

Vilniaus universitetas
Fizikos fakultetas
Kvantinės elektronikos katedra

Juozas Dudutis

STIKLO PJOVIMAS KŪGINE PRIZME SUFORMUOTU BESELIO-GAUSO PLUOŠTU

Magistrantūros studijų baigiamasis darbas

Lazerinės technologijos
studijų programa

Studentas

Darbo vadovas

Recenzentas

Katedros vedėjas

Juozas Dudutis

dr. Paulius Gečys

dr. Domas Paipulas

prof. habil. dr. Valdas Sirutkaitis

Vilnius 2016

TURINYS

Įvadas	3
1 Beselio-Gauso pluoštai	4
1.1 Beselio pluoštai	4
1.2 Beselio pavidalo pluoštų formavimo būdai	5
1.3 Beselio-Gauso pluošto formavimas realiomis sąlygomis.....	8
1.4 Beselio-Gauso pluošto transformavimas vaizdo perkėlimo sistema	12
2 Lazerinis skaidrių terpių apdirbimas	13
2.1 Spinduliuotės ir skaidrių medžiagų sąveika	13
2.2 Stiklo pjovimo metodai	16
2.3 Medžiagų apdirbimas Beselio pluoštais	20
3 Eksperimento įranga ir metodika	22
3.1 Eksperimento įranga, bandiniai ir jų charakterizavimas	22
3.2 Beselio-Gauso pluošto formavimas.....	23
4 Kūginė prizme suformuotas Beselio-Gauso pluoštas	24
4.1 Kūginės prizmės tyrimas	24
4.2 Kūginė prizme suformuoto Beselio-Gauso pluošto tyrimas.....	25
4.3 Beselio-Gauso pluošto už vaizdo perkėlimo sistemos tyrimas	30
5 Stiklo apdirbimas kūginė prizme suformuotu Beselio-Gauso pluoštu	33
5.1 Stiklo modifikacijų suformavimas tūryje	33
5.2 Pažeidimų formavimas skirtingame aukštyje bandinio tūryje.....	35
5.3 Stiklo įtrūkių formavimasis	37
5.4 Stiklo pjovimas 300 ps trukmės impulsais	41
5.5 Pjūvio sienelių šiurkštumo tyrimas	47
5.6 Stiklo pjovimas 10 ps trukmės impulsais	49
Pagrindiniai rezultatai ir išvados	51
Literatūros sąrašas	52
Rezultatų viešinimas	55
Santrauka lietuvių kalba	57
Santrauka anglų kalba / Summary	58

Įvadas

Stiklas yra chemiškai atspari, geras optines savybes turinti inžinerinė medžiaga, naudojama įvairiose srityse: architektūroje, optikoje, medicinoje, telekomunikacijose, automobilių pramonėje, saulės elementų, elektronikos, mikroelektronikos, mikrofluidinių ir mikrooptinių prietaisų gamyboje.

Stiklas gali būti apdirbamas įvairiais mechaniniais ir lazeriniais metodais [1]. Naudojant lazerinius šaltinius, apdirbimo procesus galima suskirstyti pagal naudojamą bangos ilgį, impulsų trukmę, pluošto ir medžiagos sąveikos pobūdį, pluošto skenavimo techniką. Pjovimo metodai gali būti suskirstyti į tiesioginę lazerinę abliaciją [2], raižymą ir laužimą [3], apdirbimą nuo priešingos bandinio pusės [4, 5], apdirbimą formuojant modifikacijas stiklo tūryje ir taikant terminius arba mechaninius perpjautų detalių atskyrimo būdus [6, 7].

Lazerinė abliacija yra tikslus ir lankstus medžiagų apdirbimo metodas, tačiau jo efektyvumą riboja abliacijos produktų akumuliacija ant bandinio, plazmos ir spinduliuotės sąveika, terminis poveikis aplinkinėms sritims. Nesudėtingus kontūrus kur kas efektyviau išpjauti formuojant modifikacijas – defektus stiklo tūryje ir panaudoti mechaninį detalių atskyrimą. Vienas iš perspektyvių tokių modifikacijų formavimo metodų yra Beselio pavidalo pluoštų panaudojimas.

Beselio pluoštai yra tikslūs Helmholco lygties sprendiniai [8], todėl nepatiria difrakcijos sąlygoto plitimo, o jų skirstinys yra sudarytas iš intensyvios centrinės smailės ir be galo didelio skaičiaus aplinkinių žiedų. Eksperimentiškai tokio pluošto suformuoti neįmanoma, nes tam reiktų begalinės energijos ir be galo didelių apertūrų. Praktikoje yra generuojami Beselio-Gauso pluoštai, nedifraguojantys tik ribotame sklidimo nuotolyje. Tokie pluoštai gali būti panaudoti medžiagų apdirbimui – stiklo pjovimui [9], mikro ir nano kanalų formavimui skaidriose terpėse [10, 11], neskaidrių medžiagų – silicio [12], nerūdijančio plieno [13], vario [14] – gręžimui, plonų sluoksnių abliacijai [15], mikrodarinių formavimui fotopolimerizacijos būdu [11].

Beselio-Gauso pluoštas gali būti efektyviai formuojamas panaudojant kūginę prizmę, tačiau tokių optinių elementų forma dėl gamybos technologinių apribojimų nukrypsta nuo idealaus kūgio paviršiaus formos ir neišvengiamai moduliuoja formuojamą skirstinį. Šio darbo tikslas buvo ištirti silikatinio stiklo lazerinį pjovimo metodą pikosekundiniais impulsais, panaudojant realiomis sąlygomis kūginę prizmę suformuotą Beselio-Gauso pluoštą. Tyrimų metu buvo išsikeltos užduotys sukonstruoti apdirbimo stendą, ištirti kūginę prizmę ir ja suformuotą pluoštą, ištirti tokiu pluoštu suformuotas stiklo modifikacijas ir atlikti 1 mm storio stiklo pjovimo eksperimentus bei ištirti suformuotų pjūvių kokybę, keičiant apdirbimo parametrus.

Darbas buvo parengtas Valstybinio mokslinių tyrimų instituto Fizinių ir technologijos mokslų centre, Lazerinių technologijų skyriuje, Lazerinio mikroapdirbimo technologijų laboratorijoje.

1 Beselio-Gauso pluoštai

1.1 Beselio pluoštai

Medžiagų mikroapdirbimui dažniausiai yra naudojami pluoštai, turintys Gauso skirstinį. Gausinio pluošto Furjė transformacija yra Gauso pluoštas, todėl tokio pavidalo pluoštas gali skliti per įvairias optines sistemas, sudarytas iš paprastų lęšių, nekeisdamas savo formos. Lazerių rezonatoriai nėra idealūs, todėl realybėje pluoštai yra charakterizuojami M^2 parametru, parodančiu, kiek kartų realaus pluošto skėstis yra didesnė negu Gauso pluošto. Moksliniams tikslams taikomų lazerių M^2 parametras paprastai būna mažesnis negu 2, todėl tokie pluoštai gali būti sufokusuoti į mažo diametro dėmę:

$$d_f = 2\omega_0 \approx 2 \frac{\lambda}{\pi} \frac{M^2}{NA}; \quad (1)$$

čia ω_0 – pluošto radiusas, λ – lazerio bangos ilgis, NA – fokusuojančio lęšio skaitinė apertūra. Kitas svarbus parametras, naudojamas įvertinti pluošto difrakcinį nuotolį, yra Relėjaus ilgis, kuris parodo, kokių atstumu nuo sąsmaukos sklidimo kryptimi pluošto diametras padidėja $\sqrt{2}$ karto [11]:

$$z_R = \frac{\pi\omega_0^2}{\lambda M^2} = \frac{\pi}{4\lambda} \frac{d_f^2}{M^2}. \quad (2)$$

Kaip matome, sufokusuoto pluošto dėmės dydis sąsmaukoje ir Relėjaus ilgis yra susieti, tad kuo aštriau yra fokusuojamas pluoštas, tuo yra mažesnis jo difrakcinis nuotolis.

Pluošto sklidimas tiesinėje terpėje be nuostolių yra aprašomas Helmholtco lygtimi [8]:

$$\Delta E + k_0^2 E = 0; \quad (3)$$

čia Δ – Laplaso operatorius, E – šviesos bangos elektrinio lauko stipris, $k_0 = 2\pi/\lambda$ yra bangos vektorius. Anksčiau aptartas Gauso pluoštas nėra tikslus šios lygties sprendinys, todėl sklindant patiria difrakciją.

J. Durnin pirmasis parodė [16], jog pirmos rūšies nulinės eilės Beselio funkcija J_0 yra tikslus Helmholtco lygties sprendinys, todėl tokio pavidalo pluošto intensyvumas turėtų nepriklausyti nuo sklidimo nuotolio ir $I(r, z) = I(r, 0)$. Elektrinio lauko stipris tokiu atveju yra užrašomas:

$$E(r, t, z) = A_0 \exp[i(\omega t - k_z z)] J_0(k_r r); \quad (4)$$

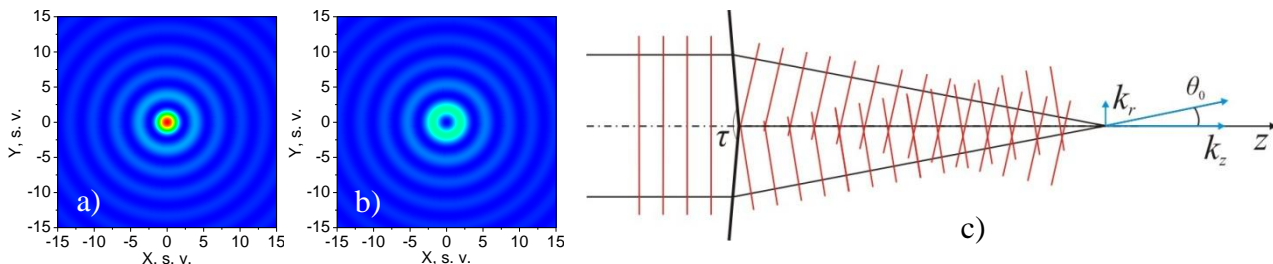
čia r – skersinė koordinatė, z – išilginė koordinatė, t – laikas, ω – spinduliuotės dažnis, A_0 – ašinė pluošto amplitudė, k_z ir k_r yra bangos vektoriaus išilginė ir skersinė komponentės. Įdomu pastebėti tai, jog $k_r = 0$ atveju (4) tampa plokščios bangos išraiška [17]. Intensyvumas yra proporcingas elektrinio lauko stiprio kvadratui $I \propto J_0^2(k_r r)$, todėl Beselio pluošto skirstinys susideda iš intensyvios centrinės smailės ir be galo didelio skaičiaus ją supančių koncentrinų žiedų (1.1 pav. a)). Bendru atveju nedifraguojantys pluoštai gali būti aprašomi ir nenulinės eilės pirmos rūšies Beselio funkcijomis (1.1 pav. b)) [8].

Beselio pluoštai pasižymi tuo, jog gali atsistatyti po to, kai dalis pluošto yra užblokuojama. Taip pat jie yra atsparesni netiesinei sąveikai, nes aplinkiniai Beselio žiedai veikia kaip centrinės smailės energijos rezervuaras. Kuomet tam tikra azimutinė pluošto dalis yra užblokuojama, tokiam pluoštui perėjus netiesinę terpę, kurioje yra formuojamas Beselio pluoštas, užblokuota dalis gali atsistatyti dėl Relėjaus sklaidos [17].

Idealus Beselio pluoštas gali būti formuojamas plokščia banga apšviečiant begalinės apertūros idealią kūginę prizmę – eksikoną su smailia viršūne. Už eksikono lūžusios plokščios bangos vektoriai guli ant kūgio paviršiaus, kurio kampas yra 2θ , ir dėl interferencijos suformuoja Beselio pluoštą, kurio erdvinis spektras yra aprašomas delta funkcija $\delta(\theta - \theta_0)$ (1.1 pav. c)). θ_0 priklauso nuo eksikono parametrų:

$$\theta_0 = \arcsin\left(\frac{n}{n_0} \cos\left(\frac{\tau}{2}\right)\right) + \frac{\tau - \pi}{2} \approx \frac{n - n_0}{n_0} \frac{\pi - \tau}{2}; \quad (5)$$

čia n ir n_0 – atitinkamai eksikono ir aplinkos lūžio rodikliai, τ - eksikono viršūnės kampas [18].



1.1 pav. Pluošto intensyvumo skirstiniai, aprašomi a) J_0 ir b) J_1 funkcijų kvadratais; c) Beselio pluošto formavimasis dėl interferencijos, apšvietus begalinių matmenų kūginę prizmę plokščia banga.

Praktiniu požiūriu suformuoti idealų nedifraguojantį Beselio pluoštą yra neįmanoma, nes tam reikia begalinio energijos kiekio ir begalinių matmenų apertūrų. Eksperimentiškai yra generuojami apertūra apriboti Beselio pluoštai, vadinami Beselio-Gauso pluoštais, kurie nepatiria difrakcijos tik ribotame nuotolyje [19]. Tokio pluošto kompleksinė amplitudė turi Gauso formos gaubtinę [8]:

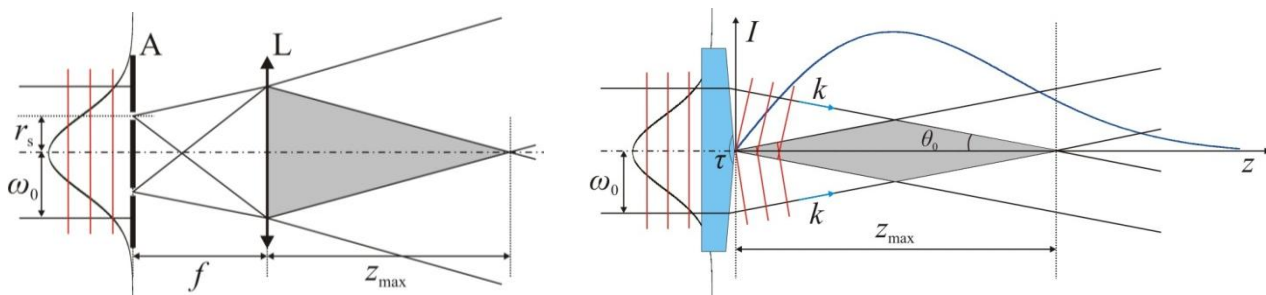
$$A = A_0 J_0(k_r) \exp\left(-\frac{r^2}{\omega_0^2}\right). \quad (6)$$

Jeigu po gaubtinę telpa pakankamai daug Beselio žiedų, toks pluoštas tampa panašiu į Beselio pluoštą. Įvairių autorių dar yra naudojami Beselio pavidalo (angl. *Bessel-like*) ir kvazi-Beselio (angl. *quasi-Bessel*) pluoštų terminai.

1.2 Beselio pavidalo pluoštų formavimo būdai

Beselio pavidalo pluoštai yra formuojami įvairiais metodais, kurie yra skirstomi pagal krintančio į optinį elementą pluošto moduliavimo būdą. Beselio-Gauso pluoštas gali būti

formuojamas atliekant pluošto fazinę arba amplitudinę moduliaciją. Pastarasis metodas yra neefektyvus, todėl dažniau naudojama fazinė pluošto moduliacija [20]. Tokiu atveju Beselio pavidalo pluoštai gali būti formuojami apšviečiant baigtinio dydžio apertūros eksikoną riboto diametro Gauso pluoštu, naudojant hologramas, erdvinius šviesos modulatorius, derinamus akustinio gradiento lęšius.



1.2 pav. Kairėje: Beselio pavidalo pluošto formavimas naudojant žiedinę apertūrą A ir glaudžiamąjį lęšį L ; dešinėje: Gauso pluošto fokusavimas kūgine prizme ir centrinės smailės intensyvumo kitimas pluošto sklaidimo kryptimi.

Eksperimentiškai Beselio pavidalo pluoštas pirmą kartą buvo pademonstruotas 1987 m. J. Durnin [21]. Krintančio pluošto amplitudė buvo moduluojama panaudojant žiedo formos apertūrą, kuri buvo patalpinta glaudžiamojo lęšio židinio plokštumoje (1.2 pav.). Tokiu atveju elektrinio lauko amplitudė apertūros plokštumoje yra užrašoma kaip:

$$E_{\text{slit}} = A_i \delta(r - r_s); \quad (7)$$

čia A_i yra krintančios bangos amplitudė, δ – Dirako delta funkcija, r_s – plyšio spindulys. Glaudžiamasis lęšis atlieka Furjė transformaciją, ir laikant, jog nagrinėjama sistema turi sukimo simetriją, galima užrašyti elektrinio lauko amplitudę lęšio židinio plokštumoje:

$$E_{\text{front}}(r) = \frac{2\pi}{i\lambda f} \int_0^\infty r' E_{\text{slit}}(r') J_0(2\pi r' \rho) dr' = A_i \frac{2\pi r_s}{i\lambda f} J_0\left(\frac{2\pi r_s r}{\lambda f}\right); \quad (8)$$

čia $\rho = r/\lambda f$, λ yra plokščios bangos ilgis, f – lęšio židinio nuotolis. Tokia elektrinio lauko amplitudės skirstinio forma atitinka Beselio pluošto apibrėžimą. Apertūriniai pluošto formavimo metodai yra neefektyvūs, nes didelė dalis lazerio spinduliuotės yra blokuojama, todėl neišvengiamai atsiranda energijos nuostoliai [11, 19]. Žiedinė apertūra gali būti pakeista skaitmeniniais prietaisais, sudarytais iš mikroveidrodžių matricos. Kiekvienas veidrodis gali būti valdomas atskirai, todėl tokiu prietaisu galima kontroliuoti formuojamo Beselio pavidalo pluošto parametrus [22].

Erdvinis šviesos modulatorius yra prietaisas, kuris moduluoja lazerio pluošto fazę ir (arba) intensyvumą. Tokie prietaisai yra populiarūs dėl savo galimybių formuoti įvairaus pasiskirstymo pluoštus bei išskaidyti juos į keletą pluoštų, naudojant kompiuteriu generuojamas hologramas [23]. Naudojant erdvinį šviesos moduliatorių, galima formuoti įvairaus kūgio kampo pluoštus bei realiu

laiku keisti jų parametrus. Šios technologijos trūkumai yra mažas prietaiso pažaidos slenkstis, ilga persijungimo trukmė (kelios dešimtys milisekundžių), mažas efektyvumas, didelė kaina [11].

Beselio pavidalo pluoštus galima formuoti naudojant akustinio gradiento lęšius, kuomet cilindre, užpildytame skysčiu, pjezoelektriniais keitikliais generuojamos akustinės bangos. Tokiu būdu terpėje yra sukuriamas periodiškai kintantis lūžio rodiklio profilis:

$$n(r, t) = n_0 + n_A J_0 \left(\frac{\omega r}{v} \right) \cos(\omega t); \quad (9)$$

čia n_0 yra terpės lūžio rodiklis statiniu atveju, ω – akustinės bangos dažnis, v – garso greitis skystyje, n_A – konstanta, kuri priklauso nuo terpės savybių ir generuojamų bangų amplitudės. Centrinė tokio lūžio rodiklio profilio dalis atitinka eksikono profilį. Kuomet šviesos pluoštas pereina tokią terpę, jis yra transformuojamas į Beselio pluoštą, papildomai apsuptą žiedinės struktūros. Akustinio gradiento lęšiais formuojamo pluošto parametrus galima reguliuoti keičiant akustinių bangų dažnį arba amplitudę, o tokio prietaiso persijungimo trukmė priklauso nuo skysčio savybių ir yra mikrosekundžių eilės dydis [11, 24].

Tarp visų Beselio pluošto formavimo metodų efektyviausias yra naudojant eksikoną (1.2 pav.) [19]. Toks optinis elementas pirmą kartą buvo pasiūlytas 1954 m J. McLeod [25]. Eksikonai gali būti difrakciniai – sudaryti iš žiedo formos difrakcinės gardelės, refrakciniai arba atspindžio. Refrakciniai eksikonai gali būti teigiami arba neigiami, tiesiniai, logaritminiai arba eksponentiniai [26], taip pat gali būti gaminami Frenelio eksikonai – Fraksikonai [27]. Eksikonai gali būti sudaryti ir iš paprastų lęšių arba iš lęšių sistemų – tokie elementai yra vadinami lęšiniaus eksikonais, o jų suformuoto pluošto difrakcinis nuotolis yra prailginamas dėl teigiamo arba neigiamo ženklo sferinių aberacijų [28]. Vis tik dažniausiai naudojami eksikonai yra kūginės prizmės formos, pagamintos iš stiklo.

Apšvietus idealią kūginę prizmę Gauso pluoštu (1.2 pav.), suformuoto pluošto erdvinis spektras nebėra delta funkcija ir plėtėja mažėjant Gauso pluošto skersmeniui $2\omega_0$. Už eksikono susiformuoja Beselio-Gauso pluoštas, kuris nepatiria difrakcijos tik ribotame nuotolyje, vadinamu Beselio zona, kurios ilgis yra $z_{\max} = \omega_0 \cos \theta_0 / \sin \theta_0$. Tokio skirstinio intensyvumas lėtai kinta pluoštui sklindant [18]. Kūgio paviršiaus kampas $2\theta_0$ gali būti apskaičiuojamas naudojantis Snelijaus dėsnium:

$$\theta_0 = \arcsin(n \sin \beta) - \beta; \quad (10)$$

čia $\beta = 90 - \tau/2$ yra eksikono pagrindo kampas, n – medžiagos lūžio rodiklis. Elektrinio lauko amplitudė už eksikono yra aprašoma tokia išraiška:

$$E(\rho, z) = E_0 \sqrt{\frac{2\pi k z \omega_0 \sin \theta_0}{z_{\max}}} \exp\left(-\frac{z^2}{z_{\max}^2} - \frac{\pi i}{4}\right) J_0(k \rho \sin \theta_0) \exp(ikz \cos \theta_0); \quad (11)$$

čia k yra bangos vektorius, ρ yra atstumas statmena kryptimi nuo pluošto sklaidimo ašies polinėje koordinatinių sistemoje, z yra atstumas nuo kūginės prizmės pluošto sklaidimo kryptimi. Intensyvumo skirstinys gali būti apskaičiuotas naudojantis sąryšiu $I(\rho, z) = c\varepsilon_0 |E(\rho, z)|^2 / 2$:

$$I(\rho, z) = \frac{4Pk \sin \theta_0}{\omega_0} \frac{z}{z_{\max}} J_0^2(k\rho \sin \theta_0) \exp\left(-\frac{2z^2}{z_{\max}^2}\right) \equiv I_0(z) J_0^2\left(2,4048 \frac{\rho}{\rho_0}\right); \quad (12)$$

čia P yra krintančio į eksikoną Gauso pluošto galia, $\rho_0 = 2,4048 / (k \sin \theta_0)$ yra centrinės smailės radiusas, skaičiuojant iki pirmojo minimumo, I_0 yra centrinės smailės intensyvumas [18]. Apskaičiuoti Beselio-Gauso pluošto intensyvumo skirstiniai yra pateikti 1.3 pav.

Centrinės smailės intensyvumas didžiausią vertę pasiekia atstumu z nuo eksikono viršūnės:

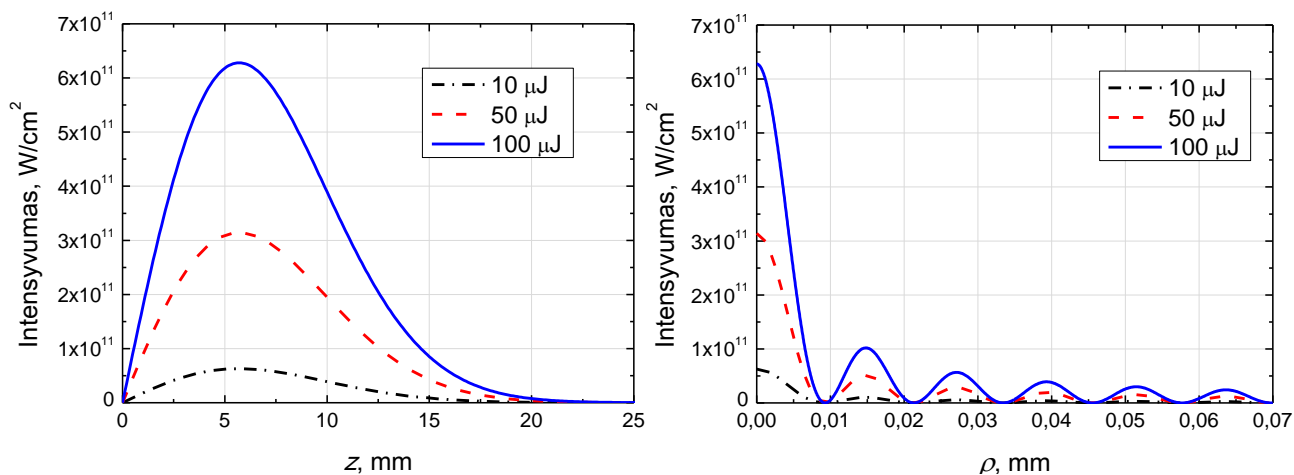
$$z = \frac{z_{\max}}{2} = \frac{\omega_0}{2\tau(n-1)}. \quad (13)$$

Beselio-Gauso skirstinyje esančių žiedų skaičių galima apskaičiuoti naudojantis išraiška:

$$N = \frac{D \sin(\theta_0)}{\lambda}; \quad (14)$$

čia D – eksikono užpildytos apertūros diametras. Po Gauso pluošto gaubtine paprastai telpa daug žiedų, o centrinė smailė ir Beselio skirstinio žiedai turi vienodą energiją, todėl optimaliomis sąlygomis vienam žiedui tenkanti energija yra santykinai nedidelė [29]:

$$\varepsilon = \frac{E_{\text{žiedo}}}{E_{\text{visa}}} = 1,21 \frac{\lambda}{\omega_0 \sin(\theta_0)}. \quad (15)$$



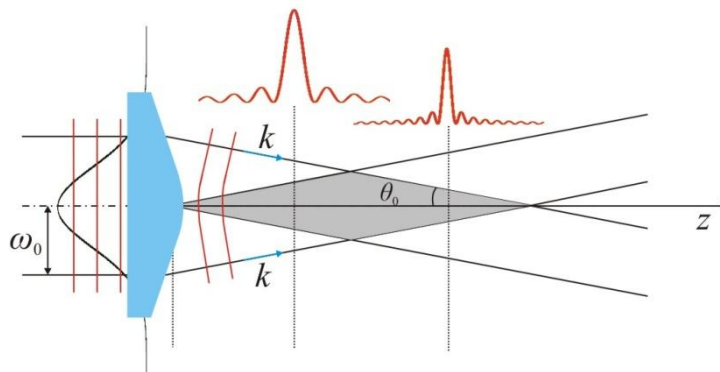
1.3 pav. Kairėje: Beselio-Gauso pluošto centrinės smailės intensyvumo priklausomybė nuo sklaidimo atstumo; dešinėje: intensyvumo priklausomybė nuo skersinės koordinatės. Parametrai: 1064 nm, 10 ps, pluošto skersmuo prieš eksikoną 1 mm, pagrindo kampas 5° .

