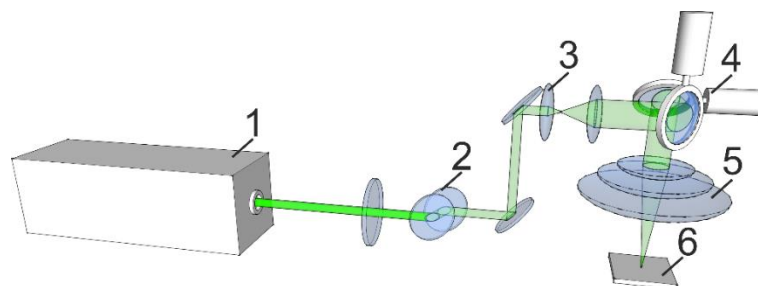
26 pav. Galvoskenneris: a) sistemos brėžinys, b) sistemos nuotrauka

- 6) SCA programinė įranga. SCA (žr. 27 pav.) yra skirta lazerio apdirbimo kontrolei - galima valdyti skirtingus technologinius procesus. Programa turi modulinę struktūrą, sudarančią galimybę lengvai integruoti bei lanksčiai valdyti turimą įrangą. Įrangos programavimas susideda iš nesudėtingų universalių algoritmų, kurie sklandžiai apjungia visos sistemos darbą. SCA programa galime valdyti XYZ stalą, Pharos lazerio impulsų išrinkiklį (angl. *pulse picker*), atenuatorius, poliarizacijos sukiklius, interferencinį mazgą, bandinio apšvietimą, vaizdinimą, bandinio pritraukimą vakuumu ir galvoskennerį.



27 pav. FemtoLab valdymo programos „SCA“ vartotojo sąsajos langas [42]

Sugeneruotas Pharos lazerio spindulys ($M^2 = 1,1$), kurio diametras 2 mm, dviem lęšiais yra išplečiamas ir nukreipiamas į galvoskennerio modulį (14 mm apertūra). Modulio išėjime esančiu teta lęšiu ($f = 100$ mm, 150-1001, Eksma Optics) spindulys sufokusuojamas bandinio paviršiuje. Galvoskenneris valdomas RTC4 valdymo plokšte (Scanlab). Bandinys dedamas ant motorizuotos linijinės vertikalios sistemos (darbinis atstumas 25 mm), kurioje jis pritraukiamas vakuumu. Ši sistema leidžia keisti jo aukštį pluošto atžvilgiu. Taip galime pasiekti, kad bandinio paviršius būtų aštriausiame spindulio fokuso taške (žr. 28 pav.). Pharos lazerio spindulio galia valdoma atenuatoriumi. Atenuatoriaus valdymas atliekamas SCA programa.



28 pav. Principinė „FemtoLAB“ ultraspalvės mikroapdirbimo sistemos schema: 1 – Pharos lazeris, 2 – atenuatorius, 3 – spindulio išplėtiklis (angl. beam expander), 4 – galvoskenneris, 5 – teta lęšis ir 6 – bandinys

3 lentelė. FemtoLab sistemos pagrindinės savybės [43,44]

Pharos 04-500-PP (Šviesos konversija)	
Didžiausia vidutinė galia	4 W
Impulso trukmė	<260 fs – 10 ps
Didžiausia impulso energija	> 0,2 mJ
Pluošto kokybė	TEM ₀₀ ; $M^2 < 1,2$
Impulsų pasikartojimo dažnis	iki 500 kHz
Bangos ilgis	1028±5 nm
Aktyvi terpė	Yb:KGW
Impulsų valdymas išoriniu signalu	Taip
XYZ pozicionavimo stalas (Aerotech)	
Eiga	160x160x160 mm
Tikslumas	±300 nm
Didžiausias judėjimo greitis	350 mm/s (hor.), 75 mm/s (vert.)
Skiriamoji geba	1 nm
Didžiausia apkrova	3 kg
Sistemos pagrindas	Granito plokštė
Optinė sistema	
Harmonikų generatorius Hiro-PH1F3 (Šviesos konversija)	2H 515 nm (>30%) 3H 343 nm (>30%)

Pluoštų galios ir poliarizacijos motorizuotas valdymas	Visi trys bangos ilgiai
Pluošto fokusavimas	1030nm, 515 nm Mitutoyo 50x objektyvas 343 nm asferinis lęšis
Interferencinis mazgas	515 nm bangos ilgis derinamas 0,8-1,3 μm periodas valdoma orientacija dėmės dydis 80x80 μm
Bandinio vaizdinimas	Ašinis apšvietimas Apšvietimas iš apačios Paviršiaus vaizdinimas skaitmenine kamera
Galvoskenneris	
Skenavimo laukas	65x65 mm
Bandinio aukštį valdančio transliatoriaus tikslumas	0,625 μm
Dėmės dydis	16 μm , Teta lęšis $f = 100$ mm
Pozicionavimo greitis, apdirbimo greitis	14 m/s, 2 m/s

3.3. Bandinių paviršiaus morfologijos analizė

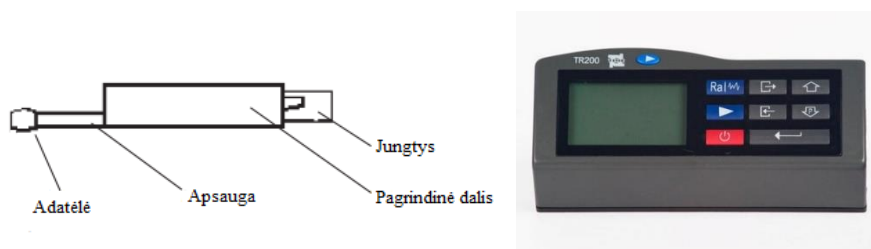
Mikroapdirbimo eksperimentai (medžiagos pažeidimai), sudaryti aliuminio oksido keramikos paviršiuje, apibūdinti naudojant: profilometrą (TR200 Time), optinį mikroskopą (OPTIKA) bei skenuojantį elektronų mikroskopą (Fei Quanta 200 FEG).

3.3.1. Profilometras

Lazeriu paveiktos aliuminio oksido keramikos topografinė paviršiaus analizė buvo atlikta profilometru. Profilometras, tai prietaisas skirtas kietų kūnų paviršiaus morfologijai įvertinti. Įrenginys susideda iš detektoriaus ir bandinio pozicionavimo sistemos. Profilometrai gali būti kontaktiniai ir nekontaktiniai. Skenuojant bandinį kontaktiniu būdu, t.y. braukiant kieta plona (deimantine) adatėle, yra gaunamas analoginis signalas vertikalia kryptimi, kuris paverčiamas į skaitmeninį, analizuojamas ir pateikiamas grafiko forma (pritaikant tam tikrą filtrą). Remiantis gautu grafiku, programa apskaičiuoja išvestinius dydžius (šurkštumus): R_a , R_q ir kt. Šurkštumas apibūdina paviršiaus tekstūrą - realaus analizuojamo paviršiaus nuokrypį nuo idealaus [45].

Kontaktinis profilometras turi keletą privalumų: didelė skyra, galimybė dirbti su nešvariais paviršiais, nereikalaujantis specifinių žinių, greitas analitinis prietaisas. Šiuo atveju, skyra priklauso nuo naudojamos plonos adatėlės skersmens, kuo ji mažesnė, tuo skyra didesnė. Pvz. darbe naudojamo TR200 profilometro (TS100 jutiklis) deimantinės adatėlės kreivumo spindulys siekia 5 μm , o aukščio skyra – 0,01 μm . Dirbant su medžiagomis, kurių paviršius užterštas, kontaktinis metodas dėl fizinio skenavimo, gali eliminuoti paviršiuje esančius nepageidaujamus nešvarumus [45].

Darbe naudotas TR200 Time kontaktinis rankinis profilometras (žr. 29 pav.). Jo savybės pateiktos 7 lentelėje.



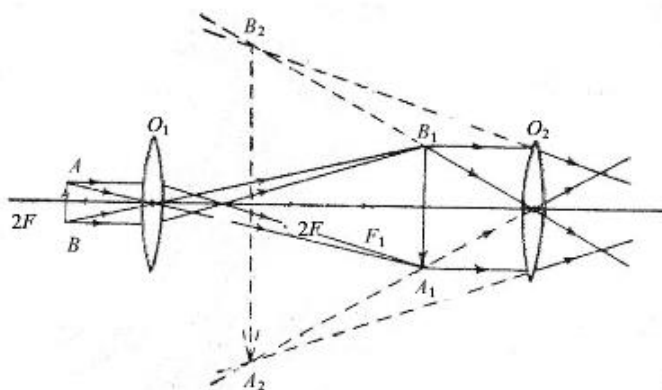
29 pav. Rankinis profilometras TR200 Time: a) principinė schema iš šono b) nuotrauka [46]

4 lentelė. TR200 Time profilometro savybės [47]

Šiurkštumo parametrai	$R_a, R_z, R_y, R_q, R_t, R_p, R_{max}, R_v, R_s, R_{Sm}, R_{Sk}, R_{mr}$
Matavimo sistema	Metrinė
Vertikalus tikslumas	10 nm
Matavimo intervalai	$\pm 20\mu\text{m}, \pm 40\mu\text{m}, \pm 80\mu\text{m}$
Skenavimo žingsnis (L)	0,25/0,8/2,5/Auto mm
Skenavimo ilgis	1-5L
Apdorojimo filtrai	RC, PC-RC, Gauss, D-P

3.3.2 Optinis mikroskopas

Aliuminio oksido keramikos paviršius buvo ištirtas naudojant optinį mikroskopą (OP). OP, kurio schema pateikta 30 pav., skirtas padidintiems mažų objektų vaizdams gauti. Prietaiso optinę sistemą sudaro objektyvas O_1 ir okuliaras O_2 , kurių optinės ašys sutampa. Tiriama medžiaga (AB) dedama prieš objektyvą toliau už židinio nuotolį ir arčiau negu dvigubas židinio nuotolis. Objektyvu gaunamas tikras, padidintas ir apverstas vaizdas A_1B_1 . Į šį vaizdą žiūrima pro okuliarą O_2 , kuris sukuria vaizdą A_2B_2 – tariamą, padidintą ir apverstą tiriamos medžiagos atžvilgiu. Tiek objektyvas, tiek okuliaras yra sudėtingos lęšių sistemos, kurių paskirtis – sukurti geriausios kokybės vaizdą [49].



30 pav. Mikroskopo optinė schema [48]

Pagrindinės optinio mikroskopo dalys (žr. 31 pav.) [50]:

- 1) Okuliaro lęšis;
- 2) Įvairaus didinimo objektyvų laikiklis;
- 3) Objektyvo lęšiai;
- 4) Bandinio stalielis ir jo valdymas ((5) didelio žingsnio, (6) mažo žingsnio);
- 7) Lęšis;
- 8) Mechaninė dalis.



