

Vilniaus universiteto
Fizikos fakulteto
Lazerinių tyrimų centras

Paulius Janaščius

MONTAŽINIŲ PLOKŠČIŲ (PCB) MIKROGRĘŽIMAS FEMTOSEKUNDINIAIS LAZERIO
IMPULSAIS

Magistrantūros studijų baigiamasis darbas

Lazerinės technologijos

studijų programa

Studentas

Vadovas

Centro direktorė

Paulius Janaščius

Dr. Domas Paipulas

Dr. Dalia Kaškelytė

Vilnius 2023

TURINYS

1. LITERATŪROS APŽVALGA	4
1.1 MONTAŽINIŲ PLOKŠČIŲ GAMYBA	4
1.2 MONTAŽINIŲ PLOKŠČIŲ VIJOS	4
1.2.1 VIJŲ KOMPONENTAI	5
1.2.2 MIKROVIJOS	5
1.3 LAZERINIS MONTAŽINIŲ PLOKŠČIŲ APDIRBIMAS	6
1.3.1 AKTUALIOS SPECIFIKACIJOS, GAUTOS LAZERINIO GRĘŽIMO METU	9
1.4 KITI LAZERINIO APDIRBIMO METODAI	10
1.5 FR4 MONTAŽINĖ PLOKŠTĖ.....	11
2. TYRIMO METODIKA	13
2.1 DARBE NAUDOJAMOS PRIEMONĖS	13
2.2 TYRIMO EIGA	13
2.2.1 DAŽNIO, SPINDULIUOTĖS ĮTĖKIO IR IMPULSŲ KIEKIO ĮTAKA IŠGREŽTŲ KRATERIŲ DYDŽIAMS BEI TERMINEI AKUMULIACIJAI	14
2.2.2 IMPULSŲ KIEKIO ĮTAKA, KUOMET AKUMULIUOTAS DOZĖS TANKIS IŠLAIKOMAS PASOTVUS, IŠGREŽTŲ KRATERIŲ DYDŽIAMS BEI TERMINEI AKUMULIACIJAI.....	17
3. TYRIMO REZULTATAI IR JŲ APTARIMAS	19
3.1 KRATERIŲ DYDŽIŲ BEI TERMINIO POVEIKIO PRIKLAUSOMYBĖ NUO KINTAMŲ SPINDULIUOTĖS ĮTĖKIO, PASIKARTOJIMO DAŽNIO BEI IMPULSŲ KIEKIO	19
3.1.1 KRATERIO KOKYBĖS PARAMETRŲ PRIKLAUSOMYBĖS	20
3.1.2 KRATERIO DYDŽIO PARAMETRŲ PRIKLAUSOMYBĖS	25
3.2 KRATERIŲ DYDŽIŲ BEI TERMINIO POVEIKIO PRIKLAUSOMYBĖ NUO IMPULSŲ KIEKIO, KAI AKUMULIUOTAS DOZĖS TANKIS IŠLAIKOMAS PASTOVUS	31
3.2.1 KRATERIO KOKYBĖS PARAMETRŲ PRIKLAUSOMYBĖS	32
3.2.2 KRATERIO DYDŽIO PARAMETRŲ PRIKLAUSOMYBĖS	33
IŠVADOS	38
LITERATŪRA	39
SANTRAUKA	41
SUMMARY	42

ĮVADAS

Montažinė plokštė (ang. PCB – printed circuit board) yra plokštė, sudaryta iš kietos, plonos dielektrinės medžiagos (dažniausiai stiklo pluošto) ir turinti elektrai laidžius varinius takelius, kurie atstoja laidus tradicinėje elektros grandinėje, taip sutaupant labai daug vietos. Plokštė yra padengiama korozijai atspariu sluoksniu, kuris apsaugo metalines elektrai laidžias jos dalis ir suteikia visiems pažįstamą žalią spalvą. Ant plokštės tvirtinami elektronikos komponentai – rezistoriai, kondensatoriai – ir įvairūs mikrovaldikliai, stiprintuvai, procesoriai. Galima teigti, kad spausdinta schema yra reikalinga elektronikos komponentų mechaninei atramai ir komponentų elektriniam sujungimui užtikrinti.[1]

Montažinės plokštės išradėjas yra austrų mokslininkas Paul Eisler, kuris pirmąją plokštę pagamino Antrojo pasaulinio karo metu. Jis patentavo plokštės išėsdinimą, mazgų sujungimo metodus. Tuo metu elektroniniai prietaisai buvo fiziškai dideli, painiai surinkti, jų komponentai sujungti laidais, kas reiškė nepatikimą dizainą, dažnus gedimus ir jų sudėtingą tvarkymą arba brangų keitimą. Paul Eisler pastebėjo šiuos visus trūkumus ir jam kilo idėja visą grandinę perkelti ant nelaidaus pagrindo, ant kurio vėliau atspausdinami variniai takeliai kaip pakaitalas laidams. [2]

Pasaulinis elektronikos prietaisų fizinio dydžio mažėjimas nulėmė tai, kad matome ir sparčiai mažėjantį jų montažinių plokščių dydį. Kylantys našumo ir dydžio reikalavimai privertė PCB gamintojus gaminti jas vis mažesnes, su tankiau išdėstytais kontaktiniais kanalais ir komponentais bei turėti vis daugiau sluoksnių, t.y. eiti į gylį. Komunikacijai tarp plokštės sluoksnių reikalingi vertikalūs kanalai – vijos. Dėl minėto absoliutaus dydžių mažėjimo populiarėja nauja vijų rūšis – mikrovijos. Mechaniniai grąžtai tampa nebe tokia našia darbo priemone, kokia buvo anksčiau prie didesnių vijų, jiems esant labai smulkiems dažnai sudyla ir sulūžta, todėl šiai paskirčiai pasirenkamas lazeris. Būtent mikrogrėžimas lazeriu yra šio tiriamojo darbo dėmesio centre, tai bandžiau atlikti ir pats.

Šio darbo tikslas – ištirti femtosekundiniais lazeriniais impulsais grėžiamo bandinio paviršių keičiant lazerio impulso energiją, pasikartojimo dažnį, impulsų kiekį, palyginti rezultatus tarpusavyje ir surasti optimaliausią grėžimo režimą, kurio rezultatas būtų mažiausi nuokrypiai ir kokybiškiausi krateriai.

1. LITERATŪROS APŽVALGA

Elektronikos įrenginių mažėjimas nulėmė montažinių plokščių mažėjimą. Mechaninis vijų gręžimas yra patrauklus savo maža eksploataavimo kaina ir galimybe iškart pragręžti kelis sluoksnius. Tačiau šis būdas stokoja tikslumo, lyginant su apdirbimu lazeriu, bei reikalauja gan dažno grąžtų aptarnavimo. Didelio tankio vijų (ang. HDI – high density interconnect) schemų populiarėjimas nulėmė vijų dydžio mažėjimą, taip leidžiant ant plokštės sutalpinti jų daugiau ir sukuriant įvairesnes grandines. Mechaninių grąžtų ribos nuvedė link plataus lazerių panaudojimo apdirbant spausdintas schemas. Lazeriai šiam pritaikymui yra patrauklesnė opcija, nes jie, kitaip negu mechaninis grąžtas, užtikrina tikslų gręžimo gylį, absoliučią kontrolę užtikrinant kaip ir kokių matmenų skylę norima padaryti bei nesukelia jokių vibracijų taip eliminuojant bet kokią šalutinę žalą plokštei.[3]

1.1 MONTAŽINIŲ PLOKŠČIŲ GAMYBA

Plokštės gamyba prasideda nuo varinio lakšto užvalcavimo ant kietos dielektrinės medžiagos – stiklo pluošto,- kuri reikalinga mechaninei grandinės atramai. Tuomet plokštė įdedama į gręžimo stakles, kurios pagal inžinierių sukurtą trimatį grandinės modelį, išgręžia skylės plokštėje. Šios skylės yra reikalingos komponentų tvirtinimui ir tarp - plokštiniam mazgų sujungimui (ang. interconnect routing). Po gręžimo plokštė kruopščiai nuvaloma, kad ant jos neliktų jokių nuosėdų. Taip plokštė paruošiama takelių spausdinimui. [1]

Ant varinio lakšto uždedama ėsdinimui atspari kaukė, turinti būsimos elektros grandinės šabloną. Tuomet plokštė yra panardinama į terpę, kuri išėsdiną visą varį, išskyrus kaukės apdengtas dalis – būsimus grandinės takelius. Tirpikliai gali būti įvairūs – įprastai naudojami geležies chlorido, vario chlorido, amoniako, sieros rūgšties ir vandenilio peroksido, amonio persulfato, sieros rūgšties tirpalai 60 – 120°C temperatūroje. Plokštė yra nuplaunama ir ant jos lieka tik grandinei reikalingi variniai takeliai.

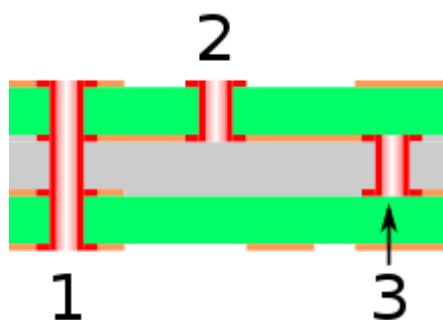
Likę variniai takeliai yra labai ploni ir sunkiai patikrinami vizualiai, todėl reikalinga optinės inspekcijos mašinos pagalba. Mašina padaro plokštės nuotraukas ir lygina jas su suprojektuotais modeliais. Jei viskas gerai ir nerandama defektų, plokštės laukia apsauginės dangos nuo korozijos klojimas. Ši danga suteikia schemai žalią spalvą ir izoliuoja varinius kontaktus ir takelius. Galų gale ant plokštės atspausdinamas dar vienas sluoksnis, kuris skirtas identifikuoti komponentų ir po antikorozinę dangą paslėptų takelių pozicijas ir įvairius reikalingus simbolius.

1.2 MONTAŽINIŲ PLOKŠČIŲ VIJOS

Šiuolaikinės montažinės plokštės dažnai turi keletą sluoksnių plokščių. Vija (ang. VIA – *Vertical interconnect access*, lotyn. *via* - *keltas*) yra būdas elektriškai sujungti tuos sluoksnius

tarpusavyje ir užtikrinti signalo nenutrūkstumą. Iš esmės, tai yra elektra laidūs vertikalūs tuneliai, išgręžti per keletą schemos sluoksnių ir užpildyti laidininku (dažniausiai – variu). Galima teigti, kad tai atstoja vertikalų kontaktinį takelį.

Vijų gali būti skirtingų rūšių, priklausomai nuo to, kaip ir kuriuos sluoksnius jos jungia: „prakišta per visą“ (ang. through-hole), „akloji“ (ang. blind), „paslėptoji“ (ang. buried). *Through-hole* vija jungia išorinius - viršutinį ir apatinį - schemos sluoksnius ir matoma iš abiejų plokštės pusių. „Akloji“ vija jungia išorinį ir vidinį sluoksnius – ji gali būti matoma tik iš vienos plokštės pusės. „Paslėptoji“ vija jungia vidinius plokštės sluoksnius, tad ji nėra matoma nei ant vieno plokštės paviršiaus. [1, 4, 5]



1 pav. Vijų tipai: 1 – through-hole, 2 - blind, 3 – buried. [6]

1.2.1 VIJŲ KOMPONENTAI

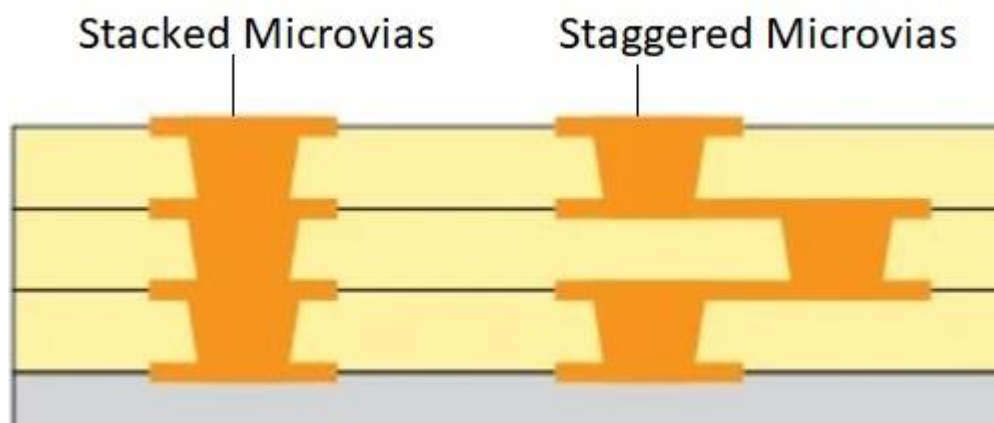
Vijos turi tris pagrindinius komponentus: vamzdelis (ang. barrel), padas (ang. pad) ir antipadas (ang. antipad). Vamzdelis yra cilindras, pagamintas iš laidininko, kuris užpildo plokštėje išgręžtą skylę. Padas reikalingas sujungti vamzdelį su elektrinės grandinės komponentais ir takeliais. Antipadas yra tarpas, kuris atskiria vamzdelį nuo dielektriko. [7]

1.2.2 MIKROVIJOS

„Aklosios“ vijos turi savo porūšį – mikrovijas. Bendrai tai yra labai maža vija, paliekanti daugiau vietos takelių išdėstymui. Taip pat jos pasižymi mažesne parazitine elektrine talpa, kas yra svarbu užtikrinant greitą elektrinių grandinių veiklą. Reikia pažymėti, kad mikrovijų gamybos procesas yra sudėtingesnis ir brangesnis, lyginant su tradicinėmis vijomis. Dauguma spausdintų schemų gamintojų mažesnio nei 150 μm skersmens vijas laiko mikrovijomis. Gamybos defektų tikimybė yra minimalizuojama naudojant mikrovijas, nes jos išgręžiamos lazeriu. Toks procesas praktiškai visiškai panaikina nuosėdas ir užtikrinta didelį tikslumą. Dėl mažo savo dydžio ir tikslaus apdirbimo, mikrovijos užtikrina didesnę elektrinių grandinių ir jų komponentų tankį ant plokštės ir leidžia išgauti sudėtingesnius grandinės dizainus. [8]

Pagal savo išdėstymą tarp sluoksnių, mikrovijos gali būti dviejų tipų: „sukrautosios“ (ang. stacked) ir „išsiskirsčiusios“ (ang. staggered). Sukrautosios mikrovijos yra išdėstytos vertikalčiai

tiesiai viena po kita. Išsiskirsčiusios mikrovijos yra viena tarp kitos išsklaidytos, žiūrint vertikalia kryptimi, per skirtingus schemos sluoksnius.

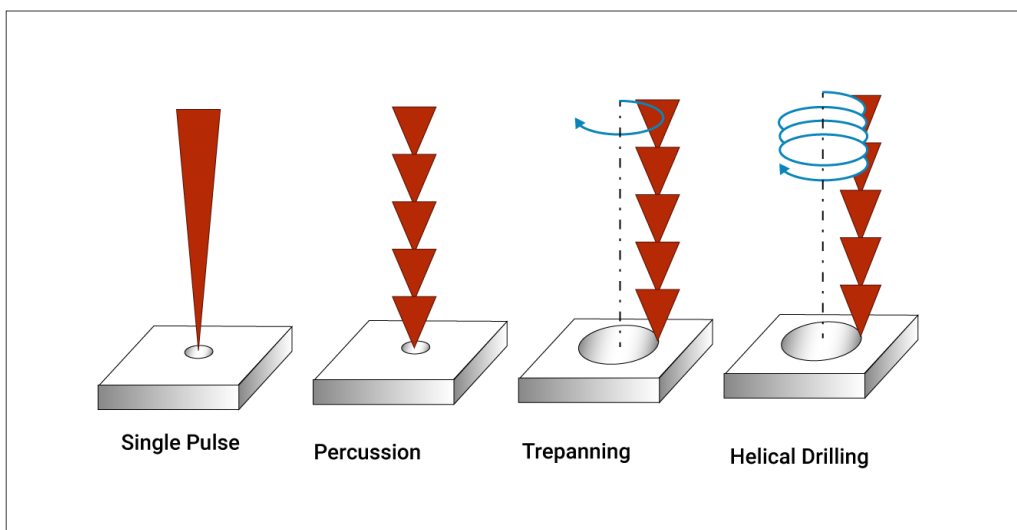


2 pav. Mikrovijų tipai. [8]

1.3 LAZERINIS MONTAŽINIŲ PLOKŠČIŲ APDIRBIMAS

Lazerio pluoštas yra nukreipiamas ant plokštės paviršiaus (varijuojant optiniais komponentais, galima parinkti trokštamą pluošto formą). Medžiaga sugeria šviesos energiją, o tai nutraukia cheminius ryšius. Toks apdirbimo metodas, kuomet apšvitos pagalba dalis medžiagos yra pašalinama nuo paviršiaus yra vadinamas lazerine abliacija.