1.3 Beselio-Gauso pluošto formavimas realiomis sąlygomis

Fokusuojant Gauso pluoštą kūgine prizme, idealiu atveju suformuoto Beselio-Gauso pluošto centrinės smailės intensyvumas pluošto sklaidimo kryptimi keičiasi tolygiai. Tačiau ankstesniame skyrelyje aprašyti teoriniai pluošto intensyvumo pasiskirstymo modeliai neatsižvelgia į pluošto

difrakciją nuo optinių elementų kraštų, neidealią kūginės prizmės formą bei realius lazerio pluošto parametrus [19].

Jau J. Durnin eksperimente 1987 m. buvo stebimos pluošto intensyvumo moduliacijos dėl difrakcijos nuo žiedinės apertūros kraštų [21]. Formuojant pluoštą eksikonu, taip pat vyksta difrakcija nuo elemento kraštų, todėl centrinės smailės intensyvumas išilgai sklidimo ašies tampa moduluotu. Kita vertus, jeigu Gauso pluošto skersmuo yra mažesnis negu eksikono apertūros spindulys, intensyvumo skirstinio moduliacijos dėl difrakcijos galima ir nepaisyti [18].



1.4 pav. Beselio-Gauso pluošto formavimas kūgine prizme su užapvalinta viršūne.

Dėl technologinių apribojimų poliruojant sudėtingos geometrijos optiką, pagamintų kūginių prizmių forma nukrypsta nuo idealaus kūgio ir turi užapvalintą galiuką (1.4 pav.). Kuomet Beselio-Gauso pluoštas yra formuojamas Gauso pluoštu, kurio diametras yra palyginamas su užapvalintos srities matmenimis, reikia atsižvelgti į tokio netobulumo sukiamas intensyvumo moduliacijas pluošto sklidimo kryptimi [30]. Eksikono profilio įtaka gali būti įvertinama skaitmeniškai sprendžiant Frenelio-Kirchofo difrakcijos integralą [19]. Tokiu atveju elektrinio lauko amplitudė už eksikono yra užrašoma:

$$E(\rho, z) = \frac{2\pi i}{\lambda} \exp\left(-\frac{2\pi z i}{\lambda}\right) \times \int_0^{\infty} \frac{E(r_0, 0)}{z} \exp\left(-\frac{(\rho^2 + r_0^2)\pi i}{\lambda z}\right) J_0\left(\frac{2\pi \rho r_0}{\lambda z}\right) r_0 dr_0; \quad (16)$$

čia $E(r_0, z)$ yra Gauso pluošto elektrinio lauko amplitudė:

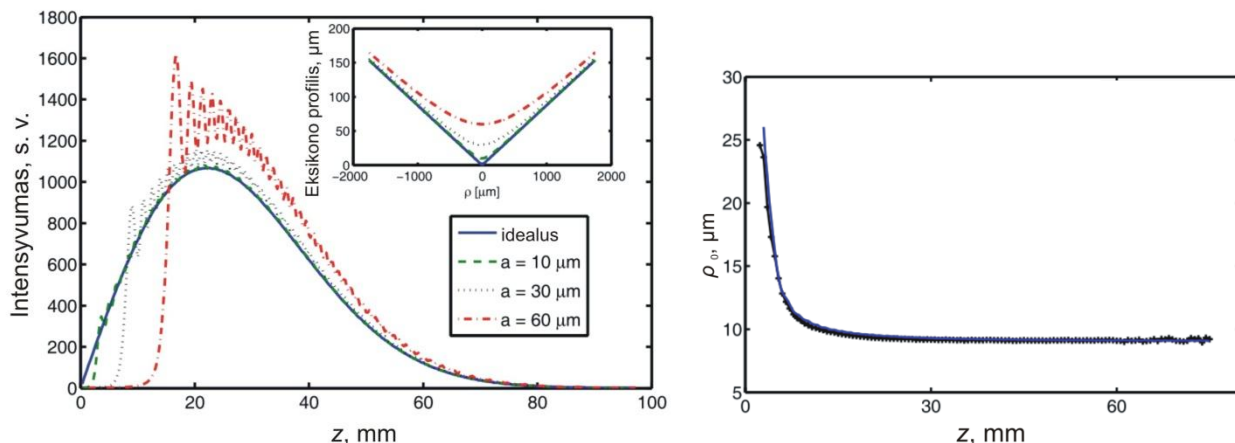
$$E(r_0, 0) = E_0 \exp\left(-\left(\frac{r_0}{\omega}\right)^2 - i\varphi(r_0)\right); \quad (17)$$

čia ω – Gauso pluošto spindulys, $\varphi(r_0)$ yra erdvinės fazės pokytis dėl pluošto sklidimo per kūginę prizmę:

$$\varphi(r_0) = \frac{2\pi(n-1)}{\lambda} d(r_0); \quad (18)$$

čia n – eksikono lūžio rodiklis, $d(r_0)$ yra realus eksikono profilis, kuris gali būti išmatuojamas eksperimentiškai.

Gauso pluošto dalis, krintanti į eksikoną toliau nuo sklaidimo ašies, yra atsakinga už Beselio pluošto suformavimą tolimesniu atstumu nuo kūginės prizmės viršūnės. Dalis Gauso pluošto bus fokusuojama užapvalintu eksikono galiuku, todėl už eksikono susiformuos banga, kurios frontas yra artimas sferiniam [18]. Tai lemia osciliuojančių smailių atsiradimą arti kūginės prizmės, kuomet banga, artima sferinei, interferuoja su Beselio pluoštais, suformuotais lūžtant bangoms toje eksikono dalyje, kuri atitinka kūgio formą. Toliau nuo kūginės prizmės intensyvumo skirstinys vėl atitinka Beselio pavidalo pluoštą, suformuotą idealiu eksikonu (1.5 pav.). Suformuotos centrinės smailės diametras mažėja didėjant atstumui nuo eksikono viršūnės (1.4 pav. ir 1.5 pav.) [17, 18].



1.5 pav. Kairėje: eksikono profilio įtaka centrinės smailės intensyvumo kitimui sklaidimo kryptimi; dešinėje: centrinės smailės radiuso kitimas sklaidimo kryptimi ($a = 33,7 \mu\text{m}$). 1064 nm, eksikono pagrindo kampas 5° , pluošto skersmuo prieš eksikoną 4,18 mm. Adaptuota pagal [18].

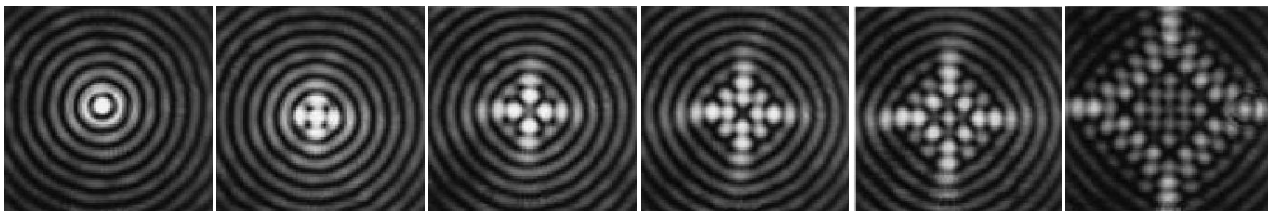
Ties neidealiu paviršiumi suformuotos sferinės bangos vektorius k guli ant sklaidimo ašies, o kvazi-Beselio pluošto bangos vektoriaus ašinė komponentė yra lygi $k_z = k \cos \theta_0$. Interferuojant bangoms su skirtingais bangos vektoriais, susiformuoja pluošto periodinė moduliacija sklaidimo kryptimi, kurios periodas yra lygus $\lambda(1 - \cos \theta_0)$. Moduliacijos gylis mažėja tolstant nuo kūginės prizmės, nes mažėja sferinės bangos intensyvumas [18].

Praktikoje realūs lazerio pluoštai yra aprašomi M^2 parametru arba pluošto parametų sandauga. Formuojant Beselio-Gauso pluoštą daugiamodžiu pluoštu, jo diametras didėja išilgai sklaidimo krypties dėl didelės krintančio į optinį elementą pluošto skėties [30].

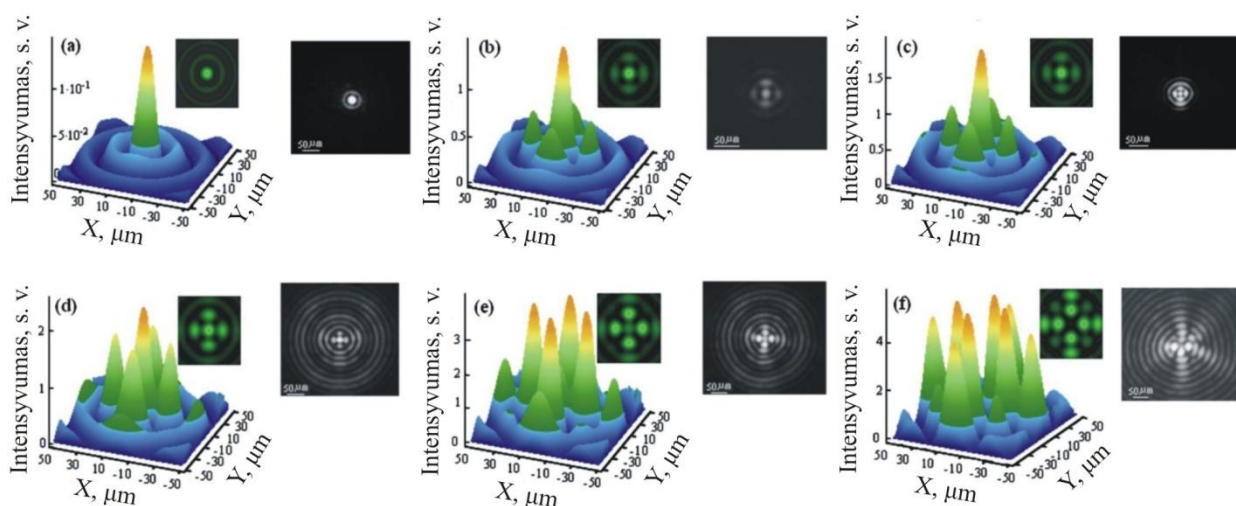
Technologiškai yra sunku pagaminti kūginę prizmę, kurios forma pasižymėtų visiška sukimo simetrija. Realiomis sąlygomis pagaminti eksikonai turi elipsės formos pagrindą ir yra tarsi suploti viena kryptimi – tokie elementai vadinami elipsiniais eksikonais [31]. Pluoštas taip pat gali kristi tam tikru kampu į optinius elementus, todėl neišvengiamai atsiranda aberacijos, moduluojančios formuojamą intensyvumo skirstinį [32, 33].

T. Tanaka ir S. Yamamoto darbe [32] buvo palygintos paprastų lęšių ir kūginių prizmių aberacijos. Didinant eksikono astigmatines aberacijas, palapsniui suardoma centrinės smailės ir

koncentrinių žiedų skirstinio forma ir pluoštas išsiskaido į daugelį atskirų maksimumų. Autoriai pažymi, jog pluoštas išsiskaido simetriškai X ir Y kryptimis. Palyginimui, paprastų lęšių atveju dėl astigmatinių aberacijų skirstinys pailgėja tik viena kryptimi. Nustatyta, jog komos aberacijos tik perslenka eksikonu formuojamą skirstinį ir nedaro įtakos skirstinio intensyvumui. Palyginimui, paprastų lęšių atveju dėl komos aberacijų skirstinys išskysta asimetriškai ir tampa panašiu į kometą. Autoriai konstatuoja, jog, skirtingai nei paprasti lęšiai, eksikonai turi tik lyginės eilės aberacijas. Astigmatinės aberacijos atsiranda pluoštui krįtant kampu į optinį elementą, todėl aberacijų įtaka didėja sukant eksikoną apie ašį, statmeną pluošto sklaidimo kryptimi (1.6 pav.).



1.6 pav. Suformuoto pluošto intensyvumo skirstinys 30 mm atstumu nuo viršūnės, keičiant eksikono pakreipimo kampą: 0° , 5° , 6° , 7° , 8° , 10° . Eksikono pagrindo kampas 10° . Adaptuota pagal [32].



1.7 pav. Elipsiniu eksikonu suformuoto pluošto sumodeliuotas ir eksperimentiškai užregistruotas intensyvumo skirstinio kitimas didėjant atstumui nuo eksikono a) – f): 60 mm, 160 mm, 173 mm, 213 mm, 288 mm, 400 mm. Eksikono pagrindo kampas 2° , skersmuo 20 mm, skirtumas tarp elipsės ašių 0,9 mm. Adaptuota pagal [31].

X. Zeng ir F. Wu publikacijoje [31] buvo eksperimentiškai ištirtas ir sumodeliuotas elipsės formos pagrindo eksikonu formuojamas pluoštas. Autoriai nustatė, jog tokio pluošto žiedai ir centrinė smailė persiformuoja į keturis arba daugiau maksimumų. Toks persiformavimas palaipsniui ryškėja didėjant sklaidimo nuotoliui (1.7 pav.). Taip pat autoriai pažymi, jog didinant pagrindo elipsiškumą ir atstumą iki eksikono viršūnės, suformuotos centrinės smailės diametras ir forma nesikeičia, tik kinta intensyvumas. Autoriai pastebi, jog elipsės formos pagrindo eksikoną galima

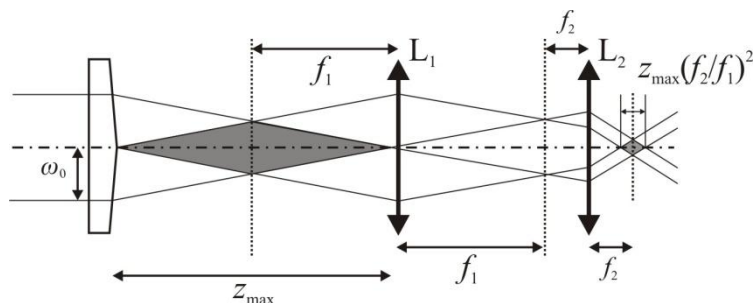
prilyginti eksikonui, pasuktam apie ašį, statmeną pluošto sklaidimo kryptį, nes tokio eksikono pagrindo pjūvis yra elipsės formos [31].

1.4 Beselio-Gauso pluošto transformavimas vaizdo perkėlimo sistema

Beselio-Gauso pluošto, suformuoto eksikonu, centrinės smailės diametras paprastai yra didesnis negu reikalingas įvairiems taikymams. Pluošto centrinei smailei suspausti yra naudojama mažinančio teleskopo konfigūracija (1.8 pav.). Lęšius, sudarančius teleskopą, galima laikyti fazinėmis kaukėmis, o elektrinio lauko amplitudė iš karto už lęšio L_i gali būti aprašoma kaip [18]:

$$E(\rho, z_{L_i}) = E(\rho, z_{L_i}) \exp\left(-i \frac{k}{2f_i} \rho^2\right); \quad (19)$$

čia f_i yra teleskopo pirmojo ir antrojo lęšio židinio nuotoliai, o z_{L_i} yra lęšio pozicija ant ašies.



1.8 pav. Beselio-Gauso pluošto transformavimas 4F vaizdo perkėlimo sistema.

Teleskopą tokioje optinėje sistemoje galima panaudoti pluošto erdviniam filtravimui. Pirmasis teleskopo lęšis atlieka pluošto Furjė transformaciją, todėl jo židinio plokštumoje yra suformuojamas Beselio-Gauso pluošto erdvinių dažnių spektras. Užapvalintas kūginės prizmės galiukas lemia žemų dažnių komponentų atsiradimą erdvinių dažnių spektre, kurias galima išfiltruoti panaudojant neskaidrią skritulio formos apertūrą. Išfiltravus nepageidaujamus žemo dažnio komponentus, sumažinamos intensyvumo osciliacijos pluošto sklaidimo kryptimi, o intensyvumo skirstinys vėl tampa panašus į idealiu eksikonu suformuotą skirstinį [18].

2 Lazerinis skaidrių terpių apdirbimas

2.1 Spinduliuotės ir skaidrių medžiagų sąveika

Nepriklausomai nuo lazerinio šaltinio, spinduliuotės sąlygoti medžiagos pokyčiai atsiranda dviejų etapų proceso metu. Iš pradžių šviesa medžiagoje yra sugerama dėl tiesinės arba netiesinės sugerties. Tuomet dėl sugertos energijos relaksacijos medžiagos struktūra yra modifikuojama. Skaidrių terpių atveju gali būti suformuojami spalviniai centrai [34], surištieji eksitonai, nanogardelės, tuštumos, įtrūkiai ir kiti defektai. Dėl struktūros pokyčių pasikeičia ir medžiagos fizikinės savybės, pavyzdžiui, lūžio rodiklis, sklaida arba sugertis [35]. Apdirbant iš daugelio komponentų sudarytas medžiagas, kai kurios atomų grupės gali pradėti sudaryti klasterius medžiagoje, pavyzdžiui, natrio atomų sankaupos silikatiniuose stikluose [36].

Taikant klasikinio osciliatoriaus modelį, medžiagos atsakas į krintančią spinduliuotę yra apibrėžiamas kompleksine dielektrine funkcija:

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_B e^2}{\varepsilon_0 m_e} \frac{\omega^2 - \omega_0^2 - i\chi\omega}{(\omega^2 - \omega_0^2)^2 + \chi^2 \omega^2}; \quad (20)$$

čia ρ_B – surištųjų elektronų tankis, ω – lazerio dažnis, m_e yra kvazi-laisvų elektronų efektinė masė. e – elektrono krūvis, ω_0 – harmoninio osciliatoriaus dažnis, χ – osciliatoriaus gesimo konstanta, kurios maksimali vertė dielektrinėse medžiagose gali būti 10 fs^{-1} . Stiklo atveju regimojoje srityje išmatuotas elektronų tankis ir harmoninio osciliatoriaus dažnis yra $\rho_B = 1,46 \times 10^{23} \text{ cm}^{-3}$ ir $\omega_0 = 19 \text{ fs}^{-1}$ [37]. Naudojantis dielektrine funkcija galima apskaičiuoti kompleksinį lūžio rodiklį, kurio realioji dalis apsprendžia šviesos lūžimą, menamoji – spinduliuotės patiriamus nuostolius.

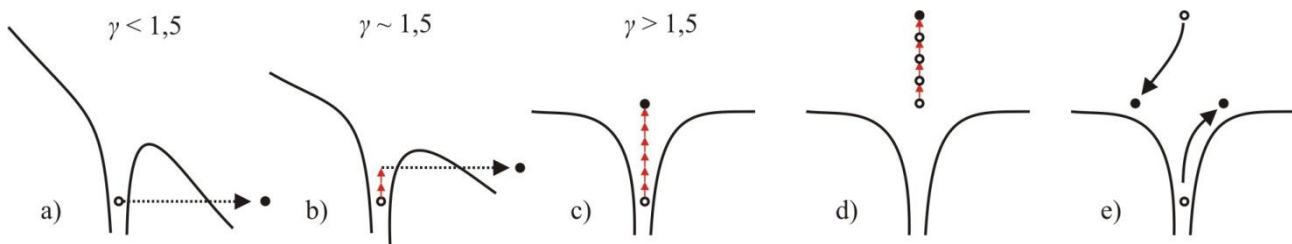
Skaidriuose dielektrikuose elektronai valentinėje juostoje gali būti sužadinti ir išlaisvinami dėl sąveikos su stipriu elektriniu lauku fotojonizacijos metu. Tuomet laisvieji elektronai gali įgyti dar daugiau energijos dėl atvirkštinės stabdomosios sugerties ir inicijuoti griūtinę jonizaciją. Tuo pat metu reikia atsižvelgti į laisvųjų elektronų tankio nuostolius dėl elektronų-skylių rekombinacijos ir elektronų difuzijos [37, 38]. Lazeriu sugeneruotų laisvųjų elektronų tankio dinamika yra kompleksinis procesas, susidedantis iš spindulinės ir nespindulinės rekombinacijos, krūvininkų pagavimo į lokalizuotas būsenas ir Ožė rekombinacijos procesų [38]. Lazerio spinduliuote sukurtos plazmos silikatiniuose stikluose gyvavimo trukmė priklauso nuo laisvųjų elektronų tankio. Kuomet plazmos tankis yra maždaug 10^{20} cm^{-3} , vidutinė gyvavimo trukmė yra 100 ps [37].

Laisvųjų elektronų tankio ρ kitimą laike bendraja forma galima aprašyti kaip:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \sigma I^k + \alpha_c I \rho - \eta_{\text{rec}} \rho^2 - \eta_{\text{diff}} \rho; \quad (21)$$

čia k – vienalaikis sugertų fotonų skaičius daugiafotonės jonizacijos metu, I – lazerio spinduliuotės intensyvumas. Dešinėje šios lygybės pusėje yra tokie nariai: fotojonizacijos sparta σI^k , griūtinės jonizacijos sparta $\alpha_c I \rho^2$, rekombinacijos įnešami nuostoliai $\eta_{\text{rec}} \rho^2$ ir nuostoliai dėl elektronų

difuzijos $\eta_{\text{diff}} \rho \cdot \sigma$, α_c , η_{rec} ir η_{diff} yra atitinkamų procesų koeficientai. Apdirbant medžiagas pikosekundiniais impulsais, dominuoja rekombinaciniai laisvųjų elektronų tankio nuostoliai, todėl elektronų difuzijos galima ir nepaisyti [37, 38].



2.1 pav. Jonizacijos procesai: a) tunelinė jonizacija; b) tarpinis procesas; c) daugiafotonė jonizacija; d) laisvųjų krūvininkų sugertis; e) smūginė jonizacija. Pagal [39].

Elektroninė jonizacija kondensuotose terpėse gali būti nagrinėjama naudojantis L. V. Keldyšo suformuluota teorija. Tokiu atveju daugiafotonės sugerties ir tunelinės jonizacijos procesai priklauso nuo lazerio spinduliuotės dažnio ir intensyvumo, o Keldyšo parametras γ apsprendžia, koks procesas, daugiafotonė ar tunelinė jonizacija, dominuos spinduliuotės ir medžiagos sąveikos metu (2.1 pav. a) – c)):

$$\gamma = \frac{\omega}{e} \left(\frac{c \varepsilon_0 n_0 m \Delta E}{I} \right)^{\frac{1}{2}}; \quad (22)$$

čia c – šviesos greitis vakuume, ε_0 – vakuomo dielektrinė skvarba, n_0 – medžiagos lūžio rodiklis, m – redukuota elektrono ir skylės masė ($m = m_e/2$). ΔE yra draustinių energijos juostų tarpas. Kuomet $\gamma \geq 1$, dominuoja daugiafotonė jonizacija, kurios metu turi būti sugertas k fotonų skaičius vienu metu [37]:

$$k = \langle \Delta / \hbar \omega + 1 \rangle. \quad (23)$$

Jau sugeneruoti laisvieji elektronai gali papildomai sugerti elektrinio lauko energiją dėl atvirkštinės stabdomosios sugerties (2.1 pav. d)). Kuomet elektronai pasiekia kritinę energiją E_{crit} , kuri yra lygi draustinių energijos juostų tarpui, susidūrimų su atomais arba molekulėmis metu gali būti generuojama dar daugiau laisvųjų elektronų (2.1 pav. e)). Neatsižvelgiant į nuostolius susidūrimo metu ir laisvųjų elektronų sužadinimo trukmę, galima įvertinti griūtinės jonizacijos koeficientą [37]:

$$\alpha_c = \frac{1}{\omega^2 \tau^2 + 1} \frac{e^2 \tau}{c n_0 \varepsilon_0 m_e E_{\text{crit}}}; \quad (24)$$

čia $\tau = 1$ fs yra charakteringa elektronų-elektronų susidūrimo trukmė.

Laisvųjų elektronų tankis didėja iki kritinio tankio:

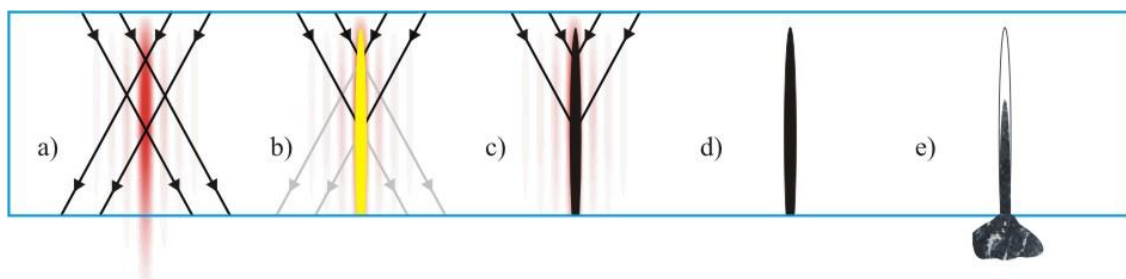
$$\rho_{\text{crit}} = \frac{(\omega^2 m_e \varepsilon_0)}{e}. \quad (25)$$

Pasiekus kritinį laisvųjų elektronų tankį, laisvųjų krūvininkų plazmos sugertis ir atspindys stipriai išauga, tuomet įvyksta medžiagos pramušimas. Ultratrumpųjų impulsų atveju elektronų sistemoje sukauptos energijos relaksacija vyksta jau po impulso, todėl galima laikyti, kad lazerinis pažeidimas įvyksta tik tame medžiagos tūryje, kuriame sugeneruotų laisvųjų elektronų tankis viršija kritinę vertę $\rho_{\text{crit}} = 3,95 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ [37]. Kai kurie autoriai dielektrikų pažeidimo sąlygą vertina ne pagal kritinį laisvųjų elektronų tankį, o pagal gardelės ir medžiagos temperatūrą [38, 40]. Modeliuojant ultratrumpųjų impulsų sąveiką su medžiaga turi būti naudojamas dviejų – elektronų ir gardelės – sistemų temperatūrų modelis [41].

Apdirbant skaidrias medžiagas ultratrumpųjų impulsų lazeriais, pradiniai laisvieji elektronai yra sugeneruojami dėl daugiafotonės arba griūtinės jonizacijos procesų. Nanosekundinių impulsų atveju pradiniai laisvieji elektronai atsiranda dėl medžiagos defektų ir priemaišų, kurios gali įvairiai pasiskirstyti bandinyje, todėl medžiagos optinis pramušimas yra statistinis įvykis. Tai lemia geresnę apdirbimo kokybę ir atsikartojamumą, naudojant ultratrumpuosius impulsus [42].