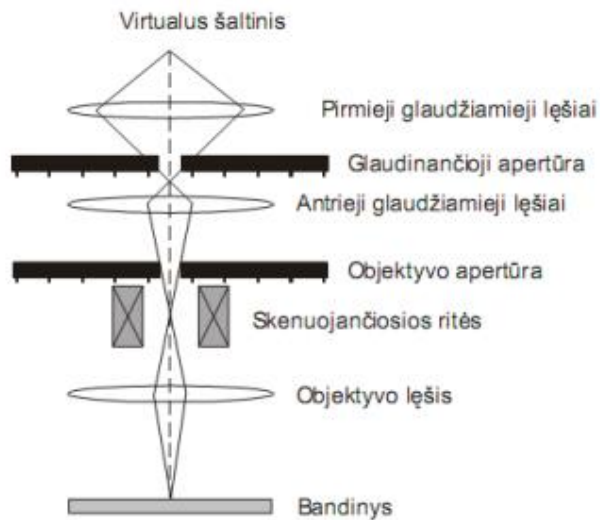
31 pav. Pagrindiniai optinio mikroskopo elementai [50]

Mikroskopo skiriamąją gebą riboja šviesos difrakcija. Skyra priklauso nuo skaitinės apertūros ir naudojamo bangos ilgio. Didžiausias OP tikslumas siekia $0,2 \mu\text{m}$, o didinimas – 1500 kartų. Kadangi įrenginys yra sudėtinga optinė sistema, stebimų objektų vaizdas yra iškraipomas. Šiam vaizdo netikslumui įtakos turi įvairios aberacijos [49].

Darbe naudotas „OPTIKA B500“ optinis mikroskopas, kurio didžiausias didinimas - 1000 kartų, o skiriamoji geba – $0,22 \mu\text{m}$.

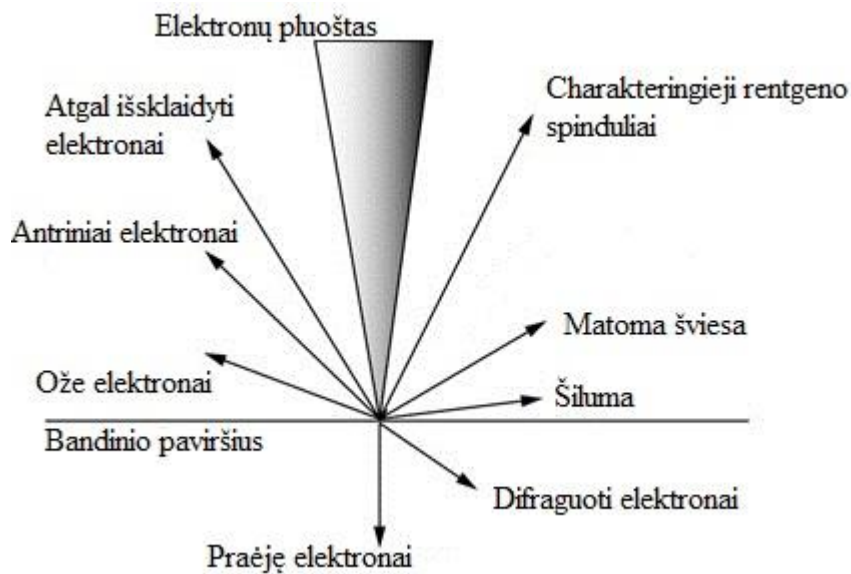
3.3.3. Skenuojantis elektronų mikroskopas

Skenuojantis elektronų mikroskopas (SEM), tai prietaisas skirtas, aukštos kokybės, daug kartų padidinto kietojo kūno paviršių vaizdams gauti, jei mikroskopas komplektuotas su rentgeno spindulių energijos dispersijos spektrometru, galime atlikti cheminę kokybinę ir kiekybinę analizę. SEM vietoj šviesos (kitaip nei OP) naudojamas įgreitintas, sufokusuotas elektronų pluoštas. Dėl šio pluošto sąveikos su paviršiuje esančiais atomais, generuojami atgal išsklaidyti (tampri sąveika) ir antriniai elektronai (netampri sąveika), kurių analizė formuoja tiriamo bandinio paviršių. SEM galime gauti iki 1.000.000 kartų didinimą [51].



32 pav. SEM principinė schema [51]

Elektronų šaltinyje sugeneruotas elektronų pluoštas yra pagreitinamas. Keičiant greitinančiąją įtampą, elektronų energija gali kisti nuo 100 eV iki 50 keV. Pluoštas magnetiniais lęšiais yra sufokusuojamas į siaurą spindulį, mažą dėmę, kurios diametras gali siekti 10 Å. Elektronų spinduliui sklindant per skenuojančiąsias rites, jis yra nukreipiamas į bandinio paviršių. Pasiekus paviršių, dėl elektronų sklaidos medžiagoje, susidaro sąveikos tūris, kurio matmenys – 100 nm iki 5 μm [51].



33 pav. Elektronų ir bandinio paviršiaus sąveika [51]

Įgreitintų elektronų sąveikos su taikinio paviršiumi metu vyksta įvairūs reiškiniai, dėl kurių yra generuojami: atgal išsklaidyti elektronai (Z ašies kontrastas), antriniai elektronai (SEM vaizdas), fotonai (elementinė sudėtis), difraguoti elektronai (kristalo orientacija ir struktūra), Ožė elektronai, regimoji šviesa ir šiluma [51].

SEM elektronų pluoštui “keliaujant” bandiniu, išspinduliuoti antriniai elektronai užregistruojami detektoriumi. Apdorojus gautus rezultatus, pateikiamas mikrovaizdas. Jei pluošto sąveikos kampas kinta, galime gauti gan gerą trimatį paviršiaus vaizdą, kuris susidaro dėl kintančio elektronų emisijos gylio [48].

Šiame darbe naudojamas FEI Quanta 200 FEG skenuojantis elektroninis mikroskopas (žr. 34 pav. ir 5 lentelę) [52].



34 pav. Fei Quanta 200 FEG SEM [53]

5 lentelė. Fei Quanta 200 FEG mikroskopo specifikacijos [54]

Elektronų patranka	Šotki
Vakuumas	Žemas ir aukštas
Elektronų greitinančioji įtampa	200 V – 30 kV
Elektronų srovė	<100 nA
Skiriamoji geba	1,2 nm
Priedai	Energijos dispersijos detektorius

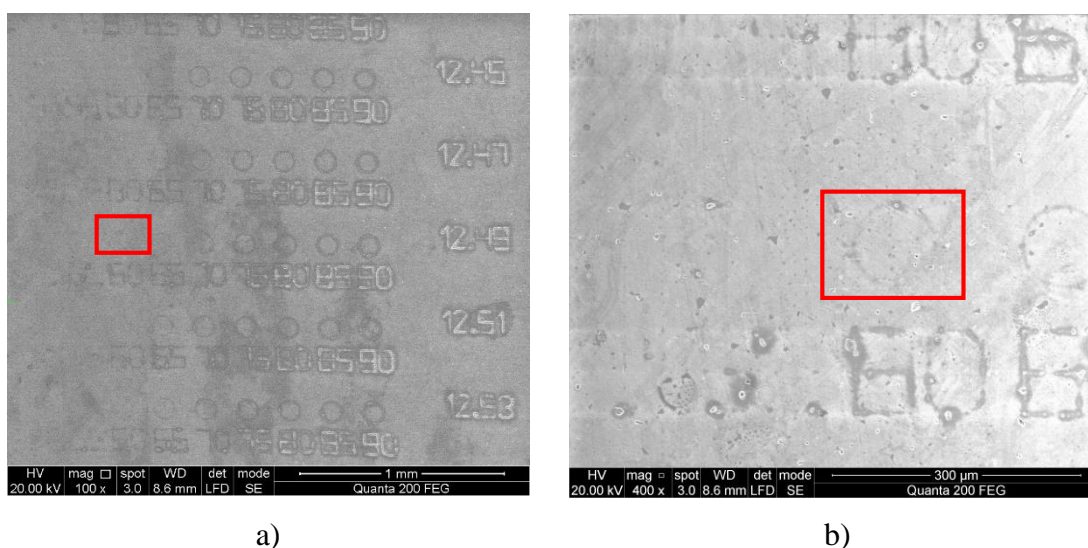
4. TYRIMŲ REZULTATAI IR JŲ APTARIMAS

Šioje darbo dalyje aptarsime aliuminio oksido keramikoje atliktų abliavimo eksperimentų (fokuso aukščio radimo, slenkstinės energijos nustatymo, mikroapdirbimo kokybės nustatymo ir fokuso gylio įvertinimo) rezultatus bei apibūdinsime „FemtoLAB“ mikroapdirbimo sistema suformuotas trimates mikrostruktūras.

Visi eksperimentai atlikti naudojant 1030 nm bangos ilgį, 40 kHz impulsų pasikartojimo dažnį ir $16 \cdot 10^{-4}$ μm efektyvų lazerio pluošto dėmės diametrą.

4.1. Fokuso nustatymas

Norint pasiekti efektyvius, didžiausios skyros lazerinius pažeidimus labai svarbu nustatyti bandinio padėtį (aukštį) išilgai lazerio pluošto fokuso. Fokusuojant lazerio spindulį, dėmės dydis priklauso nuo bangos ilgio, lęšio ir lazerio pluošto savybių. Fokuso eksperimentu (I eksperimentas) nustatytas bandinio aukštis, kuriame lazerio spindulio energija yra sukoncentruota į mažiausią dėmės plotą, taip pasiekama aukščiausia intensyvumo vertė.



35 pav. Aliuminio oksido keramikoje atlikto fokuso testo skirtingo didinimo SEM nuotraukos: a) 100x ,b) 400x . Iš visų mažiausia 130 mW galia suformuotų pažeidimų matomas tik apvestas raudonu kvadratėliu. Šalia cilučių esančios skaičių vertės - bandinio aukščiai, o apskritimų apačioje – atenuatoriaus reikšmė (galia).

Atlikto I eksperimento struktūra pateikta 2 lentelėje, o naudotos lazerio galios reikšmės - 6 lentelėje. Bandymo metu kito du parametrai: bandinio aukštis 12,35 - 12,55 mm ir pluošto galia 0,1 – 0,19 W. Su kiekvienu parametru rinkiniu buvo suformuojamas apskritiminis pažeidimas.