Lazerinis gręžimas atliekamas skirtingais režimais: vieno impulso (ang. single pulse), smūginis (ang. percussion), sukamasis (ang. trepanning), spiralinis (ang. helical). Vieno impulso gręžimo metu medžiaga yra paveikiama vienu lazerio impulsu, kuris sukuria reikiamą skylę plokštėje. Šiuo atveju tiek lazeris, tiek plokštė nejuda. Smūginio gręžimo metu medžiaga yra apšvitinama serija lazerinių impulsų. Dirbant šiuo metodu lazeris ir plokštė taip pat yra nejudinami. Smūginis režimas užtikrina gilesnes ir tikslesnes skylės su mažesniais skersmenimis, lyginant su vieno impulso režimu. Sukamuoju gręžimu apdirbant medžiagas, lazerio pluoštas yra sukamas aplink nustatytą vietą, kuri yra būsimos vijos centras. Šis metodas naudojamas, kuomet vijos skersmuo turi būti didesnis už lazerio pluošto dydį. Vijos matmenų tikslumą nulemia pluošto judėjimas. Spiralinio gręžimo metu lazerio pluoštas juda spirale plokštės atžvilgiu. Dove prizmė naudojama kontroliuojant pluoštą.

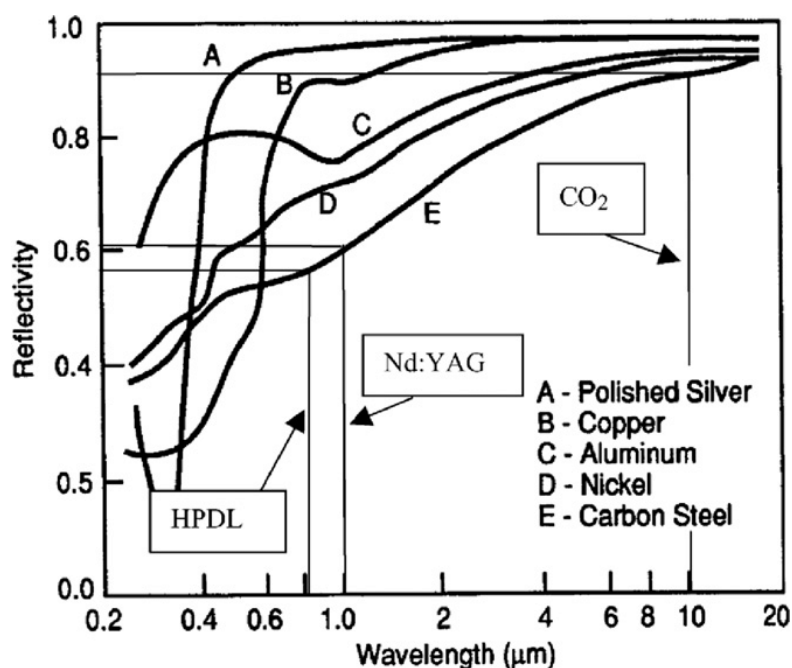


3 pav. Lazerinio gręžimo režimai. [9]

Skirtingi lazeriai gali būti naudojami skirtingiems apdirbimo metodams: skylių gręžimui, ėsdinimui, depaneliavimui. Tačiau tik tie lazeriai, kurie gali tiksliai gręžti medžiagas, kurios naudojamos spausdintų schemų gamyboje, gali būti naudojami mikrovijų gręžimui. Dažniausiai naudojami lazeriai mikrovijų gręžimui yra CO₂ ir Nd:YAG. Eksimeriniai lazeriai taip pat pritaikomi, kuomet reikia išėsdinti polimerus, tačiau jie netinkami metalų šalinimui. [3, 10, 11]

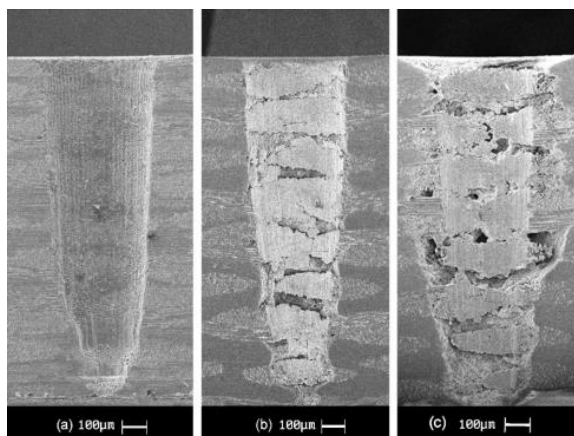
CO₂ lazeriai yra naudoja anglies dioksido dujas kaip aktyviają lazerinę terpę ir emituoja IR srities šviesą – dažniausiai naudojamas bangos ilgis 10,6 μm. Šie lazeriai gali išgręžti 50-70 μm skersmens skylės. Tai yra vieni galingiausių lazerių naudojamų šiais laikais ir tinka gręžti polimerines medžiagas, tačiau turi aukštą atspindžio koeficientą nuo metalinių paviršių. Jie dažniausiai naudojami srityse, kuriose gręžimo greitis yra pagrindinis prioritetas. 80 % mikrovijų gręžimų yra atliekama būtent šiuo lazeriu. [11]

Nd:YAG yra lazeris, kurio aktyvioji terpė yra kieto kūno kristalas. Šio lazerio fundamentalioji emisija yra artimajame IR diapazone – 1064 nm. Netiesinių kristalų pagalba sukuriama aukštesnės harmonikos, kurios turi emisijos juostas ties matomąja sritimi (532 nm) bei UV sritimi (355 nm ir 266 nm). Nd:YAG lazeriai gali išspinduliuoti iki 100 000 impulsų per sekundę. Jie gali išgręžti 12-25 μm skersmens skylės. Dažnai didesnio skersmens skylėms naudojamas sukamasis gręžimo režimas. Nd:YAG lazeris yra vienas universaliausių ir gali būti naudojamas daugelio medžiagų – polimerų, stiklo, metalų – gręžimui. [10]



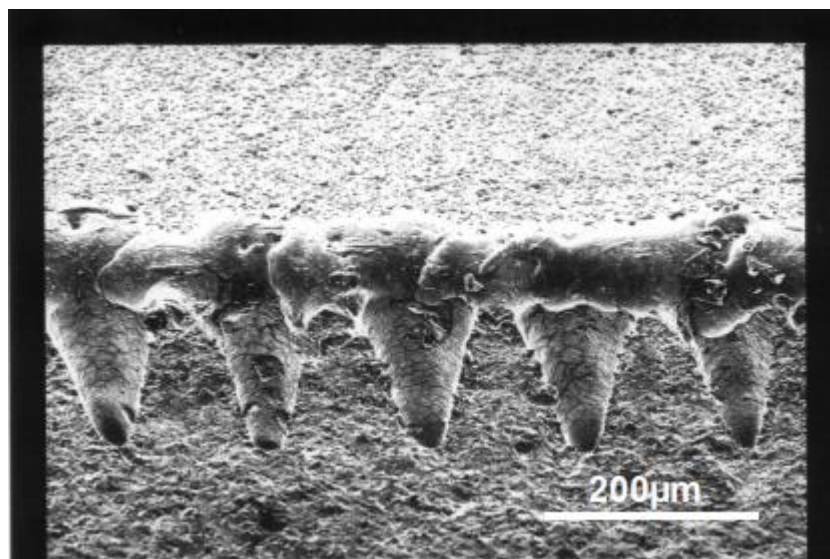
4 pav. Metalų atspindžio koeficiento priklausomybė nuo šviesos bangos ilgio. [12]

K.C Young et al. gauti rezultatai rodo, kad dirbant su kieto kūno lazerio Nd:YAG trečia harmonika (355 nm) galima pasiekti neblogų rezultatų gręžiant stiklo pluošto plokštes. Mokslininkų grupė, tyrinėjusi, kaip skirtingi lazerinės spinduliuotės parametrai veikia bandinį, pastebėjo, kad naudojant žemesnės vidutinės galios ir mažesnio pasikartojimo dažnio spinduliuotę gaunamos švarios skylės su mažai apanglėjimo. Dirbant su aukštesnėmis galiomis ir aukštesniais pasikartojimo dažniais pastebėti medžiagos slinkimasis ir iškilimas prie paveiktos vietos. Bandymai atlikti keičiant vidutinę galią nuo 0,1 W iki 1,2 W (maksimali) ir dažnį nuo 0,5 kHz iki 20 kHz. Taip pat stebėta, kaip keičiasi šilumos paveikta zona ant bandinio. Didžiausias zonos plotas gautas, kai švitinama 7 kHz dažniu. Tiek didinant, tiek mažinant dažnį zona mažėja. [14]

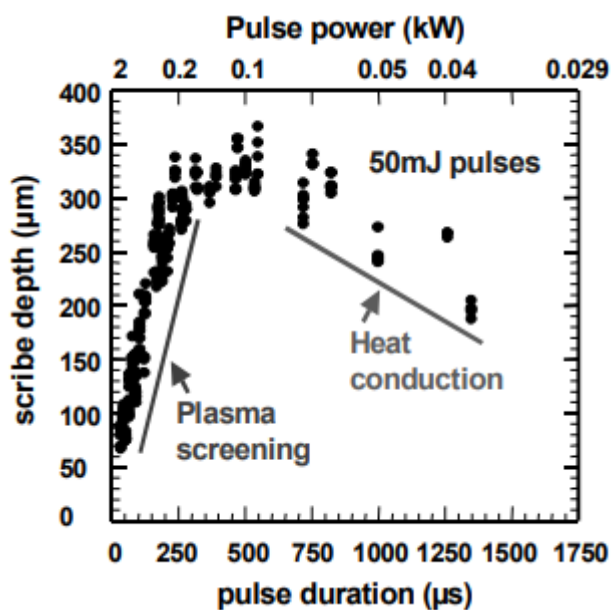


5 pav. Skenuojančiu elektronų mikroskopu darytos nuotraukos, rodančios, kaip skirtingi lazeriniai parametrai paveikia bandinį: a) 0,3 W, 1 kHz; b) 0,3 W 6 kHz; c) 1 W, 6kHz. [14]

C.J. Moorhouse, et al. grupė tyrinėjo, kokie rezultatai gaunami dirbant su CO₂ lazeriu, kuris spinduliavo vidutine 200 W galia (pikinė 2,5 kW) ilgais (mikrosekundiniais) impulsais. Šiuo lazeriu buvo apdirbama aliuminio oksido plokštelė. Buvo pastebėta, kad efektyviausiai gręžiama 200 – 600 μs impulsais (50 mJ impulso energijos) ir gaunama giliausios skylės. [11]



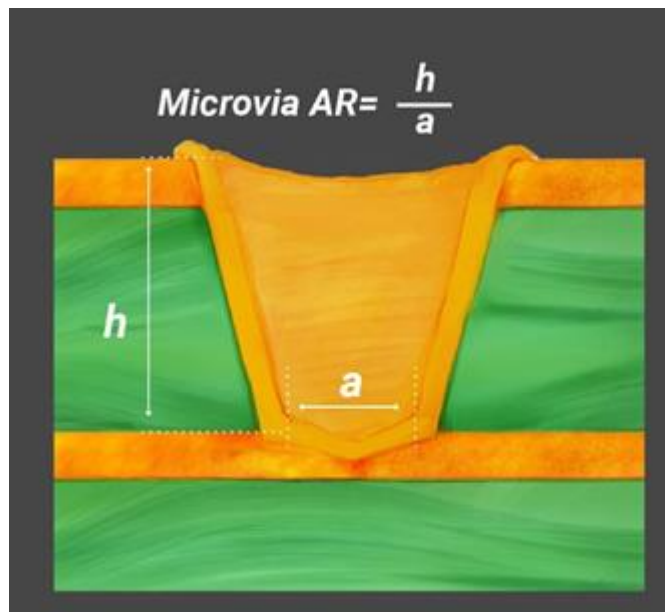
6 pav. Krateriai, gauti švitinant 200 μs impulsais, 280 mm/s greičiu. [11]



7 pav. Skylių gylis priklausomybė nuo impulso trukmės ir pikinės galios. [11]

1.3.1 AKTUALIOS SPECIFIKACIJOS, GAUTOS LAZERINIO GRĘŽIMO METU

Vienas aktualiausių parametru – išgaunamas kraštinių santykis (ang. aspect ratio). Anot IPC-T-50M kokybės standarto, mikrovija yra „akloji“ vija, kurios kraštinių santykis idealiu atveju yra 0,75:1 (through-hole vijos kraštinių santykis yra 10:1), skersmuo neviršija 150 μm.



8 pav. Mikrovijos kraštinių santykis. [13]

Natūraliai, ir mikrovijų dydis bei jų išdėstymo tankis yra svarbios specifikacijos spausdintų schemų užsakovams. Taip pat svarbu yra plokštės švarumas (paliktų nuosėdų kiekis) bei vidinis skylių glotnumas.

1.4 KITI LAZERINIO APDIRBIMO METODAI

Lazeris gali būti naudojamas ne tik vijų pragrėžimui. Tai svarbus įrankis lazerinio pjaustymo mašinoje, kuri naudojama plokščių depaneliavime, pjaustyme, atskirime. Tai tikslesnė alternatyva mechaniniams pjūklams. Plokščių lazerinė pjaustymo mašina naudoja aukštos galios šviesos pluoštą medžiagos pjaustymui.

Šaltos abliacijos (*ang. cold-ablation*) savybę turintys UV srityje spinduliuojantys lazeriai puikiai tinka plokščių depaneliavimui dėl mažos šiluminio poveikio zonos (*ang. HAZ - heat affect zone*). Tai leidžia lazerio pluoštu pjauti visiškai šalia elektrinių komponentų ir jų nepažeisti. Pavyzdžiui, CO₂ lazeris nėra tam tinkamas dėl išsiskiriančios per didelės šilumos sąveikos metu, kas gali sukelti komponentų apanglėjimą ir juos pažeisti. [11, 14, 15]

Iš kitos pusės, lazerinis pjaustymas turi ir savų minusų. Lazerinis depaneliavimas pasižymi lėtais ciklais, lyginant su mechaniniu pjautuvu. Tačiau išėigos gerinimas ir valymo žingsnio pašalinimas yra pakankamai svarbūs argumentai, kad atstotų tai. Taip pat atsiranda ribojimai pjaunamos medžiagos storiui. Jis neturi viršyti 2 mm. Tai bėgant laikui tampa vis mažiau svarbu, nes naujausios plokštės dažniausiai telpa į tokio storio reikalavimus. Pradinė investicija siekiant apdirbti medžiagas lazeriu taip pat yra didesnė dėl nemažos įrangos kainos lyginant su mechaniniais pjaustymo įrenginiais, tačiau ilginiui investicinė grąža viršija mechaninių alternatyvų, kurios reikalauja daugiau priežiūros ir ašmenų keitimo, grąžą. [15]

Lazeriai taip pat gali būti naudojami schemų ženklime. Tai yra svarbi spausdintų schemų gamybos dalis, siekiant, kad kompleksinės elektrinės grandinės ir jų komponentai būtų teisingai išdėlioti ant plokštės ir užtikrintų tinkamą jų sujungimą. Įprastai, schemas buvo pažymimos raidėmis ir skaičiais, tačiau dėl mažėjančio laisvo ploto ant plokštės, atsiranda tam tikrų apribojimų. Šviesolaidiniai lazeriai naudojami siekiant įterpti QR arba barkodus, į kuriuos galima sukišti daugiau informacijos, ant plokštės paviršiaus. Lazeriai taip pat pasižymi greitu tiek ženkliniu, tiek kodų nuskaitymu. Su jais galima per kelias sekundes išraižyti reikiamą informaciją nepažeidžiant aplink esančių komponentų lokacijų. [15, 16]

Lazerinis prikepinimas (ang. laser sintering) laikomas patrauklia priemone elektrinių komponentų tvirtinimui prie plokštės. Tai sukuria ilgaamžius, tvirtus ir pastovius ryšius gamybos metu ir užtikrina didesnę tikslumą lyginant su paprastu komponentų prilitavimu. Be lydmetalio pagamintos spausdintos schemas gali pasiūlyti ir geresnę plokštės stabilumą, ypač kalbant apie didelio tankio schemas. Tai atliekama, kai lazerio pluoštas nukreipiamas į miltelius, kurie turi sidabro dalelių. Spinduliuotės sukeliamas šiluminis poveikis yra pakankamas pasiekti miltelių lydymosi temperatūrą, o vėliau medžiaga sustingsta suformuodama tvirtą ryšį. [15]

1.5 FR4 MONTAŽINĖ PLOKŠTĖ

FR4 (*Flame retardant 4*) yra plačiai naudojama laminato medžiaga elektronikos pramonėje. Tai stiklo pluoštu stiprinta epoksido laminato rūšis, turinti puikias elektrinės izoliacijos savybes ir mechaninį stiprumą. FR4 dažniausiai naudojama montажinėms plokštėms kaip pagrindinė medžiaga ir žinoma dėl savo antipireninių savybių. Keletas svarbių faktų apie FR4 laminato medžiagą:

1. Sudėtis: FR4 susideda iš stiklo pluošto, prisotinto epoksido derva. Stiklo stiprinimas suteikia mechaninį stiprumą, o epoksido derva pasižymi puikiais elektrinės izoliacijos savybėmis.
2. Antipireniškumas: Viena iš pagrindinių FR4 savybių yra jos antipireniškumas. Ji atspari plintančioms ugnims ir savaime užsigesina, kai pašalinamas užsidegimo šaltinis. Ši savybė padaro FR4 tinkamą taikyti ten, kur svarbi priešgaisrinė sauga.
3. Elektrinė izoliacija: FR4 laminato medžiaga pasižymi aukšta elektrine izoliacija, todėl ji idealiai tinka PCB pagrindams. Ji turi didelį dielektrinį stiprumą ir mažą išsklaidos faktorių, leidžiantį atlaikyti didelę įtampą ir išvengti nutekėjimo srovės.
4. Mechaninis stiprumas: Stiklo pluošto stiprinimas FR4 suteikia puikų mechaninį stiprumą, įskaitant didelį tempimą ir lankstumo stiprumą. Tai padaro FR4 patvaria medžiaga PCB, kuri gali atlaikyti mechanines įtampas per tvarkymą, montavimą ir veikimą.