Lazerio pluošto sąveikos su medžiaga metu fotonų energija yra perduodama medžiagos elektronams. Elektronų sistema terminę pusiausvyrą pasiekia per maždaug 100 fs. Po tam tikro charakteringo laiko, kuris kristalinių medžiagų atveju yra vadinamas elektronų-fononų relaksacijos trukme, elektronai perduoda energiją šalia esantiems atomams ir jonams. Ši trukmė priklauso nuo kristalinės gardelės savybių ir trunka nuo 0,5 ps iki 50 ps [43]. Sparčiai įkaitinant terpę įvyksta fazinis sprogimas, kurio metu besiplečiantys garų burbuliukai suardo medžiagą ir paverčia ją garų ir lašelių mišiniu, kuris yra išmetamas iš sąveikos zonos. Toks medžiagos pašalinimo mechanizmas yra vadinamas abliacija [36].

Net ir naudojant ultratrumpųjų impulsų lazerius, kuomet elektronų-fononų relaksacijos trukmė yra ilgesnė negu impulso trukmė ir energija yra perduodama gardelei po impulso, terminių procesų trukmė yra nanosekundžių eilės dydis ir lazerinės abliacijos metu yra suformuojamas submikrometrų eilės lydalo sluoksnis [43].



2.2 pav. Skaidrių terpių modifikavimo Beselio pavidalo pluoštu etapai: a) pluošto sklidimas terpėje; b) plazmos kanalo suformavimas; c) išaugusi sugertis pasiekus kritinį laisvųjų krūvininkų tankį; d) energijos perdavimas gardelei; e) medžiagos pašalinimas iš kanalo [44].

Modifikacijų kanalo suformavimo etapai Beselio pavidalo pluoštui sklindant skaidria terpe yra pateikti 2.2 pav. Iš pradžių yra suformuojama laisvųjų krūvininkų plazma, kurios tolygumas priklauso nuo kūgio kampo θ_0 (2.2 pav. b)). Kuomet kūgio kampas viršija 15° , suformuojamas stabilus plazmos kanalas net ir esant dideliame spinduliuotės intensyvumui. Pasiėkus kritinį laisvųjų krūvininkų tankį, plazma tampa stipriai sugerianti (2.2 pav. c)). Po plazmos suformavimo karštų elektronų dujos perduoda energiją šaltai gardelei, kuri gali patirti fazinius pokyčius (lydymą, garavimą, skaidymąsi į daleles). Tuomet terpė yra modifikuojama, joje gali atsirasti tuštumos (2.2 pav. d)). Parinkus tinkamas apdirbimo sąlygas, medžiaga gali būti išmetama iš suformuoto kanalo pro apatinę bandinio pusę, tokiu būdu išgręžiant kanalą terpėje (2.2 pav. e)) [44].

Spinduliuotei sklindant terpe vyksta šviesos impulsų ir pluoštų saviveika – fazinis moduliavimasis ir fokusavimasis. To priežastis yra medžiagos lūžio rodiklio priklausomybė nuo spinduliuotės intensyvumo:

$$n = \sqrt{1 + \chi^{(1)} + \frac{3}{4} \chi^{(3)} |\vec{E}|^2} = n_0 + n_2 I; \quad (26)$$

čia $\chi^{(i)}$ - i-tosios eilės optinis jautris, $n_0 = \sqrt{1 + \chi^{(1)}}$ yra tiesinis lūžio rodiklis, o $n_2 = 3\chi^{(3)} / 4\epsilon_0 c n_0^2$ – netiesinis lūžio rodiklis, I yra lazerio spinduliuotės intensyvumas. Dėl erdvinio terpe sklindančio pluošto intensyvumo skirstinio dielektrikuose yra sukuriamas erdvinis medžiagos lūžio rodiklio pasiskirstymas ir terpė pradeda veikti kaip glaudžiamasis arba sklaidomasis lęšis, priklausomai nuo netiesinio lūžio rodiklio ženklo [45]. Jonizuojant medžiagą generuojami laisvieji krūvininkai lemia lūžio rodiklio sumažėjimą [44]:

$$\Delta n = -\frac{\rho(\vec{r}, t)}{2\rho_c}; \quad (27)$$

čia $\rho(\vec{r}, t)$ – laisvųjų elektronų skirstinys, ρ_c – kritinis plazmos tankis, todėl vyksta priešingas efektas – pluošto išfokusavimas. Viršijus kritinę impulso galią, Gauso pluoštas susifokusuoja į mažų skersinių matmenų šviesos giją, kuri gali būti panaudota skaidrių medžiagų pjovimui [46].

Beselio pluoštų atveju dėl didžiausio intensyvumo pluošto fokusavimasis (arba išsifokusavimas) visų pirma paveikia centrinę smailę. Dėl centrinės smailės susispaudimo mažėja kontrastas tarp Beselio žiedų, tačiau pluošto sklidimas išlieka stabilus dėl energijos perdavimo iš mažesnio intensyvumo žiedų [17].

2.2 Stiklo pjovimo metodai

Paprasčiausias namų ūkiuose plačiai naudojamas stiklo pjovimo įrankis yra rėžtukas su deimantiniu galiuku arba besisukančiu plieniniu ratuku. Toks įrankis buvo užpatentuotas 1869 m. S. G. Monce [47]. Lazerinis medžiagų raižymas pirmą kartą buvo pasiūlytas Garibotti. Šis dviejų etapų procesas yra panašus į mechaninį medžiagos raižymą. Iš pradžių yra suformuojamas griovelis




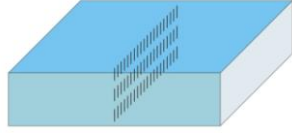


arba pažeidimų vora išilgai pjūvio linijos. Pažeidimų gylis paprastai siekia nuo vieno trečdaliao iki pusės apdirbamos medžiagos storio. Antrojo etapo metu, naudojant vakuuinius prisiurbtuvus arba velenėlius, stiklo lakštai yra perlaužiami mechaniniu būdu. Stiklo kraštuose ir paviršiuje ties pjūvio linija gali susiformuoti įtrūkiai, todėl po laužimo proceso reikia papildomo apdirbimo [1].

Lazerinio apdirbimo metodai gali būti suskirstyti pagal įvairius kriterijus – lazerinės sistemos parametrus, fokusavimo sąlygas, skenavimo techniką, spinduliuotės ir medžiagos sąveikos mechanizmą ir t.t. Lazerinis apdirbimas priklauso ir nuo aplinkos dujų sudėties ir slėgio bei medžiagų savybių ir paviršiaus šiurkštumo. Stiklo apdirbimui gali būti naudojami UV srities, pavyzdžiui, eksimeriniai lazeriai, kuomet medžiagoje pasireiškia stipri tiesinė sugertis dėl elektroninių šuolių, CO₂ lazeriai, sužadinantys virpesinius energijos lygmenis [48], ir trumpų arba ultratrumpų impulsų lazeriai, generuojantys spinduliuotę stiklo skaidrumo srityje. Fokusuojant tokių lazerių spinduliuotę pasireiškia netiesinės optikos reiškiniai, o skaidrios ir nesklaidančios terpės gali būti apdirbamos tūryje arba inicijuojant procesą nuo abiejų paviršių. Įvairūs stiklo apdirbimo metodai, naudojant trumpų arba ultratrumpų impulsų lazerius yra pateikti 2.3 pav.

Stiklo pjovimas gali būti realizuojamas abliuojant medžiagą – pašalinant visą medžiagos tūrį iš pjūvio linijos, atliekant medžiagos raižymą ir laužimą, sudarant sąlygas plisti įtrūkiams medžiagoje dėl įtempių atsiradimo, formuojant modifikacijas medžiagos tūryje [1, 6].

Abliuojant medžiagas paprastai yra sudaromas tam tikras impulsų persiklojimas ant medžiagos paviršiaus ar terpės tūryje, dažnai įvairūs raštai yra skenuojami daugelį kartų, todėl svarbu atsižvelgti į pasireiškiančius akumuliacinius reiškinius, nano ir mikrostruktūrų – raibulių, griovelių, stulpelių ir kitokių struktūrų formavimąsi bei formuojamo kraterio profilio pokyčius. Akumuliacinių efektų pavyzdžiais gali būti įtempių formavimasis, šilumos ir medžiagos defektų kaupimasis. Dėl akumuliacinių efektų mažėja abliacijos slenkstis. Keičiantis formuojamo kraterio geometrijai, kinta kampas tarp paviršiaus normalės ir lazerio pluošto, todėl keičiasi medžiagos sugertis, gali atsirasti sklaida, daugkartiniai atspindžiai nuo pjūvio sienelės [36].

Tiesioginės abliacijos metu svarbu kontroliuoti pluošto poliarizaciją. Kol pjovimo kanalo gylis nėra didelis ir nepasireiškia ryškus lazerio pluošto iškraipymas nuo pjūvio sienelių, naudojant poliarizaciją, lygiagrečią pjūviui, abliacijos sparta yra didesnė negu naudojant apskritiminę ar statmeną lazerio pluošto poliarizaciją. Kuomet formuojamo pjūvio gylis ir pločio santykis viršija 4, atspindžio faktorius tampa lygiu tarpusavyje statmenoms pluošto poliarizacijoms, todėl pluošto poliarizacijos įtaka pjovimui sumažėja [40]. Taip pat pastebėta, jog, formuojant defektų voras skaidrioje terpėje, mikroįtrūkiai mažiau plinta statmena pjūviui kryptimi naudojant poliarizaciją, kuri yra lygiagreti pjovimo kryptimi [6].

	<ul style="list-style-type: none"> • Tinka apdirbti ir neskaidrias terpes; • Galima išpjauti išorinius ir vidinius kontūrus, išgręžti skyles; • Norint suformuoti statmenas sienelės, reikia naudoti pluošto pakreipimo sistemas; • Dėl energijos perdavimo sukeliama medžiagos pažeidimai; • Atribotas apdirbimo greitis; • Ablacijos produktų ir plazmos sąveika su spinduliuote;
	<ul style="list-style-type: none"> • Galima išpjauti išorinius ir vidinius kontūrus, išgręžti skyles; • Suformuojamos statmenos sienelės; • Greitesnis procesas lyginant su tiesiogine abliacija; • Nėra spinduliuotės ekranavimo plazma ir abliacijos produktais; • Tinka apdirbti tik skaidrias ir neskaidančias terpes; • Šiukšlių kaupimasis pjovimo kanale apriboja pasiekiamą gylį-pločio santykį;
	<ul style="list-style-type: none"> • Tinka apdirbti ir neskaidrias terpes; • Didelis apdirbimo greitis; • Sunku išpjauti sudėtingus kontūrus; • Netinka vidinių kontūrų išpjovimui;
	<ul style="list-style-type: none"> • Nėra apdirbimo šiukšlių; • Modifikacijos gali būti pritaikytos sudėtingų kontūrų išpjovimui; • Sunku pjauti vidinius kontūrus;
	<ul style="list-style-type: none"> • Nėra apdirbimo šiukšlių; • Didelis apdirbimo greitis; • Tinka sudėtingų išorinių kontūrų pjovimui; • Sunku pjauti vidinius kontūrus; • Siekiant kontroliuoti priešingos pusės modifikacijas reikalingas nesutrikdytas pluošto sklaidimas terpeje;
	<ul style="list-style-type: none"> • Nėra apdirbimo šiukšlių; • Tinka sudėtingiems kontūrams ir formoms; • Siekiant tiksliai kontroliuoti modifikacijas netoli priešingos pusės, reikalingas nesutrikdytas pluošto sklaidimas; • Mažas apdirbimo greitis.

2.3 pav. Įvairių stiklo pjovimo metodų palyginimas [49].

Šilumos akumuliacija naudojant impulsinius lazerius gali būti įvertinama sprendžiant šilumos pernašos lygtį. Charakteringa laiko trukmė, per kurią šilumos banga nusklinda atstumu r nuo šaltinio, gali būti įvertinta kaip:

$$t = r^2 \frac{\rho C}{\kappa}; \quad (28)$$

čia ρ – medžiagos tankis, C – šilumos talpa, κ – šiluminis medžiagos laidumas. Paprastai stiklo terpėse šilumos banga sklinda maždaug $1 \mu\text{m}$ per $1 \mu\text{s}$ greičiu. Visiškas šilumos išsisklaidymas iš sufokusuotu lazerio pluoštu paveikto terpės tūrio užtrunka nuo $10 \mu\text{s}$ iki $100 \mu\text{s}$, priklausomai nuo medžiagos kaitinimo ir terminio poveikio zonos dydžio. Tokiu būdu galima įvertinti šilumos akumuliaciją naudojant didelio impulsų pasikartojimo dažnio lazerius, kuomet lazeriu paveiktas medžiagos tūris nespėja atvėsti tarp lazerio impulsų. Šilumos akumuliacija medžiagoje lemia lydalo susiformavimą, o iš apdirbimo zonos išstumtas lydidas gali nusėsti ant pjūvio sienelės ir lemti netolygią sienelės formą. Tuo tarpu įtempių akumuliacija lemia įtrūkių medžiagoje susiformavimą bei medžiagos porėtumą [36].

Stiklas gali būti pjaunamas lydymo ir garinimo būdu, tačiau tokiu atveju po apdirbimo reikia papildomo šlifavimo ir poliravimo proceso. Net naudojant pūtimą dujomis, visas lydidas nėra pašalinamas iš apdirbimo zonos [1].

Naudojant kontroliuojamo įtrūkio metodą yra sunaudojama mažiau lazerio energijos negu lazerinio raižymo ar abliacijos atveju, taip pat pasiekiami didesni apdirbimo greičiai. Naudojant šį metodą, įtrūkliai medžiagoje yra suformuojami dėl lokalaus medžiagos kaitinimo. Dėl aukštos temperatūros medžiagoje susiformuoja gniuždymo įtempiai, kurie, praėjus lazerio pluoštui, relaksuoja, tačiau atsiranda liekamieji lokalūs medžiagos įtempiai. Jeigu jų vertė viršija kritinę, stiklo įtrūkio linija plinta tolyn pagal pluošto skenavimo kryptį. Kontroliuojamam stiklo skilimui sudaryti gali būti naudojami įvairūs metodai, pavyzdžiui, spartus medžiagos įkaitinimas sufokusuotu lazerio pluoštu bei ataušinimas vandens srove. Taip pat gali būti naudojamas medžiagos pakaitinimas išfokusuotu lazeriu pluoštu prieš skenuojant sufokusuotą lazerio pluoštą bandinio paviršiumi [1].

Stiklo pjovimui naudojant abliaciją bei asistuojant lazerio indukuota plazma, lazerio pluoštas yra fokusuojamas pro bandinį ant apačioje padėto metalinio taikinio. Tokiu būdu yra generuojami laisvieji krūvininkai iš metalo. Susidaranti plazma modifikuoja apatinį stiklo paviršių, todėl padidėja medžiagos sugertis ir prasideda abliacijos procesas [1, 51]. Preciziškam mikrostruktūrų formavimui apatinėje bandinio pusėje gali būti naudojami sugeriantys angliavandenilių skysčiai ir tirpalai bei skystas metalas [50].

Įvairių elektronikos prietaisų gamybos metu medžiagos turi būti padalinamos į mažesnes dalis [3]. Jeigu detalių matmenys yra palyginami su pjūvio pločiu, pjūvio kanalo siaurinimas tampa

itin svarbiu uždaviniu. Vienas iš stiklo apdirbimo metodų yra paslėptasis raižymas, kurio metu yra suformuojamos popaviršinės modifikacijos iki 90% ruošinio storio. Suformuoti defektai lemia medžiagos susilpninimą tam tikroje zonoje, todėl, naudojant mechaninį poveikį, oro srovę arba sudarant temperatūrinį gradientą medžiagoje, stiklas gali būti atskiriamas pagal suformuotų defektų linijas. Paslėptasis raižymas, lyginant su kitais metodais, turi keletą privalumų: greitą apdirbimo spartą, mažą arba jokio stiklo apskeldėjimo, itin mažą pjūvio plotį ir proceso metu nėra naudojamos pavojingos cheminės medžiagos (pavyzdžiui, vandenilio fluorida rūgštis (HF) arba kalio šarmas (KOH)), taip pat tokiu metodu galima apdirbti chemiškai grūdintą stiklą. Paslėptasis raižymas yra atliekamas keliais metodais: naudojant dvigubo židinio fokusuojančią optiką, skenavimą keletą kartų skirtingame aukštyje, apdirbant šviesos gijomis, naudojant Beselio pluoštus ar kitokius pluošto formavimo metodus. Paslėptasis raižymas turi keletą trūkumų, tokių kaip pjūvių sienelių šiurkštumas ir mechaninio perpjautų detalių atskyrimo poreikis [6, 52].

Aštriai fokusuojant nanosekundinio lazerio impulsus, galima sudaryti terminius įtempius medžiagoje ir suformuoti mikroįtrūkius. Parinkus tinkamą impulsų persiklojimą apdirbimo plokštumoje, medžiaga gali būti pašalinama nuolaužų forma [52], todėl sunaudojama mažiau energijos negu reiktų visos medžiagos lydymui ir išgarinimui iš pjūvio kanalo [53]. Pjūvio plotis turi būti pakankamas medžiagos pašalinimui iš apdirbimo zonos, todėl pjūvio praplėtimui gali būti naudojamos trepanavimo sistemos, kurios suka pluoštą tam tikru diametru [54]. Stiklo apdirbimas nanosekundiniu lazeriu, naudojant trepanavimo sistemas ir keičiant sufokusuoto pluošto sąsmaukos padėtį vertikalia kryptimi, yra aptartas D. Ashkenasi darbe [4].

Naudojant pikosekundinio lazerio impulsus ir įvairią pluošto skenavimo techniką, keičiant fokusavimo sąlygas bandinyje, buvo apdirbamos 700 μm storio chemiškai stiprinto *Gorilla* stiklo plokštelės. Sparčiausias pjovimo procesas buvo pasiektas tuomet, kai lazerio pluoštas buvo fokusuojamas ant apatinio stiklo plokštelės paviršiaus. Optimalus pjūvio plotis turėjo būti pakankamai didelis – maždaug pusė bandinio plokštelės storio, nes pro abliuojamą kanalą reikėjo pašalinti apdirbimo atliekas, kurios yra išmetamos dėl gravitacijos jėgos ir plazmos sukeltų smūginių bangų [5].

2.3 Medžiagų apdirbimas Beselio pluoštais

Beselio pavidalo pluoštai gali būti pritaikomi įvairiems tikslams, kuomet reikia didelio difrakcinio nuotolio ir mažų skersinių matmenų pluošto. Tokie pluoštai buvo pritaikyti mikroskopijoje, netiesinėje optikoje, kaip optiniai pincetai dalelių rūšiavimui [55], tolygių išlydžių kanalų suformavimui tarp aukštos įtampos elektrodų [56] ir kitiems tikslams. Viena iš tokių pluoštų panaudojimo sričių yra lazerinis įvairių medžiagų apdirbimas.

Beselio pavidalo pluoštai gali būti pritaikyti stiklo ir kitų skaidrių terpių apdirbimui. Panaudojant femtosekundinio lazerio „Pharos“ (UAB MGF „Šviesos konversija“, bangos ilgis 1030 nm, impulsų pasikartojimo dažnis 60 kHz) čirpuotus 72 μ J energijos impulsus, kurių trukmė siekė 11 ps, 700 μ m storio stiklo maksimalus pjovimo greitis buvo 270 mm/s. Chemiškai stiprinto 700 μ m storio stiklo pjovimo greitis buvo mažesnis ir siekė 120 mm/s [9]. Naudojant Beselio-Gauso pluoštą taip pat buvo pademonstruotas kontroliuojamo įtrūkio silikatinio stiklo pjovimo metodas ir safyro paslėptasis raižymas [51].

Naudojant 800 nm bangos ilgio titano safyro lazerį, buvo formuojami nanokanalai stikle vienu mikrodžaulių eilės energijos impulsu. Suformuotų kanalų pločio-gylis santykis buvo lygus 1:100 [20].

Naudojant „Pharos“ lazerio antrąją harmoniką, pademonstruotas tūrinių Brego gardelių įrašymas lydytame kvarce Beselio-Gauso pluoštu. Tokių gardelių difrakcijos efektyvumas siekė ~90% [57].

Naudojant Beselio-Gauso pluoštą, buvo pademonstruotas ir neskaidrių medžiagų apdirbimas. Naudojant 786 nm ir 393 nm bangos ilgius ir 110 fs trukmės impulsus buvo pademonstruotas submikroninių skylių gręžimas silicyje [12], taip pat 10 μ m skersmens skylių gręžimas 20 μ m storio nerūdijančio plieno folijose, panaudojant 10 ns trukmės impulsus. Išgręžtų skylių sienelių polinkis buvo mažesnis, lyginant su apdirbimu Gauso pluoštu [13]. Naudojant 10 ps trukmės impulsus, buvo pragręžtas 100 μ m storio vario bandinys [14]. Pademonstruotas plonasluoksnių struktūrų apdirbimas nuabliuojant Molibdeno sluoksnį nuo lankstaus poliamido padėklo [15]. Viena vertus, tokia sistema toleruoja dideles kelių milimetrų eilės padėklo aukščio variacijas, kita vertus, periferiniai žiedai taip pat gali paveikti medžiagą, kas ne visada yra priimtina, todėl neskaidrių terpių apdirbimas Beselio pluoštais vis dar yra diskusijų objektas.

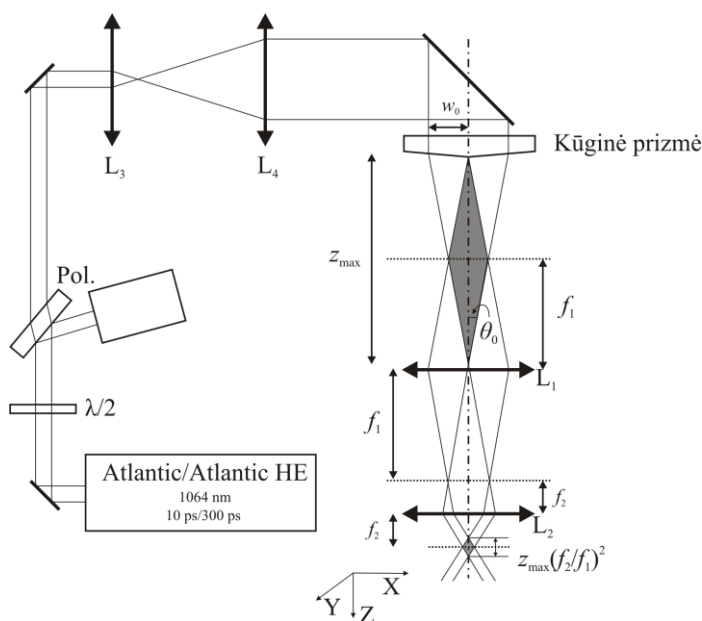
Medžiagos gali būti apdirbamos ir sudėtingesnės erdvinės sandaros pluoštais. Pavyzdžiui, panaudojant sklidimo kryptimi užlinkstančius *Airy* pluoštus, įmanoma išpjauti silicio kontūrus su užapvalintomis briaunomis [58].

3 Eksperimento įranga ir metodika

3.1 Eksperimento įranga, bandiniai ir jų charakterizavimas

3.1 lentelė. Lazerinės sistemos parametrai.

Lazeris	Lazerinė sistema	
	Atlantic (Ekspla)	Atlantic HE (Ekspla)
Bangos ilgis, nm	1064	1064
Impulso trukmė, ps	10	300
Pasikartojimo dažnis, kHz	400-1000	1
Maksimali galia, W	70	2,3
Impulso energija, mJ	0,175	2,3



3.1 pav. Eksperimento schema.

Eksperimentų metu buvo naudojami diodais kaupinami Nd:YVO₄ kietojo kūno lazeriai: 10 ps impulsų trukmės pikosekundinio lazerio Atlantic (Ekspla) ir 300 ps impulsų trukmės lazerio Atlantic HE (Ekspla) fundamentinė harmonika (1064 nm). Lazerinės sistemos parametrai pateikti 3.1 lentelėje. Eksperimento schema, sudaryta iš lazerio, galios slopintuvo (pusės bangos ilgio fazinės plokštelės ir Briusterio kampo poliarizatoriaus), teleskopo, kūginės prizmės ir 4F vaizdo perkėlimo sistemos, yra pateikta 3.1 pav. Beselio-Gauso pluošto formavimas, panaudojant vaizdo perkėlimo sistemą, plačiau aptartas 3.2 skyrelyje.

Apdirbamo bandinio padėtis XY plokštumoje pluošto atžvilgiu buvo keičiama naudojant dviejų ašių pozicionavimo stalus (Aerotech ALS25020). Bandinio padėtis vertikalia kryptimi buvo keičiama naudojant motorizuotą staliuką su žingsniniu varikliu (Standa), valdomu išoriniu kontrolieriu (Ekspla).

Eksperimentų metu buvo apdirbamos 1 mm ir 4 mm storio silikatinio stiklo plokštelės. 1 mm storio stiklo plokštelių išmatavimai buvo 76x26 mm.

Bandinių charakterizavimas buvo atliekamas optiniais mikroskopais (OM) BX51 (Olympus) ir Eclipse LV100 (Nikon) bei skenuojančiu elektronų mikroskopu (SEM) JSM-6490 LV (JEOL), užgarius 5 – 10 nm storio aukso sluoksnį ant stiklo paviršiaus kombinuotu garintuvu Q 150T ES (Quorum). Pjūvio sienelių profilis buvo matuojamas adatiniu profilometru Dektak 150 (Veeco).

3.2 Beselio-Gauso pluošto formavimas

Kuomet lazerio bangos ilgis yra 1064 nm, 5° pagrindo kampo idealiu eksikonu suformuoto pluošto centrinės smailės diametras yra lygus 21 μm. Skaidrių terpių apdirbimui reikia didesnio spinduliuotės intensyvumo ir mažesnių matmenų pažeidimų, todėl eksperimento schemoje buvo naudojama vaizdo perkėlimo sistema, sudaryta iš dviejų lęšių, kurių židinio nuotoliai žymimi f_1 ir f_2 . Už vaizdo perkėlimo sistemos centrinės smailės diametras d_0 buvo sumažinamas f_1/f_2 karto, o Beselio zonos ilgis $z_{\max} - (f_1/f_2)^2$ karto. Beselio zonos ilgis taip pat buvo keičiamas keičiant Gauso pluošto diametrą prieš eksikoną, panaudojant pluošto diametrą išplečiantį arba suspaudžiantį teleskopą, nes Beselio zonos ilgis yra tiesiog proporcingas Gauso pluošto diametrai prieš eksikoną. Eksperimentų metu naudotos vaizdo perkėlimo sistemos parametrai yra pateikiami 3.2 lentelėje. Pirmasis elementas buvo teigiamas lęšis, antrasis – asferinis lęšis arba objektyvas, sudarytas iš daugelio laužiančių paviršių. Toks elementas yra charakterizuojamas efektyviuoju židinio nuotoliu, pateiktu 3.2 lentelėje.