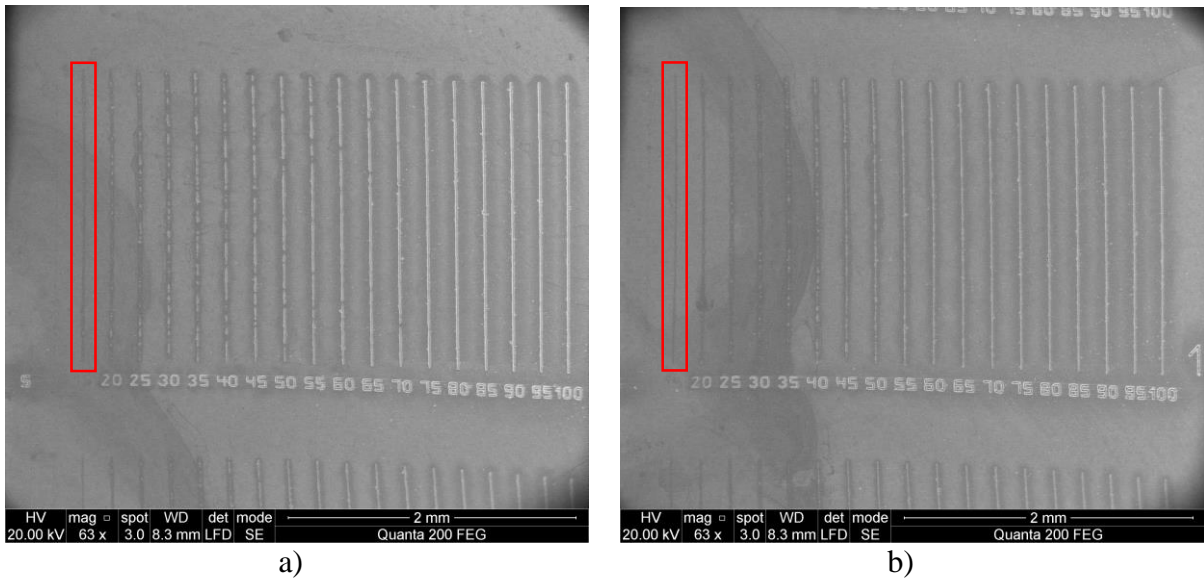
Remiantis paviršiuje sudarytais pažeidimais, surastas efektyvus bandinio aukštis (12,49 mm). Fokuso taškas priskiriamas bandinio aukščiui, kuriame su mažiausia galia (130 mW) vis dar aiškiai matomas sudarytas apskritimas (žr. 35 pav.). Ši aukščio vertė buvo naudojama tolimesniuose eksperimentuose.

6 lentelė. „FemtoLAB“ mikroapdirbimo sistemos atenuatoriaus ir galios reikšmės

Atenuatoriaus reikšmė, %	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90
Pluošto galia, W	0,1	0,11	0,12	0,13	0,14	0,15	0,16	0,17	0,18	0,19

4.2. Slenkstinė energija

Kitas taip pat labai svarbus lazerinio spindulio ir medžiagos sąveikos parametras – abliacijos slenkstis. Jis apibūdina minimalią energijos tankio vertę, nuo kurios prasideda medžiagos pašalinimas. Abliacijos slenkstis priklauso nuo medžiagos bei lazerio pluošto savybių.



36 pav. a) 50 mm/s ir b) 100 mm/s apdirbimo greičiu sudaryti linijų masyvai. Skaičiai po linijomis - atenuatoriaus reikšmės. Pažeidimų linijos nebesusidaro, kai pluošto galia siekia <135 mW

II eksperimentas sudarytas iš linijų masyvų (žr. 2 lentelę), kur kiekvieną liniją atitinka skirtinga lazerio pluošto galia (žr. 7 lentelę). Šiuo atveju galia kito nuo 45 – 904 mW.

Išanalizavus II eksperimento SEM mikrofotografijas, nustatyta aluminio oksido keramikos slenkstinė vertė – 1,69 J/cm². Abliacijos slenkstis priskiriamas pirmai linijos vertei (135 mW), prieš kurią visiškai nebepažeidžiamas paviršius. Taip galime sąlyginai įvertinti energijos tankių intervalą, kuriame vyksta abliacijos procesas.

7 lentelė. „FemtoLAB“ mikroapdirbimo sistemos atenuatoriaus ir galios reikšmės

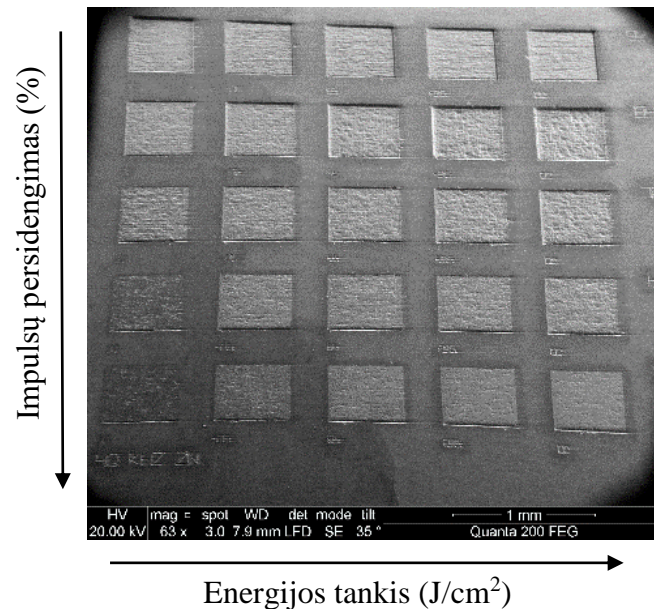
Atenuatoriaus reikšmė, %	5	10	15	20	25	...	80	85	90	95	100
Pluošto galia, mW	45	90	135	180	225	...	723	768	814	859	904

4.3. Apdirbimo kokybė

Impulsiniu lazeriu apdirbtos medžiagos paviršiaus morfologija stipriai priklauso nuo trimatėje erdvėje išsidėsčiusio impulsų persidengimo. Keičiant impulso energiją galima keisti pažeidimų persidengimą ir pašalintą medžiagos tūrį. Medžiagos apdirbimo precizika, tikslumas, našumas ir valdomumas gali būti įgyvendinti optimizuojant šiuos impulso parametrus. III

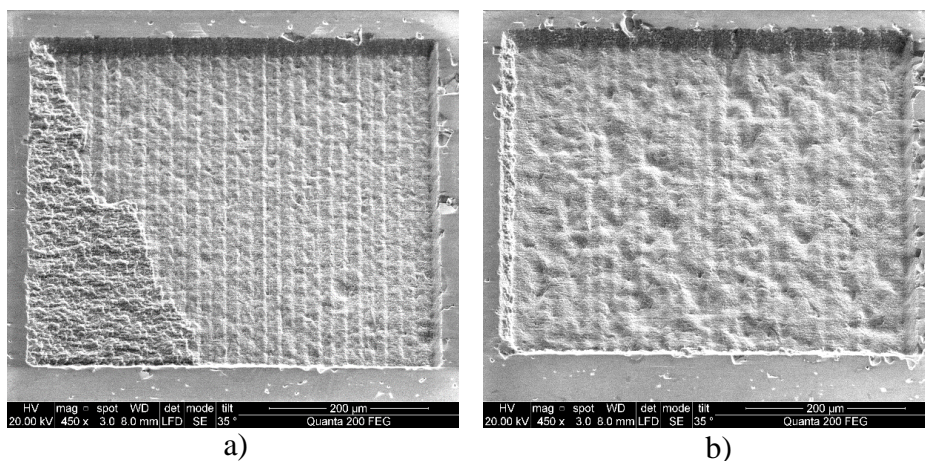
eksperimentas atliktas norint išsiaiškinti impulsų persidengimo ir energijos tankio įtaką pažeidimo gyliui ir apdirbto paviršiaus kokybei.

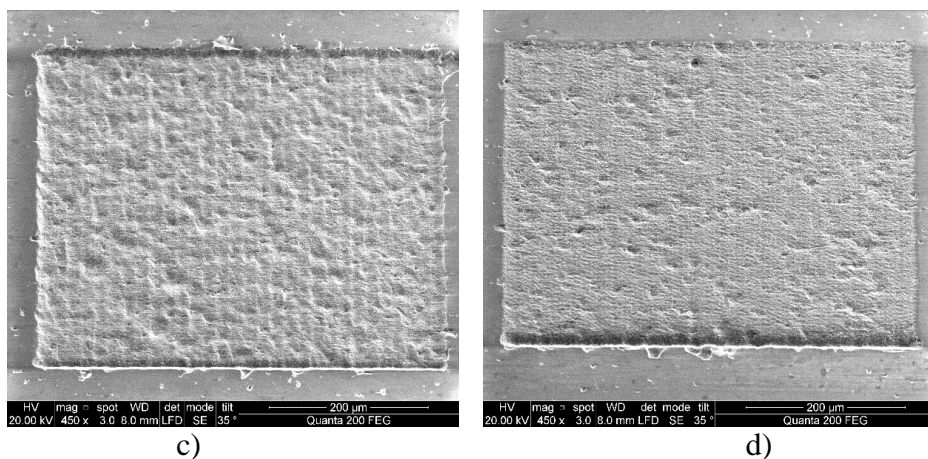
III eksperimento realizavimas aliuminio oksido keramikos paviršiuje parodytas 37 pav. Bandymo metu kito du parametrai: impulsų persidengimas 60,9 - 92 % (apdirbimo greitis 50 – 250 mm/s) ir energijos tankis 0,56 – 11,2 J/cm². Išsamus eksperimento aprašymas pateiktas 2 lentelėje.



37 pav. Pažeidimų masyvo stulpelius atitinka impulsų persidengimas (60,9-92 %), o eilutes - energijos tankis (0,56 – 11,2 J/cm²).

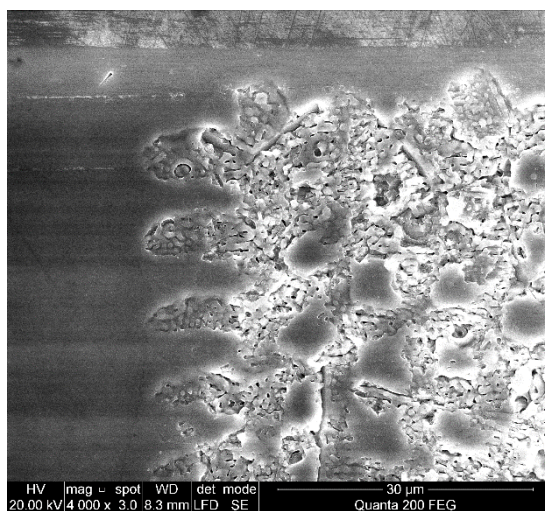
Išanalizavus gautus kvadratinių pažeidimų SEM vaizdus, pastebimas paviršiaus tolygumo kitimas. Esant pakankamai dideliems impulsų persidengimams (92 ir 90,6 %) arba mažiems apdirbimo greičiams (50 ir 60 mm/s), ties visomis energijos tankio vertėmis (0,56 – 11,2 J/cm²) susidaro perlydytas medžiagos šiukšlių sluoksnis, kuris blogina paviršiaus kokybę. Impulsų persidengimas ir energijos tankis nulemia lokalią paviršiaus temperatūrą, todėl naudoti dideles jų vertes yra netikslinga, susidaro nepageidaujami reiškiniai [38].