5. Termiškas stabilumas: FR4 turi gera termišką stabilumą, leidžiantį jai atlaikyti įvairias darbo temperatūras. Ji gali atlaikyti elektroninių komponentų veikimo metu išskiriamą šilumą be reikšmingo degradavimo.
6. PCB taikymas: FR4 yra labiausiai naudojama medžiaga PCB pagrindams dėl jos elektrinių, mechaninių ir antipireninių savybių. Ji suteikia stabilų pagrindą elektroniniams komponentams montuoti ir palengvina elektrinių signalų maršrutizavimą.
7. Prieinamumas: FR4 laminato medžiaga plačiai prieinama elektronikos pramonėje ir siūloma įvairiais storio, vario svorio ir paviršiaus apdailos variantais, kad atitiktų konkrečius taikymo reikalavimus.[17, 18]

2. TYRIMO METODIKA

2.1 DARBE NAUDOJAMOS PRIEMONĖS

1. Lazeriniam gręžimui naudojamas „UAB Light Conversion“ pagamintas femtosekundinės trukmės impulsus generuojantis lazeris „Pharos“. Kietojo kūno Yb:KGW lazerio parametrai nurodyti 1 lentelėje.

1 lentelė. „UAB Light Conversion“ lazerio „Pharos“ pagrindinės charakteristikos [19]

Maksimali išėjimo galia	10 W
Impulso trukmė	300 fs
Impulso trukmės reguliavimo diapazonas	290 fs – 10 ps
Maksimali impulso energija	0,2 mJ
Impulsų pasikartojimo dažnis	200 kHz
Centrinis bangos ilgis	1030 nm
Poliarizacija	Tiesinė
Pluošto kokybė	TEM ₀₀ ; M ² < 1,2
Pluošto diametras	3,3 ± 0,3 mm

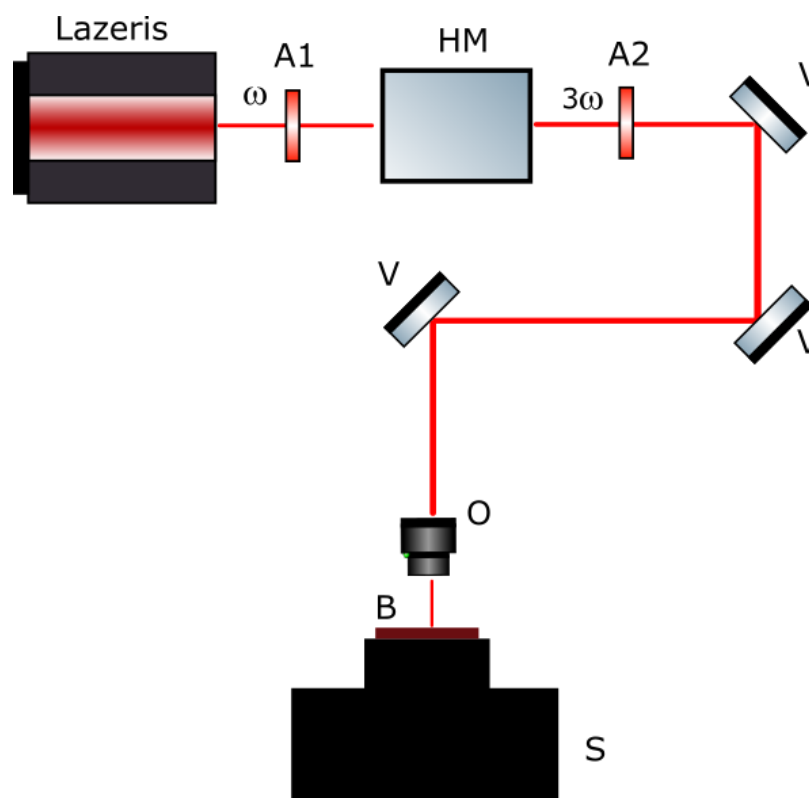
2. Harmonikų modulis, kuriame sugeneruojama tyrimo metu naudota trečia harmonika (343 nm).
3. Atenuatoriai, skirti kontroliuoti impulso energiją.
4. Fokusavimui naudotas LMU-10X-UVB objektyvas (Thorlabs), kurio efektyvusis židinio nuotolis yra 20,5 mm, skaitinė apertūra 0,24. Juo pluoštas sufoksuotas į 7.14 μm skersmens tašką.
5. Bandinys pritvirtintas prie pozicionavimo stalo (Aerotech), kuris judėjo X ir Y ašimis, taip leisdamas judinti bandinį pluošto atžvilgiu. Tyrimo metu Z ašies pozicija išliko nekintanti.
6. Bandinys buvo 1,8 mm storio standartinė FR4 montažinė plokštė, pagaminta iš stiklotekstolito.
7. Sistemos (tiek lazerio, tiek pozicionavimo stalo, tiek atenuatorių) valdymas atliktas kompiuteriu, SCA (Workshop of Photonics) programine įranga.
8. Lazериu atlikus gręžimą rezultatai stebimi ir registruojami optiniu profilometru „Sensorfar PLμ2300“, optiniu mikroskopu bei skenuojančiu elektronų mikroskopu.

2.2 TYRIMO EIGA

Tyrimo metu bandinys apšaudytas lazeriniais impulsais keičiant spinduliuotės parametrus:

- Siekiant išsiaiškinti terminės akumuliacijos įtaką ir palyginti spinduliuotės įtėkio įtaką bandiniui, tirtas bandinys apšaudytas skirtingomis energijomis, dažniais ir impulsų kiekiais;
- Palyginta, kokia įtaka bandiniui gaunama tam pačiam akumuliuotam dozės tankiui, tačiau per skirtingą impulsų kiekį, kritus ant bandinio.

Sujustiravus opinę sistemą, stiklotekstolito bandinys dedamas ant pozicionavimo stalelio. Prie šio prijungtas suspaustas oras, kartu su vakuuminiu padėklu, neleidžia kristalo plokštei judėti. Naudojant „SCA“ programinę įrangą, skirtą lazerinėms sistemoms valdyti, parašomas algoritmas lazeriniam gręžimui atlikti. Bandinio paviršiuje atliekamas gręžimas. Principinė tyrimo schema pateikta 16 pav.



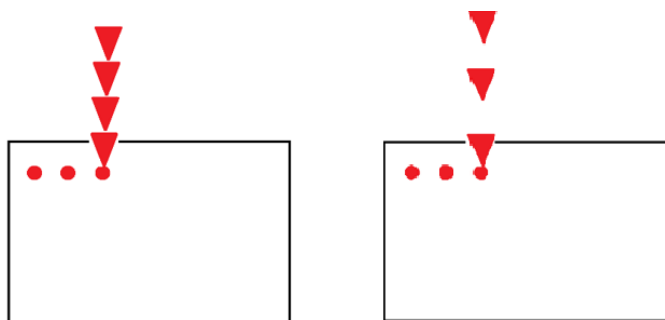
9 pav. Principinė eksperimento schema. Lazeris – Pharos kietakūnis lazeris, A1 ir A2 – pirmos ir trečios harmonikos atenuatoriai, HM – harmonikų modulis, V – veidrodžiai, O – fokusavimo objektyvas, S – pozicionavimo stolas, judantis X ir Y ašimis, B – bandinys.

Po gręžimo bandinys analizuojamas profilometru, optiniu bei skenuojančiu elektronų mikroskopu.

2.2.1 DAŽNIO, SPINDULIUOTĖS ĮTĖKIO IR IMPULSŲ KIEKIO ĮTAKA IŠGRĖŽTŲ KRATERIŲ DYDŽIAMS BEI TERMINEI AKUMULIACIJAI

Naudojant programinę įrangą SCA parašytas pozicionavimo stalo valdymo algoritmas ir bandinio paviršius apšaudytas paveikiant lazerine spinduliuote perkusijos metodu, t.y. impulsai suleidžiami į vieną tašką. Buvo sukurti kraterių rinkiniai 1×10 , taip išgręžiant 10 kraterių ties nekintančiu parametru rinkiniu. Tai reiškia, kad nustačius vieną galią ir dažnį padaroma 10 kraterių, bandinys paslenkamas, kad spinduliuotė būtų nutaikyta į nepaveiktą vietą, pakeičiama, pavyzdžiui,

galia ir padaroma kiti 10 kraterių. Užregistruotos vertės suvidurkintos. Šitaip keičiant spinduliuotės parametrus siekta surasti efektyviausią gręžimo režimą. Teorinis matricos atvaizdavimas pateiktas 10 paveiksle.



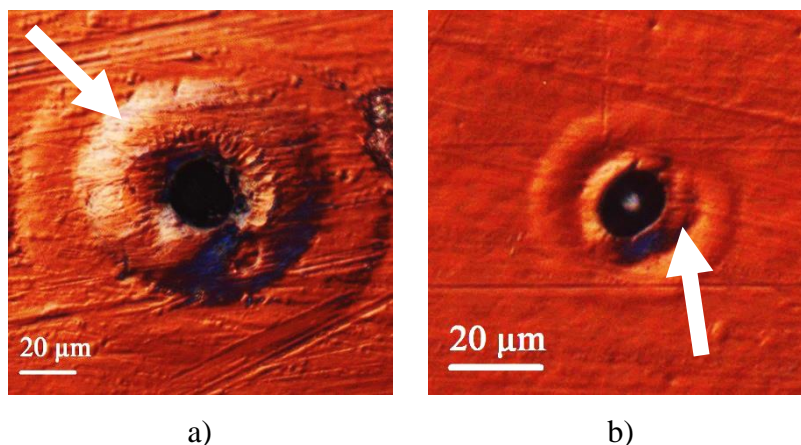
10 pav. Teorinis apdirbimo, kurio metu keičiama kritės spinduliuotės įtėkis ir lazerio pasikartojimo dažnis, matricos atvaizdavimas.

Tyrimo metu siekta išsiaiškinti, kaip skirtingų parametrų spinduliuotė paveikia bandinio paviršių, atsižvelgiant į keletą aspektų: terminio poveikio zoną, kraterio gylį, diametrą bei išabliuotą tūrį. Visi matavimai atlikti optiniu mikroskopu, padarant paviršiaus nuotraukas ir vizualiai įvertinant, pavyzdžiui, terminio poveikio zonos diametrą, ir skenuojant profilometru. Apdirbimo metu naudoti lazerio parametrai pavaizduoti 2 lentelėje.

2 lentelė. Lazerio parametrai naudoti gręžimui.

Impulsų pasikartojimo dažnis, kHz	75	37.5	25	18.75
Lazerinės spinduliuotės centrinis bangos ilgis, nm	343			
Impulso trukmė, fs	300			
Impulso energija, μJ	2.67	2	1.33	0.66
Vidutinė galia, mW	200	150	100	50

Terminio poveikio zona įvertinta vizualiai, atsižvelgus į paviršiaus negrįžtamą pažeidimą. Tai galėjo būti ar pabangavimas, ar išsikėlimas, ar spalvos pakeitimas. Pavyzdžiai pavaizduoti 11 paveiksle:

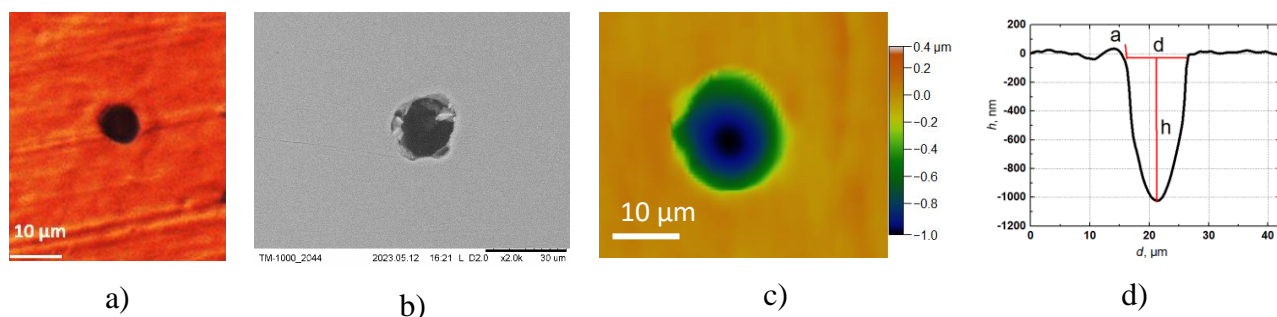


11 pav. Bandinio paviršiaus nuotraukos. Iš dešinės: a) išsikėlimas, b) pabangavimas.

11a paveiksle matomas bandinio paviršiaus išsikėlimas yra šalia kraterio esanti bandinio dalis, kuri nebuvo paveikta lazerine spinduliuote, tačiau dėl terminio poveikio gręžiant kraterį išsilydžiusi ir išsikėlusi dervos dalis. 11b paveiksle matomi ratilai, esantys aplink apdirbimo vietą. Tai terminio poveikio paviršiui sukeltas medžiagos lydymasis ir matomas *bangavimas* žiūrint iš apdirbto kraterio centro. Tai yra panašu į įkaitusią išsilydžiusią dervą, kuri slinka tolyn nuo kraterio, vėsta, o prieš ją atsiranda kita banga.

Kraterio diametras gautas įvertinus išmatavus gilesnės (juodos) pažaidos skylės diametrą.

Kraterio gylis ir išabliuotas tūris matuoti ir apskaičiuoti naudojantis profilometru gautais duomenimis. Šie duomenys analizuoti naudojant *Gwyddion* programinę įrangą, kuri leido skaitmeniškai atkurti kraterio skerspjūvį (12d pav.) bei apskaičiuoti jo (išabliuotą) tūrį. Kraterio gylis apskaičiuotas įvertinus skirtumą tarp jo dugno ir neapdirbto bandinio paviršiaus.



12 pav. Bandinio paviršiaus: a) nuotrauka, daryta optiniu mikroskopu, b) nuotrauka, daryta skenuojančiu elektronų mikroskopu, c) profilometru gauta topografija bei d) skerspjūvio profilis.

12d paveiksle raudonomis linijomis pažymėti dydžiai: a – užvarų aukštis, d – kraterio diametras, h – kraterio gylis.

Turint šiuos duomenis apskaičiuotas kraterių kraštinių santykis:

$$AR = \frac{h}{d} \quad (1)$$

Kur h – kraterio gylis, o d – kraterio diametras ties paviršiumi.

Sufokusuoto pluošto skersmuo apskaičiuotas naudojantis 2 formule:

$$s = \frac{1,27 \cdot M^2 \cdot \lambda \cdot F}{d} \quad (2)$$

sKur M^2 – pluošto kokybės parametras (vertė paimta iš lazerio specifikacijų lapo [20]), λ – spinduliuotės centrinis bangos ilgis, F – objektyvo židinio nuotolis ir d – pluošto prieš objektyvą skersmuo.

Spinduliuotės įtėkis apskaičiuotas su 3 formule:

$$J = \frac{2E}{\pi w^2} \quad (3)$$

Kur E – impulso energija, o w – pluošto spindulys.

Taip pat, turint išabliuotą tūrį, apskaičiuotos ir pavaizduotos abliacijos efektyvumo ir spartos priklausomybės nuo kritusios energijos bei dažnio. Abliacijos efektyvumas gautas taip:

$$\eta = \frac{V}{E} \quad (4)$$

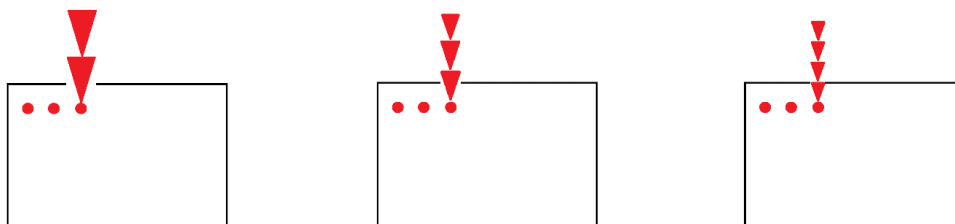
Kur η nurodo efektyvumą, V išabliuotą kraterio tūrį, o E kritusią energiją. Abliacijos efektyvumas nurodo kokios energijos reikėjo išabliuoti tam tikrą tūrio kiekį. Abliacijos sparta gauta taip:

$$\eta_0 = \frac{V}{En} \quad (5)$$

Kur n yra impulsų kiekis. Šis dydis nurodo vieno impulso abliavimo greitį, t.y. koks tūris medžiagos išsiabliuoja per impulsą.