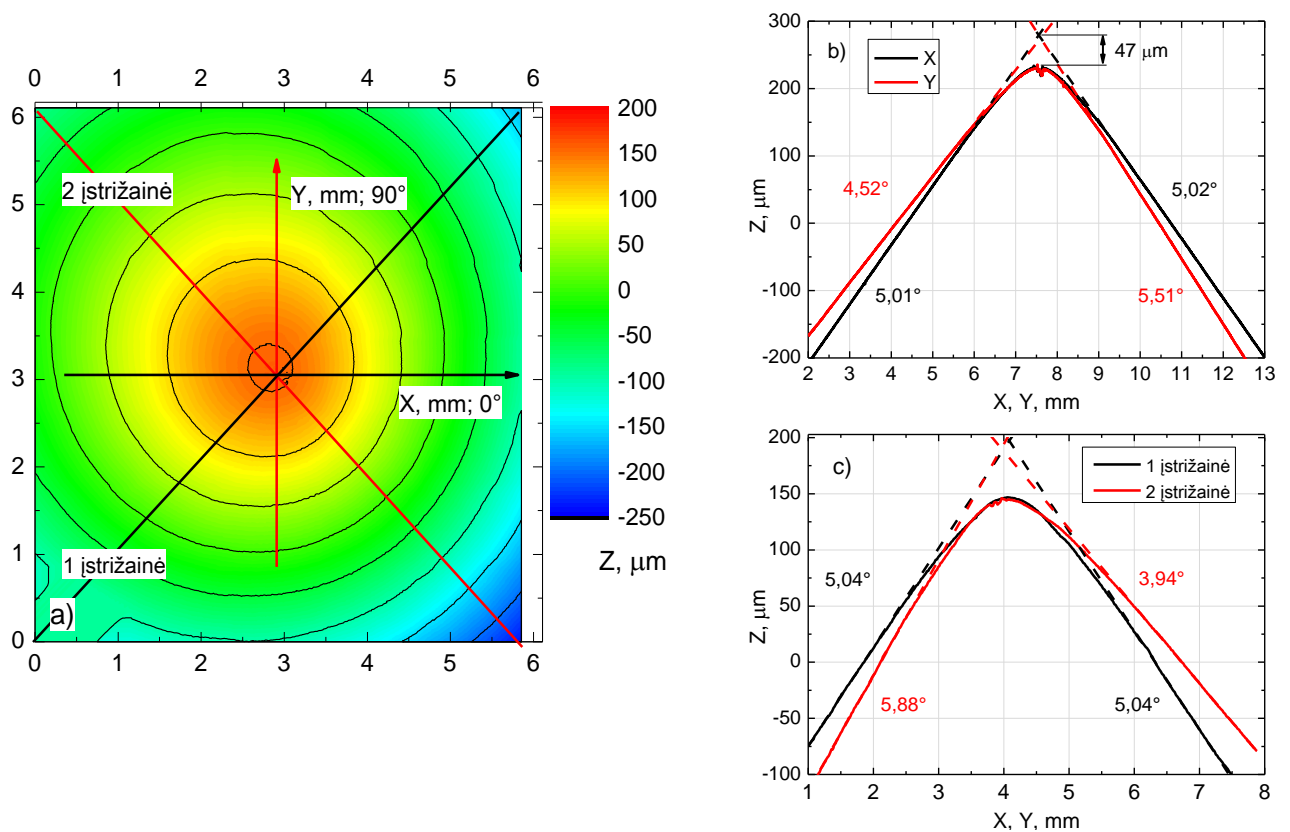
3.2 lentelė. Eksperimentų metu naudotos vaizdo perkėlimo sistemos.

Lazeris	Impulso trukmė, ps	Pluošto skersmuo, mm	Vaizdo perkėlimo sistema		
			f_1 , mm	f_2 , mm	f_1/f_2
Atlantic	10	1,67	100	11	9,09
Atlantic	10	1,67	50	4 (objektyvas)	12,5
Atlantic	10	1,67	50	10 (objektyvas)	5
Atlantic	10	1,67	75	10 (objektyvas)	7,5
Atlantic	10	1,67	100	10 (objektyvas)	10
Atlantic	10	2,72	100	10 (objektyvas)	10
Atlantic HE	300	2,96	100	10 (objektyvas)	10
Atlantic HE	300	2,96	50	10 (objektyvas)	5
Atlantic HE	300	2,96	75	10 (objektyvas)	7,5
Atlantic HE	300	4,46	75	10 (objektyvas)	7,5

4 Kūginė prizme suformuotas Beselio-Gauso pluoštas

4.1 Kūginės prizmės tyrimas

Eksperimentų metu Beselio-Gauso pluoštas buvo formuojamas naudojant vieno colio (25,4 mm) diametro apertūros kūginę prizmę, pagamintą iš lydyto kvarco, kurios pagrindo kampas yra 5° . Eksikonas buvo ištirtas optiniu profilometru Sensofar PL μ 2300 (VU LTC). Nustatyta, jog dėl gamybos proceso metu atsirandančių paklaidų kūginės prizmės pagrindas yra elipsės formos, o viršūnė yra užapvalinta ir pakrypusi viena kryptimi (4.1 pav.).



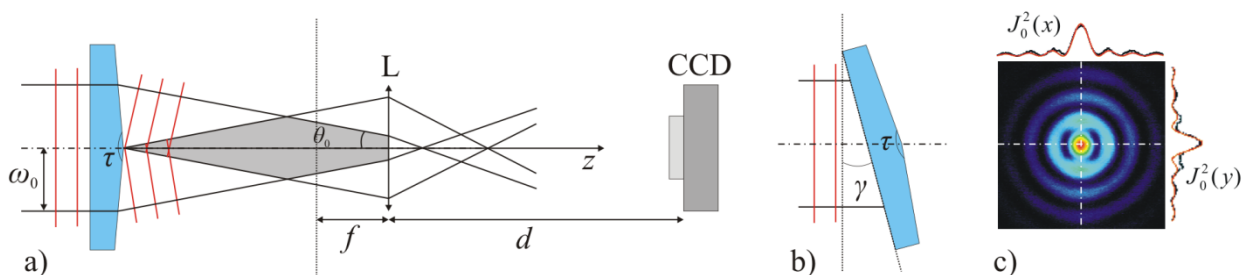
4.1 pav. a) Optiniu profilometru išmatuota eksikono paviršiaus topografija; b) eksikono profilis X ir Y kryptimis; c) eksikono profilis, išmatuotas 1 ir 2 įstrižainės kryptimis.

Išmatuotas atstumas nuo idealaus iki realaus eksikono profilio viršūnės buvo $\sim 50 \mu\text{m}$. Eksikono pagrindas yra elipsės formos, o vienodo aukščio kontūrų XY plokštumoje elipsės ašių santykis yra $\sim 1,04$. Eksikono viršūnė yra pasvirusi viena kryptimi (statesnis kraštas $5,88^\circ$, nuožulnesnis $3,94^\circ$), o vienodo aukščio kontūrų centro padėtis vidutiniškai pasislenka $50 \mu\text{m}$ XY plokštumoje kas $20 \mu\text{m}$ Z kryptimi.

Kūginės prizmės pagrindo kampas X ir Y kryptimis $\sim 1,6$ mm atstumu nuo viršūnės jau pakankamai gerai atitiko gamintojo deklaruojamus 5° . Eksperimentų metu Gauso pluošto skersmuo prieš eksikoną buvo keičiamas nuo $1,7$ mm iki $4,5$ mm, todėl didelė naudojamos apertūros dalis buvo nukrypusi nuo idealaus eksikono formos ir neišvengiamai darė įtaką pluošto formavimui.

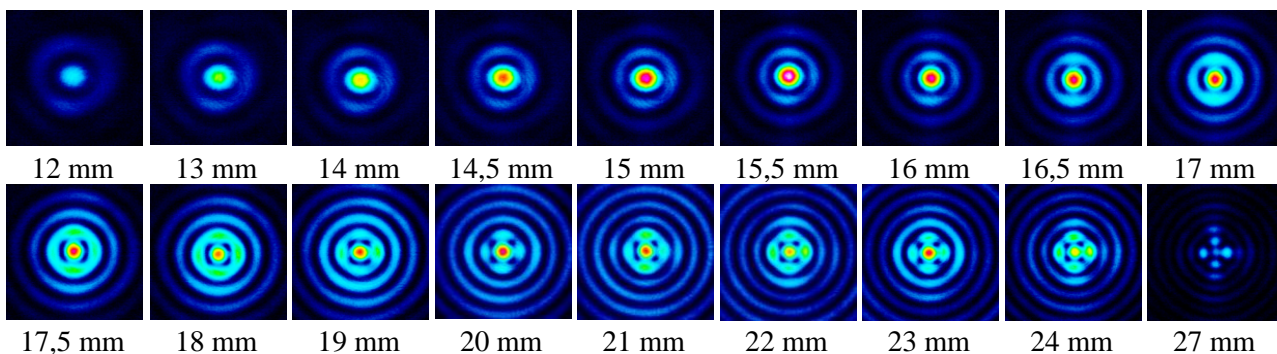
4.2 Kūginė prizme suformuoto Beselio-Gauso pluošto tyrimas

Eksikono paviršiaus formos tyrimo rezultatai yra pateikti 4.1 skyrelyje. Tokia kūginė prizme formuojamas skirstinys buvo atvaizduojamas ant CCD (*krūvių sąsajos įtaisas*, angl. *charge-coupled device*) kameros matricos, naudojant $f = 8$ mm židinio nuotolio ir 0,5 skaitinės apertūros asferinį lęšį (4.2 pav. a)). Kuomet atstumas tarp lęšio ir CCD kameros yra daug didesnis negu lęšio židinio nuotolis, ant CCD kameros yra atvaizduojamas lęšio židinio plokštumoje esantis objektas, padidintas $\sim d/f$ kartų. Tyrimų metu naudotas didinimas buvo nuo 16 iki 35,6 karto, o Gauso pluošto skersmuo prieš eksikoną buvo lygus 3 mm.



4.2 pav. a) Pluošto tyrimas su CCD kamera; b) γ kampu pakreiptas eksikonas; c) pluošto profilio tyrimas.

Tiriamas eksikonas buvo patalpintas laikiklyje, kurį galima sukti aplink ašį. 0° pozicija atitinka 4.1 pav. a) pateiktą žymėjimą. Laikiklį taip pat buvo galima pasukti apie ašį, statmeną sklaidimo kryptčiai, kad eksikono pagrindas sudarytų γ kampą su plokštuma, statmena sklaidimo kryptčiai (4.2 pav. b)).

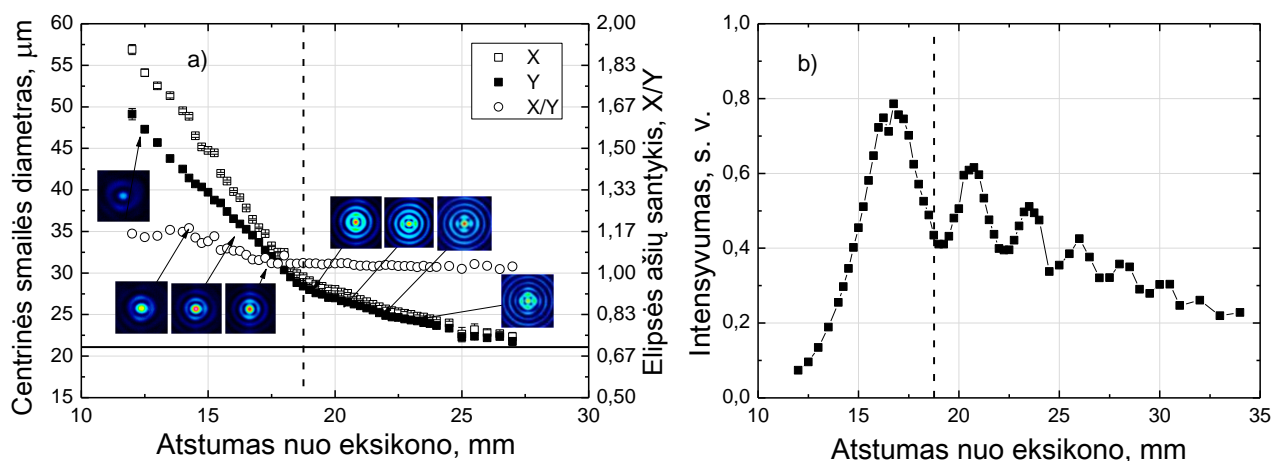


4.3 pav. Nepakreiptu eksikonu suformuoto pluošto intensyvumo skirstinys XY plokštumoje skirtingu atstumu nuo viršūnės.

Tyrimų metu buvo registruojamas intensyvumo skirstinys skirtingu atstumu nuo eksikono viršūnės, o išmatuoti profiliai statmenomis kryptimis buvo aproksimuojami Beselio funkcijos kvadratu. Dėl neidealios eksikono formos formuojamas skirstinys – centrinė smailė ir periferiniai žiedai – buvo elipsės formos. Suformuoto pluošto elipsiškumas buvo įvertintas kaip ašių santykis. Pateiktuose rezultatuose X kryptis atitinka elipsės ilgesniąją ašį, Z kryptis – pluošto sklaidimo kryptį.

Nepakreipto eksikono ašinė pozicija tokiu atveju sudarė 160° ir 340° kampus su registruojamo skirstinio horizontalia kryptimi.

Didėjant pluošto sklidimo nuotoliui, centrinė smailė ir aplinkiniai žiedai palaipsniui transformavosi į pavienius maksimumus, mažėjo kontrastas tarp žiedų, tačiau taip pat mažėjo ir centrinės smailės elipsiškumas (4.3 pav.). Didžiausias elipsės ašių santykis buvo lygus 1,18, o ženkliausias elipsiškumo mažėjimas buvo iki pusės Beselio zonos nuotolio (4.4 pav.), kuomet sumažėjo iki 1,04 ir iš esmės nebekito pluoštui sklindant tolyn nuo eksikono viršūnės.



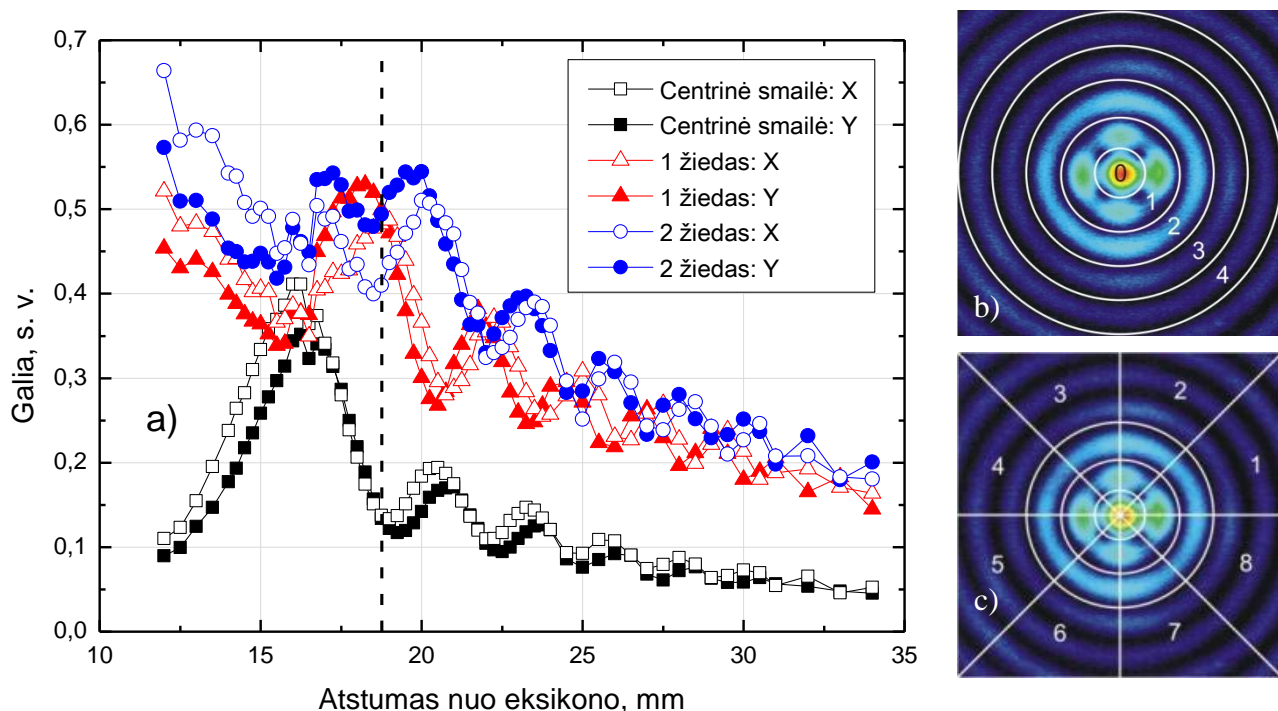
4.4 pav. a) Išmatuotas centrinės smailės diametras X ir Y kryptimis ir įvertintas pluošto elipsiškumas; ištisinė horizontali linija žymi 5° laipsnių idealiu eksikonu suformuotą centrinės smailės diametrą; punktyrinė linija žymi pusės Beselio zonos ilgį; **b)** centrinės smailės intensyvumo priklausomybė nuo atstumo iki eksikono viršūnės.

Centrinės smailės diametras mažėjo didėjant atstumui nuo eksikono viršūnės (4.4 pav. a)). Mažiausias išmatuotas centrinės smailės diametras siekė $21,8 \mu\text{m}$, tuo tarpu idealiu 5° pagrindo eksikonu suformuoto pluošto centrinės smailės diametras turėtų būti $21,1 \mu\text{m}$, kai bangos ilgis yra 1064 nm . Centrinės smailės intensyvumas sklidimo kryptimi periodiškai osciliavo (4.4 pav. b)). Šie reiškiniai yra sąlygoti užapvalintos eksikono viršūnės.

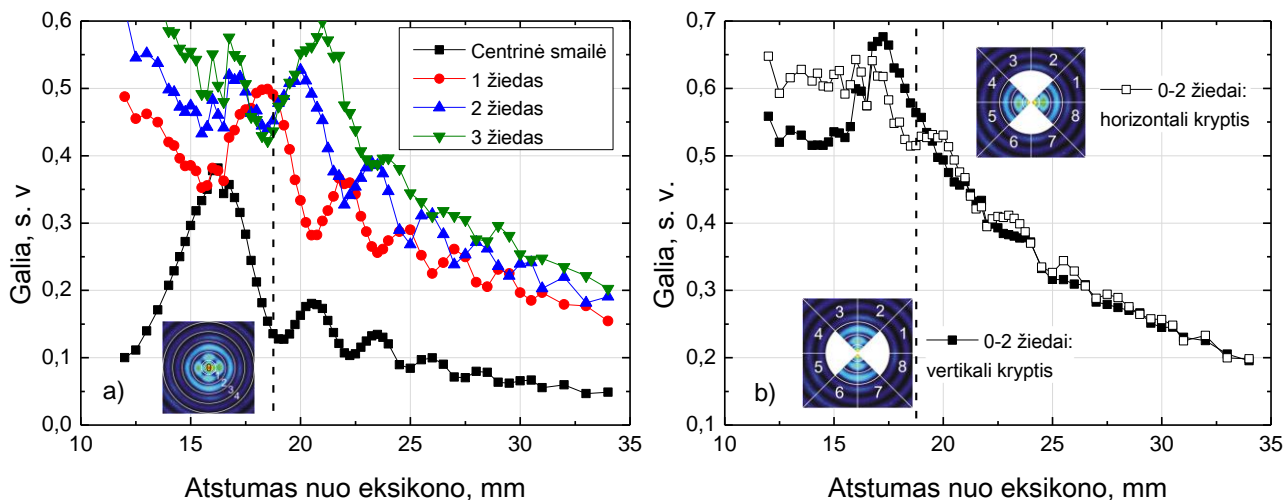
CCD kamera registruoja intensyvumą (W/cm^2), todėl susumavus atskirus kameros matricos elementus ir priskyrus atitinkamam žiedui (4.5 pav. b)) buvo įvertinta, kaip keičiasi galia (W) centrinėje smailėje ir aplinkiniuose žieduose, pluoštui sklindant už eksikono. Nustatyta, jog galia centrinėje smailėje ir žieduose periodiškai osciliuoja, o centrinės smailės (ir aplinkinių žiedų, pradedant antruoju) galios maksimumai su nedideliu poslinkiu atitinka pirmojo žiedo minimumus (4.6 pav.). Poslinkio vertė mažėja didėjant sklidimo nuotoliui.

Analizuojant duomenis, užregistruoto skirstinio centrinė smailė ir periferiniai žiedai buvo padalinti į 8 sektorius (4.5 pav. c)). Tuomet sektoriai buvo suskirstyti pagal X arba Y kryptį. 1, 4, 5, 8 sektoriai atitiko horizontalią, arba X, kryptį, o 2, 3, 6, 7 sektoriai atitiko vertikalią, arba Y, kryptį. Centrinėje smailėje didesnę galios dalis buvo sutelkta horizontalia kryptimi (4.5 pav. a)).

Susumavus centrinės smailės ir dviejų aplinkinių žiedų galią buvo pastebėta, jog priklausomai nuo atstumo iki eksikono viršūnės galia buvo didesnė horizontalia arba vertikalia kryptimis (4.6 pav.). Tokį periodišką galios kitimą skirtingomis kryptimis galima pastebėti ir su CCD kamera darytose nuotraukose (4.3 pav.).



4.5 pav. a) Galia centrinėje smailėje ir aplinkiniuose žieduose, padalinta į sektorius; b) skirstinio padalinimas į žiedus (0 atitinka centrinę smailę); c) skirstinio padalinimas į sektorius.

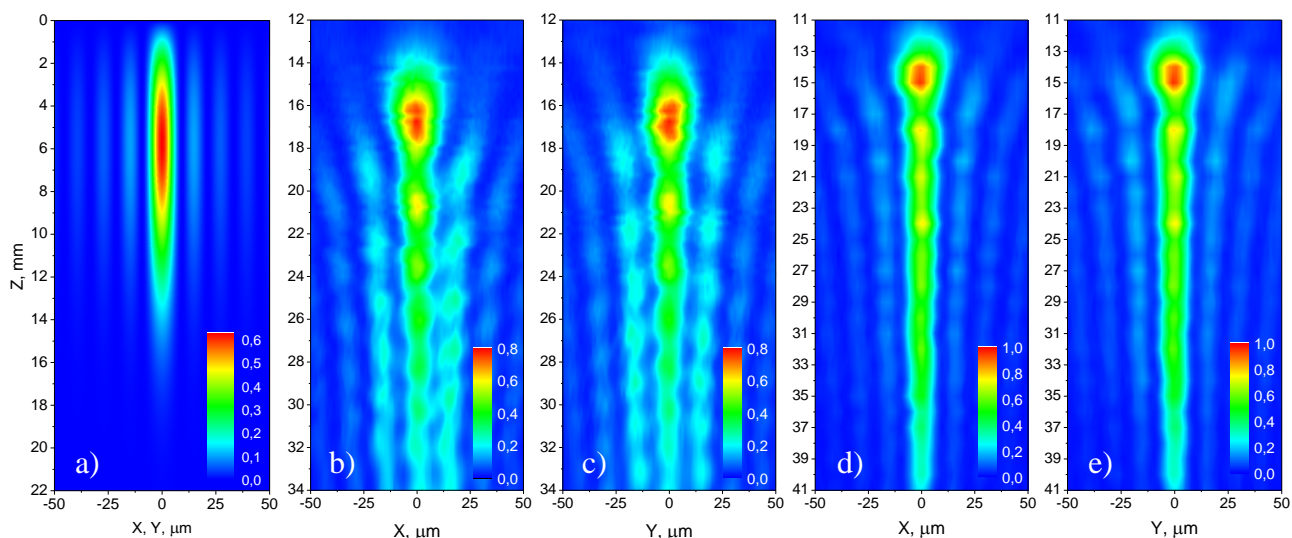


4.6 pav. a) Visa galia centrinėje smailėje ir aplinkiniuose žieduose; b) susumuota centrinės smailės ir pirmų dviejų aplinkinių žiedų galia, tenkanti sektoriams X ir Y kryptimis.

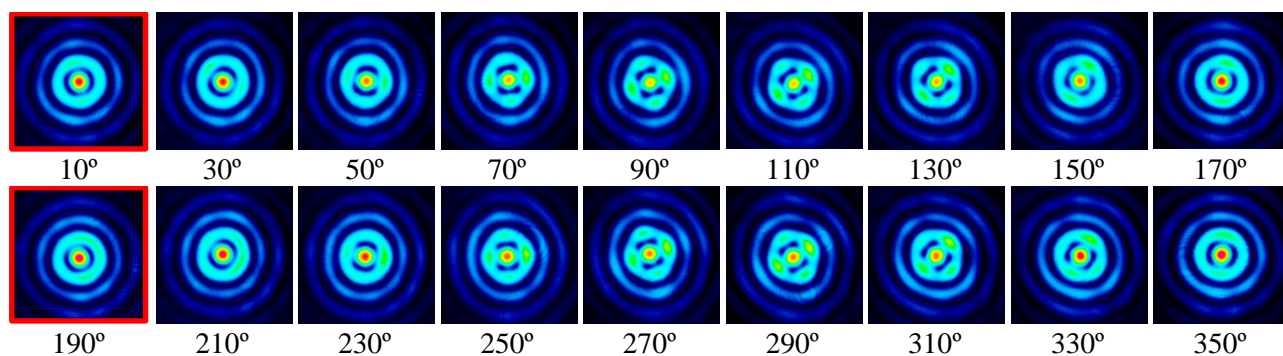
Išmatuoti Beselio-Gauso pluošto intensyvumo skirstiniai XZ ir YZ plokštumose bei palyginti su skirstiniu, apskaičiuotu idealaus 5° eksikono atveju, yra pateikti 4.7 pav.