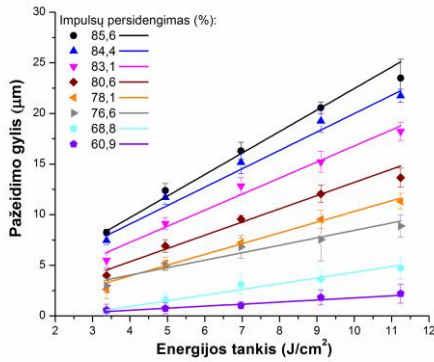
39 pav. Skirtingomis sąlygomis (impulsų persidengimas (apdirbimo greitis), energijos tankis) sudarytų 500x500 μm^2 pažeidimų SEM mikrofotografijos: a) 92,2 % (50 mm/s), 3,37 J/cm², b) 84,4 % (100 mm/s), 11,2 J/cm², c) 76,6 % (150 mm/s), 11,2 J/cm², d) 68,8 % (200 mm/s), 11,2 J/cm²

Dalinai perlydytas sluoksnis pastebimas ir ties 88,1 % (76 mm/s apdirbimo greičiu) impulsų persidengimu. Tolimesnis impulsų persidengimo mažinimas (76,6 – 85,6 %) arba apdirbimo greičio didinimas (92 – 150 mm/s), gerina paviršiaus kokybę – perlydytas medžiagos sluoksnis visame energijos tankio kitimo intervale (0,56 – 11,2 J/cm²) nebepastebimas. Persidengimo vertėms pasiekus 68,8 ir 60,9 % (apdirbimo greičiams 200 ir 250 mm/s), o energijos tankio – 0,56 ir 3,37 J/cm², apdirbimas tampa nestabilus, paviršiuje galime pastebėti pavienius impulsus, kurie nebesuformuoja pažeidimo vientisumo (žr. 40 pav.).

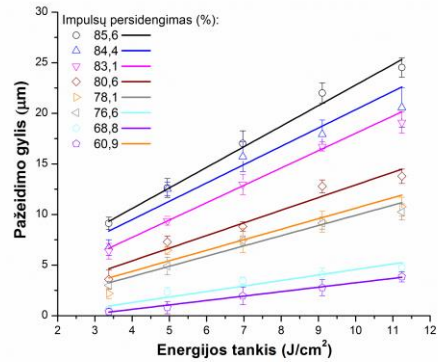


40 pav. 68,8 % impulsų persidengimas (200 mm/s apdirbimo greitis) ir 3,37 J/cm² energijos tankis. Apdirbimas nestabilus, struktūra nesuformuojama.

Apdirbimo našumui įvertinti pažeidimų gylyai išmatuoti naudojant profilometrą ir „FemtoLAB“ sistemoje esančią vertikalią pozicionavimo sistemą (žr. 41 pav.). Kaip matome abiem metodais matuotos gylių vertės koreliuoja (didžiausias skirtumas 1,2 μm).



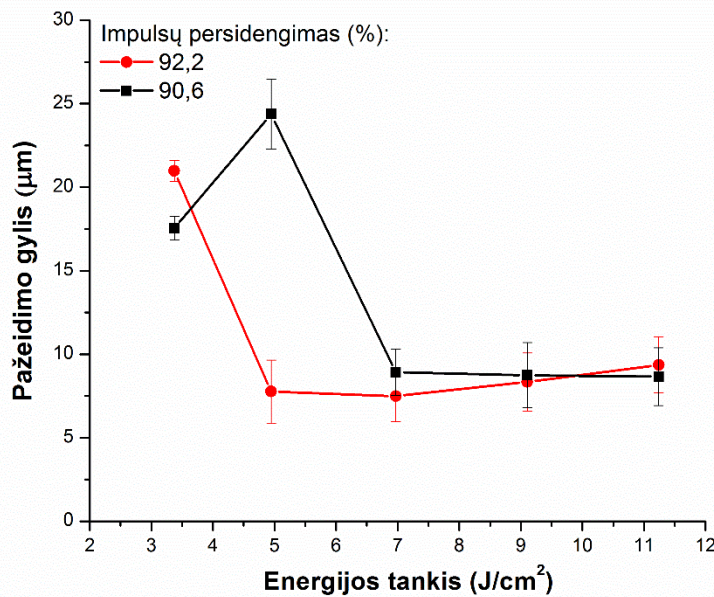
a)



b)

41 pav. Energijos tankio ir impulsų persidengimo įtaka pažeidimo gyliui. Pažeidimų gyliai išmatuoti: a) profilometru, b) optiniu mikroskopu. Eksperimentiniai taškai vaizduoja vidutines matavimų vertes, o paklaidos - vidutinį kvadratinį nuokrypį

Kadangi analizuojant SEM vaizdus buvo pastebėta, kad ties 92,2 ir 90,6 % persidengimo (50 ir 60 apdirbimo greičių) vertėmis susidaro perlydytas medžiagos šiukšlių sluoksnis (gylis mažėja didėjant energijos srautui) šių verčių toliau nebenagrinėsime (žr. 42 pav.).



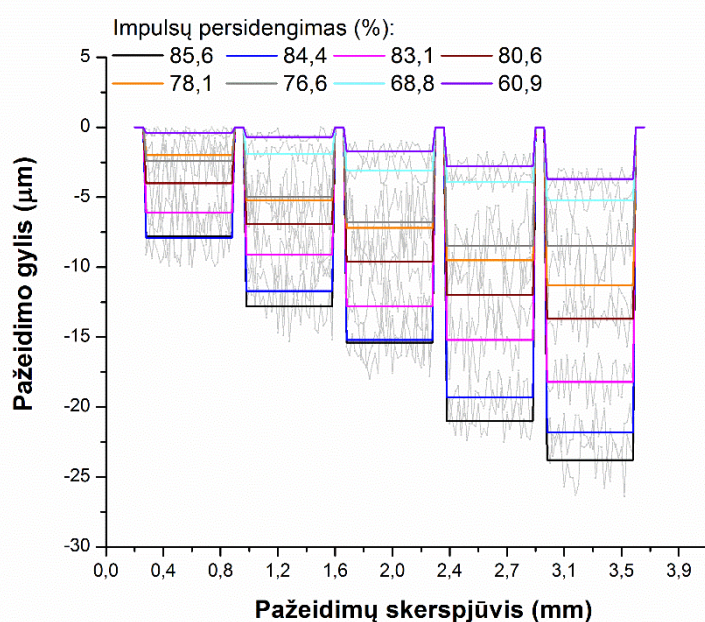
42 pav. Pažeidimų gylio mažėjimas dėl susidarancio nepageidaujamo persilydžiusio sluoksnio. Apdirbimo greitis abiem atvejais: 50 ir 60 mm/s (impulsų persidengimas 92,2 ir 90,6 %)

41 pav. esančiuose grafikuose galime pastebėti tiesines pažeidimo gylio augimo tendencijas. Ties didžiausiomis impulsų persidengimo ir energijos tankio vertėmis gyliai siekia 18,3 - 23,5 μm , o mažiausiomis iki 5 μm . 41 pav. eksperimentinius rezultatus aprašančių tiesių polinkio koeficientai pateikti 8 lentelėje.

8 lentelė. Aproximuojančių tiesių charakteristikos

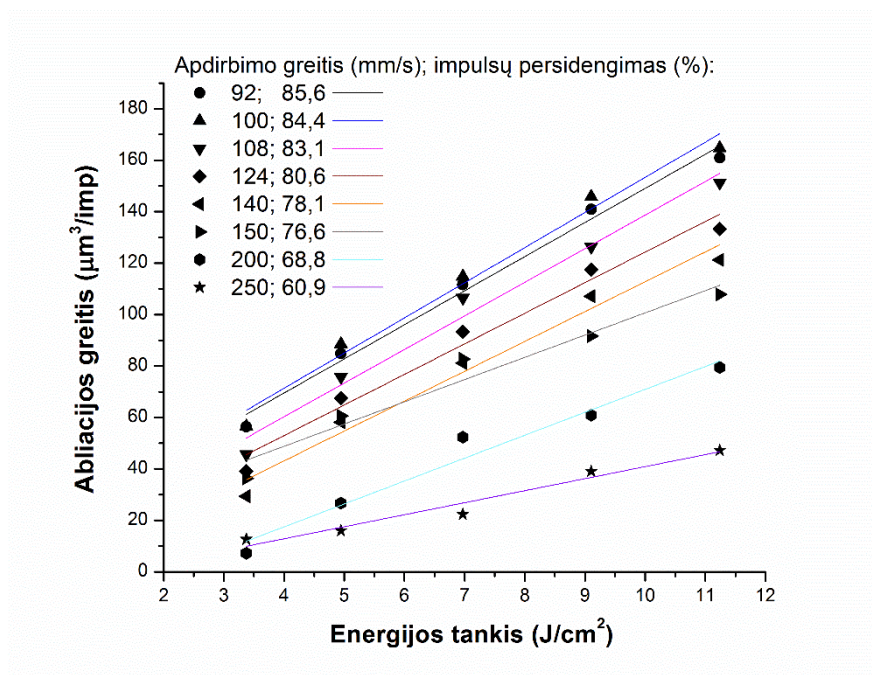
Impulsų persidengimas (%); apdirbimo greitis (mm/s)	Tiesės polinkio koef.	R ²
85,6; 92	2,12	0,99
84,4; 100	1,82	0,98
83,1; 108	1,59	0,97
80,6; 124	1,31	0,96
78,1; 140	1,06	0,98
76,6; 150	0,74	0,92
68,8; 200	0,56	0,96
60,9; 250	0,2	0,87

Tiesės polinkio koeficientas gali būti siejamas su apdirbimo efektyvumu. Duomenys pateikti 8 lentelėje rodo, kad polinkio koeficientas mažėja didėjant abliacijos greičiui (mažėjant impulsų persidengimui). Remiantis aproksimuotomis tiesėmis ir jų parametrais atrinktos trys 85,6; 84,4 ir 83,1 % (92, 100 ir 108 mm/s apdirbimo greičių) vertės, kurios turi didžiausius tiesės polinkio koeficientus ir pažeidimo gylius. Ši tendencija puikiai pastebima ir pažeidimų skerspjūvių palyginime (43 pav.).



43 pav. Pažeidimų matavimai skerspjūviai išmatuoti profilometru. Pilkos linijos žymi profilometro matavimus, spalvotos – vidutinės gylio vertės lazerio pažeidimo dugnuose

Išsamesnis atrinktų dydžių palyginimas buvo atliktas apskaičiavus jų abliacijos greičius (44 pav.). Šis parametras tiesiogiai apibūdina apdirbimo našumą ir nusako kokį medžiagos tūrį apdirbimo metu pašalina vienas lazerio impulsas.