2.2.2 IMPULSŲ KIEKIO ĮTAKA, KUOMET AKUMULIUOTAS DOZĖS TANKIS IŠLAIKOMAS PASOTVUS, IŠGRĘŽTŲ KRATERIŲ DYDŽIAMS BEI TERMINEI AKUMULIACIJAI

Atliekant analogiškus matavimus palyginta, kokia įtaka bandiniui gaunama tam pačiam spinduliuotės įtėkiui, tačiau per skirtingą impulsų kiekį, kritus ant bandinio. Šiuo atveju sukurtos taškų matricos 10x10, taip išgręžiant 100 kraterių ties nekintančiu parametru rinkiniu. Tai reiškia, kad nustatius vieną galią ir dažnį padaroma 100 kraterių, bandinys paslenkamas, kad spinduliuotė būtų nutaikyta į nepaveiktą vietą, pakeičiama, pavyzdžiui, galia ir padaroma kiti 100 kraterių. Užregistruotos vertės suvidurkintos. Šitaip keičiant spinduliuotės parametrus siekta surasti efektyviausią gręžimo režimą. Teorinis matricių atvaizdavimas pateiktas 13 paveiksle.



13 pav. Teorinis apdirbimo, kurio metu buvo keičiamas impulsų kiekis ir išlaikytas pastovus spinduliuotės įtėkis, matricos atvaizdavimas.

Apdirbimo metu naudoti lazerio parametrai pavaizduoti 3 lentelėje.

3 lentelė. Lazerio parametrai naudoti grėžimui.

Impulsų pasikartojimo dažnis, kHz	99				
Lazerinės spinduliuotės centrinis bangos ilgis, nm	343				
Impulso trukmė, fs	300				
Impulso energija, μJ	4.65	2.32	1.55	1.16	0.46
Vidutinė galia, mW	460	230	153	115	46

3. TYRIMO REZULTATAI IR JŲ APTARIMAS

Siekiant įvykdyti darbo tikslus bei surasti optimaliausią gręžimo režimą, keičiant lazerio parametrus buvo išgręžtos kraterių matricos, rezultatai suvidurkinti ir pavaizduotos jų dydžių bei nuokrypių priklausomybės nuo tų parametrų. Rezultatuose išskiriami du rinkiniai priklausomybių: kraterio parametrų, kuriuose atsispindi jų gyliai, diametrai, tūriai ir kraštinių santykio vertės; bei kokybiniai, kuriuose atsispindi užvartų aukščio, terminio poveikio zonos diametro dydžiai. Taip pat prie kokybinio vertinimo galima priskirti standartinio nuokrypio vertes, kurios parodo kiek patikimi yra gauti rezultatai (mažas svyravimas – patikimas ir atvirkščiai).

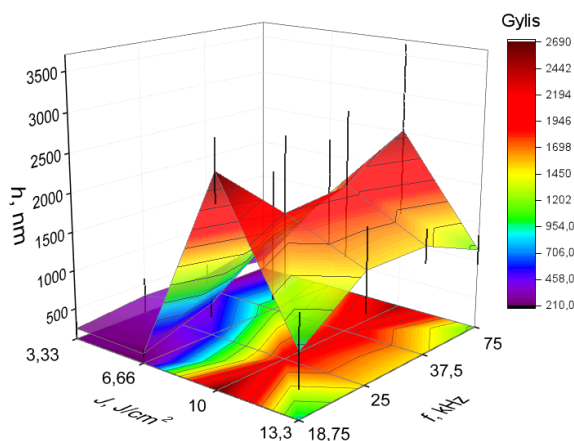
3.1 KRATERIŲ DYDŽIŲ BEI TERMINIO POVEIKIO PRIKLAUSOMYBĖ NUO KINTAMŲ SPINDULIUOTĖS ĮTĖKIO, PASIKARTOJIMO DAŽNIO BEI IMPULSŲ KIEKIO

Eksperimento metu lazerio vidutinė galia kito nuo 50 mW iki 200 mW, dažnis buvo keičiamas nuo 18,75 kHz iki 75 kHz, impulso trukmė išlaikyta stabili ties 300 fs, impulso energija keista nuo 0,66 μJ iki 2,67 μJ. Apskaičiuotas spinduliuotės įtėkis svyravo 3,3 J/cm² iki 13,3 J/cm². Lazerio pluoštas sufokusuotas į 7,14 μm skersmens tašką ant bandinio paviršiaus. Siekiant palyginti rezultatus tarp skirtingų impulsų kiekių atidėtos bendros priklausomybės nuo akumuliuoto dozės tankio, kuris nurodo visą į bandinio paviršių kritusios spinduliuotės dozę ir apskaičiuojamas taip:

$$E = J \cdot n \quad (6)$$

Kur E – akumuliuotas dozės tankis, J – įtėkis ir n – impulsų kiekis.

Analizuojant rezultatus dėmesys skiriamas ir jų patikimumui, t.y. kokie gauti paklaidų rėžiai ties kiekvienu rezultatu, tačiau dėl patogumo atvaizduojant rezultatus priklausomybėse ir pastebint tam tikrus dėsningumus paklaidos nėra pažymėtos. Pavyzdys su paklaidomis pavaizduotas 14 paveiksle.

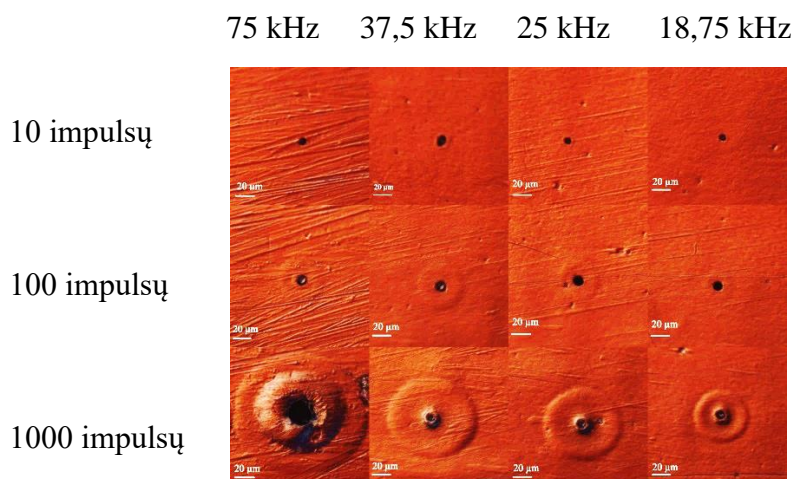


14 pav. Kraterio gylio (h) priklausomybė nuo kirtusio impulso įtėkio (J) ir pasikartojimo dažnio (f) su pavaizduotomis paklaidomis.

Reikia paminėti, kad apdirbant 1000 impulsų ir žemiausia energija per mikroskopus krateriai matėsi normaliai, tačiau profilometras be aiškios priežasties topografijos nesugebėjo atvaizduoti, todėl šis rezultatų rinkinys išimtas iš analizės.

3.1.1 KRATERIO KOKYBĖS PARAMETRŲ PRIKLAUSOMYBĖS

Bandinį apšaudžius $13,3 \text{ J/cm}^2$ įtėkio impulsais prie skirtingų dažnių ir impulsų kiekio optiniu mikroskopu gaunamas vaizdas matomas 15 paveiksle.



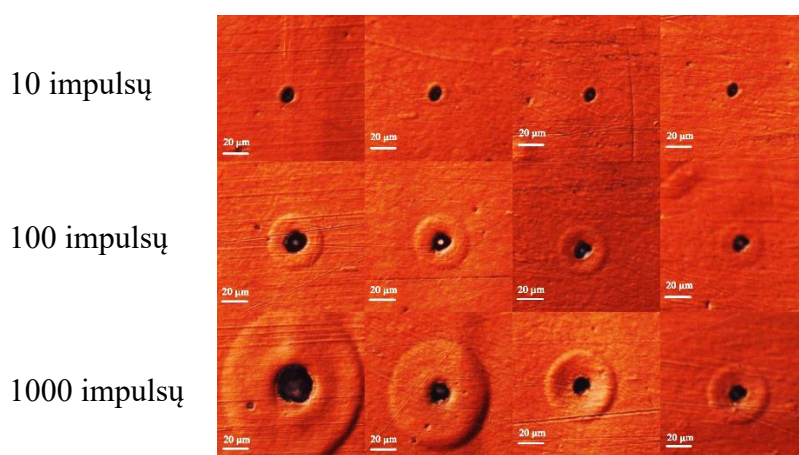
15 pav. Mikroskopu gauta bandinio paviršiaus nuotrauka prie skirtingų dažnių ir impulsų kiekių, kai į bandinį nukreipiami $13,3 \text{ J/cm}^2$ įtėkio impulsai.

Iš 14 paveikslo matome, kad vizualiai labiausiai išsiskiria krateriai, gauti bandinį paveikus 1000 impulsų, 75 kHz – terminis poveikis šiuo režimu yra akivaizdžiai didžiausias. Kitais dažniais paveiktų kraterių vaizdas po 1000 impulsų tarpusavyje atrodo gan panašiai, skiriasi tik terminis poveikis, ir tai leidžia daryti prielaidą, kad krateriai gręžiami kokybiškiau (su mažesne terminio poveikio zona bei žemesnėmis užvartomis). Kraterio diametras taip pat atrodo didžiausias ties aukščiausiu dažniu, likę krateriai atrodo panašiai.

Žvelgiant į bandinio paviršių po mažiau impulsų (10 ir 100) iš mikroskopo nuotraukų didelį skirtumą pamatyti sunku, tačiau matosi, jog paviršius yra labiau išsikėlęs ties aukštesniais dažniais. Kraterių diametrai vizualiai atrodo panašiai ir beveik niekuo nesiskiria.

Bandinį apšaudžius 10 J/cm^2 įtėkio impulsais prie skirtingų dažnių ir impulsų kiekio optiniu mikroskopu gaunamas vaizdas matomas 16 paveiksle.

75 kHz 37,5 kHz 25 kHz 18,75 kHz

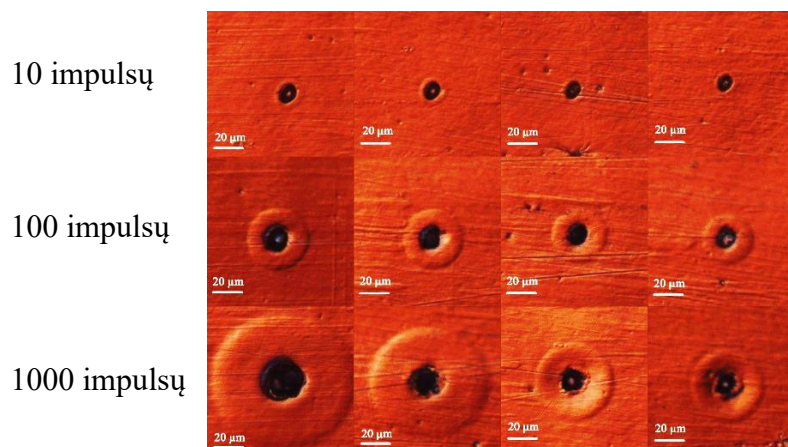


16 pav. Mikroskopu gauta bandinio paviršiaus nuotrauka prie skirtingų dažnių ir impulsų kiekių, kai į bandinį nukreipiami 10 J/cm^2 įtėkio impulsai.

Po 10 J/cm^2 impulsų aiškiausiai matomas skirtumas tarp skirtingų režimų – terminis poveikis, priklausęs nuo dažnio. Augant dažniui akivaizdžiai plėtėsi ir terminio poveikio zona. Šis efektas lengviausiai pastebimas prie didžiausių (1000) impulsų kiekių. Taip pat panašu, jog panašia priklausomybe didėja ir kraterio diametras. Ties mažesniais kiekiais krateriai atrodo gan panašiai su šiek tiek mažiau pastebima terminio poveikio zonos diametro augimo didėjant pasikartojimo dažniui tendencija.

Bandinį apšaudžius $6,66 \text{ J/cm}^2$ įtėkio impulsais prie skirtingų dažnių ir impulsų kiekio optiniu mikroskopu gaunamas vaizdas matomas 17 paveiksle.

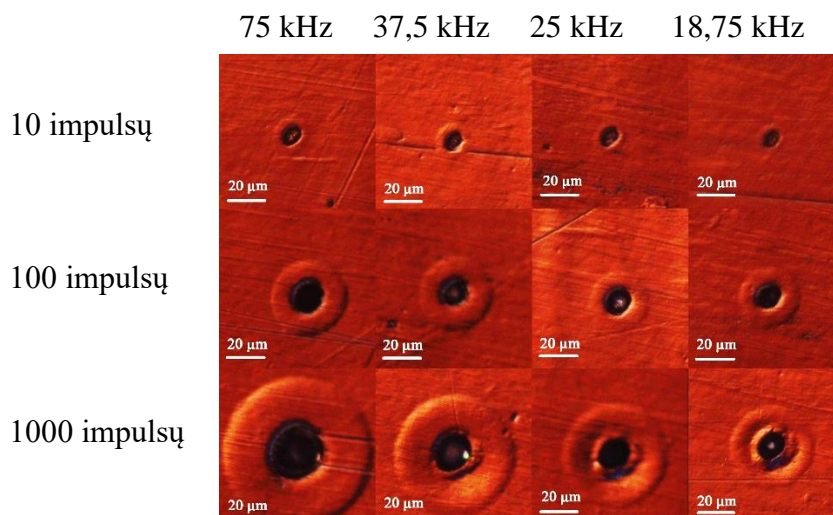
75 kHz 37,5 kHz 25 kHz 18,75 kHz



17 pav. Mikroskopu gauta bandinio paviršiaus nuotrauka prie skirtingų dažnių ir impulsų kiekių, kai į bandinį nukreipiami $6,66 \text{ J/cm}^2$ įtėkio impulsai.

Iš 17 paveiksle pavaizduotų paviršiaus nuotraukų matome tas pačias tendencijas kaip ir prie didesnių impulso energijų (16 pav.) – terminis poveikis ir kraterio diametras auga didėjant dažniui. Tai labiausiai pastebima prie 1000 impulsų veikos.

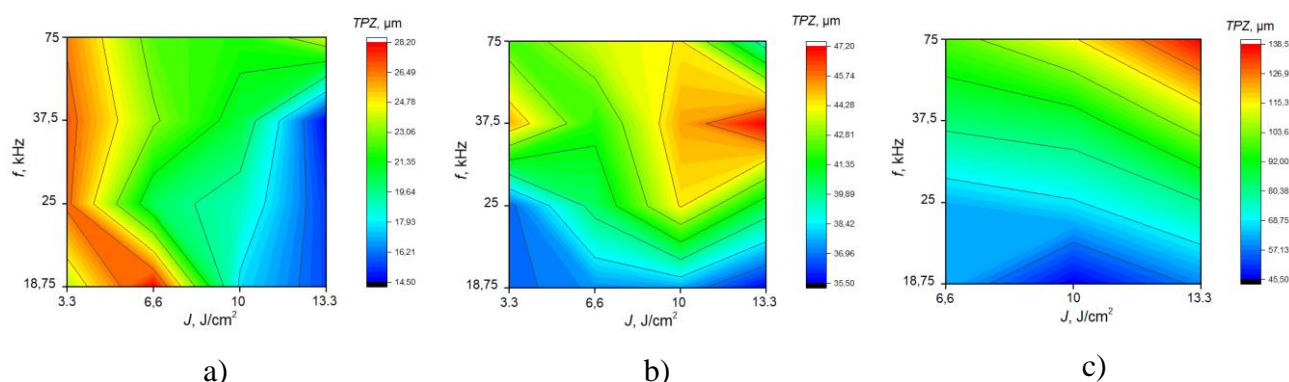
Bandinį apšaudžius 3,33 J/cm² įtėkio impulsais prie skirtingų dažnių ir impulsų kiekio optiniu mikroskopu gaunamas vaizdas matomas 18 paveiksle.



18 pav. Mikroskopu gauta bandinio paviršiaus nuotrauka prie skirtingų dažnių ir impulsų kiekių, kai į bandinį nukreipiami 3,33 J/cm² įtėkio impulsai.