Formuojamas skirstinys priklausė nuo eksikono pakreipimo kampo γ . Naudojant 15° pakreipimą, buvo pastebėta, jog egzistuoja dvi eksikono pasukimo apie ašį pozicijos, kuomet

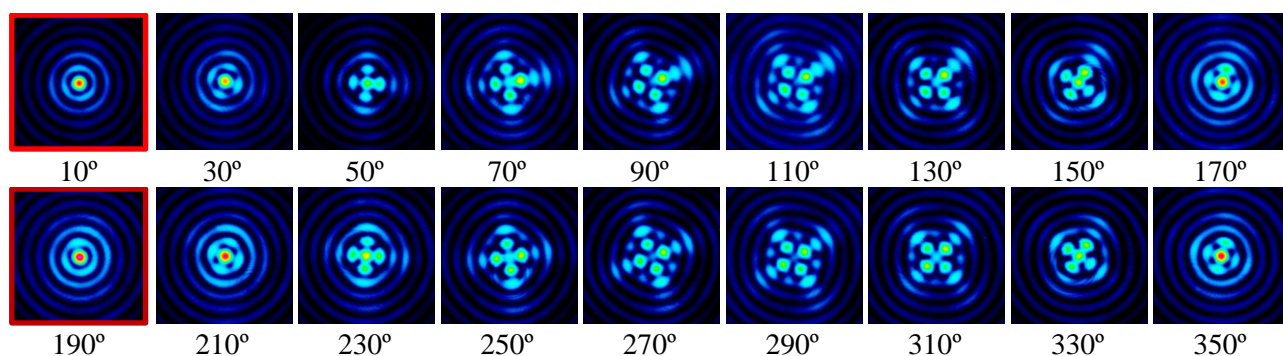
eksikonas yra suderintas ir galima suformuoti didesnio kontrasto skirstinį, kuris pluoštui sklindant neišskysta į pavienius maksimumus. Skirtumas tarp eksikono pasukimo ašinių padėčių buvo lygus 180° (4.8 pav.). Pluošto išskydymas keičiant eksikono pasukimo kampą buvo ženkliai didesniu atstumu nuo eksikono viršūnės (4.8 pav. - 4.10 pav.). Suderinto eksikono suformuoto skirstinio nuotraukos yra pažymėtos raudonu apvalu. Mažinant eksikono pakreipimo kampą buvo stebimas mažėjantis pluošto kontrastas ir didėjantis išsiskaidymas į atskirus maksimumus.



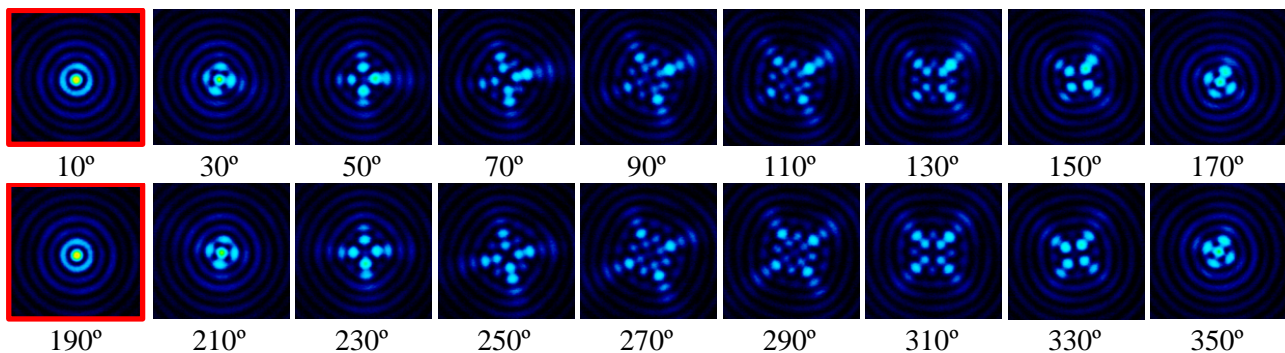
4.7 pav. Beselio-Gauso pluošto skirstinys XZ ir YZ plokštumose: a) apskaičiuotas idealaus 5° pagrindo kampo eksikono atveju; b) ir c) išmatuotas už nepakreipto eksikono; d) ir e) išmatuotas už 15° kampu pakreipto eksikono.



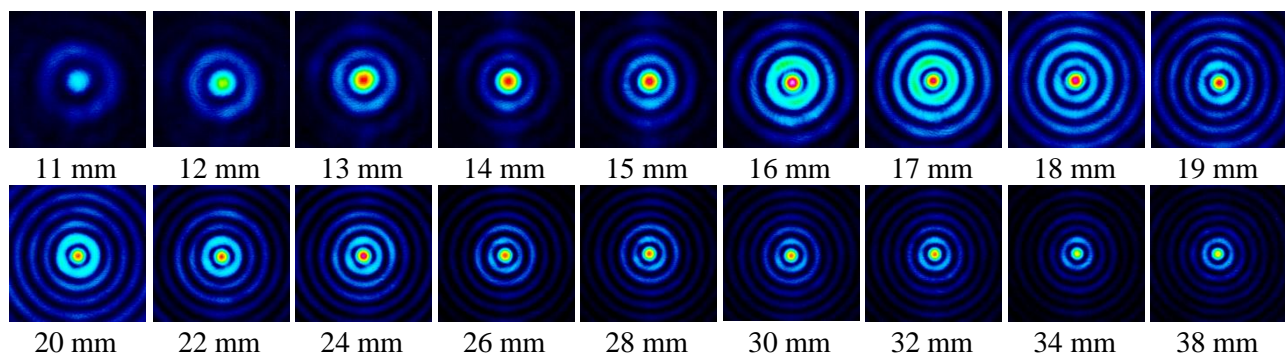
4.8 pav. 15° kampu pakreipto eksikono formuojamas pluoštas. Sukamas eksikono laikiklis apie ašį. Atstumas nuo eksikono viršūnės 16 mm.



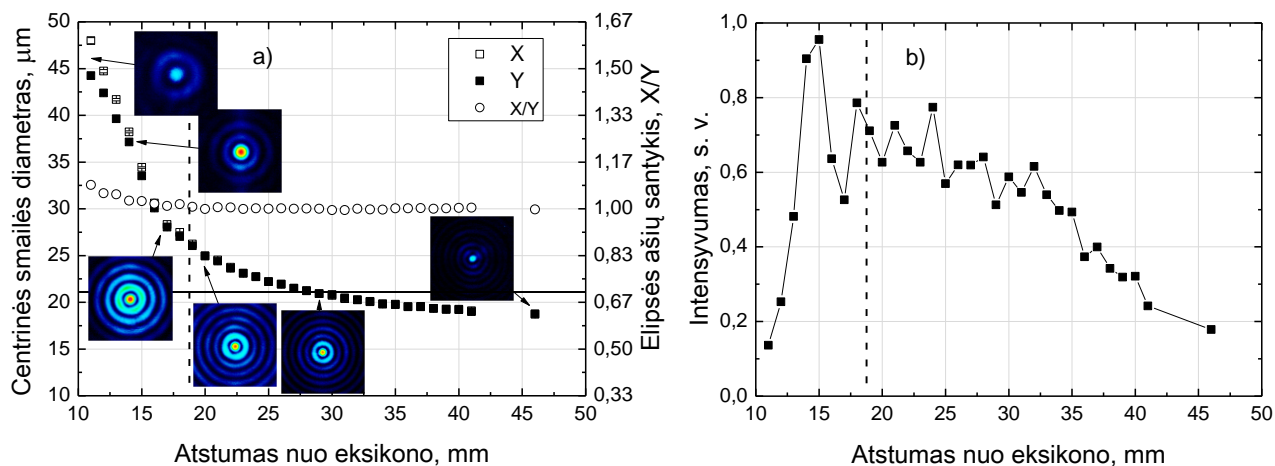
4.9 pav. 15° kampu pakreipto eksikono formuojamas pluoštas. Sukamas eksikono laikiklis apie ašį. Atstumas nuo eksikono viršūnės 26 mm.



4.10 pav. 15° kampu pakreipto eksikono formuojamas pluoštas. Sukamas eksikono laikiklis apie ašį. Atstumas nuo eksikono viršūnės 36 mm.



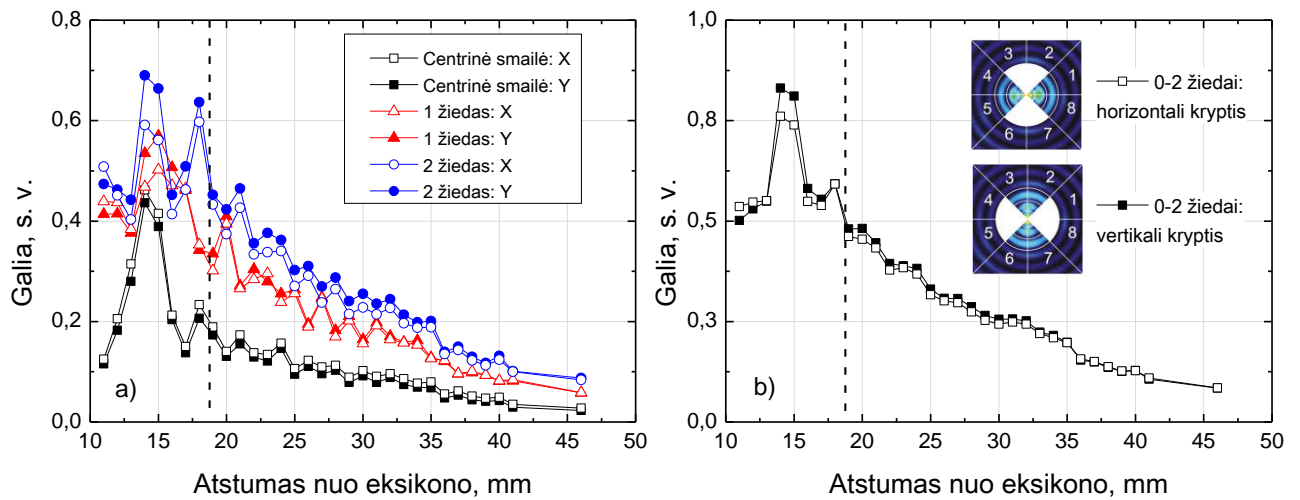
4.11 pav. 15° kampu pakreipto ir suderinto eksikono formuojamas pluoštas. Keičiamas atstumas nuo eksikono viršūnės.



4.12 pav. Pluošto formavimas pakreiptu eksikonu: a) išmatuotas centrinės smailės diametras X ir Y kryptimis ir įvertintas pluošto elipsiškumas; b) centrinės smailės intensyvumas ant pluošto sklaidimo ašies.

Pakreiptas ir suderintas eksikonas formavo pluoštą, kurio centrinės smailės diametras buvo mažesnis ir mažiau elipsinis, lyginant su nepakreiptu eksikonu. Toks pluoštas neišskydo į atskirus maksimumus (4.11 pav. ir 4.12 pav. a)). Nors pluošto intensyvumo ir galios osciliacijos centrinėje smailėje ir aplinkiniuose žieduose išliko (4.12 pav. b)), galia tokiame skirstinyje pasiskirstė vienodai vertikalia ir horizontalia kryptimis (4.13 pav.). Galima padaryti išvadą, jog yra įmanoma

pagerinti eksikonu su astigmatinėmis aberacijomis formuojamo pluošto kokybę, pakreipus eksikoną bei parinkus tinkamą pasukimo apie ašį poziciją.



4.13 pav. Pluošto formavimas pakreiptu eksikonu: a) galia centrinėje smailėje ir aplinkiniuose žieduose, padalinta į sektorius; b) susumuota centrinės smailės ir pirmų dviejų aplinkinių žiedų galia, tenkanti sektoriams X ir Y kryptimis.

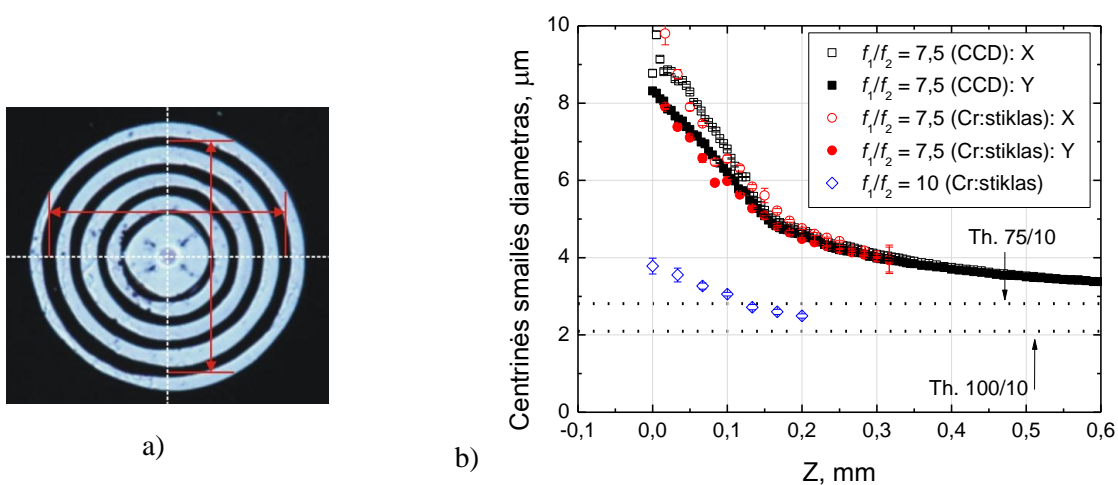
Astigmatinės eksikono aberacijos sukuria simetrinį pluošto išsiskaidymą į atskirus maksimumus statmenomis kryptimis. Tas ir buvo stebima tiriant pakreipto ir išderinto eksikono suformuotą intensyvumo skirstinį dideliu atstumu nuo eksikono viršūnės (4.10 pav.). Pluoštą tokiu nuotoliu formavo kūgį atitinkanti eksikono formos dalis ir tokiu būdu galima paaiškinti mažėjantį centrinės smailės elipsiškumą didėjant sklaidimo nuotoliui. Tuo tarpu arčiau eksikono viršūnės pluoštas yra formuojamas užapvalinta sritimi, kurią galima laikyti sferiniu lęšiu. Dėl astigmatinių aberacijų sferiniu lęšiu suformuotas skirstinys statmenomis kryptimis išskysta nevienodai, todėl suformuotas pluoštas arčiau eksikono viršūnės yra elipsės formos. Intensyvumo moduliacijos pluoštui sklindant atsiranda dėl interferencijos tarp sferinės bangos ir Beselio pluošto, suformuoto eksikono kūgine dalimi.

Pakreipus eksikoną ir pasukus apie ašį tinkamu kampų, aberacijos, atsirandančios dėl eksikono pakreipimo, kompensuoja elipsės formos pagrindo sąlygotas aberacijas, todėl pluoštas nebeiškysta į atskirus maksimumus. Tuo pačiu yra pakreipiama ir eksikono viršūnė, todėl, nors ir ne visiškai, tačiau sumažėja pluošto elipsiškumas iš karto už eksikono viršūnės.

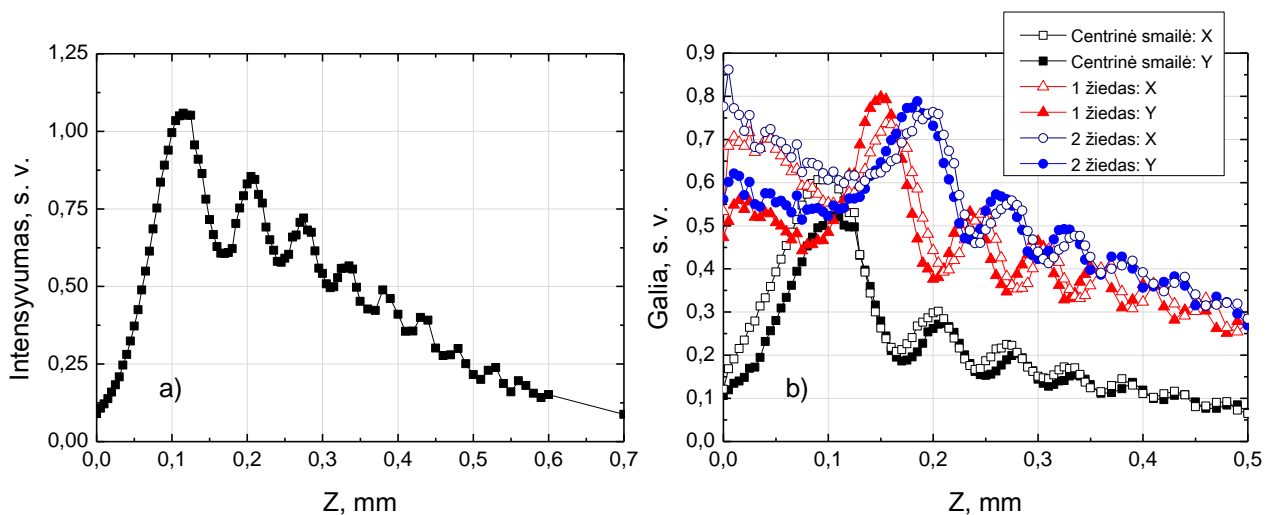
4.3 Beselio-Gauso pluošto už vaizdo perkėlimo sistemos tyrimas

Siekiant ištirti vaizdo perkėlimo sistemos įtaką skirstinio formavimui, Beselio-Gauso pluoštas buvo ištirtas naudojant du metodus: (1) atvaizduojant skirstinį ant CCD matricos ir (2) nuabliuojant Chromo sluoksnį, užgarintą ant stiklo paviršiaus. Pirmasis metodas leido kiekybiškai įvertinti pluošto intensyvumą. Naudojant antrąjį metodą, matuojant atstumus tarp išabliuotų žiedų (4.4 pav.

a)), buvo įvertintas centrinės smailės diametras, keičiant bandinio poziciją vertikalia kryptimi skirstinio atžvilgiu. Tyrimų metu eksikonas nebuvo pakreiptas, naudotos $f_1/f_2 = 7,5$ ir 10 vaizdo perkėlimo sistemos. Pluošto skersmuo prieš eksikoną buvo 3 mm.



4.14 pav. a) Nuabliuotas chromo sluoksnis nuo stiklo paviršiaus ir atstumo tarp žiedų matavimas; b) išmatuotas centrinės smailės diametras ir jo priklausomybė nuo sklidimo nuotolio.

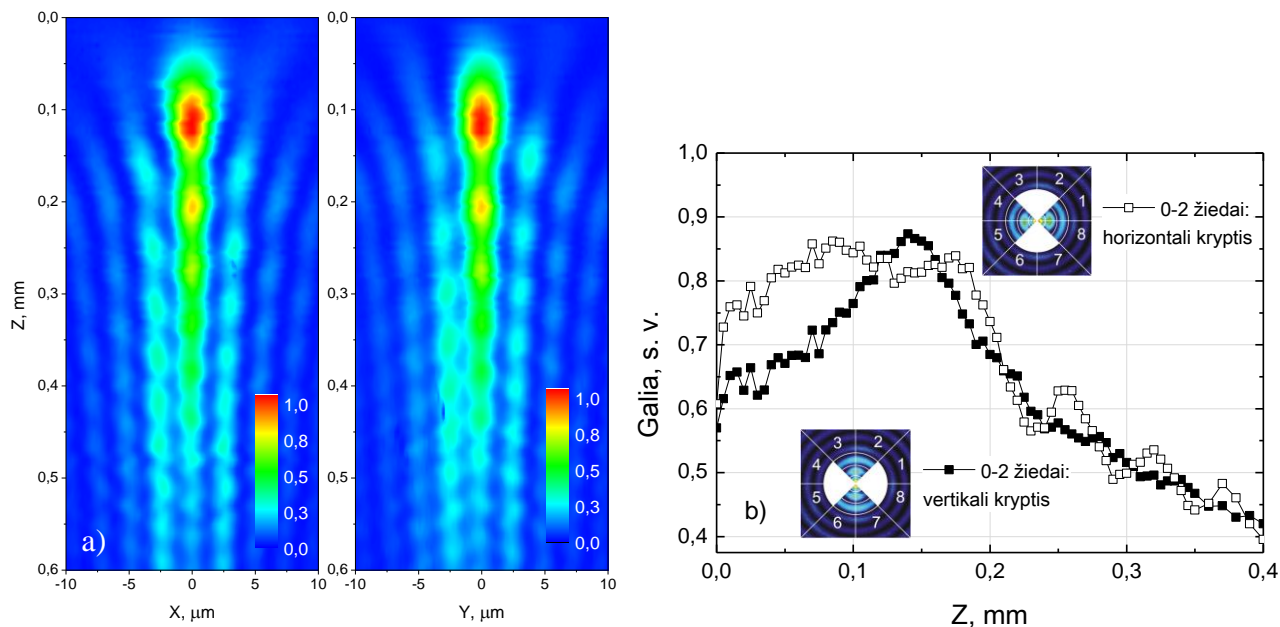


4.15 pav. a) Centrinės smailės intensyvumas ant pluošto sklidimo ašies; b) galia centrinėje smailėje ir aplinkiniuose žieduose, padalinta į sektorius. $f_1/f_2 = 7,5$ vaizdo perkėlimo sistema.

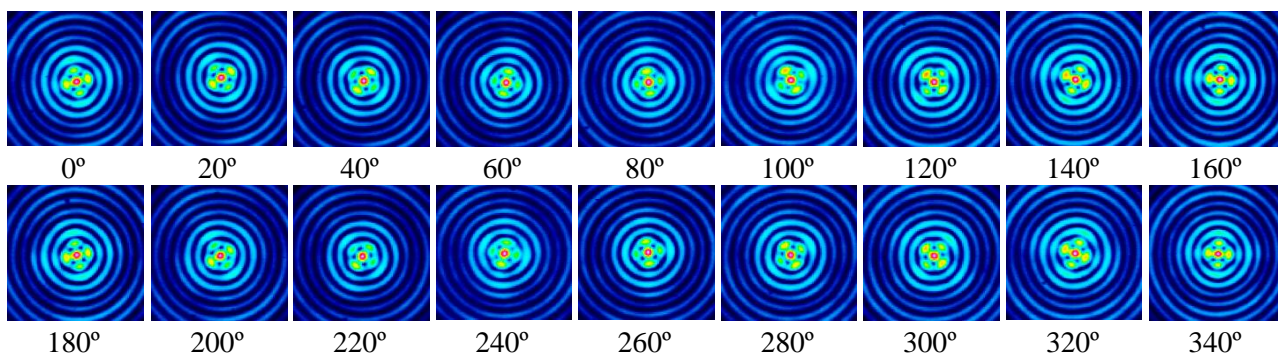
Centrinės smailės diametras ir elipsiškumas mažėjo pluošto sklidimo kryptimi (4.14 pav. b)). Naudojant $f_1/f_2 = 7,5$ vaizdo perkėlimo sistemą, vertinant pagal atstumą tarp išabliuotų žiedų, centrinės smailės diametras ištirtoje srityje mažėjo nuo 9,8 μm iki 4 μm ir sutapo su apskaičiuotu naudojant pluošto atvaizdavimą ant CCD matricos. $f_1/f_2 = 10$ sistemos atveju pluošto diametras sumažėjo nuo 3,8 μm iki 2,5 μm. Tokiomis optinėmis sistemomis sumažintos idealiau eksikonu suformuotos centrinės smailės diametras turėtų būti lygus atitinkamai 2,8 μm ir 2,1 μm.

Vaizdo perkėlimo sistema papildomų reikšmingų aberacijų neįnešė ir suformuotas pluoštas turėjo panašias charakteristikas kaip ir iš karto už eksikono. Intensyvumo skirstinys palaipsniui išskyrė į atskirus maksimumus, taip pat buvo stebimos periodinės intensyvumo ir galios osciliacijos

(4.15 pav.). Pluošto skirstinys XZ ir YZ plokštumose yra pateiktas 4.16 pav. a). Didesnė galios dalis centrinėje smailėje ir dviejuose aplinkiniuose žieduose buvo sutelkta horizontalia kryptimi, kuri atitinka elipsės ilgesniąją ašį (4.16 pav. b)). Tokią skirstinio konfiguraciją XY plokštumoje buvo įmanoma sukurti apie ašį pluošto sklaidimo kryptimi keičiant eksikono poziciją apie ašį (4.17 pav.).



4.16 pav. a) Pluošto skirstinys XZ ir YZ plokštumose; b) susumuota centrinės smailės ir pirmų dviejų aplinkinių žiedų galia, tenkanti sektoriams X ir Y kryptimis. $f_1/f_2 = 7,5$ vaizdo perkėlimo sistema.



4.17 pav. Suformuotas skirstinys už vaizdo perkėlimo sistemas. Sukamas eksikono laikiklis.

5 Stiklo apdirbimas kūgine prizme suformuotu Beselio-Gauso pluoštu

5.1 Stiklo modifikacijų suformavimas tūryje

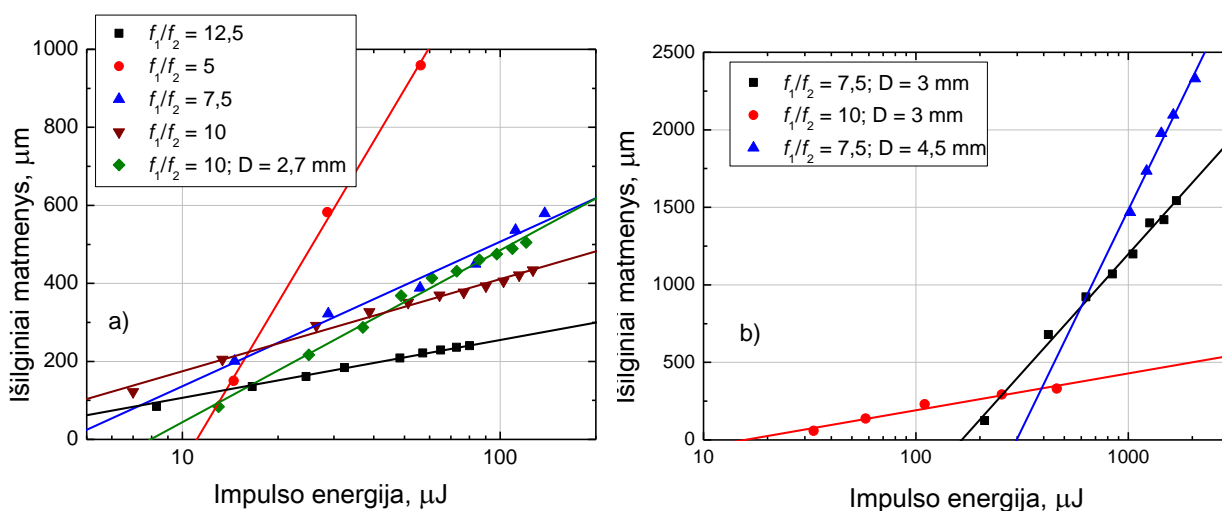
Naudojant vaizdo perkėlimo sistemas su skirtingu mažinimu, eksperimentų metu buvo skenuojamos linijos skirtingame aukštyje stiklo plokštelės tūryje. Po apdirbimo stiklo plokštelės buvo perlaužiamos statmena skenavimo linijoms kryptimi, nupoliruotos ir vaizdintos optiniu mikroskopu. Tokiu būdu buvo išmatuoti stiklo modifikacijų ir pažeidimų išilginiai matmenys.