44 pav. Ablacijos efektyvumas skirtingomis apdirbimo sąlygomis

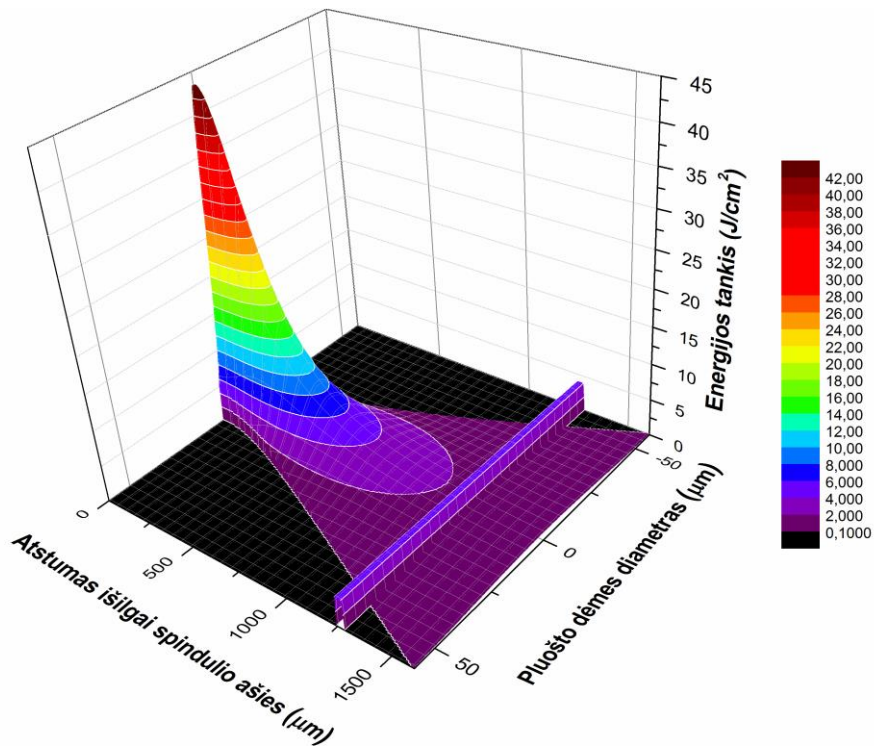
44 pav. grafike aiškiai matosi, kad efektyviausi apdirbimo greičiai - 92 ir 100 mm/s (85,6 ir 84,4 % impulsų persidengimai). Toliau didėjant greičiams efektyvumas mažėja ir pasak [38] straipsnio autoriaus apdirbto paviršiaus šiurkštumas auga. Todėl tolimesniems bandymams atlikti buvo pasirinktas 100 mm/s apdirbimo greitis (84,4 % impulsų persidengimas) ir 11,2 J/cm² energijos tankis. Medžiagos pašalinimo greitis šiuo atveju siekia 165 μm³/imp.

4.4. Fokuso gylis

Lazerine abliacija sudarant galias struktūras svarbu nustatyti apdirbimo pakartojimo skaičiaus priklausomybę nuo pažeidimo gylio. Kaip jau žinome, keisdami impulso energijos tankio vertes galima valdyti pažeidimų gylius. Jei kinta apdirbamos medžiagos paviršius, pasikeičia ir fokusavimo sąlygos. Fokusavimo sąlygos glaudžiai susiję su Gauso pluošto intensyvumo pasiskirstymu ir dėmės dydžiu.

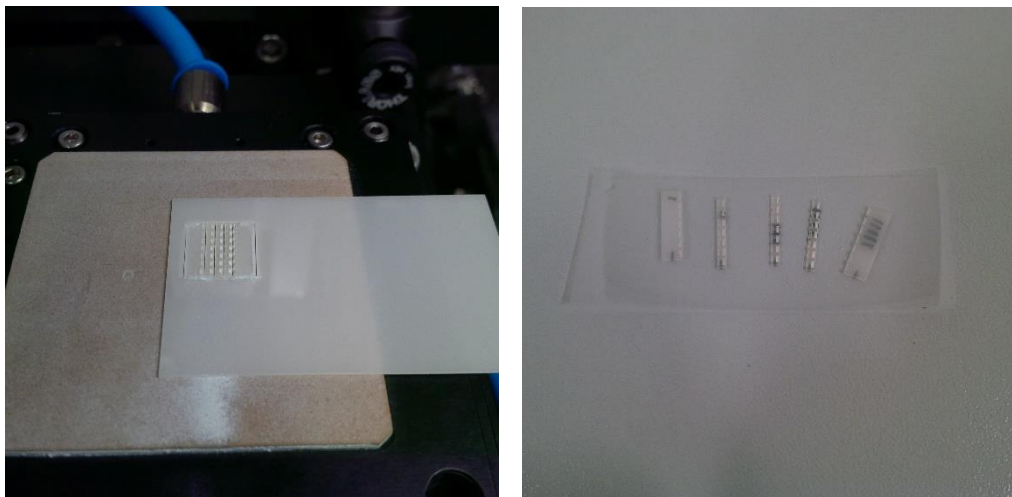
Tam, kad išsiaiškintume šių reiškinų poveikį medžiagos apdirbimui buvo apskaičiuotas sufokusuoto Gauso pluošto intensyvumo pasiskirstymas išilgai spindulio ašies. Modeliavimas atliktas naudojant realius „FemtoLAB“ sistemoje naudojamus parametrus: 16 μm diametro dėmę ir 0,904 W vidutinę pluošto galią. Gautos intensyvumo vertės buvo perskaičiuotos į energijos tankius.

Kaip matome 46 pav., didžiausios pluošto energijos tankio vertės pasiskirsčiusios ~500 μm atstume nuo fokuso taško. Toliau didėjant atstumui, energijos tankis smarkiai sumažėja. Grafike violetinė linija žymi II eksperimente nustatytą slenkstinę energijos tankio reikšmę. Ji parodo atstumą nuo fokuso taško, kuriame nebevyksta medžiagos abliacija (1250 μm).



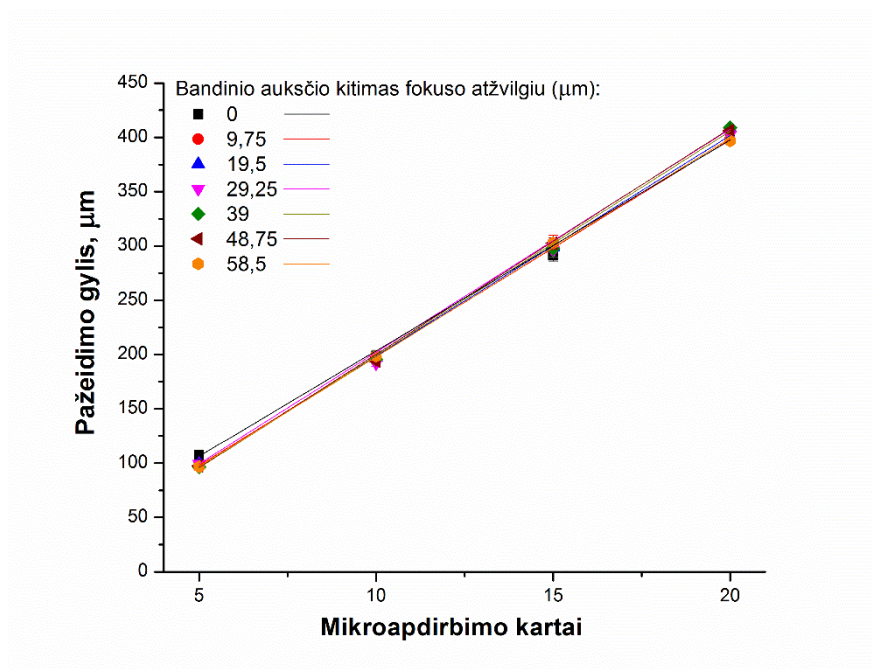
45 pav. Energijos tankio pasiskirstymas fokusuojamame Gauso pluošte. Violetinė linija ties 1255 μm žymi eksperimentiškai nustatytą abliacijos slenkstį

IV eksperimentas atliktas norint išsiaiškinti kokią įtaką abliavimo greičiui turi skirtingas bandinio aukščio kitimas fokuso atžvilgiu formuojant šimtų mikrometrų gylio pažeidimus. Realus atlikto IV eksperimento vaizdas pateiktas 46 pav.



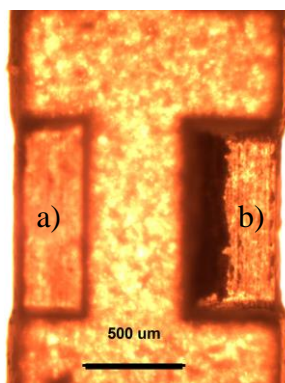
46 pav. Realus „FemtoLAB“ sistema atlikto eksperimento vaizdas. Matomi atskiri aliuminio oksido keramikos gabalėliai užklijuoti ant 19 mm pločio lipnios juostos

Eksperimento parametrai: 100 mm/s apdirbimo greitis (84,4 % impulsų persidengimas) ir $11,2 \text{ J/cm}^2$ energijos tankis. Gautos gylio ir apdirbimo kartų priklausomybės pateiktos 47 pav.

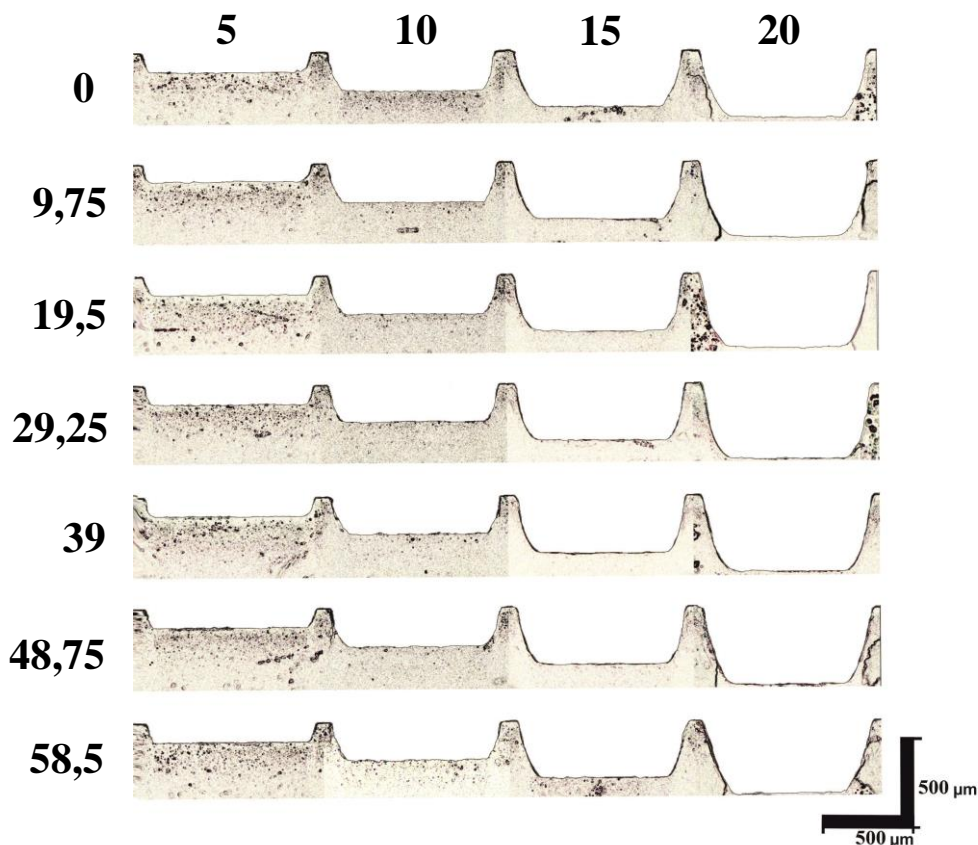


47 pav. Apdirbimo pakartojimų skaičiaus bei vertikalaus bandinio aukščio keitimo įtaka suformuoto pažeidimo gyliui

Remiantis gautomis priklausomybėmis, galime teigti, kad keičiant bandinio aukštį skirtingu žingsniu kiekvieną apdirbimo kartą pažeidimo gylis nesikeičia. Pastebėta, kad naudojant 29,25 – 58,5 μm bandinio aukščio kitimo vertes apdirbtame paviršiuje susidaro persilydęs medžiagos sluoksnis (žr. 48 pav.). 49 pav. pateikti kvadratėlių skerspjūviai, išanalizuoti optiniu mikroskopu stebint bandinio pjūvį.