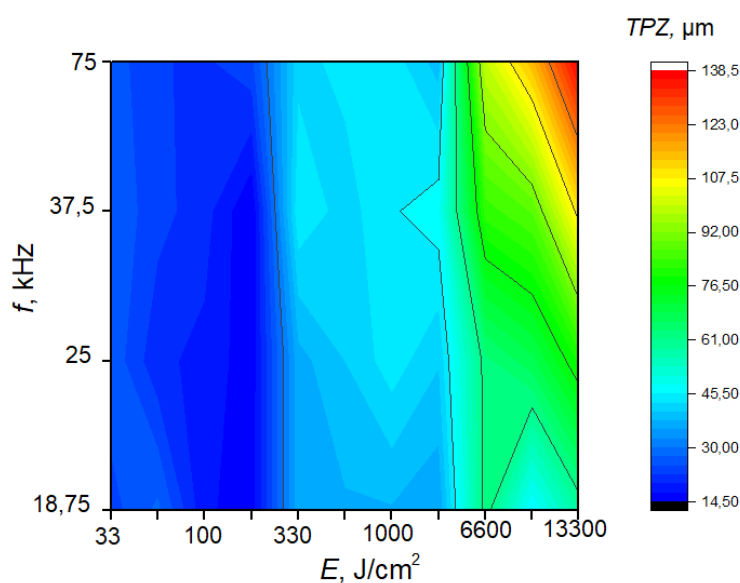
Su dar mažesne energija paveikus bandinį matome panašų dėsningumą kaip ir 17 bei 16 pav. Vizualiai krateriai tarp skirtingų dažnių atrodo labai panašiai. Galima tik pastebėti kintančią terminio poveikio zonoje esančią paviršiaus topografiją su atsirandančiais ratilais.

19 paveiksle pateikiamos kraterių kokybinių parametrų priklausomybės nuo spinduliuotės įtėkio ir dažnio prie skirtingų impulsų kiekių.



19 pav. Kraterio terminio poveikio zonos diametro (TPZ) priklausomybė nuo kirtusio impulso įtėkio (J) ir pasikartojimo dažnio (f) prie a) 10, b) 100, c) 1000 impulsų.

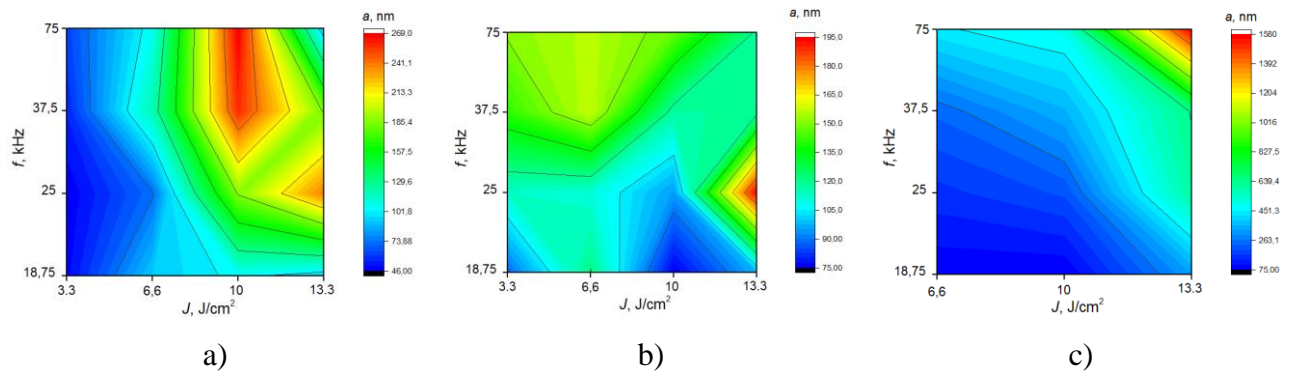
Atlikus matavimus ir rezultatų analizę, pastebime, kad ties 100 ir 1000 impulsų (19b ir 19c) matomas terminio poveikio paviršiu augimas didinant dažnį ir įtėkį ir pasiekia didžiausią vertę (138 μm) ties 13 J/cm^2 ir 75 kHz po 1000 impulsų. Žvelgiant į rezultatus gautus prie 10 impulsų (19a) matoma priešinga tendencija, kuomet terminis poveikis didžiausias prie mažesnio įtėkio. Atkreipiant dėmesį į standartinius nuokrypius pastebime, kad rezultatai gauti po 1000 impulsų yra sąlyginai patikimiausi, nes jų nuokrypis mažiausias, o ties 10 ir 100 impulsų matomi nemaži svyravimai. Svarbu pabrėžti, kad tarp skirtingų režimų paveikiant 100 impulsų matomų verčių vidurkiai tarpusavyje yra panašiausi (kinta tarp 35 ir 45 μm), bet standartiniai nuokrypiai gan nemaži, o po 1000 impulsų vidurkiai kinta nuo 63 μm iki 138 μm . Turint tai omeny, galima daryti išvadą, kad terminio poveikio zonos diametras didėja augant spinduliuotės įtėkiui bei pasikartojimo dažniui. Tuo leidžia įsitikinti ir 20 paveiksle pavaizduota bendra terminio poveikio zonos diametro priklausomybė nuo akumuliuoto dozės tankio ir dažnio.



20 pav. Kraterio terminio poveikio zonos diametro (TPZ) priklausomybė akumuliuoto dozės tankio (E) ir pasikartojimo dažnio (f).

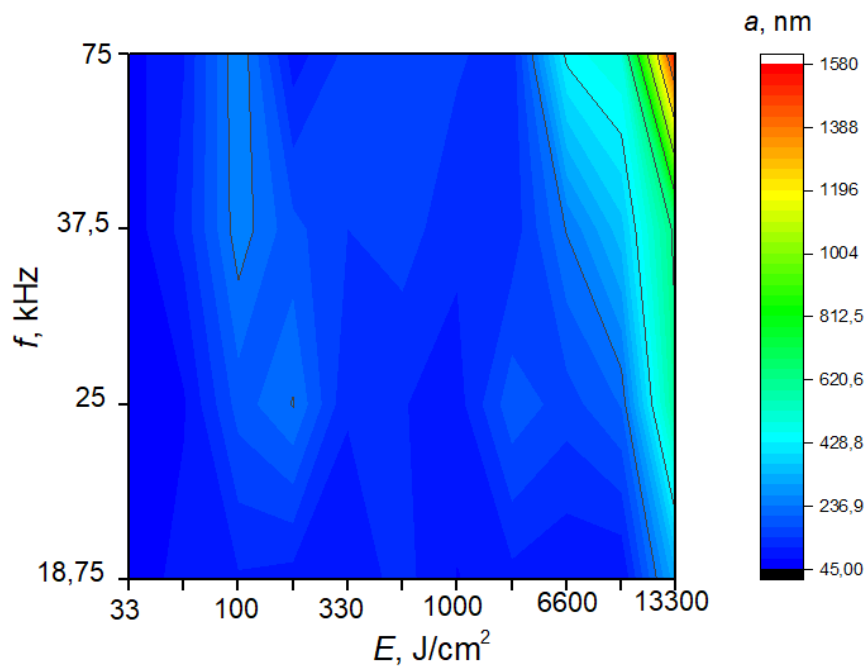
Pateikus bendrą vaizdą matome, kad kritus didžiausiam (13300 J/cm^2) įtėkiui terminio poveikio zona ryškiai iškilusi virš kitų režimų.

Gręžimo kokybė taip pat įvertinta atlikus užvartų aukščio matavimus ir analizę. Jų priklausomybė nuo įtėkio ir dažnio pateikiama 21 paveiksle.



21 pav. Kraterio užvartų aukščio (a) priklausomybė nuo kirtusio impulso įtėkio (J) ir pasikartojimo dažnio (f) prie a) 10, b) 100, c) 1000 impulsų.

Iš šių priklausomybių matome panašų vaizdą, analizuojant terminio poveikio zonos diametro priklausomybes – ties 1000 impulsų (21c) gręžimu matome tą pačią tendenciją, kuri rodo užvartų didėjimą augant įtėkiui ir dažniui. Ties 100 impulsų (21b) jokios tendencijos nėra, tačiau ties 10 impulsų (21a) matomas užvartų aukščio maksimumas ties mažesne įtėkio verte. Taip pat verta pastebėti, kad tas maksimumas yra didesnis (269 nm) palyginus su 100 impulsų maksimumu (195 nm). Toks rezultatas stebina, nes natūralu tikėtis didesnio terminio poveikio prie didesnio kirtusio įtėkio, tačiau šįkart taip nėra. Tą būtų galima bandyti aiškinti nehomogenišku paviršiumi, dėl kurio arba pats dydis gaunasi iškreiptas, arba skiriasi bandinio paviršiaus sugertis lazerinei spinduliotei. Vėlgi, atkreipiant dėmesį į standartinius nuokrypius matome tą patį vaizdą kaip ir terminio poveikio zonos diametro matavime, kuomet prie 1000 impulsų nuokrypiai gauti mažiausi, todėl galima daryti išvadą, kad tie duomenys yra patikimiausi. O tai reiškia, kad didinant spinduliuotės įtėkį ir pasikartojimo dažnį gręžimo kokybė krenta, nes prie aukščiausių įtėkio ir dažnio verčių terminis poveikis paviršiui didžiausias.

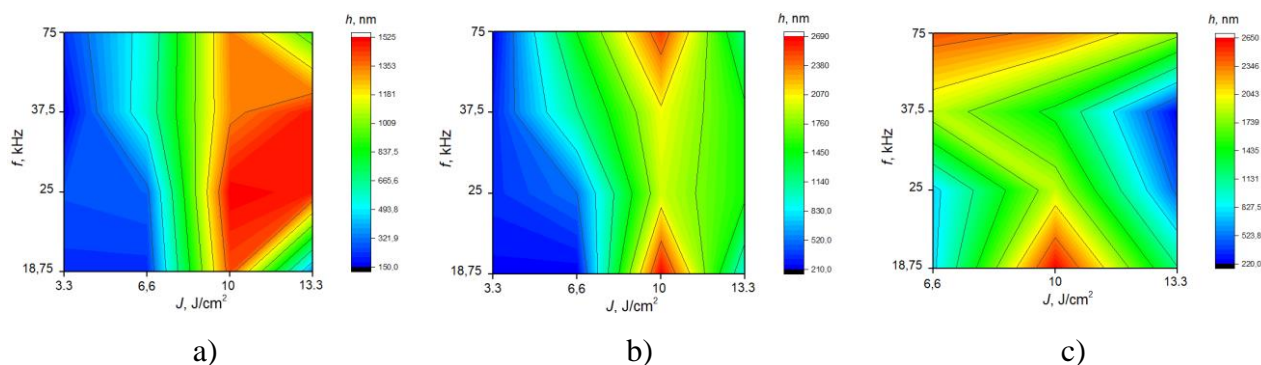


22 pav. Kraterio užvartų aukščio (a) priklausomybė nuo akumuliuoto dozės tankio (E) ir pasikartojimo dažnio (f).

Atidėjus bendrą priklausomybę matome, kad užvartų aukštis prie aukščiausių dažnio ir dozės tankio smarkiai lenkia kitus režimus, o turint tai omeny kartu su terminio poveikio zonos diametro priklausomybėm, tai reiškia, kad didinant spinduliuotės įtekį ir pasikartojimo dažnį gręžimo kokybė krenta, nes prie aukščiausių įtekio ir dažnio verčių terminis poveikis paviršiu didžiausias.

3.1.2 KRATERIO DYDŽIO PARAMETRŲ PRIKLAUSOMYBĖS

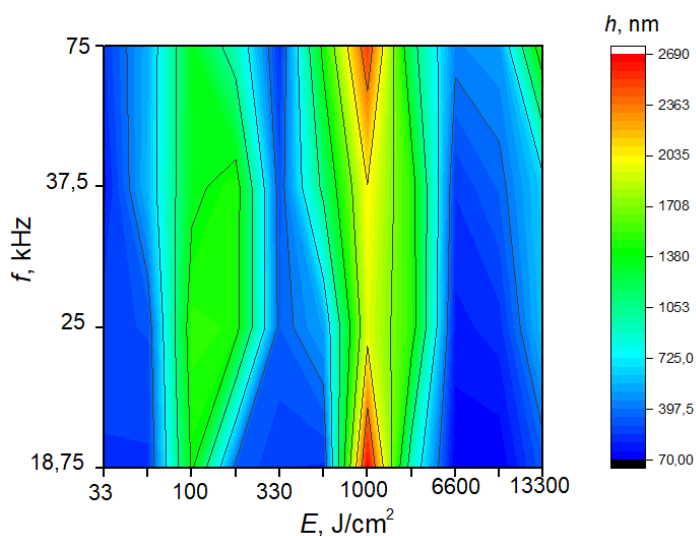
Toliau pateikiamos ir analizuojamos kraterio dydžio parametrų (gylis, diametro, tūrio, kraštinių santykio) priklausomybės nuo dažnio, spinduliuotės įtekio ir impulsų kiekio.



23 pav. Kraterio gylis (h) priklausomybė nuo kirtusio impulso įtekio (J) ir pasikartojimo dažnio (f) prie a) 10, b) 100, c) 1000 impulsų.

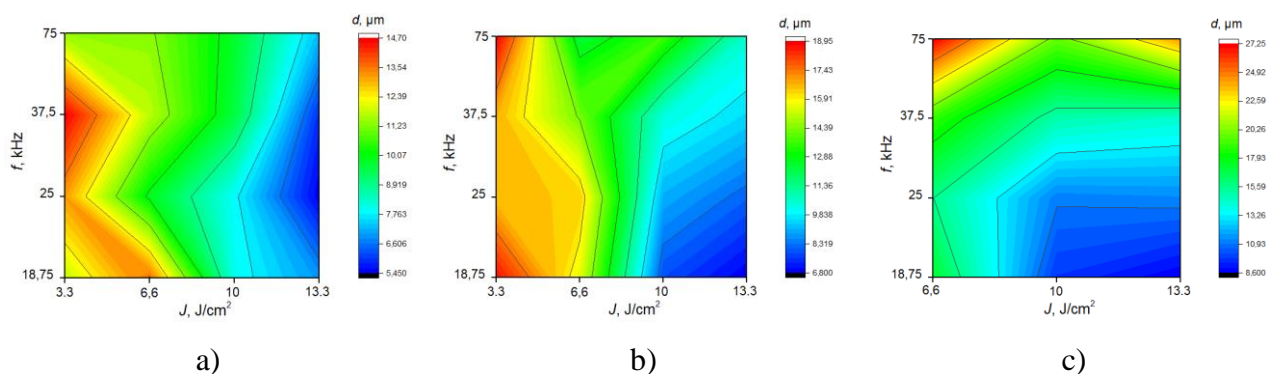
Lyginant kraterio gylis priklausomybes prie skirtingų impulsų kiekių, galima pastebėti, kad bandinį apšaudant daugiau impulsų kraterių gylis vidutiniškai gaunamas didžiausias ties 10 J/cm^2

impulso įtėkiu ir mažiausiu dažniu, o prie 10 impulsų ties didžiausia įtėkio verte. Labai specifiniais atvejais standartinis nuokrypis lyginant tarpusavyje rezultatus gautas gan nedidelis, todėl galima teigti, jog tie režimai, pavyzdžiui 10 J/cm² impulso įtėkiu ir 18,75 kHz paveikus 100 impulsų ar 6,66 J/cm² impulso įtėkiu ir 75 kHz paveikus 1000 impulsų, duoda patikimiausius rezultatus. Kadangi prie 100 ir 1000 impulsų atvejų maksimalios gylio vertės gautos prie to paties parametrų rinkinio (10 J/cm² impulso įtėkio ir 18,75 kHz pasikartojimo dažnio), galima daryti išvadą, jog giliausi krateriai išsigręžia būtent prie to paties impulso įtėkio ir mažiausio pasikartojimo dažnio. Tuo galima įsitikinti, kuomet pažvelgiame į bendrą gylio priklausomybę nuo akumuliuoto dozės tankio 24 paveiksle.



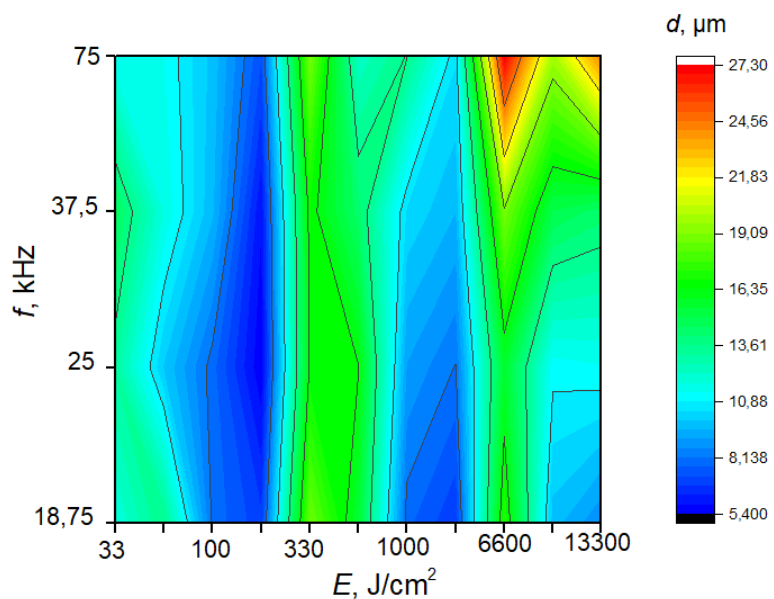
24 pav. Kraterio gylio (h) priklausomybė nuo akumuliuoto dozės tankio (E) ir pasikartojimo dažnio (f).

Šioje priklausomybėje matosi aiškus periodinis gylio svyravimas nuo spinduliuotės įtėkio, patvirtinantis, kad gręžiant su 10 J/cm² impulsais padaromi giliausi krateriai, o ir mažinant, ir didinant šią vertę gylis mažėja.