Atliekant eksperimentus 10 ps impulsų trukmės lazeriu Atlantic, impulso energija buvo keičiama nuo 4 μJ iki 140 μJ , impulsų pasikartojimo dažnis buvo 4 kHz, o skenavimo greitis 10 mm/s. Erdvinis atstumas tarp pažeidimų skenavimo kryptimi buvo lygus 2,5 μm . Naudotos vaizdo perkėlimo sistemos ir teoriškai įvertinti suformuoto Beselio-Gauso pluošto parametrai yra pateikti 5.1 lentelėje. Reikia pažymėti, jog dėl šviesos bangos lūžimo pereinant skirtingo lūžio rodiklio terpių sandūrą padidėja Beselio zonos ilgis:

$$z_{\max \text{ st.}} = z_{\max} (n_{\text{stiklo}}/n_{\text{oro}}). \quad (29)$$

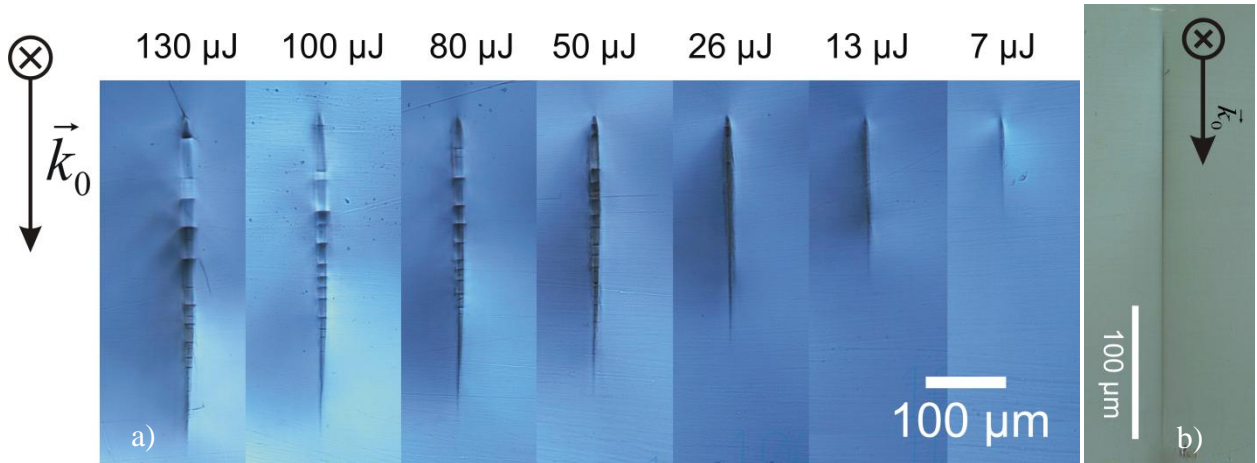
5.1 lentelė. Vaizdo perkėlimo sistemos dirbant su Atlantic lazeriu.

Pluošto skersmuo D , mm	Vaizdo perkėlimo sistema			Už vaizdo perkėlimo sistemos		
	f_1 , mm	f_2 , mm	f_1/f_2	d_0 , μm	Z_{\max} , mm	$Z_{\max \text{ st.}}$, mm
1,67	100	11	9,09	2,3	0,26	0,38
1,67	50	4	12,5	1,7	0,14	0,20
1,67	50	10	5	4,2	0,85	1,27
1,67	75	10	7,5	2,8	0,38	0,57
1,67	100	10	10	2,1	0,21	0,32
2,72	100	10	10	2,1	0,34	0,51



5.1 pav. Beselio-Gauso pluoštu suformuotų modifikacijų išilginiai matmenys naudojant a) 10 ps impulsų trukmės lazerį Atlantic ir b) 300 ps impulsų trukmės lazerį Atlantic HE.

Išmatuoti išilginiai pažeidimų matmenys ištirtoje srityje tiesiškai priklausė nuo impulso energijos logaritminėje skalėje (5.1 pav. a)). Keičiant vaizdo perkėlimo sistemos mažinimą, kito stiklo modifikacijų išilginių matmenų dydis. Naudojant $f_1/f_2 = 5$ sistemą buvo suformuotos modifikacijos per visą 1 mm storio stiklą, o mažiausių išilginių matmenų pažeidimai buvo formuojami naudojant $f_1/f_2 = 12,5$ sistemą.



5.2 pav. Atlantic lazeriu suformuotos stiklo tūrinės modifikacijos, naudojant a) $f_1/f_2 = 10$ vaizdo perkėlimo sistemą, kuomet Gauso pluošto skersmuo prieš eksikoną 1,67 mm; b) $f_1/f_2 = 5$ vaizdo perkėlimo sistemą ir 30 μJ impulsus.

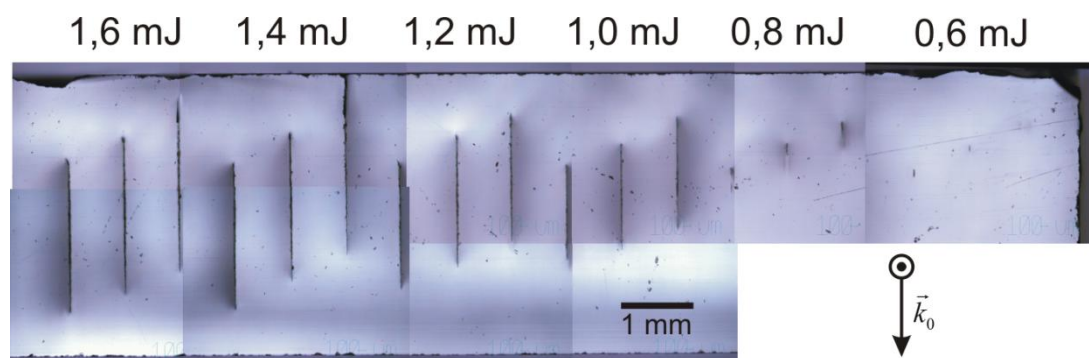
Kuomet impulso energija buvo nedidelė, o spinduliuotės intensyvumas buvo arti terpės modifikavimo slenksčio, skenuojant linijas stiklo tūryje buvo keičiamas medžiagos lūžio rodiklis, o suformuotos modifikacijos pasižymėjo dideliu ilgio ir pločio santykiu (5.2 pav. b)). Didinant impulso energiją, ties apdirbimo plokštuma pradėdavo formotis skersiniai ir išilginiai pažeidimai, taip pat pažeidimai išplisdavo skersine kryptimi. Naudojant $f_1/f_2 = 10$ vaizdo perkėlimo sistemą, skersinių įtrūkių formavimasis prasidėjo ties 50 μJ (5.2 pav. a)). Skersinių pažeidimų atsiradimą galima paaiškinti periodinėmis centrinės smailės intensyvumo osciliacijomis pluošto sklaidimo kryptimi (4.15 pav. a)).

Atliekant eksperimentus 300 ps impulsų trukmės lazeriu Atlantic HE, buvo naudojamos 3 skirtingos vaizdo perkėlimo sistemos: $f_1/f_2 = 5; 7,5; 10$ ir skirtingas Gauso pluošto diametras prieš eksikoną (5.2 lentelė). Dėl apriboto lazerio impulsų pasikartojimo dažnio, skenavimo greitis buvo sumažintas iki 2,5 mm/s tam, kad būtų išlaikomas vienodas 2,5 μm erdvinis atstumas tarp pažeidimų skenavimo kryptimi kaip ir naudojant Atlantic lazerį. Šioje sistemoje buvo pasiekama didesnė impulsų energija, todėl buvo naudojamas didesnio diametro Gauso pluoštas prieš eksikoną ir Beselio zonos ilgis buvo didesnis. Tai leido suformuoti pažeidimus per visą 1 mm bandinio storį. Apdirbant 1 mm ir 4 mm storio stiklo plokšteles, išmatuotų išilginių pažeidimų matmenų

priklausomybės nuo impulso energijos yra pateiktos 5.1 pav. b). Suformuotų modifikacijų pavyzdžiai 4 mm storio stiklo tūryje yra pateikti 5.3 pav.

5.2 lentelė. Vaizdo perkėlimo sistemos dirbant su Atlantic HE lazeriu.

Pluošto skersmuo D , mm	Vaizdo perkėlimo sistema			Po vaizdo perkėlimo sistemos		
	f_1 , mm	f_2 , mm	f_1/f_2	d_0 , μm	Z_{max} , mm	$Z_{\text{max st.}}$, mm
2,96	100	10	10	2,1	0,38	0,56
2,96	50	10	5	4,2	1,50	2,25
2,96	75	10	7,5	2,8	0,67	1,00
4,46	75	10	7,5	2,8	1,00	1,50



5.3 pav. Atlantic HE lazeriu suformuotos modifikacijos 4 mm storio stiklo tūryje. Naudota $f_1/f_2 = 7,5$ vaizdo perkėlimo sistema. Gauso pluošto skersmuo prieš eksikoną 4,5 mm.

Modifikacijų ir pažeidimų suformavimas per visą ruošinio storį leidžia apdirbti medžiagas nekeičiant bandinio padėties vertikalia kryptimi eksikono atžvilgiu. Stiklo pjovimas naudojant šią metodiką yra aptartas 5.4 skyrelyje. Kuomet modifikacijų išilginiai matmenys yra mažesni negu bandinio storis, siekiant suformuoti defektų plokštumą bandinyje, reikia keisti pažeidimų formavimo aukštį tūryje.

5.2 Pažeidimų formavimas skirtingame aukštyje bandinio tūryje

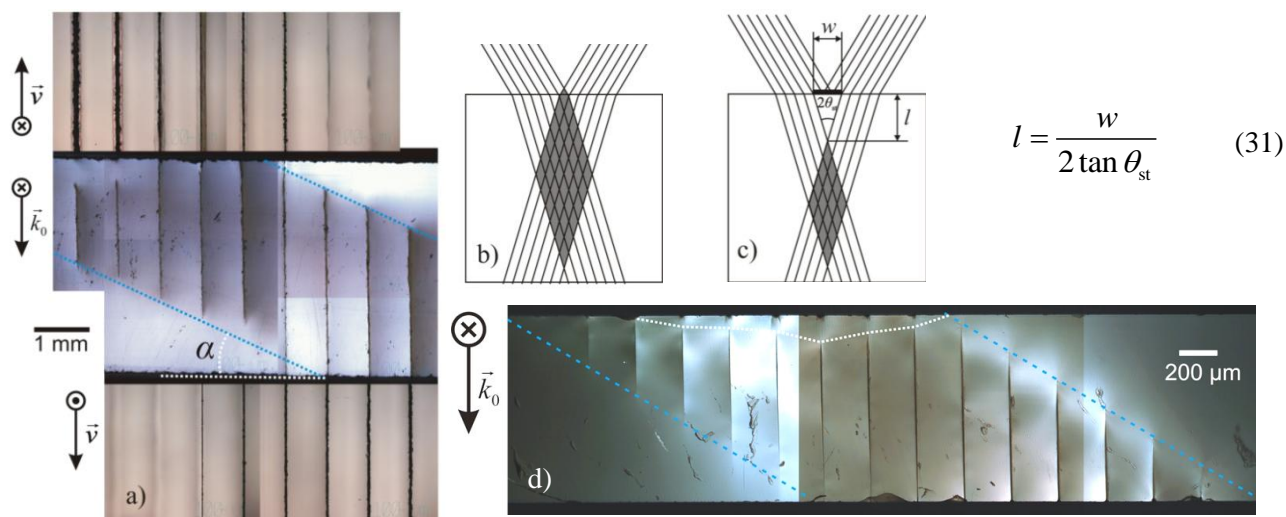
Naudojant Beselio pavidalo pluoštus, medžiagų apdirbimo procesas yra mažiau jautrus sferinėms aberacijoms, negu fokusuojant Gauso pluoštą didelės skaitinės apertūros objektyvu be papildomų optinių elementų sferinės aberacijos korekcijai, kurie tokiu atveju turi priklausyti nuo to, kokiame skaidrios terpės gylyje yra fokusuojamas pluoštas. Beselio-Gauso pluoštą formuojantys bangų vektoriai guli ant kūginio paviršiaus, todėl praeidami skirtingo lūžio rodiklio terpių sandūrą krinta ir lūžta vienodu kampu ir tokiu pluoštu suformuoti pažeidimai turėtų nepriklausyti nuo to, kokiame aukštyje bandinio tūryje yra formuojami. Atliekant bandinio postūmį vertikalia kryptimi,

terpėje suformuojamų pažeidimų poslinkis turi būti perskaičiuojamas įvertinant medžiagos lūžio rodiklį n_{st} :

$$\Delta z_{st} \approx \Delta z_{ore} n_{st}; \quad (30)$$

čia Δz_{ore} atitinka bandinio postūmį vertikalia kryptimi.

Eksperimentų metu buvo pademonstruotas tolygus tūrinių stiklo pažeidimų padėties kitimas keičiant pozicionavimo staliuko padėtį vertikalia kryptimi (5.4 pav. a), d)). Tačiau galima pastebėti, jog ties viršutine stiklo plokštelės dalimi yra tam tikro aukščio sritis, kurioje nesusiformuoja pažeidimai. Nors stiklo plokštelė skirstinio atžvilgiu yra leidžiama žemyn, tokia zona išlieka. Tai galima paaiškinti dvejopai: (1) stiklo plokštelės viršutinėje dalyje yra suformuojami paviršiaus pažeidimai, kurie blokuoja tolimesnį pluošto sklidimą (5.4 pav. c); (2) apdirbimo metu, ties paviršiumi įvyksta oro pramušimas, susiformuoja plazmos debesėlis, kuris taip pat ekranuoja pluoštą. Pateiktame pavyzdyje, skenuojant 4 mm storio stiklą 2,5 mm/s greičiu Atlantic HE lazerio pluoštu, nuo viršutinio paviršiaus buvo maždaug 0,4-0,55 mm ilgio nepažeista zona.



5.4 pav. a) Atlantic HE lazeriu suformuoti stiklo pažeidimai skirtingame aukštyje bandinio tūryje; b) pluošto sklidimas ties skirtingo lūžio rodiklio terpių sandūra; c) pluošto sklidimo blokavimas dėl bandinio paviršiaus pažeidimų; d) Atlantic lazeriu suformuoti pažeidimai skirtingame aukštyje bandinio tūryje. Pluošto skenavimo greitis 5 mm/s, 150 μJ, 4 kHz, $f_1/f_2 = 7,5$ vaizdo perkėlimo sistema.

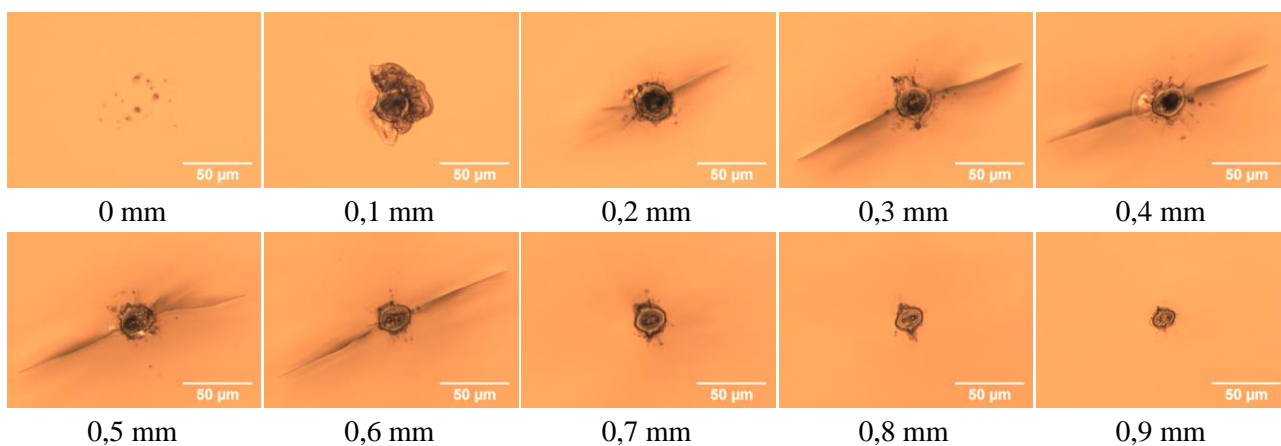
Naudojant geometrinės optikos artinį, galima įvertinti nepažeistos stiklo zonos ilgį l , arba atstumą nuo stiklo paviršiaus iki stiklo tūryje suformuotų pažeidimų viršutinės dalies, kuomet pluošto sklidimas yra blokuojamas dėl paviršiuje suformuotų pažeidimų (31). Šioje išraiškoje w – paviršiaus pažeidimų skersiniai matmenys, $2\theta_{st}$ – kūgio kampas stikle [59]. Pateikto pavyzdžio atveju (5.4 pav. a) išmatuotos stiklo poveikio zonos ilgis buvo 190 μm, o paviršiaus pažeidimų matmenys siekė 120 μm. Žinant, kad kampas tarp kūginio bangos fronto ir ašies buvo apytikriai lygus 7,8°, naudojantis (31) išraiška, galima įvertinti pluošto atsistatymo (rekonstrukcijos) nuotolį,

kuris tokiu atveju yra 700 μm ir 440 μm . Eksperimentiniu būdu įvertintos zonos ilgis be tūryje suformuotų pažeidimų patenka į šį intervalą.

Galima pastebėti, jog keičiant bandinio padėtį vertikalia kryptimi, keičiasi ir stiklo paviršiaus morfologija – pažeidimų diametras ir išabliuotų kraterių gylis. Šį kitimą galima paaiškinti tuo, jog formuojant Beselio pluoštą yra naudojamas baigtinio diametro Gauso pluoštas. Tokiu būdu atsiranda suformuoto pluošto centrinės smailės intensyvumo kitimas išilgai sklidimo krypties. Stiklo paviršiaus pažeidimas yra slenkstinis procesas, todėl didėjant intensyvumui, keičiasi pažeidimo skersiniai matmenys. Esant pakankamam intensyvumui, stiklo paviršius yra veikiamas ne tik centrinės smailės, bet ir Beselio pavidalo pluošto žiedų.

5.3 Stiklo įtrūkių formavimasis

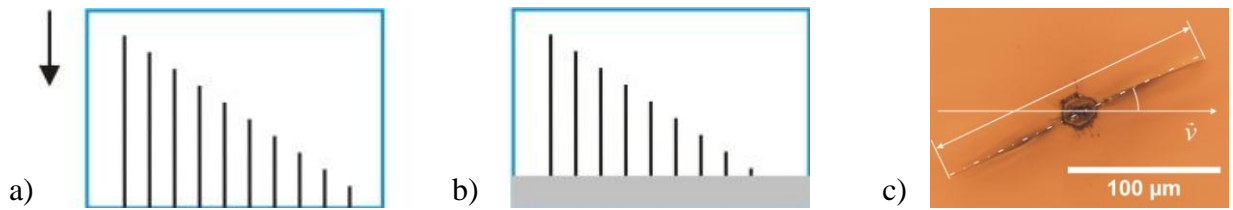
Susiformuojantys įtrūkliai stikle buvo įvertinti skenuojant linijas ir keičiant suformuoto Beselio-Gauso skirstinio padėtį bandinio tūryje, naudojant 300 ps impulsų trukmės lazerį Atlantic HE ir $f_1/f_2 = 7,5$ vaizdo perkėlimo sistemą. Gauso pluošto skersmuo prieš eksikoną buvo 3 mm. Atlikti eksperimentai keičiant eksikono laikiklio padėtį apie ašį, pakreipimą bei impulso energiją.



5.5 pav. Susiformuojantys įtrūkliai apatinėje stiklo plokštelės pusėje, keičiant bandinio padėtį vertikalia kryptimi. Impulso energija 2 mJ.

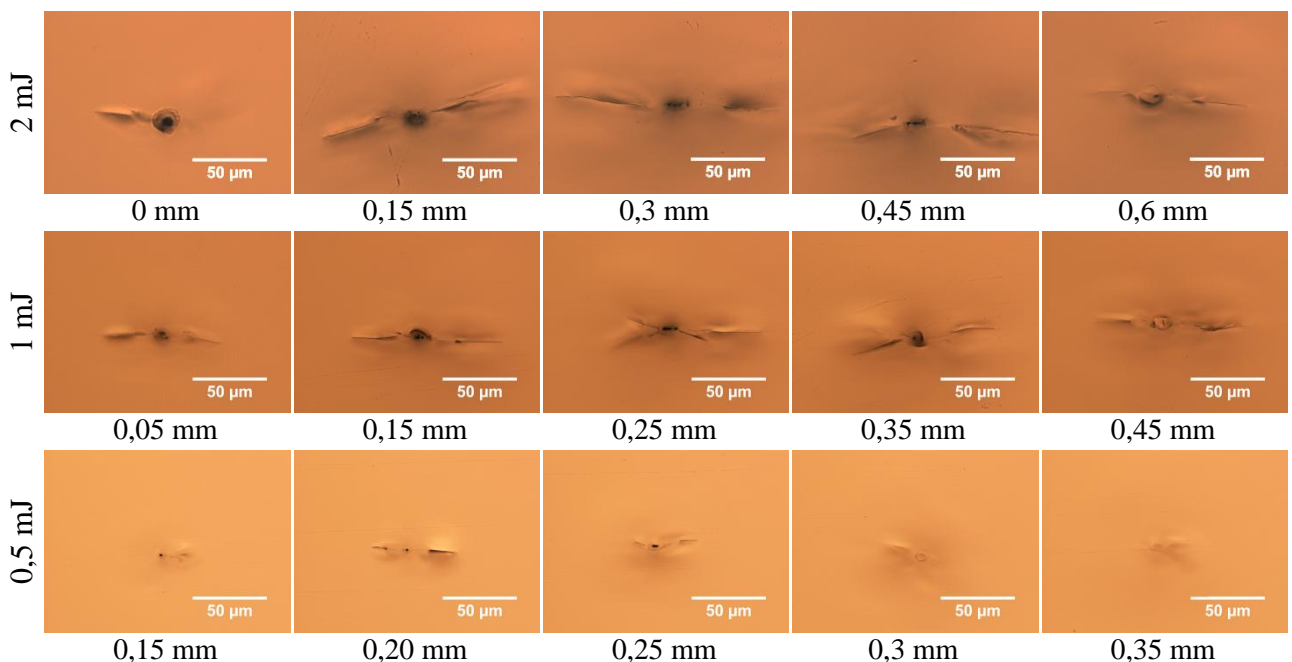
Keičiant Beselio-Gauso skirstinio padėtį bandinyje Z kryptimi, buvo sudaromos tokios apdirbimo sąlygos, kad besiformuojantys įtrūkliai stikle išplistų statmena pluošto sklidimui kryptimi (5.5 pav.). Apdirbant 2 mJ energijos impulsais, kuomet suformuoto skirstinio viršutinė padėtis buvo ties stiklo apatiniu paviršiumi, buvo stebimos pavienės išsibarsčiusios stiklo paviršiaus modifikacijos. Leidžiant bandinį skirstinio atžvilgiu žemyn, apatinėje pusėje pradėjo formotis elipsės formos krateris ir stiklo pažeidimai. Nuo 0,2 mm galima stebėti besiformuojančius ~180 μm ilgio įtrūkius viena dominuojančia kryptimi. Ši kryptis priklausė nuo skirstinio padėties bandinio atžvilgiu ir sutapo su elipsės formos skirstinio ilgąja ašimi. Šioje srityje suformuoto kraterio

vidutinis diametras buvo $23\ \mu\text{m}$, o elipsės ašių santykis 1,1. Nuo $0,7\ \text{mm}$ įtrūkliai formavosi tik stiklo tūryje ir neatsirasdavo ties stiklo apatiniu paviršiumi.



5.6 pav. a) Pažeidimų suformavimas tūryje, keičiant bandinio poziciją ir b) paviršiaus poliravimas; c) suformuoti įtrūkliai apatinėje plokštelės pusėje ir jų charakterizavimas.

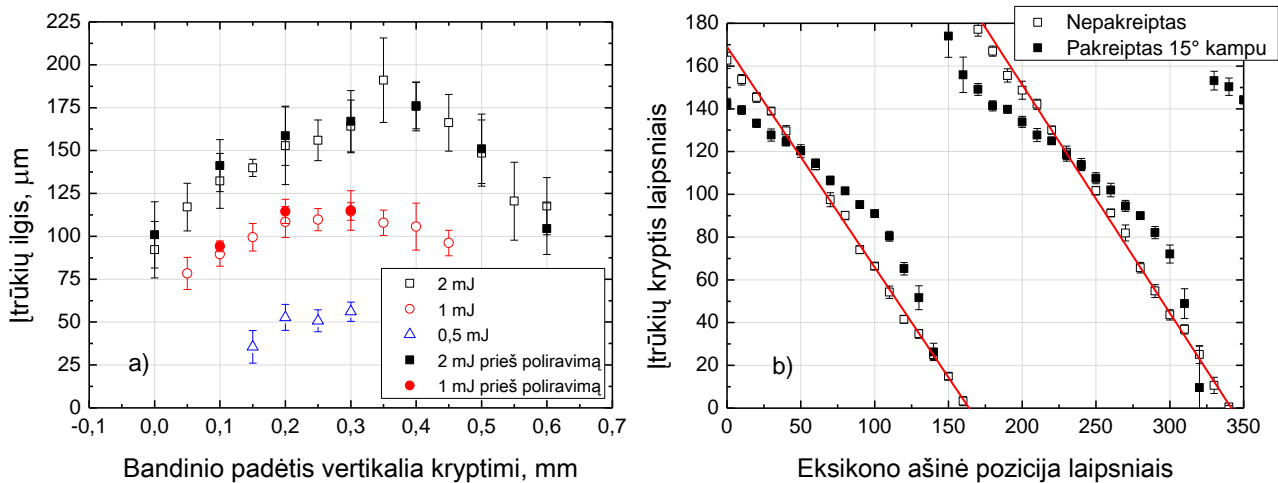
Siekiant išmatuoti suformuotų pažeidimų matmenis bandinio tūryje, buvo nupoliruotas $140\ \mu\text{m}$ storio medžiagos sluoksnis nuo apatinės bandinio pusės, kaip pavaizduota 5.6 pav. a) ir b). Maksimalaus ilgio įtrūkliai ties tiriamu paviršiumi (bandinio apatine puse prieš nupoliruojant arba ties nupoliruotu paviršiumi po poliravimo) susiformuodavo tuomet, kai skirstinio viršutinė padėtis buvo $0,45\text{--}0,53\ \text{mm}$ atstumu nuo apatinio arba nupoliruoto paviršiaus, įvertinant stiklo lūžio rodiklį. Terminas viršutinė skirstinio dalis atitinka aukščiausią suformuoto pluošto dalį, kuria paveikus stiklą susiformuoja įtrūkliai. Kuomet skirstinio viršutinė dalis yra ties apatiniu paviršiumi, bandinio padėtis vertikalia kryptimi atitinka $0\ \text{mm}$ poziciją.