48 pav. Skirtingomis sąlygomis (bandinio aukščio kitimas fokuso atžvilgiu/pakartojimų skaičius) suformuotų pažeidimų optinio mikroskopo vaizdas: a) 19,5 $\mu\text{m}/15$; b) 29,25 $\mu\text{m}/20$. Dešinėje esančioje struktūroje (b) matosi persilydęs medžiagos sluoksnis



49 pav. IV eksperimento pažeidimų matricos skerspjūvio optinio mikroskopo nuotrauka. Horizontalūs skaičiai atitinka apdirbimo pakartojimų skaičių, vertikalūs – bandinio aukščio kitimo žingsnį

Pažeidimo skerspjūviai tiek gyliu, tiek ir forma yra panašūs. Kraštų polinkio kampas dugno atžvilgiu lygus $\sim 16^\circ$. Šis „V“ formos griovelių artefaktas stebimas ir kitų autorių darbuose [55-57]. Reiškinyms dėl kurio susidaro sienelių statmenumo nuokrypis nėra iki galo ištirtas ir paaiškintas. Manoma, kad griovelių sienelių statmenumą galima valdyti trumpinant lazerio impulsų trukmę ir didinant jų smailinę galią.

Apibendrinant eksperimento rezultatus, galime padaryti išvadą, kad slenkstinė apdirbimo vertė ($1250 \mu\text{m}$) nepapuoia į bandinio aukščio kitimo intervalą ($1170 \mu\text{m}$). Viso eksperimento metu pluošto energijos tankis viršijo slenkstinę vertę, todėl aiškių pokyčių nepastebėta. Pažeidimų gyliai didėja proporcingai pakartojimų skaičiui. Tolimesniam mikrostruktūrų formavimui buvo pasirinktas $9,5 - 19,5 \mu\text{m}$ bandinio aukščio kitimas, nes ties didesnėmis vertėmis blogėja paviršiaus kokybė, susidaro persilydęs medžiagos sluoksnis.

4.5. Mikrostruktūrų realizavimas

„FemtoLAB“ femtosekundine lazerine mikroapdirbimo sistema aliuminio oksido keramikoje buvo suformuotos trys trimatės mikrostruktūros: piramidė, mikroskystinis prietaisas ir akustinio mikroskopo kalibracinis blokas. Apibendrinti apdirbimo metu naudoti lazerio parametrai pateikti 9 lentelėje. Visų mikrostruktūrų formos buvo aprašytos AutoCAD programoje ir po to

įkeltos į lazerio valdymo sąsają SCA. Figūros suformuotos naudojant apdirbimą linijomis (žr. 22 pav.). Struktūrų gylis buvo valdomas keičiant apdirbimo pakartojimų skaičių.

9 Lentelė. Pagrindiniai lazerio parametrai

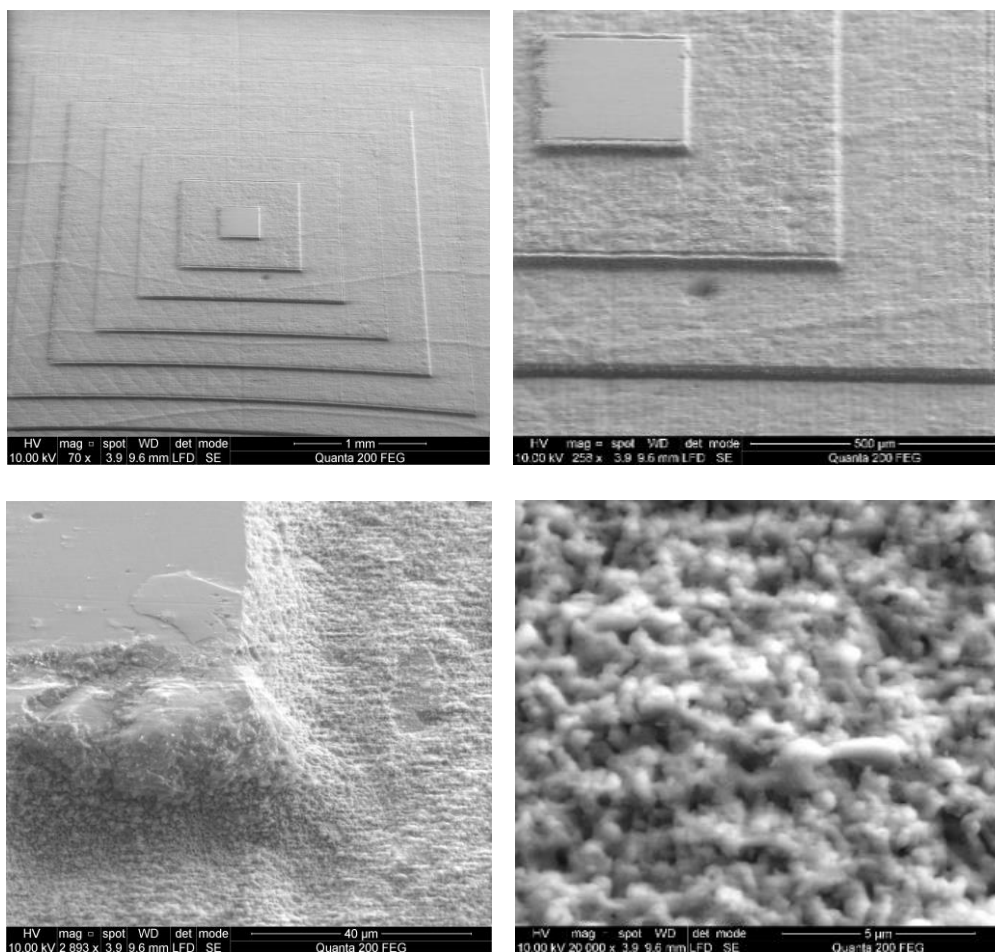
Bangos ilgis, nm	1030
Impulsų pasikartojimo dažnis, kHz	40
Lazerio galia, W	0,904
Energijos tankis, J/cm ²	11,2
Impulso energija, μJ	22
Apdirbimo greitis mm/s; impulsų persidengimas %	100; 84,4

4.5.1. Piramidės

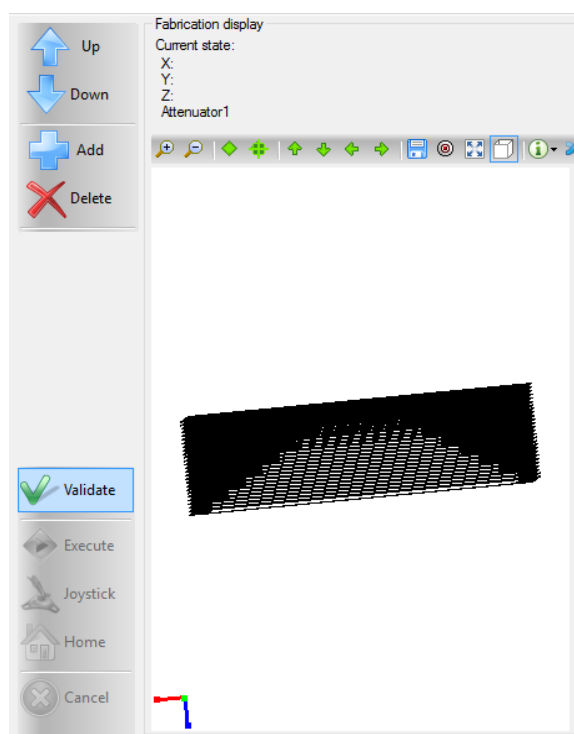
3D piramidės apibūdinančios charakteristikos pateiktos 10 ir 11 lentelėse, o jų struktūrų SEM ir SCA programos vaizdai - 50 ir 53 pav.

10 lentelė. Piramidės būdingi matmenys

Dydis	1,9x1,9 mm ²
Bendras aukštis	464 μm
Laiptelio aukštis	58 μm
Laiptelio plotis	100 μm
Laiptelių skaičius	8



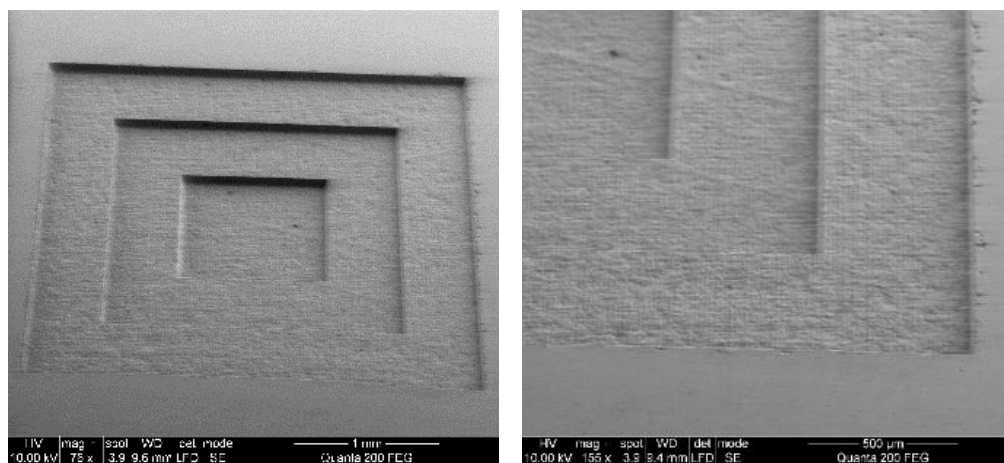
50 pav. Daug kartų padidintos suformuotos piramidės SEM vaizdai



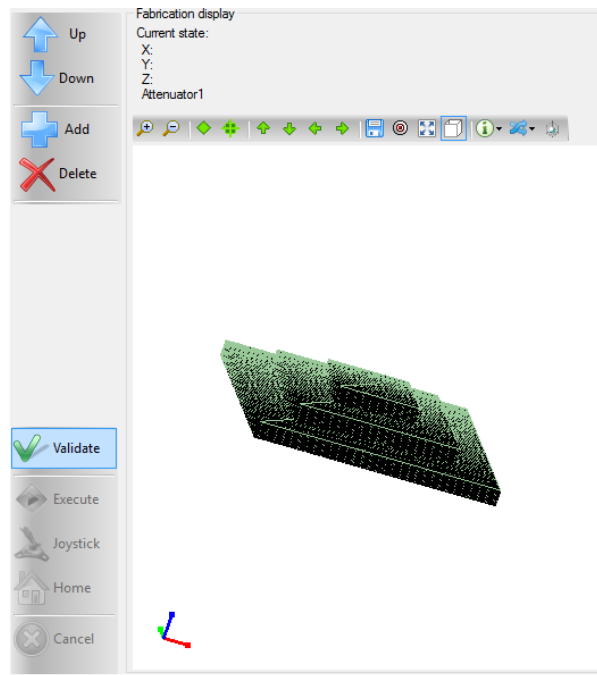
51 pav. SCA sąsajoje suprogramuoto trimačio trikampio vaizdas