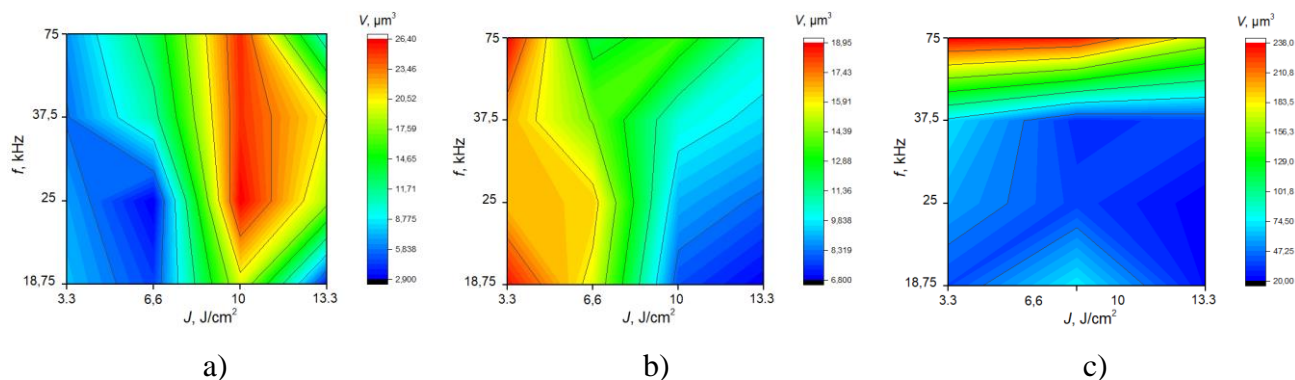
25 pav. Kraterio diametro (d) priklausomybė nuo kirtusio impulso įtėkio (J) ir pasikartojimo dažnio (f) prie a) 10, b) 100, c) 1000 impulsų.

Iš visais atvejais gautų diametro priklausomybių matome, jog vidutiniškai didžiausias kraterio diametras gaunamas prie mažesnių įtėkio verčių ir svyruoja tarp režimų atsižvelgiant į dažnius (pavyzdžiui prie 10 impulsų didžiausia vertė ties 37,5 kHz, prie 100 impulsų ties 18,75 kHz, o prie 1000 impulsų ties 75 kHz). Galima pastebėti, kad prie 1000 impulsų ties aukščiausia įtėkio verte ir aukščiausiu dažniu diametras taip pat yra gan panašus į prieš tai minėtą režimą, tačiau standartinis nuokrypis prie mažesnių įtėkio verčių yra taip pat mažesnis, tad tas rezultatas yra patikimesnis. Tai leidžia teigti, jog didžiausio diametro krateriai gaunami prie mažesnių impulso įtėkio verčių. Tai taip pat yra matoma bendrojoje priklausomybėje 26 paveiksle.



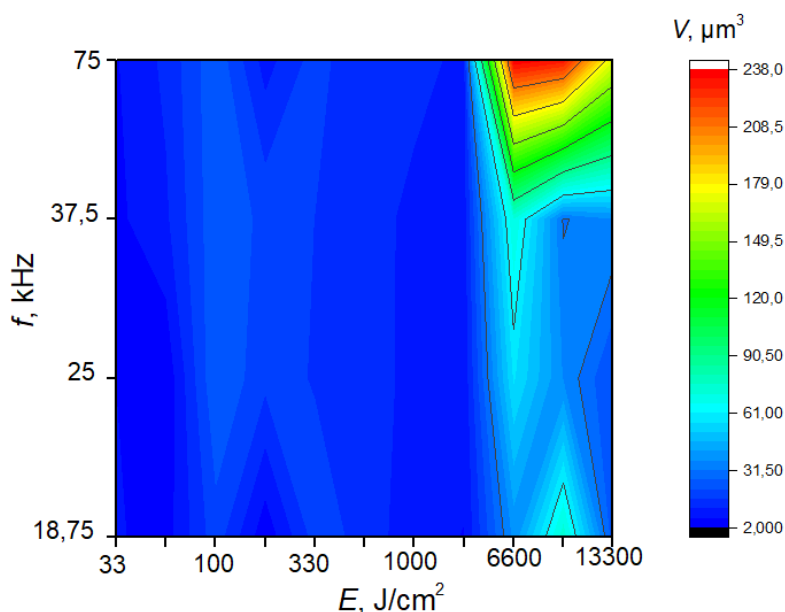
26 pav. Kraterio diametro (d) priklausomybė nuo akumuliuoto dozės tankio (E) ir pasikartojimo dažnio (f).

Šioje priklausomybėje panašiai kaip ir gylio priklausomybėje matome periodinį svyravimą, tik šikart maksimumai yra nebe prie 10 J/cm², o mažesniųjų įtėkio (6,66 ir 3,33 J/cm²) verčių.



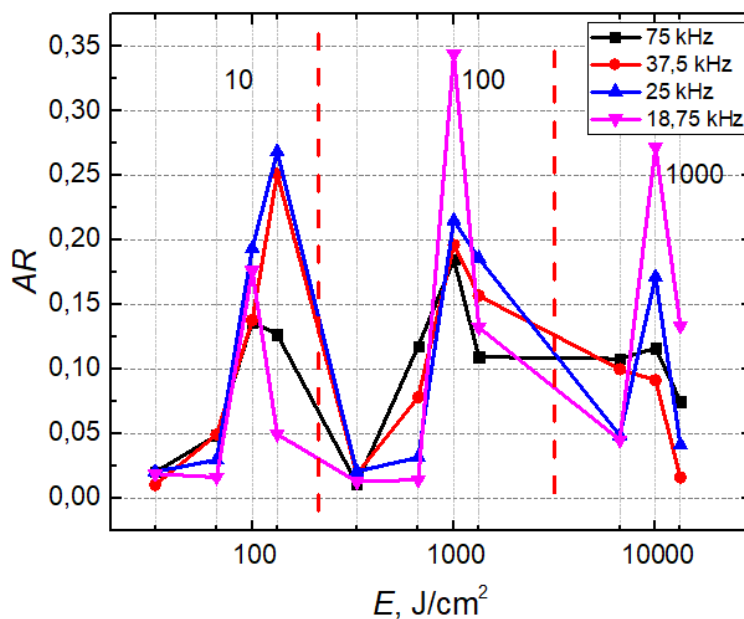
27 pav. Kraterio tūrio (V) priklausomybė nuo kirtusio impulso įtėkio (J) ir pasikartojimo dažnio (f) prie a) 10, b) 100, c) 1000 impulsų.

Analizuojant tūrio priklausomybes bendras tendencijas išvelgti galime tik prie 10 ir 100 impulsų, kur tūris pagrinde priklausė nuo įtėkio ir didžiausias vertes pasiekė ties 10 J/cm². Prie 1000 impulsų matoma kiek kitokia priklausomybė – nuo dažnio. Nuo įtėkio priklausomybę išvelgti sunku.



28 pav. Kraterio tūrio (V) priklausomybė akumuliuoto dozės tankio (E) ir pasikartojimo dažnio (f).

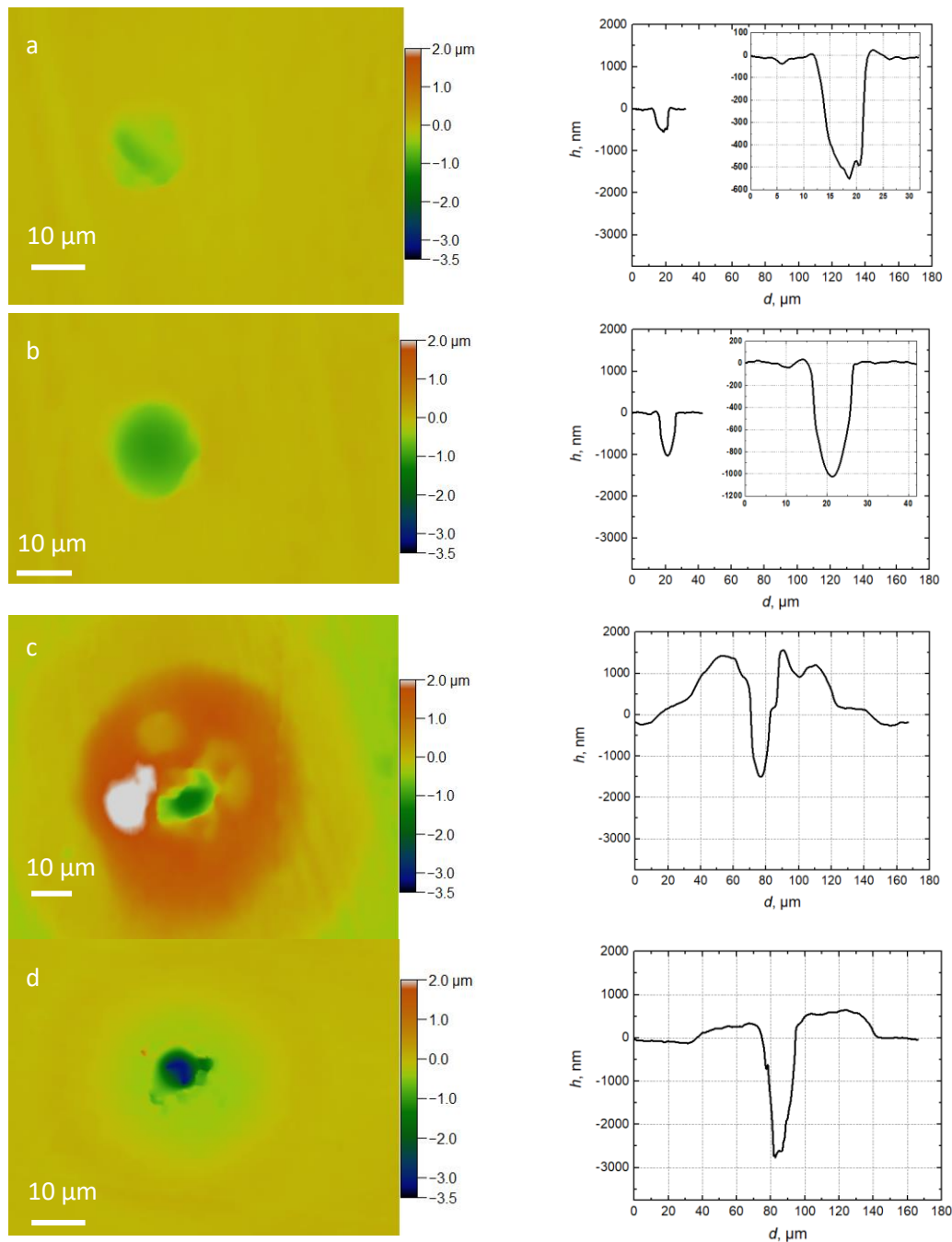
Iš bendro vaizdo matome tik tai, kad prie didžiausių dažnių ir įtėkių tūris buvo didžiausias, nes maksimumas ir po 100 impulsų pasiektas būtent ties 75 kHz. Nors standartiniai nuokrypiai neleidžia šių verčių laikyti patikimomis, bet išvada tokia, kad išabliuoto tūrio kiekis labiausiai priklausė nuo spinduliuotės pasikartojimo dažnio.

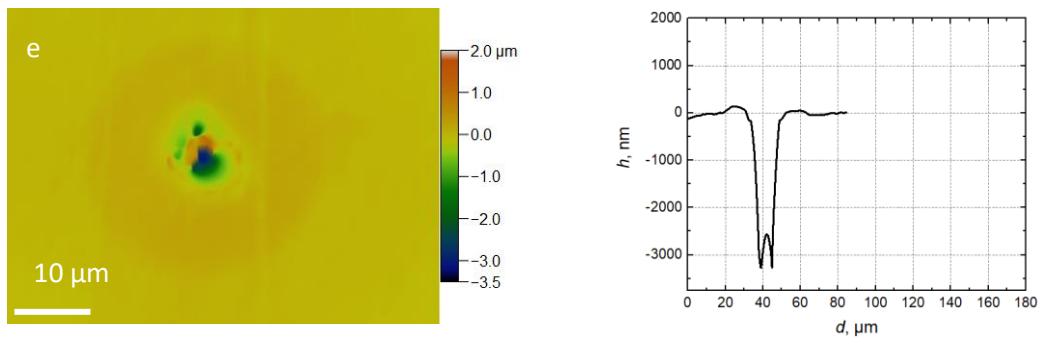


29 pav. Kraterio kraštinių santykio (AR) priklausomybė nuo akumuliuoto dozės tankio (E) ir pasikartojimo dažnio (f). Raudonais punktyrais atskirti skirtingi impulsų kiekiai.

Žvelgiant į kraštinių santykio priklausomybę nuo įtėkio galima pastebėti periodiškumą, kuris dar kartą įrodo prieš tai aptartas gylio bei diametro priklausomybes. Didesnė vertė rodo didesnę gylį ir mažesnę diametrą, kas šiuo atveju rodo efektyvesnę gręžimą, nes medžiaga yra abliuojama į gylį, o ne plotį – vėl gaunama 10 J/cm^2 įtėkio vertė ir žemiausia dažnio (18,75 kHz) vertė. Kol kas ši vertė nėra ypatingai aktuali, nes yra toli nuo literatūros apžvalgoje minimos 0,75 ribos.

Vizualiam kraterių palyginimui 30 paveiksle pateiktos jų topografijos su profiliais siekiant atskleisti prieš tai minėtas gręžimo tendencijas.

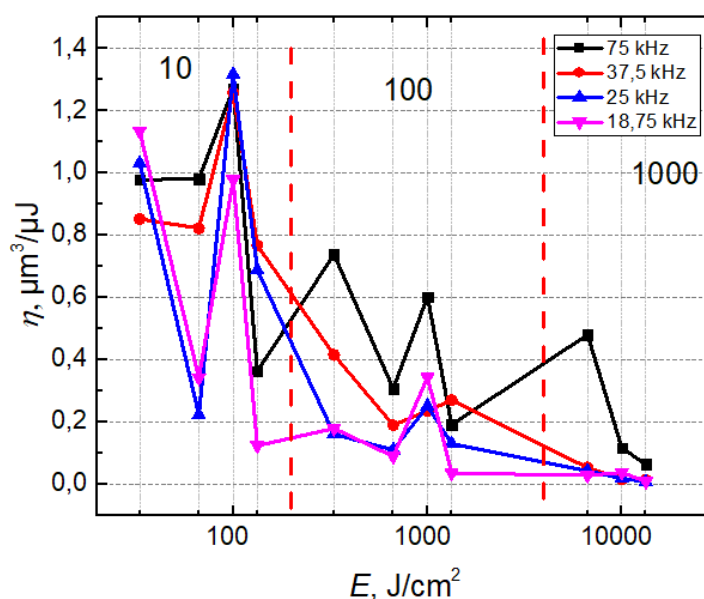




30 pav. Kraterių topografijos kairėje kartu su jų profiliais dešinėje po a) $13,3 \text{ J/cm}^2$ (10 impulsų, 75 kHz), b) $13,3 \text{ J/cm}^2$ (100 impulsų, 75 kHz), c) $13,3 \text{ J/cm}^2$ (1000 impulsų, 75 kHz), d) 10 J/cm^2 (1000 impulsų, 18,75 kHz), e) 10 J/cm^2 (100 impulsų, 18,75 kHz)

Lyginant profilius galima išskirti b ir e atvejus, kuomet bandinys apšaudymas tuo pačiu 100 impulsų, tačiau skirtingais dažniais ir bendromis įtėkio vertėmis. Kaip matome, bandinio paviršius į kurį krito mažesnis įtėkis buvo išabliuotas stačiau, t.y. labiau į gylį negu į plotį ir gauta gylio vertė e) atveju vidutiniškai buvo daug didesnė lyginant su b) atvejo režimu. Abiem atvejais gauti krateriai diametru smarkiai atsilieka nuo kraterių, gautų po 1000 impulsų – logiška. Tačiau gyliu vidutinės vertės gautos panašios (nors ir atvaizduoti pavieniai atvejai), o c) atveju netgi ir ryškiai mažesnė. Žvelgiant būtent į c) atvejį matome ryškiausią priežastį, kodėl grėžimas maksimalia naudota energija nebuvo toks efektyvus kaip pasirinkus silpnesnius impulsus – terminis poveikis bandiniui šiuo atveju yra didžiausias, gautas didžiausias šio poveikio zonos diametras ir milžiniškos užvartos, kurios vidutiniškai buvo net 1000 nm aukštesnės lyginant su kitu 1000 impulsų režimu – d) atveju. Tą galima bandyti paaiškinti dviem būdais:

- Per didelis terminis poveikis bandiniui ir paviršiuje esanti medžiaga smarkiai lydosi ir dalis jos tiesiog užverčia patį kraterį;
- Daugiafotonė sugertis – prie intensyviausių apdirbimo režimų daugiafotonė sugertis turi didžiausią tikimybę įvykti ir taip gali mažinti abliacijos efektyvumą.