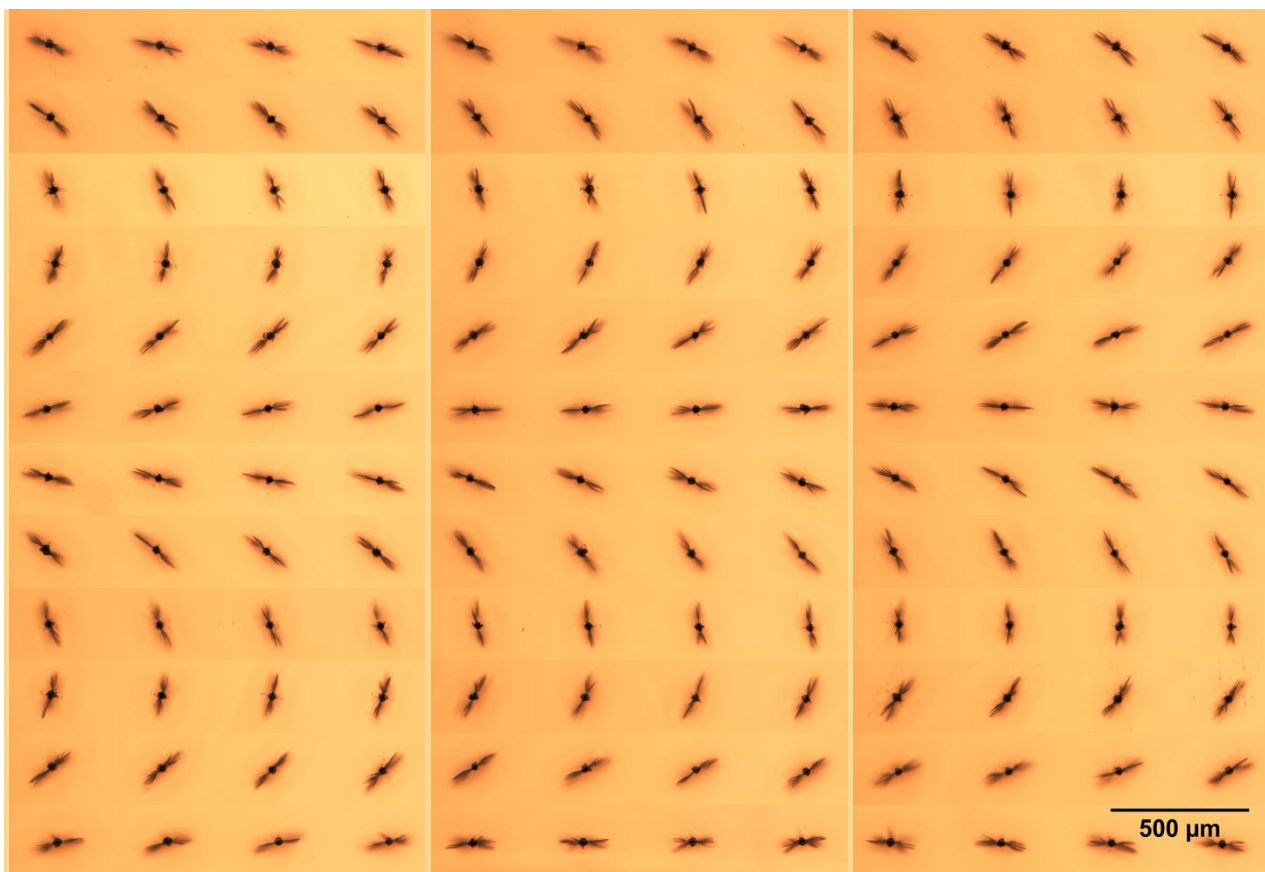
5.7 pav. Susiformuojantys įtrūkliai apatinėje stiklo plokštelės pusėje, keičiant bandinio padėtį vertikalia kryptimi. Nupoliruotas $140\ \mu\text{m}$ storio stiklo sluoksnis.

Keičiant impulso energiją ir bandinio padėtį, suformuotų pažeidimų ir įtrūkių OM nuotraukos yra pateiktos 5.7 pav. Išmatuotų įtrūkių ilgis ties apatiniu paviršiumi ir $140\ \mu\text{m}$ atstumu nuo apatinio paviršiaus sutapo (5.8 pav. a)). Mažinant impulso energiją, mažėjo bandinio padėties vertikalia kryptimi srities ilgis, kuomet susiformuodavo pažeidimai ties bandinio paviršiumi.

Sukant eksikoną apie ašį, kuri sutampa su pluošto sklaidimo ašimi, yra sukamas ir pluošto intensyvumo skirstinys, todėl tokiu būdu galima kontroliuoti įtrūkių kryptį. Keičiant apdirbimo parametrus, buvo išmatuotas įtrūkių ilgis ir orientacija pluošto skenavimo krypties atžvilgiu, kuri visų eksperimentų metu buvo vienoda (5.6 pav. c)).

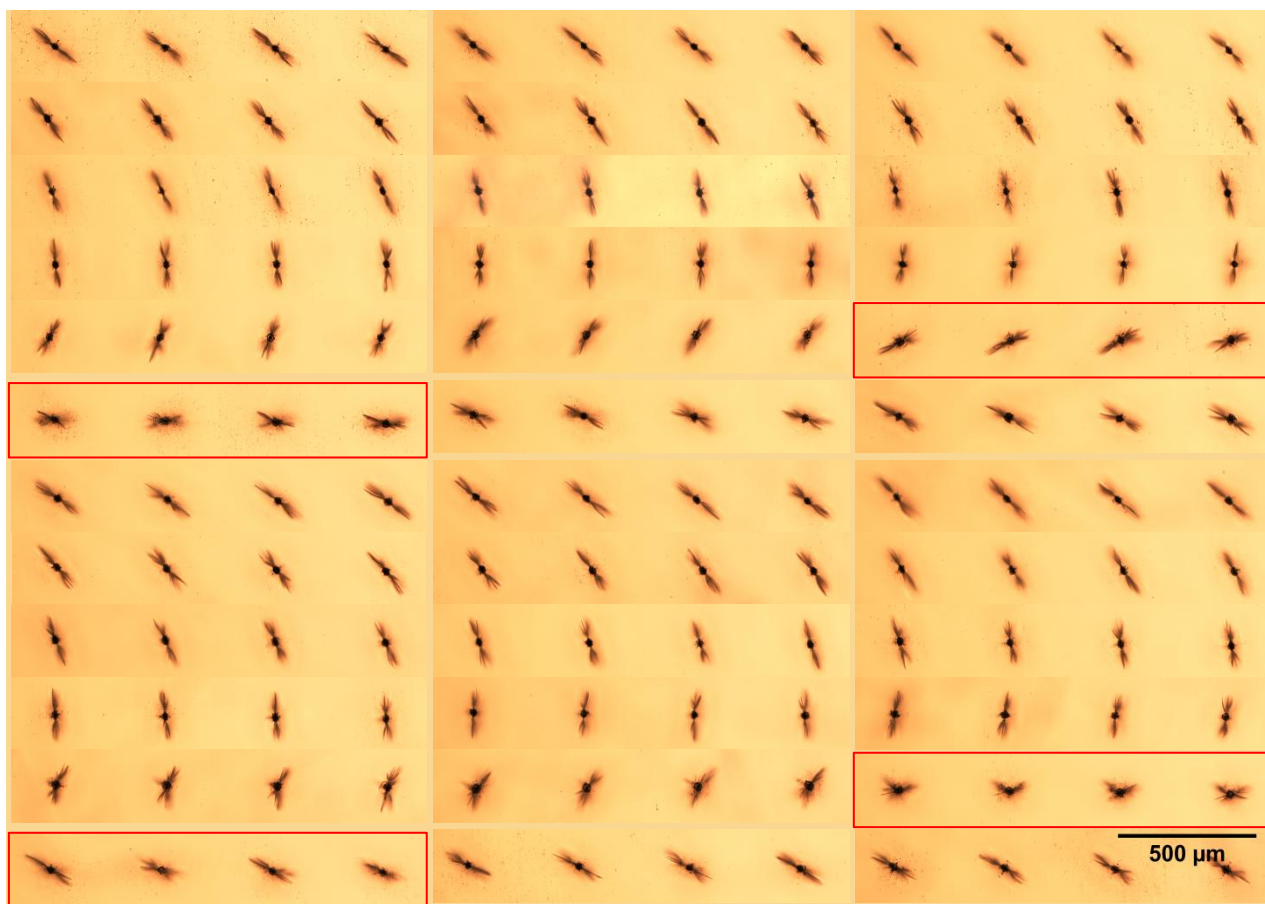


5.8 pav. Įtrūkių ilgio priklausomybė nuo bandinio padėties vertikalia kryptimi; b) įskilimų krypties priklausomybė nuo eksikono ašinės pozicijos ir pakreipimo.



5.9 pav. Susiformuojantys įtrūkiai apatinėje stiklo plokštelės pusėje. Sukamas eksikonas apie ašį kas 10° . Pateiktas nuotraukų eiliškumas iš kairės į dešinę ir nuo viršaus į apačią. Skenavimo kryptis iš kairės į dešinę.

Įtrūkių susiformavimas stikle priklausė nuo eksikono pakreipimo kampo γ . Nepakreipto eksikono atveju skilimų kryptis tiesiškai priklausė nuo eksikono pasukimo kampo apie ašį (5.8 pav. ir 5.9 pav.). Padidinus eksikono pakreipimo kampą iki 15° , dominuojanti stiklo pažeidimų kryptis nukrypo nuo tiesinio dėsnio bei tapo mažiau jautri eksikono pasukimui. Galima pastebėti, jog egzistuoja tokios eksikono pasukimo apie ašį pozicijos, kuomet įtrūkių ilgis sumažėja, o jų orientacija tampa daugiau chaotiška bei nukrypsta nuo dominuojančios krypties (5.10 pav. pažymėta raudonu kontūru). Šios pasukimo pozicijos atitinką suderintu eksikonu suformuotą labiau simetrinį pluoštą. Tokiu pluoštu suformuoti įtrūkiai yra panašūs į žvaigždės tipo pažeidimus suvenyriniuose stiklo kubuose, ženklinant juos nanosekundiniais impulsais. Visgi šiuo atveju nedidelis įtrūkių kryptingumas išlieka, nes eksikono aberacijos nėra visiškai kompensuojamos.

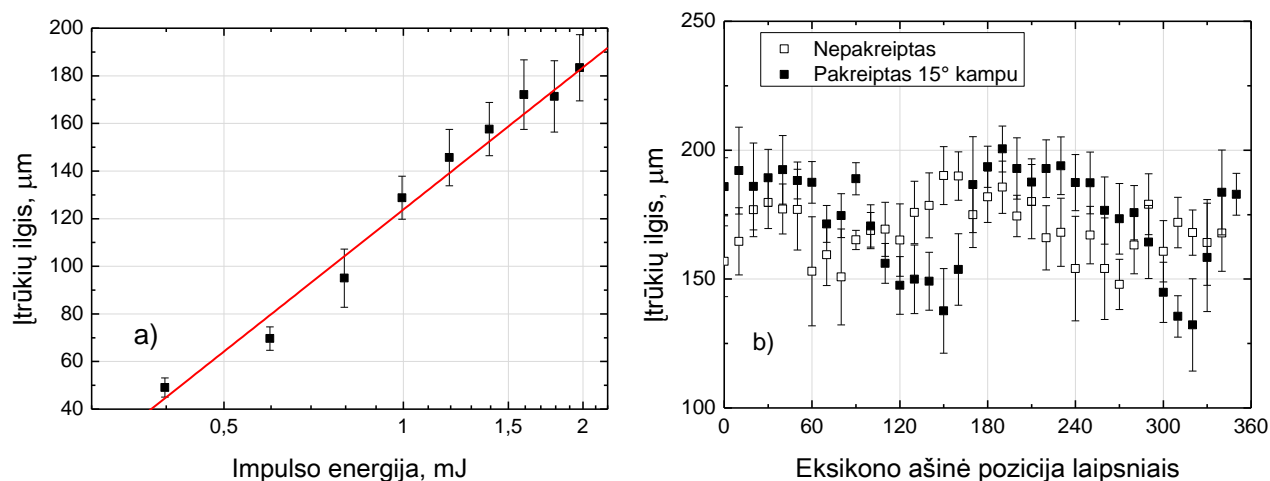


5.10 pav. Susiformuojantys įtrūkiai apatinėje stiklo plokštelės pusėje. Sukamas 15° kampu pakreiptas eksikonas apie ašį kas 10° . Pateiktas nuotraukų eiliškumas iš kairės į dešinę ir nuo viršaus į apačią. Skenavimo kryptis iš kairės į dešinę.

Logaritminėje skalėje įskilimų ilgis tiesiškai priklausė nuo impulso energijos ir siekė $183 \mu\text{m}$, apdirbant stiklą 2 mJ energijos impulsais nepakreipto eksikono atveju (5.11 pav. a)). Pakreipus eksikoną, maksimalus įtrūkių ilgis buvo $200 \mu\text{m}$, tačiau suderinus eksikoną sumažėjo (5.11 pav. b)). Įskilimų ilgis taip pat priklausė nuo atstumo tarp kraterių. Kuomet atstumas tarp kraterių buvo

pakankamai mažas, atsirasdavo papildomi įtrūčiai skilimo kryptimi, sujungiantys kraterius net ir tuomet, kai pavienių įskilimų kryptis nebuvo orientuota tiksliai skenavimo kryptimi.

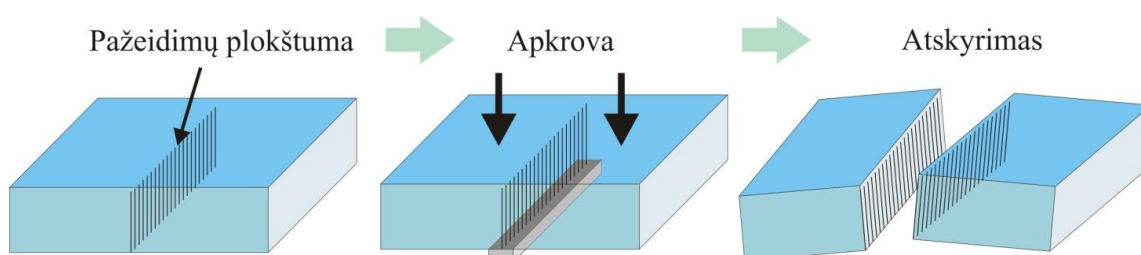
Įtrūčių formavimasis buvo nejautrus poliarizacijos keitimui – pusės ir ketvirčio bangos ilgio fazinių plokštelių sukimui apie ašį prieš eksikoną.



5.11 pav. Įtrūčių ilgio priklausomybė nuo a) impulso energijos ir b) eksikono ašinės pozicijos.

5.4 Stiklo pjovimas 300 ps trukmės impulsais

Naudojant pikosekundinį lazerį Atlantic HE buvo pademonstruotas 1 mm storio stiklo plokštelių pjovimas. Esant fiksuotai bandinio padėčiai vertikalia kryptimi, bandinys buvo skenuojamas vieną kartą Beselio-Gauso pluoštu, sudarant pažeidimų plokštumą bandinio tūryje. Tuomet buvo atliekamas plokštelės perlaužimas rankomis (5.12 pav.). Pjūvio kontūro ilgis buvo 26 mm, atstumas tarp gretimų pjūvio linijų 4 mm. Laužimas buvo atliekamas iš tos pusės, kurioje buvo matomi stiklo paviršiaus pažeidimai arba suformuota skilimo linija. Išplitę pavieniai apskeldėjimai atsirasdavo dėl netinkamo plokštelės laužimo, kuomet susiliesdavo atskirtų detalių briaunos.

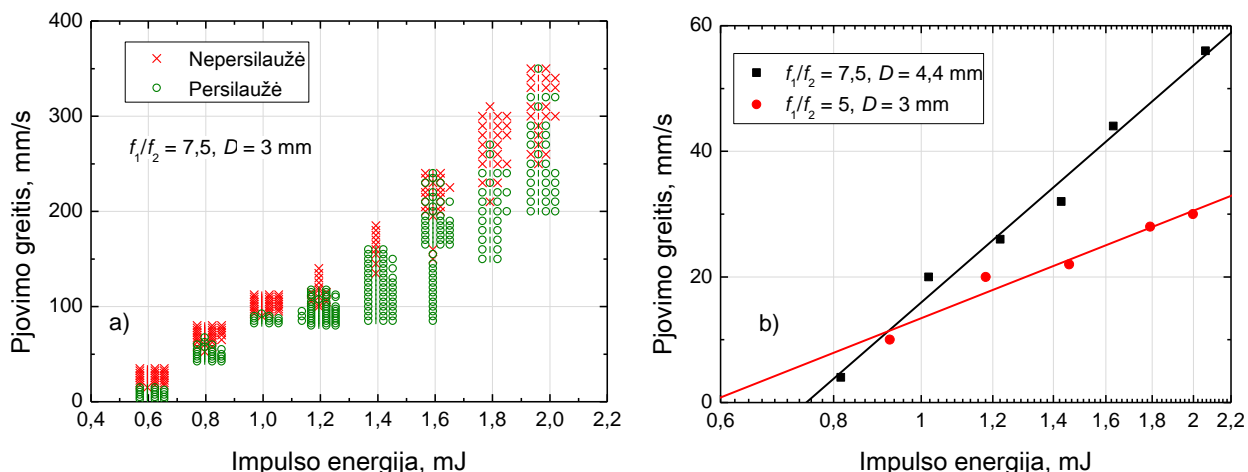


5.12 pav. Stiklo pjovimo etapai: (1) pažeidimų plokštumos sudarymas; (2) laužimas naudojant mechaninę apkrovą; (3) detalių atskyrimas.

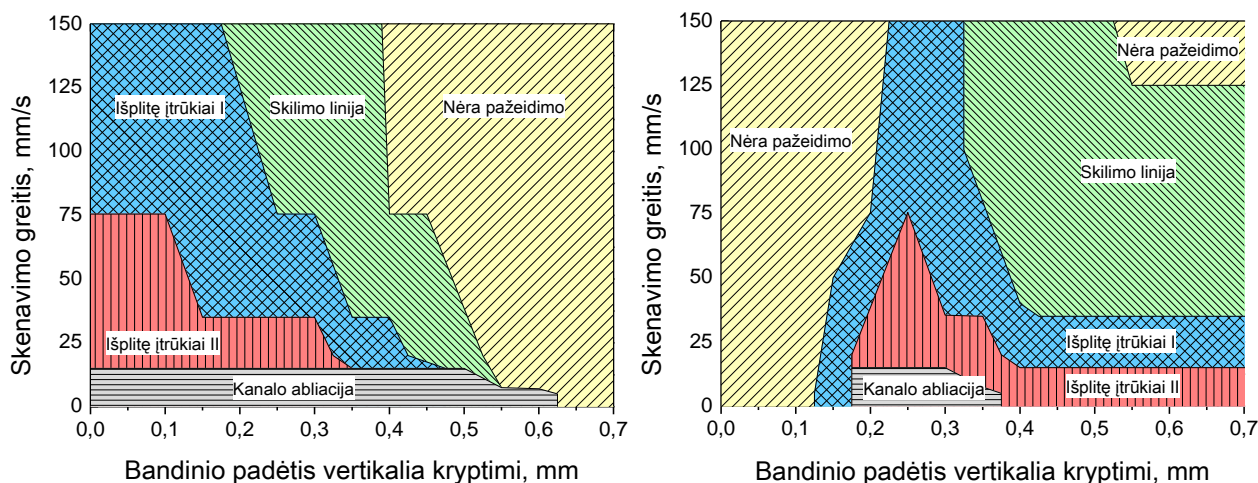
Eksperimentų metu buvo naudojamos $f_1/f_2 = 5$ ir $7,5$ vaizdo perkėlimo sistemos. Lazerio pluošto skersmuo prieš eksikoną buvo 3 mm ir 4,5 mm. Tinkamiausia vaizdo perkėlimo sistema 1 mm storio stiklo plokštelės pjovimui buvo $f_1/f_2 = 7,5$, tačiau dirbant su mažesne impulso

energija, reikėjo pakankamai dideliu 100 μm tikslumu parinkti bandinio padėtį Z ašyje dėl mažesnio Beselio zonos ilgio ir mažesnių stiklo pažeidimo išilginių matmenų (5.1 pav.).

Keičiant impulso energiją ir skenavimo greitį, tyrimų metu buvo nustatytas maksimalus pjovimo greitis, kuomet dar įmanoma tiesiai perlaužti bandinį (5.13 pav.). Toliau didinant skenavimo greitį, laužimo metu suformuota pjūvio plokštuma tampa nebe kontroliuojama ir nukrypsta nuo suformuotų pažeidimų plokštumos per keletą milimetrų. Bandinio pozicija vertikalia kryptimi buvo parenkama taip, kad suformuotų stiklo pažeidimų kanalų viršutinė dalis būtų žemiau viršutinės bandinio pusės.



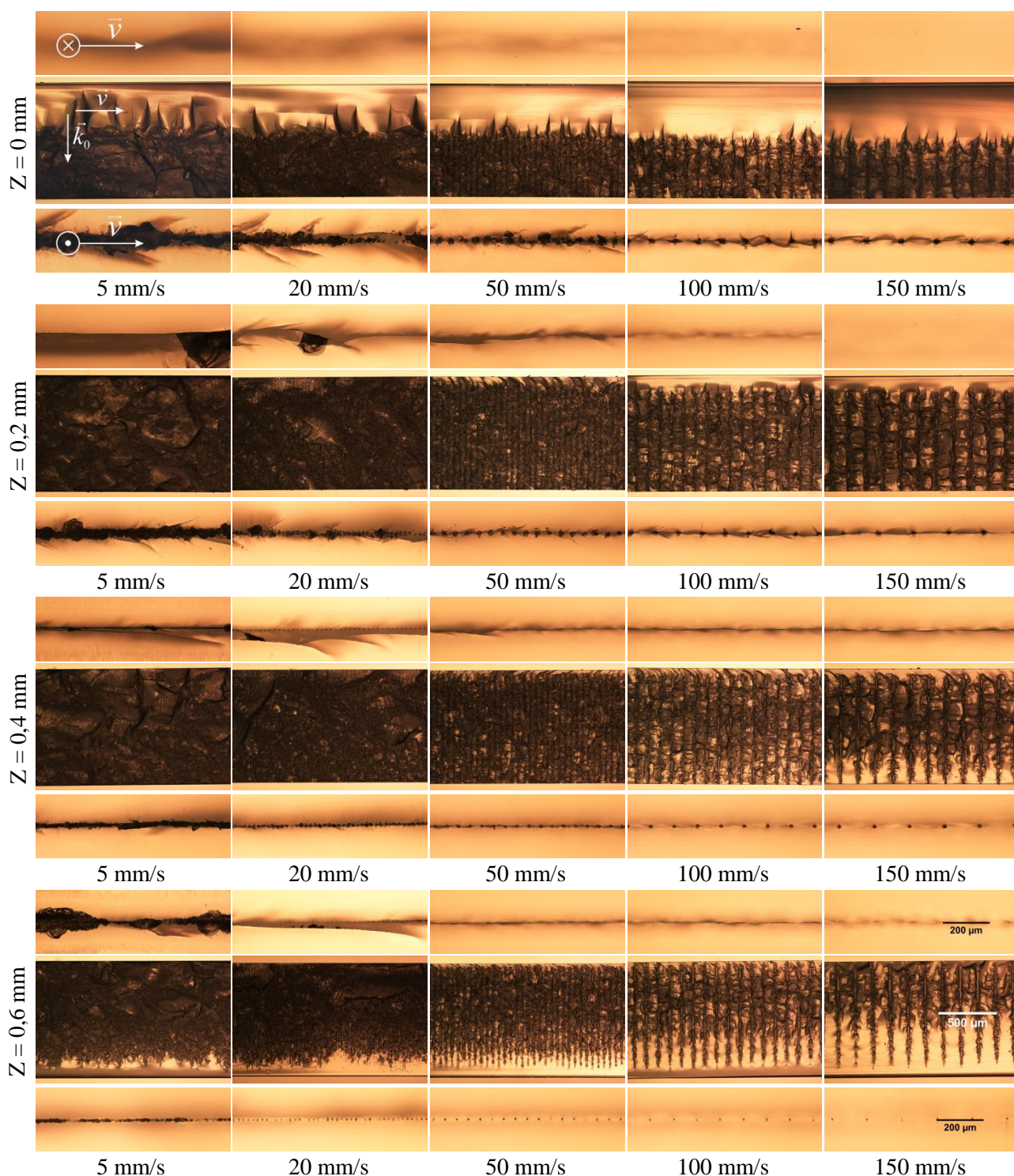
5.13 pav. Maksimalus 1 mm storio stiklo pjovimo greitis naudojant skirtingas vaizdo perkėlimo sistemas ir Gauso pluošto diametrą prieš eksikoną.



5.14 pav. Apdirbimo parametrų sritys, išskirtos pagal susiformuojančius pažeidimus stiklo plokštelės apatinėje (kairėje) ir viršutinėje (dešinėje) pusėje.