11 lentelė. Inversinės piramidės matmenys

Piramidė	
Dydis	3x3 mm ²
Bendras aukštis	162 μm
Laiptelio aukštis	54 μm
Laiptelio plotis	500 μm
Laiptelių skaičius	3



52 pav. Inversinės piramidės SEM nuotraukos



53 pav. SCA sąsajoje suprogramuoto trimačio inversinio trikampio vaizdas

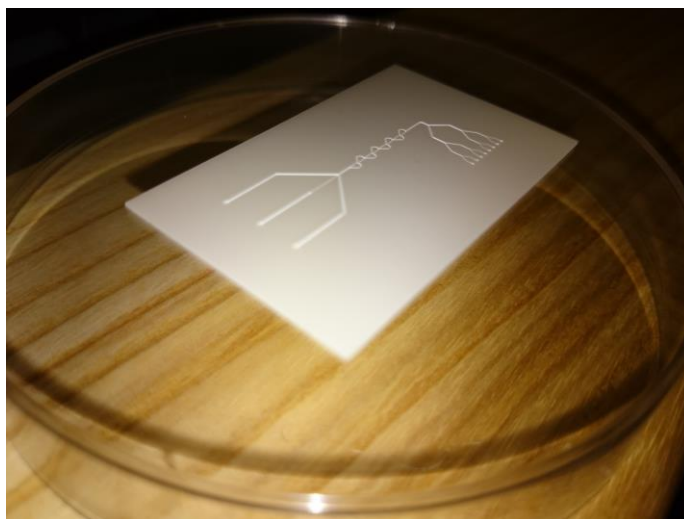
4.5.2. Mikroskystinis prietaisas

Mikroskystinis prietaisas skirtas mažų skysčio kiekių valdymui. Mažiausi naudojami skysčių kiekiai – nanolitrai ar net femtolitrai, o prietaisų matmenys gali siekti nuo mikrometrų iki centimetrų. Mikroskystiniai prietaisai naudojami biologijos, elektronikos, medicinos ir kitose srityse.

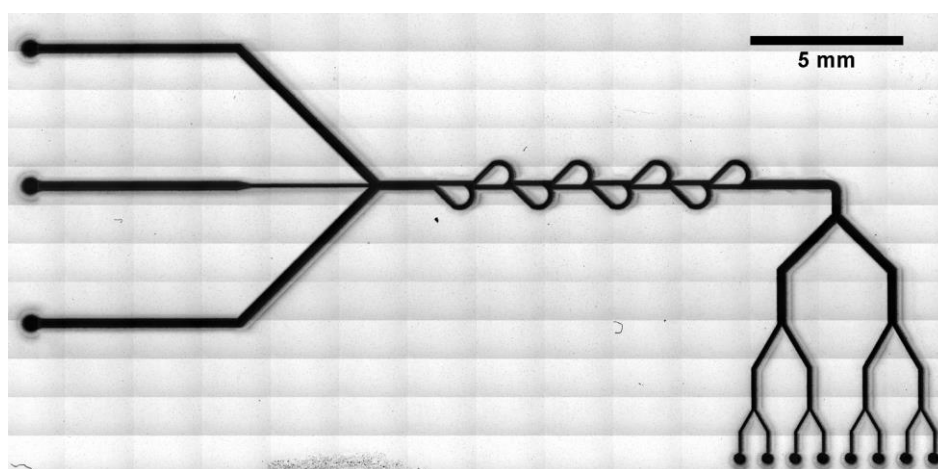
Šiame darbe pagaminto mikroskystinio prietaiso paskirtis – sumaišyti tris skysčius. Prietaisas turi 3 įėjimo kanalus, maišyklę ir 8 išbėgimo angas priešingoje plokštelės pusėje. Įrenginio matmenys pateikti 12 lentelėje, o lazerinio mikroapdirbimo metu naudoti parametrai 9 lentelėje.

12 lentelė. Mikroskystinio prietaiso matmenys

Dydis, cm ²	3,2x1,5
Mažiausias kanalo plotis, μm	75
Didžiausias kanalo plotis, μm	300
Kanalų gylis, μm	175
Išbėgimo angų diametrai, μm	360



a)



b)

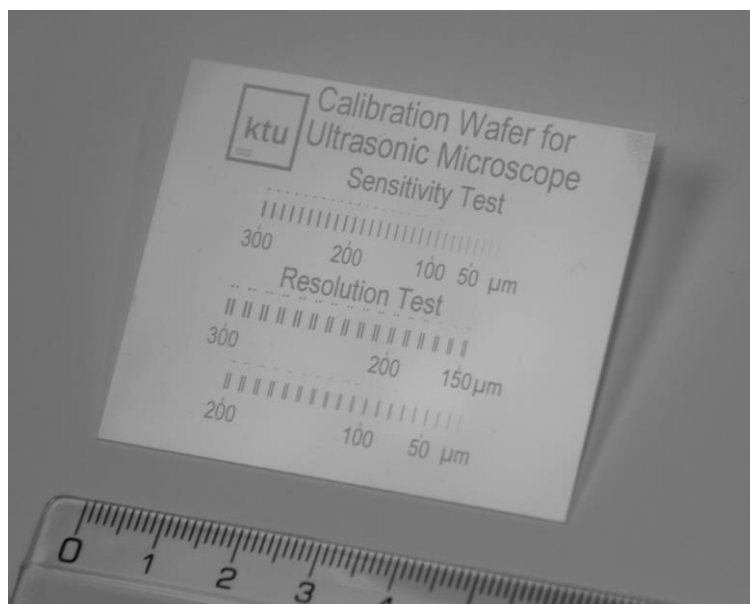
54 pav. Mikroskystinio prietaiso nuotraukos: a) bendras vaizdas, b) optinė mikrofotografija

4.5.3. Akustinio mikroskopo kalibracinis blokas

Akustinio mikroskopo kalibracinė liniuotė - tai metrologiškai kalibruotas įrankis, skirtas mikroskopo skiriamosios gebos ir jo jautrumo įvertinimui. Kalibracinė liniuotė sudaryta iš žinomų linijinių matmenų lazerio pažeidimo sričių. Šių sričių matmenys – mikronų eilės. Suformuoto kalibracinio bloko matmenys pateikti 12 lentelėje, bendras vaizdas - 55 paveiksle, o pagrindinės apdirbimo sąlygos 9 lentelėje.

12 lentelė. Akustinio mikroskopo kalibracinio bloko matmenys

Dydis	4,8x6 cm ²
Gylis	20 μm
Jautrumo testas	
Stačiakampių dydis	ilgis 2 mm, plotis kito 5-500 μm, žingsniu 40 μm
Atstumas tarp stačiakampių, mm	1
Skyros testas	
Stačiakampių dydis	Ilgis 2 mm, plotis kito 5-500 μm, žingsniu 20 μm
Atstumai tarp stačiakampių	5-500 μm, žingsniu 20 μm



55 pav. Akustinio mikroskopo kalibracinio bloko nuotrauka

Akustinio mikroskopo kalibracinio bloko kūrimas - mineto (MTEPI) fondo finansuojamas projektas („Erdvinės skiriamosios gebos kalibracinio bloko akustiniam mikroskopui sukūrimas, tyrimas ir taikymai (MicroSound)). Projekto tikslas – sumodeliuoti ir pagaminti kalibracinio bloko prototipą, kuris galėtų būti komercinamas ir tiekiamas kaip gaminys. Projektas vykdytas kartu su prof. K. Baršausko ultragarso mokslo instituto mokslininkais (KBUMI).

IŠVADOS

- Buvo sukurta lazerinio mikroapdirbimo metodika, kuri pasirinktai medžiagai leidžia surasti optimalius abliacijos parametrus. Aliuminio oksido keramikoje keičiant apdirbimo greitį (50 – 250 mm/s), energijos tankį (0,56 – 11,2 J/cm²), impulsų persidengimą (60,9 – 92,2 %), apdirbimo pakartojimo skaičių (5 – 20) ir bandinio aukščio kitimą fokuso taško atžvilgiu (0 – 58,5 μm) buvo suformuotos keturios skirtingos struktūros.
- Naudojant 1030 nm bangos ilgio, 40 kHz pasikartojimo dažnio ir 270 fs trukmės impulsus buvo nustatyta, kad aliuminio oksido keramikos abliacijos slenkstinė vertė yra 1,69 J/cm².
- Profilometru, optiniu ir skenuojančiu elektronų mikroskopais ištirta aliuminio oksido keramikos paviršiuje suformuotų struktūrų paviršiaus morfologija. Pastebėta, kad kintant impulsų persidengimui (apdirbimo greičiui) ir energijos tankiui keičiasi paviršiaus tolygumas. Esant pakankamai dideliems impulsų persidengimams (92, 90,5 ir 88,1 %) arba mažiems apdirbimo greičiams (50, 60 ir 72 mm/s), ties visomis energijos tankio vertėmis (0,56 – 11,2 J/cm²) susidaro perlydytas medžiagos šiukšlių sluoksnis. Sumažinus impulsų persidengimą (padidinus apdirbimo greitį) iki 76,6 – 85,6 % (92 – 150 mm/s) perlydytas sluoksnis visame energijos tankio kitimo intervale nebepastebimas. Persidengimo (apdirbimo greičio) vertėms pasiekus 68,8 ir 60,9 % (200 ir 250 mm/s), o energijos tankio - 0,56 ir 3,37 J/cm², apdirbimas tampa nestabilus, paviršiuje galime pastebėti pavienius impulsus, kurie nebesuformuoja vientiso pažeidimo.
- Nustatyta, kad keičiant bandinio aukštį skirtingu žingsniu kiekvieną apdirbimo kartą, pažeidimo gylis nesikeičia. Tai patvirtino ir apskaičiuotas sufokusuoto Gauso pluošto energijos tankio pasiskirstymas išilgai spindulio ašies. Jis parodė, kad slenkstinės apdirbimo vertės atstumas nuo pluošto dėmės fokuso taško (1250 μm) yra didesnis už bandinio aukščio kitimo intervalą (1170 μm). Viso eksperimento metu pluošto energijos tankis viršijo slenkstinę vertę. Taip pat buvo pastebėta, kad pažeidimo skerspjūviai tiek gyliu, tiek ir forma yra panašūs. Kraštų polinkio kampas dugno atžvilgiu lygus ~16°. Naudojant 29,25 – 58,5 μm bandinio aukščio kitimo vertes apdirbtame paviršiuje susidaro persilydęs medžiagos sluoksnis.
- Nustatyti našiausi aliuminio oksido keramikos apdirbimo parametrai naudojant 40 kHz impulsų pasikartojimo dažnį: 100 mm/s apdirbimo greitis (84,4 % impulsų persidengimas) ir 11,2 J/cm² energijos tankis. Abliacijos greitis šiuo atveju siekia 165 μm³/imp;
- Panaudojus surastus efektyvius lazerinės sistemos apdirbimo parametrus aliuminio oksido keramikoje buvo suformuotos trimatės mikrostruktūros: piramidė, mikroskystinis prietaisas ir akustinio mikroskopo kalibracinis blokas.