31 pav. Kraterio abliacijos efektyvumo (η) priklausomybė nuo akumuliuoto dozės tankio (E) ir pasikartojimo dažnio (f). Raudonais punktyrais atskirti skirtingi impulsų kiekiai.

Galų gale tuo įsitikinama pamačius tą patį periodiškumą ir abliacijos efektyvumo priklausomybę. Čia vienintelis skirtumas yra tai, kad didžiausios vertės gautos prie didžiausių dažnių. Taip yra ir todėl, kad turi priklausomybę taip pat priklausė nuo dažnio ir būtent prie aukščiausių verčių išabliuotas tūris buvo didžiausias – tas atsispindi ir čia.

Abliacijos sparta nėra atvaizduota, nes tiesiog paslinktų vertes per 10, 100 ir 1000 kartų ir išryškintų ir taip matomą tendenciją.

Taigi, apibendrinant lazeriu išgręžtų kraterių dydžių ir kokybės parametru priklausomybes nuo kritusio spinduliuotės įtėkio, dažnio ir impulsų kiekio galima teigti, jog optimaliausias gręžimo režimas gautas dirbant su 10 J/cm² įtėkio ir 18,75 kHz pasikartojimo dažnio režimu. Būtent šiuo režimu gautais atvejais krateriai gręžti efektyviausiai, nes prie augančių dažnių bei įtėkio terminis poveikis bandiniui didžiausias bei prasideda intensyvesnė daugiafotonė sugertis, slopinanti abliaciją. Taip pat prie didelio terminio poveikio bandiniui galima pridėti ir didžiausius standartinius nuokrypius nuo vidurkių, o tai reiškia ir mažiau patikimus rezultatus.

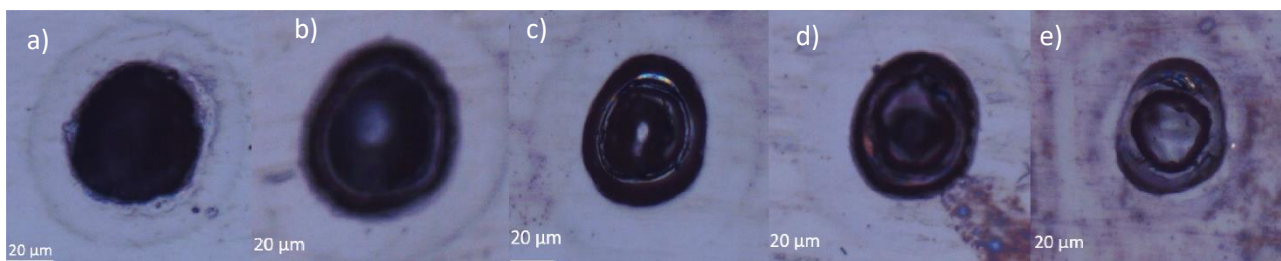
3.2 KRATERIŲ DYDŽIŲ BEI TERMINIO POVEIKIO PRIKLAUSOMYBĖ NUO IMPULSŲ KIEKIO, KAI AKUMULIUOTAS DOZĖS TANKIS IŠLAIKOMAS PASTOVUS

Šioje tyrimo dalyje siekta išsiaiškinti, kaip priklauso tie patys kraterių dydžių bei kokybės parametrai, kuomet bendras spinduliuotės įtėkis išlaikomas pastovus, keičiant tik impulsų kiekį (o kartu automatiškai ir impulso energiją), per kurį tas įtėkis krenta ant bandinio. Į bandinį kritusio akumuliuoto dozės tankio vertė – 2322,72 J/cm², kurie buvo padalinti per 100, 200, 300, 400 ir 1000

impulsų. Pasikartojimo dažnis išliko stabilus ties 99 kHz, o impulso energija kito nuo 0,46 μJ iki 4,65 μJ .

3.2.1 KRATERIO KOKYBĖS PARAMETRŲ PRIKLAUSOMYBĖS

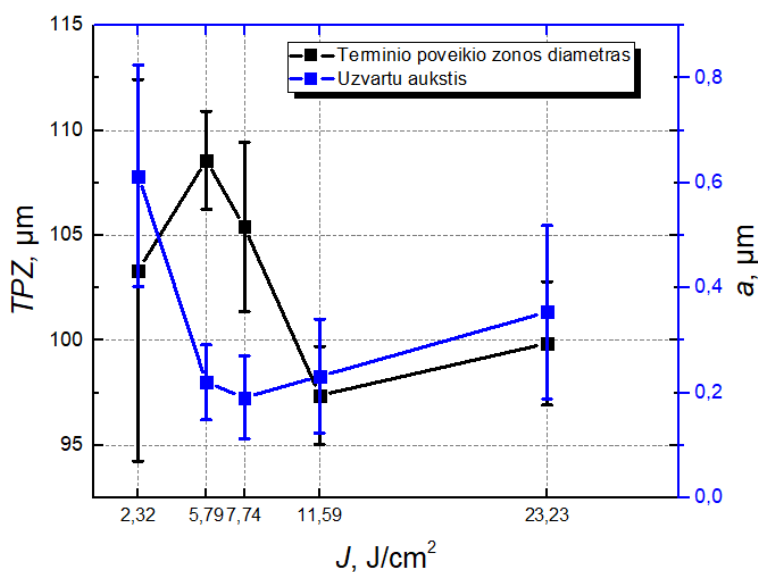
Bandinį apšaudžius minėtais parametrais, gauti 32 paveiksle matomos optiniu mikroskopu darytos nuotraukos.



32 pav. Mikroskopu gauta bandinio paviršiaus nuotrauka prie a) 100, b) 200, c) 300, d) 400 ir e) 1000 impulsų, kai akumuliuotas dozės tankis išlaikytas pasotvus.

Žvelgiant į mikroskopu darytas nuotraukas išvelgti ryškius skirtumus sunku – visi krateriai vizualiai atrodo panašiai, tik kai kurių vidinės struktūros matosi aiškiau, ypač prie daugiau impulsų gavusios bandinio dalies. Taip pat galima išvelgti ir nežymų terminio poveikio zonos diametro didėjimą augant impulsų skaičiui.

Norint pastebėti ryškesnius skirtumus pabandyta atvaizduoti ir paanalizuoti užregistruoti dydžiai. Terminio poveikio zonos diametro ir užvartų aukščio priklausomybės nuo impulso energijos pavaizduotos 33 paveiksle.

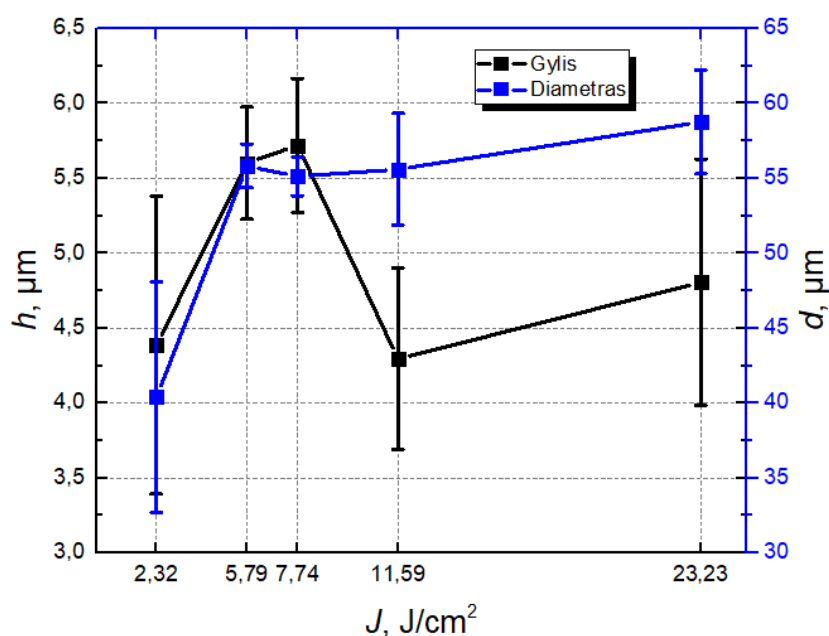


33 pav. Kraterio terminio poveikio zonos diametro (TPZ) ir užvartų aukščio (a) priklausomybė kirtusio impulso įtekio (J).

Iš šios priklausomybės matome, jog vidutiniškai didžiausias terminio poveikio zonos diametras gautas ties 1,16 ir 1,55 μJ . Šie duomenys atrodo ir patikimiausi, nes standartiniai nuokrypiai gauti mažiausi. Iš dalies toks rezultatas keistas, nes užvartų aukštis taip pat gautas mažiausias prie šių režimų. Apdirbimas ties 0,46 μJ davė rezultatus su didžiausiomis paklaidomis, kartu su gan didelėmis terminio poveikio bandiniui vertėmis, todėl tai galima laikyti kaip neoptimaliu režimu dirbti. Apdirbant su 2,32 μJ (200 impulsų) vidutiniškai davė kokybiškiausius rezultatus, turint omeny mažiausią terminio poveikio zoną, vidutinišką užvartų aukštį ir nedideles paklaidas.

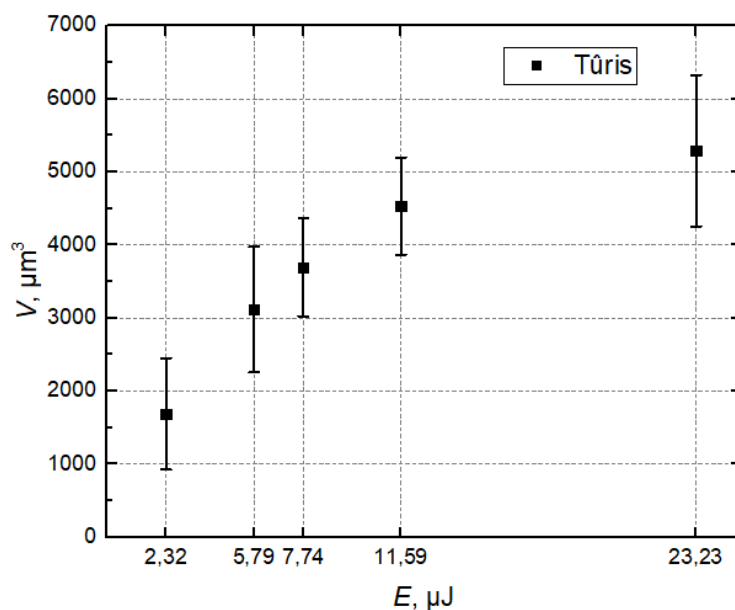
3.2.2 KRATERIO DYDŽIO PARAMETRŲ PRIKLAUSOMYBĖS

Toliau pateikiamos ir analizuojamos kraterio dydžio parametrų (gylio, diametro, tūrio, kraštinių santykio) priklausomybės nuo impulsų kiekio, kai dažnis ir spinduliuotės įtėkis išlaikomi pastovūs.



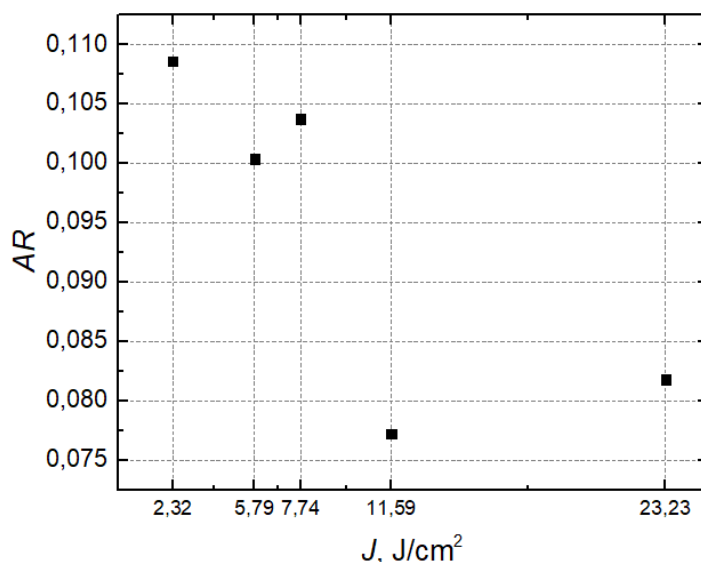
34 pav. Kraterio diametro (d) ir gylio (h) priklausomybė nuo kirtusio impulso įtėkio (J).

Iš šios priklausomybės matome, jog giliausi krateriai gauti tais pačiais atvejais, kaip ir aukščiausios užvartos – ties 5,79 ir 7,74 J/cm^2 (400 ir 300 impulsų). Taip pat šie režimai turėjo žymiai mažesnes paklaidas, lyginant ir su didesnės energijos spinduliuote, ir su mažesne, todėl galima teigti, jog grėžimas šiais režimais vyksta efektyviausiai. Vidutinės diametro vertės rodo, jog mažiausio diametro krateris gautas apšvietus 1000 impulsų su 2,32 J/cm^2 įtėkiu, taip pat su gan didelėmis paklaidomis šis režimas yra akivaizdžiai nepatikimiausias, nes diametro vertės ties kitomis energijų vertėmis (100-400 impulsų) svyruoja nedaug ir yra su gan panašiu standartiniu nuokrypiu.



35 pav. Kraterio tūrio (V) priklausomybė nuo kirtusio impulso įtekio (J).

Žvelgiant į išabliuoto tūrio priklausomybę nuo impulso energijos matome augimą didėjant impulso energijai, kuriame galima išvelgti sotinimąsi – su kiekvienu impulso energijos padidėjimu išabliuotas tūris vidutiniškai padidėja po vis mažesniu žingsniu. Taip pat 23,23 J/cm² impulso įtekio, kurio metu bandinys apšaudytas 100 impulsų rodo didžiausią standartinę nuokrypį, kuris verčia laikyti tokį rezultatą dar mažiau patikimu.

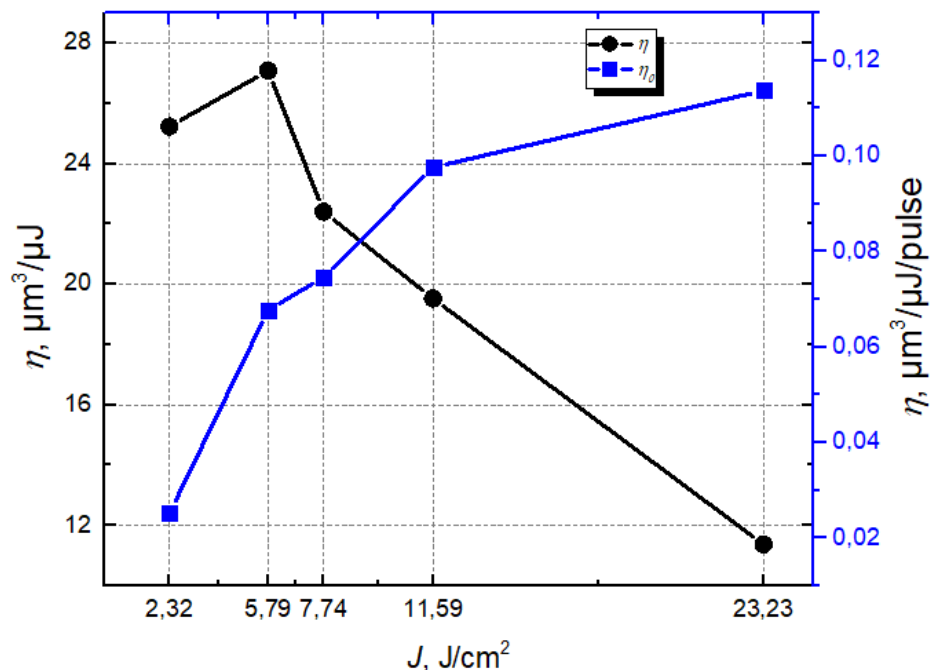


36 pav. Kraterio kraštinių santykio (AR) priklausomybė nuo kirtusio impulso įtekio (J).

Iš kraštinių santykio priklausomybės nuo impulso energijos galima pastebėti, jog mažiausias santykis gaunamas veikiant 11,59 J/cm² μJ (200 impulsų), vadinasi lazeris gręžia labiau į plotį negu į gylį, todėl negalima to laikyti patikimu režimu. Taip pat galima pastebėti, jog šiuo atveju

kraštinių santykio vertė auga mažėjant impulso įtėkiui. Vėlgi, kaip ir anksčiau, kraštinių santykio vertė iš esmės dar nėra tokia aktuali, nes ji yra toli nuo minėtos 0,75 ribos.