LITERATŪROS SĄRAŠAS

1. MEMS. [žiūrėta 2016.05.12]. Prieiga per: <http://www.nanonewsnet.ru/articles/2010/mems-mikroelektromekhanicheskie-sistemy-chast-3>
2. Sub-Contract Micro Milling. [žiūrėta 2016.05.12]. Prieiga per: <http://www.oxfordlasers.com/laser-micromachining/laser-micro-milling/sub-contract-micro-milling/>
3. Ona Balachninaite, Algridas Bargelis, Aleksandr Dementjev, Remigijus Jonušas, Gediminas Račiukaitis, Valdas Sirutkaitis. *Lazerinė technologija*. Vilniaus universiteto leidykla. 2008.
4. X. Liu, X. Chen, W. T. Lotshaw, and A.-C. Tien. Elimination of recast layer and microcracking in laser machining with femtosecond pulses. *Conference Proceedings - Lasers and Electro-Optics Society Annual Meeting-LEOS*. 1997, vol. 11, pp. 162.
5. IBS Coatings for Ultrafast Laser and Applications. [žiūrėta 2016.05.12]. Prieiga per: <https://www.semrock.com/ibs-coatings-for-ultrafast-lasers-and-applications.aspx>
6. J. Meijer. Laser beam machining (LBM), state of the art and new opportunities. *Journal of Materials Processing Technology*. 2004, vol. 149, no. 1–3, pp. 2–17.
7. Chung IY, KIM JD, Kang KH. Ablation drilling of invar alloy using ultra-short pulsed laser. *Int J Precis Eng Manuf*. 2009, vol. 10, pp. 11–6.
8. S. Mishra and V. Yadava. Laser Beam MicroMachining (LBMM) - A review. *Optics and Lasers in Engineering*. 2015, vol. 73. pp. 89–122.
9. F. Preusch, B. Adelmann, and R. Hellmann. Micromachining of AlN and Al₂O₃ Using Fiber Laser. *Micromachines*. 2014, vol. 5, pp. 1051–1060.
10. Average and Peak Power - A Tutorial. [žiūrėta 2016.05.12]. Prieiga per: <http://hank.uoregon.edu/experiments/modelocked-fiberlaser/20063.pdf>
11. D. Sola and J. I. Peña. Laser machining of Al₂O₃-ZrO₂ (3% Y₂O₃) eutectic composite. *J. Eur. Ceram. Soc*. 2012, vol. 32, no. 4, pp. 807–814.
12. A. Miotello and P. Ossi. Laser-surface interactions for new materials production. *Tailoring structures and Properties*. Italy. 2010. ISBN 978-3-642-03307-0.
13. J. Sabbaghzadeh, M. J. Hamed, F. M. Ghaini, and M. J. Torkamany. Effect of process parameters on the melting ratio in overlap pulsed laser welding. *Metall. Mater. Trans. B Process Metall. Mater. Process. Sci*. 2008, vol. 39, no. 2, pp. 340–347.
14. G. Gbur and E. Wolf. The Rayleigh range of partially coherent beams. *Opt. Commun.* 2001, vol. 199, no. 5–6, pp. 295–304.
15. Rayleigh length. [žiūrėta 2016.05.12]. Prieiga per: https://en.wikipedia.org/wiki/Rayleigh_length
16. E. G. Gamaly, A. V. Rode, B. Luther-Davies, and V. T. Tikhonchuk. Ablation of solids by femtosecond lasers: Ablation mechanism and ablation thresholds for metals and dielectrics. *Phys. Plasmas*. 2002, vol. 9, no. 3, pp. 949.
17. U. Keller. Ultrafast solid-state laser oscillators: A success story for the last 20 years with no end in sight. *Appl. Phys. B Lasers Opt*. 2010, vol. 100, no. 1, pp. 15–28.
18. Basic Configuration with Laser Welder. [žiūrėta 2015.05.12]. Prieiga per: <http://www.avio.co.jp/english/products/assem/principle/laser/configuration.html> (žiūrėta 2015.05.12).
19. L. Allen, J. H. Eberly. *Optical Resonance and Two-Level Atoms*. America. ISBN 9780486655338.

20. M. Wollenhaupt, A. Assion, and T. Baumert. Femtosecond Laser Pulses: Linear Properties, Manipulation, Generation and Measurement. *Springer Handb. Lasers Opt.* 2007, no. 5, pp. 937–983.
21. J. Cheng, C. S. Liu, S. Shang, D. Liu, W. Perrie, G. Dearden, and K. Watkins. A review of ultrafast laser materials micromachining. *Optics and Laser Technology.* 2013, vol. 46, no. 1. pp. 88–102.
22. S. W. Youn, M. Takahashi, H. Goto, and R. Maeda. Fabrication of micro-mold for glass embossing using focused ion beam, femto-second laser, excimer laser and dicing techniques. *J. Mater. Process. Technol.* 2007, vol. 187–188, pp. 326–330.
23. D. Sabbert, J. Landsiedel, H. D. Bauer, and W. Ehrfeld. ArF-excimer laser ablation experiments on Cycloolefin Copolymer (COC). *Appl. Surf. Sci.* 1999, vol. 150, no. 1, pp. 185–189.
24. Kruger J. Kautek W. The femtosecond pulse laser: a new tool for micromachining. *Laser Physics.* 1999, vol. 19, pp. 30-40.
25. N. Anscombe. Direct laser writing. *Nat. Photonics.* 2010, vol. 4, no. 1, pp. 22–23.
26. Using laser to cut a diamond. [2015.05.17]. Prieiga per: <http://www.nanowerk.com/nanotechnology-news/newsid=34684.php>
27. B. Borchers, J. Bekesi, P. Simon, and J. Ihlemann. Submicron surface patterning by laser ablation with short UV pulses using a proximity phase mask setup. *Journal of Applied Physics,* 2010, vol. 107, no. 6.
28. T. Roch, A. Lasagni, and E. Beyer. Nanosecond UV laser graphitization and delamination of thin tetrahedral amorphous carbon films with different sp³/sp² content. *Thin Solid Films.* 2011, vol. 519, no. 11, pp. 3756–3761.
29. N. H. Rizvi. Femtosecond laser micromachining : Current status and applications. *Glass.* 2003, vol. 50, no. 50, pp. 107–112.
30. Rizvi NH. Femtosecond laser micromachining: current status and applications. *Riken Rev.* 2003, 50, 7782.
31. Gower MC. Industrial applications of laser micromachining. *Opt. Express.* 2000, 7(2), pp. 56-67.
32. Micromachining. [2015.05.12]. Prieiga per:<http://www.warsash.com.au/products/laser-systems/MICROMACHINING.php>
33. Fei He, Yang Liao, Jintian Lin, Lingling Qiao, Yachent and Koji Sugioka. Femtosecond Laser Fabrication of Monolithically Integrated Microfluidic Sensors in Glass. *Sensors.* 2014, 15, pp. 19402-19440.
34. Micromachining | Menlo Systems. [žiūrēta 2015.05.12]. Prieiga per: <http://www.menlosystems.com/en/applications/all/laser-machining/micromachining/>
35. Laser Micromachining of Ceramics, Alumina, Greensheet (Unfired) Ceramic. [peržiūrēta 2016.05.11]. Prieiga per: http://www.ipgphotonics.com/apps_ceramic.htm
36. Aluminum oxide ceramic. [peržiūrēta 2016.05.11]. Prieiga per: <http://www.astromet.com/alumina-ceramic-amalox68.htm>
37. D. T. Pham, S.S. Dimov, P.V. Petkov. Laser milling of ceramic components. *Int. J. Mach. ToolsManuf.* 2007, 40, 618–626.
38. C. Leone, S. Genna, F. Tagliaferri, B. Palumbo, and M. Dix. Experimental investigation on laser milling of aluminium oxide using a 30W Q-switched Yb:YAG fiber laser. *Opt. Laser Technol.* 2016, vol. 76, pp. 127–137.
39. Aluminum Oxide. [žiūrēta 2016.05.12]. Prieiga per: <http://accuratus.com/alumox.html>
40. Abdul Mutalib Md Jani, Dusan Losic. Nanoporous anodic aluminium oxide: Advances in surface engineering and emerging applications. *Progress in Materials Science.* 2013, 58, pp 636-704.
41. Al₂O₃. [žiūrēta 2016.05.12]. Prieiga per: http://c-component.ru/PRODUCTS/Ceramic_Substrates/Al2O3

42. Laser micromachining Software SCA. [žiūrėta 2016.04.20]. Prieiga per: <http://wophotonics.com/product/laser-micromachining-software-sca/>
43. Pharos vartotojo instrukcija 2014 rugsėjo 23 d., pp 94.
44. SCA programinės įrangos vartotojo instrukcija, pp. 78.
45. Chin Y. Poon, Bharat Bhushan. Comparison of surface roughness measurements by stylus profiler, AFM and non-contact optical profiler. *Wear*. 1995, 190, pp. 76-88.
46. TIME TR200 Surface Roughness Tester. [žiūrėta 2016.04.20] Prieiga per: <http://digiwork.ca/product.html?title=TIME%20TR200%20Surface%20Roughness%20Tester&list=products/data190>
47. Profilometro TR200 Time vartotojo instrukcija.
48. Dudonis, Julius. *Paviršiaus fizika ir chemija: Mokomoji knyga*. Šiauliai: Šiaulių universiteto leidykla, 2007.
49. Michael W. Davidson, Mortimer Abromowitz. *Encyclopedia of Imaging Science and Technology*. Optical Microscopy. (2002), DOI: 10.1002/0471443395.img074
50. Optical microscope. [žiūrėta 2016.04.20]. Prieiga per: https://en.wikipedia.org/wiki/Optical_microscope (žiūrėta 2016.04.20)
51. Egerton, R. F. Physical principles of electron microscopy: an introduction to TEM, SEM, and AEM. *Springer*. 2005, pp. 527.
52. KTU SEM laboratorija. [žiūrėta 2016.04.20]. Prieiga per: <http://www.personalas.ktu.lt/~tomtamu/SEM/>
53. Quanta Scanning Electron Microscope | FEI. [žiūrėta 2016.04.20]. Prieiga per: <https://www.fei.com/products/sem/quanta-sem/>
54. Skenuojančio elektronų mikroskopo Fei Quanta 200 FEG vartotojo instrukcija.
55. W. Hu, Y. C. Shin, G. B. King. Micromachining of Metals, Alloys, and Ceramics by Picosecond Laser Ablation. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 2010, vol. 132, pp. 1-7.
56. D. Sola, J. I. Peña. Study of the Wavelength Dependence in Laser Ablation of Advanced Ceramics and Glass-Ceramic Materials in the Nanosecond Range. *Materials*. 2013, 6, pp. 5302-5313.
57. S. Darwish, N. Ahmed, A. M. Alahmari, N. A. Mufti. A comparison of laser beam machining of micro-channels under dry and wet mediums. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2015, pp. 1-17.