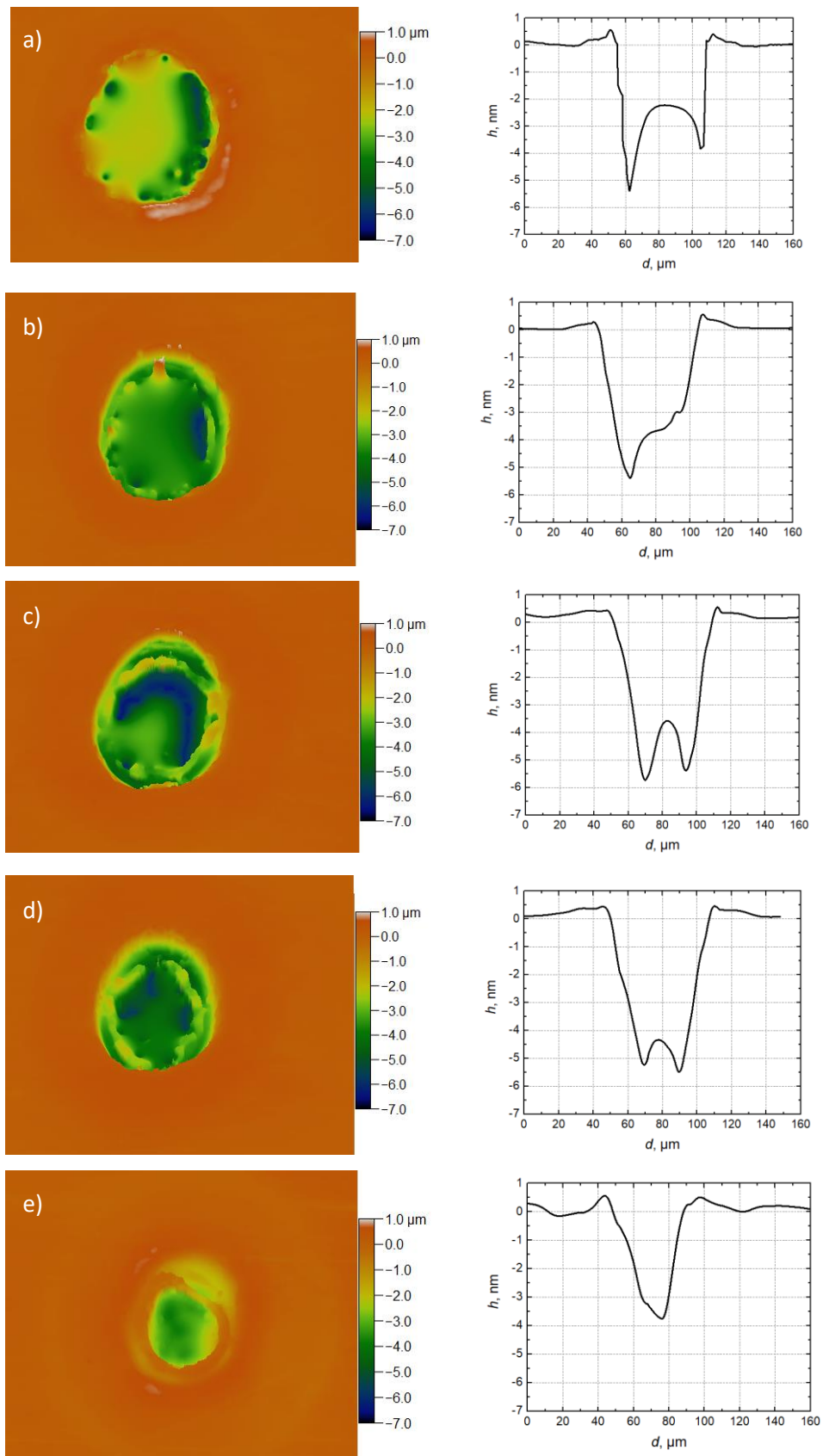
Siekiant išsiaiškinti, kuris režimas efektyviausiai abliavo tūrį, 37 paveiksle atidėtos abliacijos efektyvumo ir spartos priklausomybės nuo impulso energijos.



37 pav. Kraterio abliacijos efektyvumo (η) bei spartos (η_0) priklausomybė nuo impulso energijos (E).

Ši priklausomybė rodo, kad bandinys abliavosi efektyviausiai, tai reiškia, kad daugiausiai kubinių mikrometrų tūrio per kritusį mikrodžaulį spinduliuotės, kai buvo apšaudytas 400 impulsų po 5,79 J/cm², o sparčiausiai, tai reiškia, kad daugiausiai tūrio išabliuota per vieną impulsą, kai buvo apšaudytas 100 impulsų po 23,23 J/cm². Toks rezultatas yra logiškas, nes dirbant šiuo režimu vidutiniškai ir tūris buvo didžiausias, ir jam išabliuoti prirėikė mažiausiai impulsų. Tačiau tai nebūtinai reiškia optimalų gręžimą, nes tūris skaičiuojamas turint omeny tiek gylį, tiek diametrą. Be to, gautos vertės buvo su didžiausia paklaida. Nors ir gautos šiek tiek mažesnės gylio ir tūrio vertės, tačiau mažesni standartiniai nuokrypiai ir mažesnis terminis poveikis bandiniui verčia teigti, jog optimaliausias gręžimas gautas su 200 impulsų.

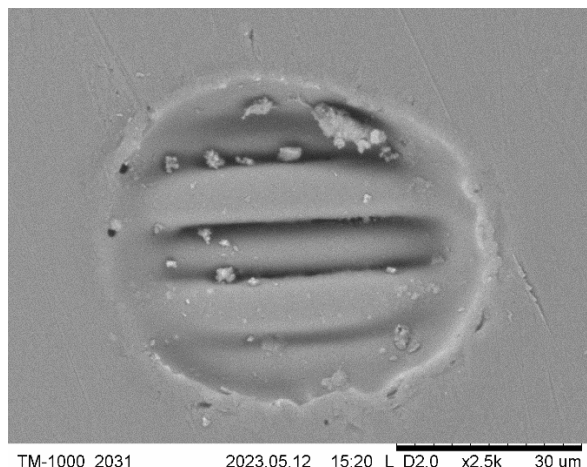
Vizualiam kraterių palyginimui 38 paveiksle pateiktos jų topografijos su profiliais.



38 pav. Kraterių topografijos kairėje kartu su jų profiliais dešinėje po a) 100, b) 200, c) 300, d) 400, e) 1000 impulsų.

Gautos topografijos iš esmės iliustruoja anksčiau padarytus pastebėjimus – visais atvejais krateriai gauti su ne itin žymiais skirtumais, išskyrus 1000 impulsų atvejį, kai visos dydžių

priklausomybės (gylio, diametro, tūrio) rodė mažiausias vertes. Nors verta pastebėti, jog kraterių kraštai šiuo atveju gauti glotniausi, palyginus su mažiau impulsų ir didesnių jų energija vykdytus gręžimus, kur buvo galima pastebėti visokius nelygumus. Taip pat ties 100 - 400 impulsų atvejais žvelgiant į profilius matomas iškilimas, kuris yra neišsiabliavęs stiklotekstolito audinys. Jis geriau matomas skenuojančiu elektronų mikroskopu darytoje nuotraukoje pateiktoje 39 paveiksle.



39 pav. Skenuojančiu elektronų mikroskopu daryta bandinio nuotrauka, kai krito 100 impulsų.

Panašu, kad audinio struktūra yra ties 4 μm gyliu, todėl nematoma ties 1000 impulsų veika, nes šiame režime kraterio gylis retai viršydavo šią vertę.

Visgi tai, kad tokia struktūra matoma, leidžia daryti išvadą, kad audinys galėjo pasimatyti dėl jo skirtingos sugerties charakteristikos lyginant su epoksidine derva – gręžimo metu aplink esanti derva abliuojasi greičiau už audinį. Tai gali būti problema ir lėtinti gręžimą – beveik visi krateriai daugmaž gauti 6 μm , o audinio struktūra galimai stabdė gilesnį gręžimą.

Ties didesniu impulsų kiekiu kraterijoje esantis iškilimas mažėja, tai leidžia pasvarstyti, kad gavęs daugiau impulsų audinys kažkiek abliuojasi, o tai prisideda prie optimalumo, kalbant apie 200 - 400 impulsų režimus. Iš esmės būtent šie režimai rodė geriausias rodiklius, o pridėjus neišabliuotą audinį ties 100 impulsų ir apskritai dažniausiai nepasiektą jo gylį ties 1000 impulsų, galima teigti, kad patikimiausiai veikė 5,79 – 11,59 J/cm^2 impulsų režimai, kurių metu bandinys paveiktas būtent 200 - 400 impulsais ir tarpusavyje ypatingai nesiskyrė.

IŠVADOS

1. Siekiant ištirti terminio poveikio įtaką bandiniui ir rasti optimalų gręžimo režimą, išanalizuoti skirtingais pasikartojimo dažniais ir spinduliuotės įtėkio vertėmis lazeriu išgręžti krateriai bei duomenys palyginti tarp skirtingų impulsų kiekių. Gauta, jog impulsų pasikartojimo dažnis smarkiai lemia terminį poveikį bandiniui, nes didžiausi terminio poveikio diametrai ir užvartų aukščiai vidutiniškai gauti prie aukščiausių tyrimo metu naudotų dažnių, o žemiausias tyrimo metu naudotas dažnis (18,75 kHz) davė kokybiškiausią rezultatą. Terminis poveikis bandinio paviršiui augo kylant dažniui, todėl pasirinkta mažiausia dažnio vertė – tinkamiausia mikrovijų gręžimui.
2. Tiriant gręžimo efektyvumo priklausomybę nuo skirtingų parametrų gauta, jog jis labiausiai priklauso nuo impulso įtėkio, ir pastebėta, kad efektyviausiai krateriai abliavosi ties specifine įtėkio verte – 10 J/cm^2 , nes tiek prie mažesnių, tiek prie didesnių įtėkio verčių matomas mažėjantis pragręžtas vidutinis gylis.
3. Gręžimo efektyvumo mažėjimas didinant impulso įtėkį galėjo atsirasti dėl dviejų dalykų: pirma tai didesnis terminis poveikis, kuris gali perlydyti bandinio paviršių ir taip užversti išgręžtą kraterį; ir antra – daugiafotonė sugertis, kuri suintensyvėja prie intensyvesnės lazerinės spinduliuotės ir gali neigiamai paveikti abliacijos spartą. Mažesnėms vertėms tiesiog trūksta intensyvumo efektyviai abliacijai.
4. Siekiant PCB plokštėje pragręžti mikroviją, reiktų naudoti kitą, tai yra ne perkusijos, o, pavyzdžiui, spiralinį, gręžimo režimą, nes pluoštas krateriui gilėjant išsifokusuoja.

LITERATŪRA

- [1] Bhunia, S. and Tehranipoor, M. (2019) 'Printed Circuit Board (PCB): Design and test', *Hardware Security*, pp. 81–105. doi:10.1016/b978-0-12-812477-2.00009-5.
- [2] Paul Eisler, *Wikipedia*, https://en.wikipedia.org/wiki/Paul_Eisler (2023-05-20).
- [3] Antti Salminen and Tony Vesterinen , "Laser processing of PCB", ICALEO 2004, M408 (2004) <https://doi.org/10.2351/1.5060329>
- [4] (2021-08-22) What is a Via? *PCB Directory*, <https://www.pcbdirectory.com/community/what-is-a-via> (2023-05-20)
- [5] Wright, Al, (2018-06-11) PCB vias – everything you need to know, *EPEC Engineering technologies*, <https://blog.epectec.com/pcb-vias-everything-you-need-to-know> (2023-05-17)
- [6] Via (electronics), *Wikipedia*, [https://en.wikipedia.org/wiki/Via_\(electronics\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Via_(electronics)) (2023-05-23).
- [7] PCB via: What is it and which type should you choose? *OurPCB*, <https://www.ourpcb.com/pcb-via.html> (2023-05-21).
- [8] (2022-01-21) What is microvia? *PCB Directory*, <https://www.pcbdirectory.com/community/what-is-a-microvia> (2023-05-21).
- [9] (2021-04-20) How does laser drilling work in PCBs? *Sierra circuits*, <https://www.protoexpress.com/blog/how-does-laser-drilling-work-pcb/> (2023-05-22)
- [10] E. K. W. Gan, H. Y. Zheng and G. C. Lim, "Laser drilling of micro-vias in PCB substrates," Proceedings of 3rd Electronics Packaging Technology Conference (EPTC 2000) (Cat. No.00EX456), 2000, pp. 321-326, doi: 10.1109/EPTC.2000.906394.
- [11] C. J. Moorhouse, F. Villarreal, J. J. Wendland, H. J. Baker, D. R. Hall ir D. P. Hand „Enhanced peak power CO2 laser processing of PCB materials“, Proc. SPIE 5827, Opto-Ireland 2005: Photonic Engineering, (2005 m. birželio 8 d.); <https://doi.org/10.1117/12.605096>.
- [12] Abboud, Jaafar. (2017). Material Response With High Power Laser in Surface Treatment of Ferrous Alloys.
- [13] PCB via design, *Sierra Circuits*, <https://www.protoexpress.com/kb/pcb-via-design/> (2023-05-22).
- [14] K.C. Yung, S.M. Mei, T.M. Yue, A study of the heat-affected zone in the UV YAG laser drilling of GFRP materials, *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 122, Issues 2–3, 2002.

- [15] How to use laser in PCB, *Rayming PCB & assembly*, <https://www.raypcb.com/pcb-laser/> (2023-05-22).
- [16] Laser systems. The revolution in PCB manufacturing, *Raylase*, <https://www.raylase.de/en/applications/laser-marking/pcb-manufacturing.html> (2023-05-22)
- [17] Azar, K., & Graebner, J. E. (n.d.). Experimental determination of thermal conductivity of printed wiring boards. Twelfth Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium. Proceedings. 1996
- [18] Sarvar, F., Poole, N. J., & Witting, P. A. (1990). PCB glass-fibre laminates: Thermal conductivity measurements and their effect on simulation. *Journal of Electronic Materials*, 19(12), 1345–1350. 1990
- [19] „UAB Light Conversion“ lazerio „Pharos“ specifikacijų lapas. <https://lightcon.com/product/pharos-femtosecond-lasers/#specifications> (2023-05-23)

SANTRAUKA

Paulius Janaščius

MONTAŽINIŲ PLOKŠČIŲ (PCB) MIKROGRĘŽIMAS FEMTOSEKUNDINIAIS LAZERIO IMPULSAIS

Montažinė plokštė yra plokštė, sudaryta iš kietos, plonos dielektrinės medžiagos (dažniausiai stiklo pluošto) ir turinti elektrai laidžius varinius takelius, kurie atstoja laidus tradicinėje elektros grandinėje, taip sutaupant labai daug vietos. Pasaulinis elektronikos prietaisų fizinio dydžio mažėjimas nulėmė tai, kad matome ir sparčiai mažėjantį jų montažinių plokščių dydį. Kylantys našumo ir dydžio reikalavimai privertė PCB gamintojus gaminti jas vis mažesnes, su tankiau išdėstytais kontaktiniais kanalais ir komponentais bei turėti vis daugiau sluoksnių, t.y. eiti į gylį. Komunikacijai tarp plokštės sluoksnių reikalingi vertikalūs kanalai – vijos. Dėl minėto absoliutaus dydžių mažėjimo populiarėja nauja vijų rūšis – mikrovijos. Mechaniniai grąžtai tampa nebe tokia našia darbo priemone, kokia buvo anksčiau prie didesnių vijų, jiems esant labai smulkiems dažnai sudyla ir sulūžta, todėl šiai paskirčiai pasirenkamas lazeris.

Šio darbo tikslas – ištirti femtosekundiniais lazeriniais impulsais gręžiamo bandinio paviršių keičiant lazerio impulso energiją, pasikartojimo dažnį, impulsų kiekį, palyginti rezultatus tarpusavyje ir surasti optimaliausią gręžimo režimą, kurio rezultatas būtų mažiausi nuokrypiai ir kokybiškiausi krateriai.

Atlikus tyrimą buvo nustatyta, kad optimalus gręžimo režimas yra, kai į bandinį krenta 10 J/cm^2 įtėkio impulsai ir mažiausias tyrimo metu naudotas pasikartojimo dažnis – 18,75 kHz, - nes gręžimas tokiais parametrais buvo efektyviausias (giliausi krateriai) ir kokybiškiausias (mažiausios paklaidos bei terminis poveikis).

SUMMARY

Paulius Janašcius

MICRO-DRILLING OF PRINTED CIRCUIT BOARDS (PCB) USING FEMTOSECOND LASER PULSES

A printed circuit board is a board made of a hard, thin dielectric material (usually fiberglass) and has electrically conductive copper tracks that replace the wires in a traditional electrical circuit, saving a lot of space. The global reduction in the physical size of electronic devices has led to the fact that we are also seeing a rapid reduction in the size of PCBs. Increasing performance and size requirements have forced PCB manufacturers to make them smaller and smaller, with more densely spaced contact channels and components, and to have more and more layers, i.e., go deep. Vertical channels - vias - are required for communication between the board layers. Due to the aforementioned absolute decrease in sizes, a new type of vias – micro-vias - is becoming popular. Mechanical drills are no longer as efficient a tool as they used to be for larger vias as they often rot and break when they are very tiny, so a laser is chosen for this purpose.

The purpose of this work is to study the surface of the sample drilled with femtosecond laser pulses by changing the energy of the laser pulse, the repetition frequency, the number of pulses, compare the results with each other and find the optimal drilling mode, which would result in the smallest deviations and the highest quality craters.

After conducting the study, it was found that the optimal drilling mode is when 10 J/cm^2 fluence pulses fall on the sample and the lowest repetition frequency used during the study - 18.75 kHz - because drilling with such parameters was the most efficient (the deepest craters) and the highest quality (the smallest errors and thermal effects).