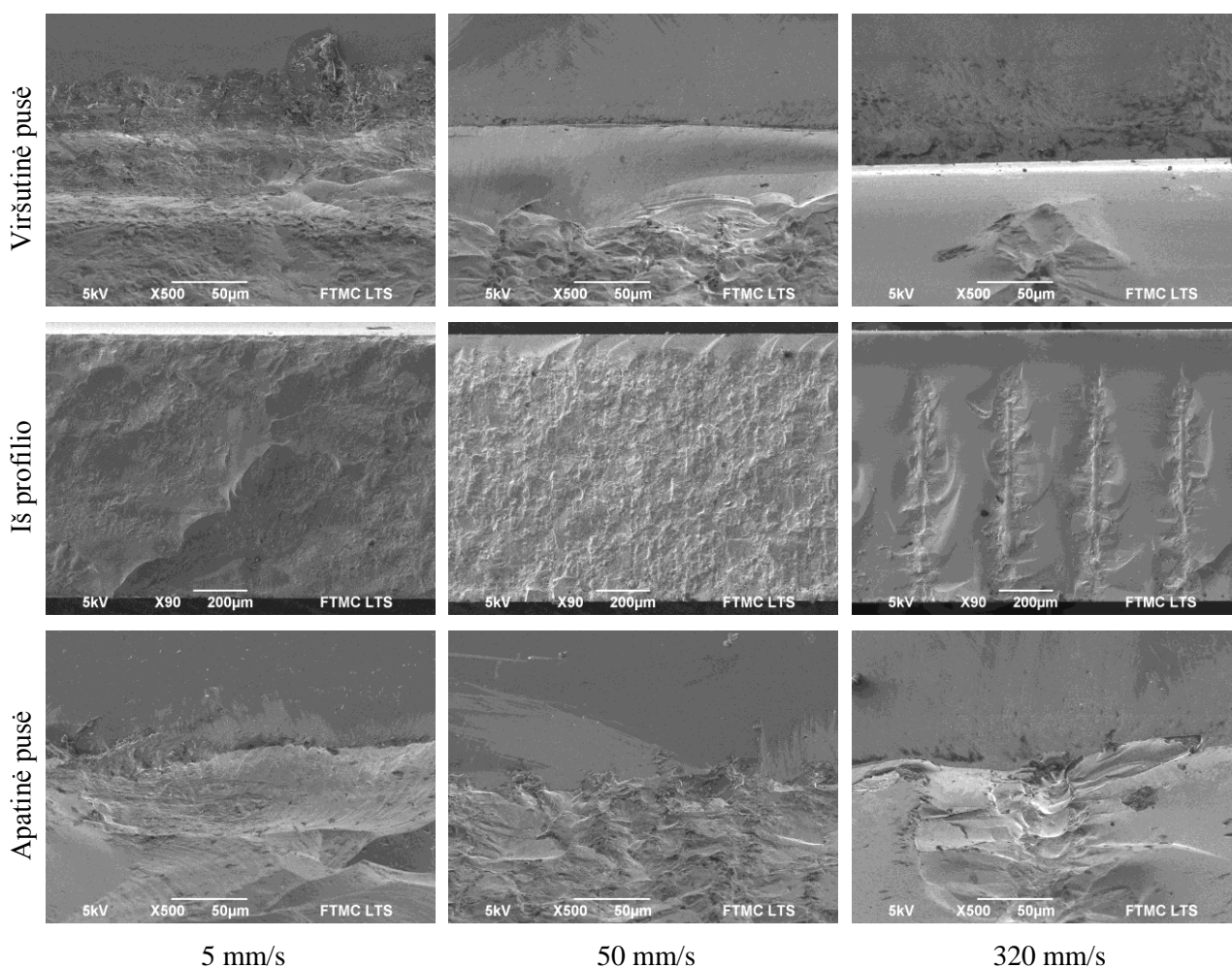
Pasiektas maksimalus stabilus 1 mm storio stiklo plokštelės pjovimo greitis buvo 240 mm/s, naudojant 3 mm skersmens Gauso pluoštą prieš eksikoną, $f_1/f_2 = 7,5$ vaizdo perkėlimo sistemą ir 2 mJ energijos impulsus. Nepakreipto eksikono formuojamas skirstinys buvo orientuotas taip, kad dominuojanti stiklo skilimų kryptis sutaptų su pjovimo kryptimi. Atliekant eksperimentus su $f_1/f_2 = 5$ ir $f_1/f_2 = 7,5$ vaizdo perkėlimo sistema bei 4,4 mm diametro pluoštu prieš eksikoną,

skilimų kryptis sudarė $\sim 25^\circ$ kampą su pjovimo kryptimi ir pasiekiamas maksimalus pjovimo greitis buvo mažesnis (5.13 pav. b)). Tolimesnių pjovimo tyrimų metu buvo naudojama $f_1/f_2 = 7,5$ vaizdo perkėlimo sistema ir 3 mm skersmens Gauso pluoštas prieš eksikoną.



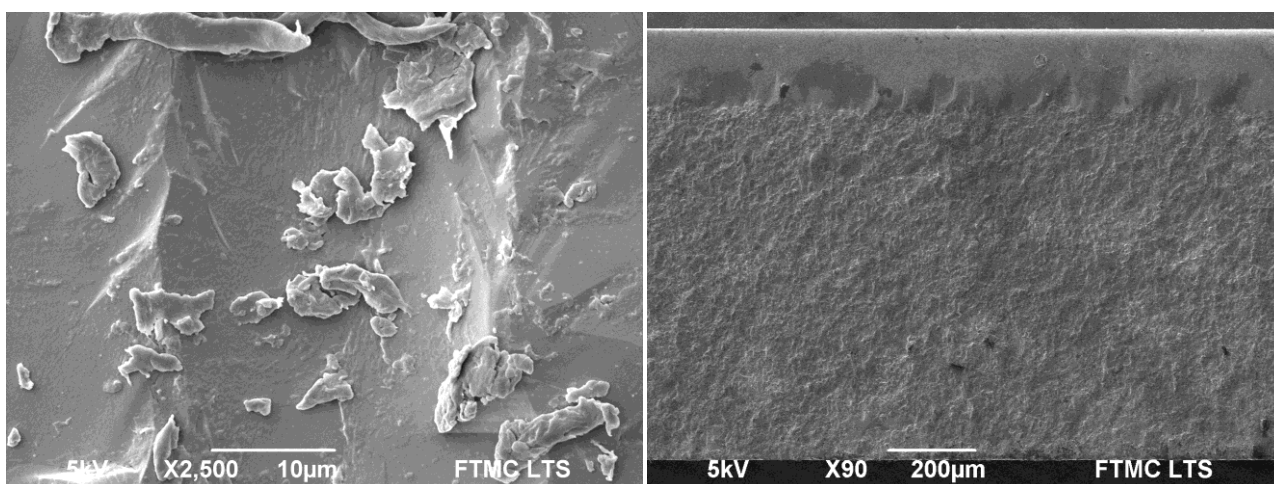
5.15 pav. Suformuota pjūvio linija 2 mJ impulsais, keičiant bandinio pozicionavimo sąlygas ir skenavimo greitį. OM nuotraukos iš viršutinės ir apatinės pusės ir perlaužtos plokštelės profilio.

Pjovimo procesas priklausė nuo apdirbimo parametrų – impulsų energijos, skenavimo greičio – erdvinio atstumo tarp pažeidimų – ir bandinio padėties skirstinio atžvilgiu. Esant fiksuotai impulso energijai, galima išskirti skenavimo greičio ir bandinio padėties parametrų sritis, kuomet dominuoja skirtingas stiklo paviršiaus pažeidimo pobūdis. 2 mJ energijos impulsais suformuoti stiklo pažeidimai buvo suskirstyti į 5 grupes, įvertinant suformuotą pjūvį iš abiejų stiklo plokštelės pusių (5.14 pav.): paviršiaus abliacija, ženkliai išplitusių (~100 μm) įtrūkių zoną (II), mažiau išplitusių įtrūkių zoną (I), suformuotą skilimo liniją, kuri nubėga pluošto skenavimo kryptimi, ir nepažeistą stiklo paviršių. Skirstymas yra sąlyginis, nes, viena vertus, atlikti eksperimentai tik su nedideliu apdirbimo parametrų rinkiniu (skenavimo greitis 5, 10, 20, 50, 100 ir 150 mm/s, o bandinio pozicija buvo keičiama kas 50 μm). Kita vertus, suformuota pjovimo linija buvo vertinama subjektyviai pagal optinio mikroskopo nuotraukas. Pateiktuose rezultatuose, kuomet bandinio pozicija buvo 0 mm, stikle suformuotų pažeidimo kanalų viršutinė dalis buvo per 0,5 mm nuo stiklo plokštelės viršutinės pusės. Vertikali kryptis atitiko pluošto sklidimo kryptį. Tyrimų metu Atlantic HE lazerio impulsų pasikartojimo dažnis buvo 1 kHz, todėl 1 mm/s skenavimo greitis atitiko 1 μm erdvinį atstumą tarp pažeidimų skenavimo kryptimi.

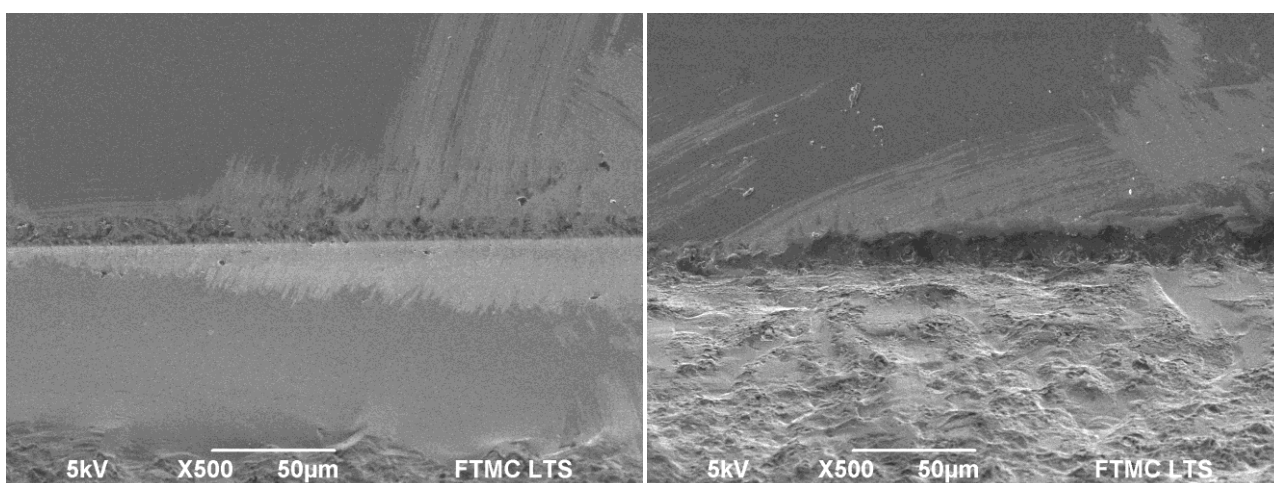


5.16 pav. Perpjautas stiklas, naudojant skirtingą skenavimo greitį ir 2 mJ energijos impulsus. Apatinė ir viršutinė pusė buvo pakreipta 30° kampu, todėl nuotraukų viršutinėje dalyje matomas stiklo paviršius, apatinėje – pažeidimų plokštuma.

Kuomet skirstinio viršutinė padėtis buvo žemiau stiklo viršutinio paviršiaus, esant mažam skenavimo greičiui, stiklo plokštelės apatiniame paviršiuje buvo išabliuojami kanalai (5.15 pav.). Taip pat buvo stebimas formuojamų įtrūkių išplitimas į šonus nuo pluošto skenavimo krypties. Nuotraukose iš profilio pusės matyti, jog stiklo įtrūkiai išplito ir į viršutinę plokštelės pusę nuo sudaromos pažeidimų plokštumos. Dėl pažeidimų išplitimo įvairiomis kryptimis skirtingomis plokštumomis stiklo perlaužimas buvo sunkus. Didinant skenavimo greitį, abliuojamo kanalo plotis ir įtrūkių išplitimas į šalis palaipsniui mažėjo ir didėjo atstumas nuo pažeidimų plokštumos iki stiklo paviršiaus. Parinkus tinkamą greitį, ties viršutine plokštelės dalimi buvo suformuojamas tolygus perlaužto stiklo kraštas (5.16 pav.). Dar padidinus greitį, jau galima išskirti stiklo tūryje suformuotus kanalus (5.17 pav.). Tokių kanalų plotis siekė 27 μm , apdirbant 2 mJ energijos impulsais.



5.17 pav. Kairėje: suformuotas kanalas stiklo tūryje; dešinėje: perpjauto stiklo pjūvio sienelė (0,6 mJ, 10 mm/s).



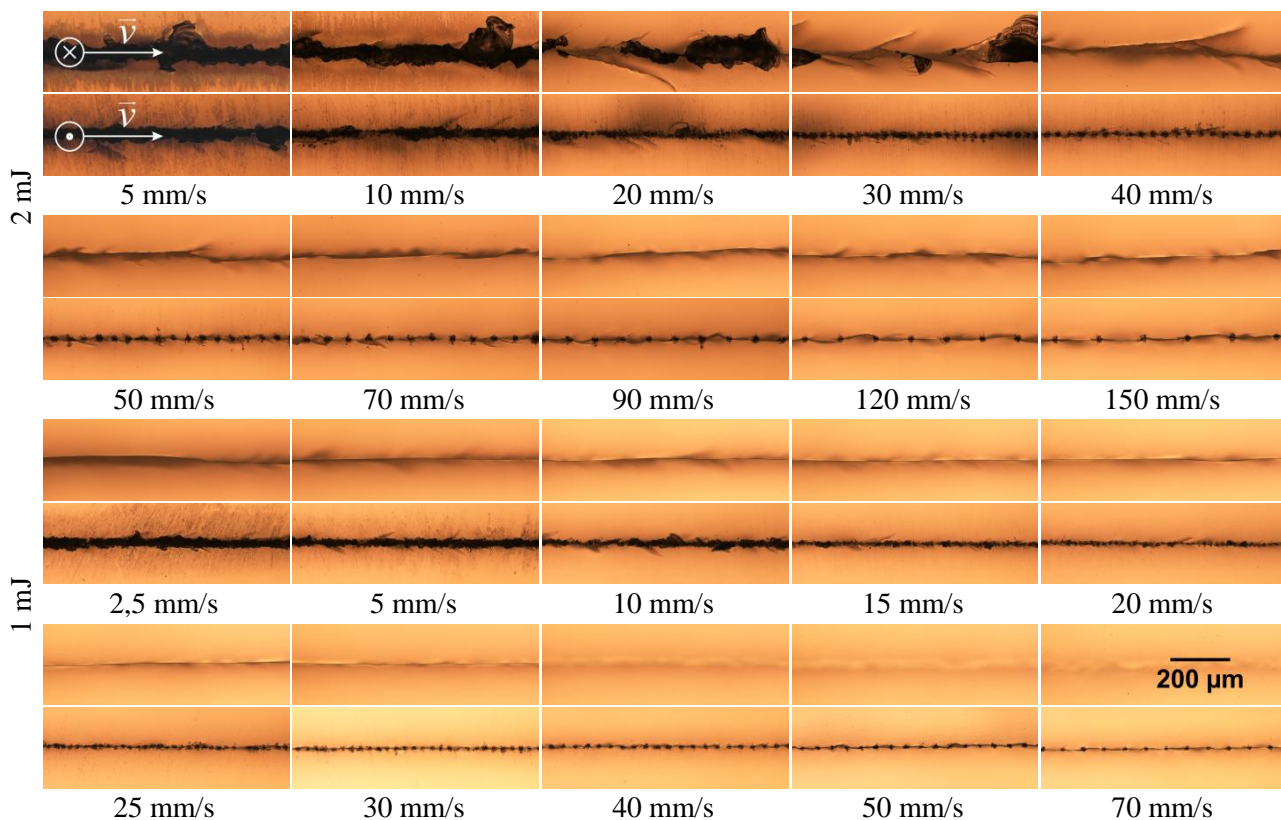
5.18 pav. Perpjautos stiklo plokštelės, pakreiptos 30° kampu, viršutinė (kairėje) ir apatinė (dešinėje) pusė (0,6 mJ, 10 mm/s).

Parinkus tinkamą pjovimo greitį ir bandinio pozicionavimo padėtį vertikalia kryptimi, buvo suformuojama tolygi stiklo skilimo linija, kuri nusklihdavo pjūvio kryptimi. Tokios linijos

bangavimas į šonus XY plokštumoje optimaliomis sąlygomis siekė 5 – 15 μm . Dar padidinus greitį, susiformuodavo nesusisiekiantys stiklo įtrūkiai ir pjovimo procesas tapdavo nestabilus. Tai atsispindėjo stiklo pjovimo dideliu greičiu eksperimentuose, kuomet kai kurios plokštelės persilaužė arba nepersilaužė, nors apdirbimo sąlygos buvo vienodos (5.13 pav. a)).

Leidžiant bandinį žemyn, apatinėje pusėje išabliuotų kanalų plotis ir pažeidimų išplitimas mažėjo (5.15 pav.), o viršutinėje pusėje pradėjo formuotis abliuojamas kanalas ir išplitę stiklo įtrūkiai. Toliau leidžiant bandinį žemyn ir padidinus skenavimo greitį, viršutinėje pusėje susiformuodavo tolygi skilimo linija. Taigi, galima išskirti du optimalius stiklo pjovimo režimus, kuomet stiklo viršutiniame arba apatiniame paviršiuje yra suformuojama tolygi stiklo skilimo linija. Perlaužto stiklo kraštas atitinka skilimo liniją, todėl ypač svarbu ją kontroliuoti. Pirmuoju atveju stiklas turi būti laužiamas iš priešingos pusės, antruoju atveju – iš viršutinės. Antruoju atveju stiklas buvo apdirbamas mažesnio intensyvumo skirstinio dalimi, todėl pasiekiamas maksimalus pjovimo greitis buvo mažesnis ir siekė 170 mm/s.

Galima pastebėti, jog apatinėje plokštelės pusėje išabliuotų kraterių diametras buvo didesnis negu viršutinėje pusėje ir siekė kelias dešimtis mikrometrų. Padidinus skenavimo greitį tiek, kad suformuoti kanalai tūryje išsiskirtų erdvėje, ties viršutine stiklo plokštelės puse atsirasdavo tam tikro aukščio sritis, kurioje nesusiformavo pažeidimo kanalas. Nors stiklo plokštelė buvo leidžiama eksikono atžvilgiu žemyn, tokia zona išliko.

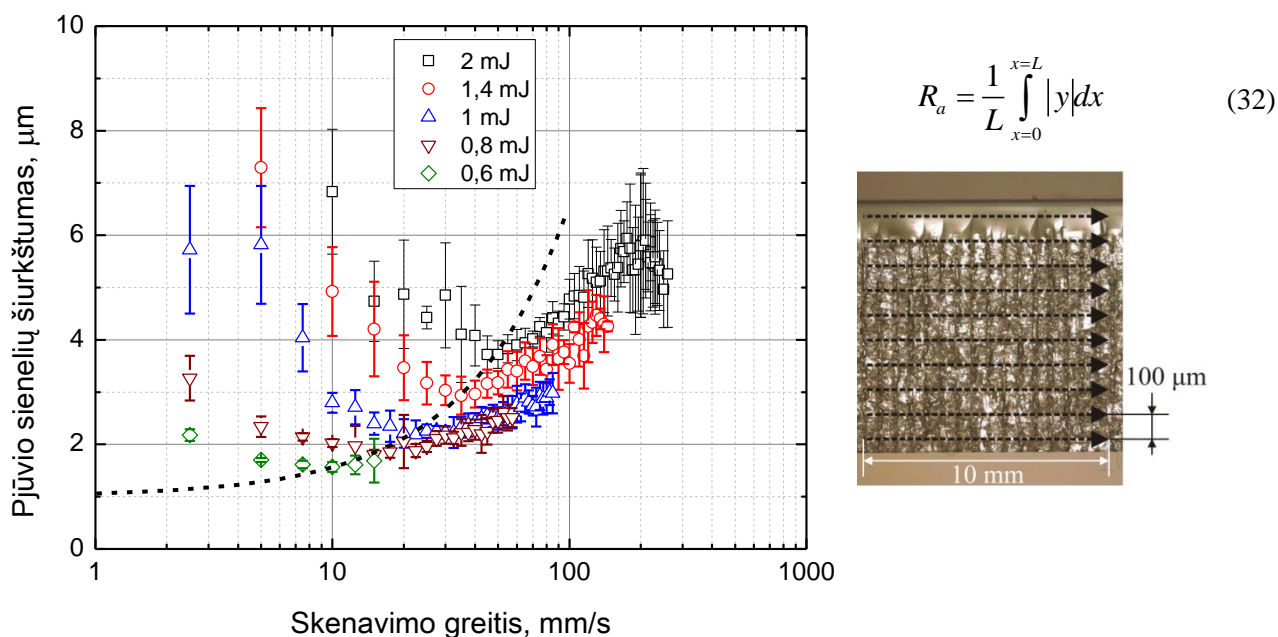


5.19 pav. Skirtingu skenavimo greičiu suformuota pjūvio linija 2 mJ ir 1 mJ energijos impulsais. OM nuotraukos iš viršutinės ir apatinės stiklo plokštelės pusių.

Mažinant impulsų energiją, išabliuojamų kraterių diametras ir įtrūkių išplitimas į šalis mažėjo, taip pat mažėjo pjūvimo greitis, kuomet susidaro tolygi stiklo skilimo linija (5.19 pav.), tačiau pasiekiami pjūvio kokybė buvo geresnė (5.17 pav. ir 5.18 pav.). Galima padaryti išvadą, jog skenavimo greitis arba atstumas tarp stiklo tūryje suformuotų kanalų yra esminis apdirbimo parametras, kuris proceso metu turi būti parenkamas priklausomai nuo impulsų energijos ir bandinio padėties skirstinio atžvilgiu.

5.5 Pjūvio sienelių šiurkštumo tyrimas

300 ps impulsų trukmės lazeriu perpjauto stiklo plokštelės buvo analizuojamos adatiniu profilometru, daugelį kartų skenuojant pjūvio sienelės iš profilio pusės (5.20 pav.). Skenavimo linijos ilgis buvo 10 mm, atstumas tarp gretimų linijų 100 μm. Vidutinis šiurkštumas R_a buvo apskaičiuojamas naudojantis (32) išraišką. L atitinka skenavimo linijos ilgį, y – matuojamo taško ir vidutinio aukščio skirtumą. Tyrimų metu buvo įvertinama tik ta sritis, kurioje buvo suformuoti pažeidimai. Pagal vienos plokštelės duomenis buvo apskaičiuojamas pjūvio sienelės šiurkštumo vidurkis.



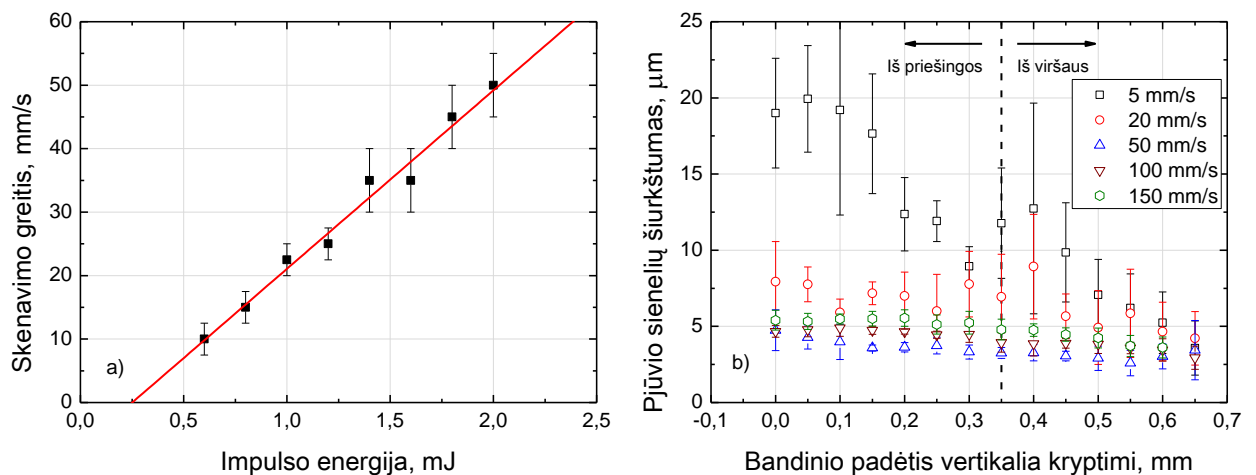
5.20 pav. Kairėje: pjūvio sienelių šiurkštumo priklausomybė nuo skenavimo greičio, naudojant $f_1/f_2 = 7,5$ vaizdo perkėlimo sistemą. Punktyrinė linija parodo optimalų skenavimo greitį ir minimalų šiurkštumą keičiant impulso energiją. Skirstinio viršutinė dalis buvo žemiau stiklo viršutinio paviršiaus. Dešinėje: pjūvio šiurkštumo įvertinimas.

Pjūvio sienelių šiurkštumas priklausė nuo impulso energijos, skenavimo greičio ir skirstinio padėties bandinio atžvilgiu. Mažinant impulsų energiją, pjūvio sienelių šiurkštumas mažėjo. Naudojant 3 mm skersmens Gauso pluoštą prieš eksikoną ir $f_1/f_2 = 7,5$ vaizdo perkėlimo sistemą bei orientuojant pluošto skirstinį taip, kad formuojamų stiklo įtrūkių kryptis sutaptų su skenavimo

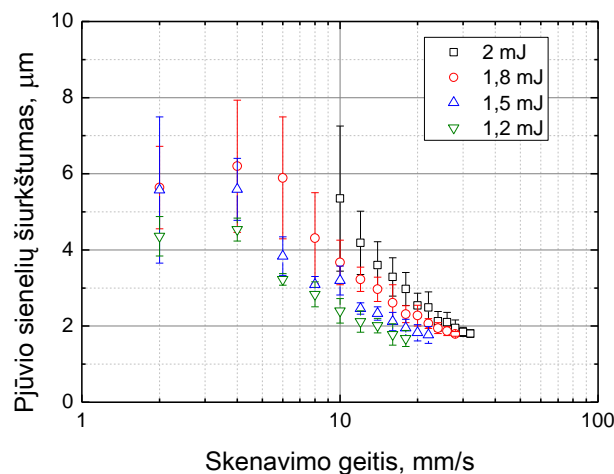
kryptimi, nustatyta, jog egzistuoja optimalus skenavimo greitis, kuomet pjūvio sienelių šiurkštumas yra mažiausias (5.20 pav.). Mažiausias paviršiaus vidutinis šiurkštumas siekė $1,6 \mu\text{m}$, kuomet impulso energija buvo $0,6 \text{ mJ}$, pluošto skenavimo greitis 10 mm/s . Optimalus skenavimo greitis ištirtoje srityje tiesiškai priklausė nuo naudotos impulsų energijos (5.21 pav. a)).

Pjūvio sienelių šiurkštumas mažėjo leidžiant bandinį žemyn suformuoto skirstinio atžvilgiu, nes medžiaga tokiu atveju buvo apdirbama mažesnio intensyvumo skirstinio dalimi (5.21 pav. b)). Ženkiausias šiurkštumo mažėjimas buvo stebimas esant mažam pluošto skenavimo greičiui, o optimalus skenavimo greitis buvo 50 mm/s . Bandinio padėtis atitinka nurodytą 5.4 skyrelyje.

Naudojant $f_1/f_2 = 5$ sistemą, kuomet formuojamų stiklo įtrūkių kryptis sudarė $\sim 25^\circ$ kampą su skenavimo kryptimi, pjūvio sienelių šiurkštumas mažėjo didinant skenavimo greitį iki maksimalaus, kai plokštelės jau nebepersilauždavo. Šia sistema pasiektas rezultatai buvo palyginami su šiurkštumu naudojant $f_1/f_2 = 7,5$ sistemą, tačiau pjūvimui reikėjo didesnės impulsų energijos.



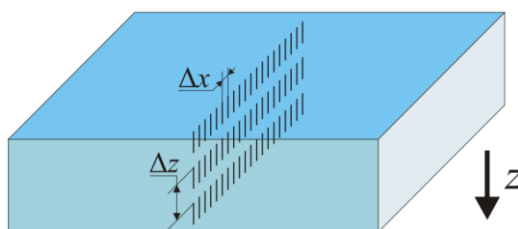
5.21 pav. a) Optimalaus skenavimo greičio, kuomet pasiekiamas mažiausias pjūvio sienelių šiurkštumas, priklausomybė nuo impulso energijos; b) pjūvio sienelių šiurkštumo priklausomybė nuo bandinio padėties vertikalia kryptimi, keičiant skenavimo greitį.



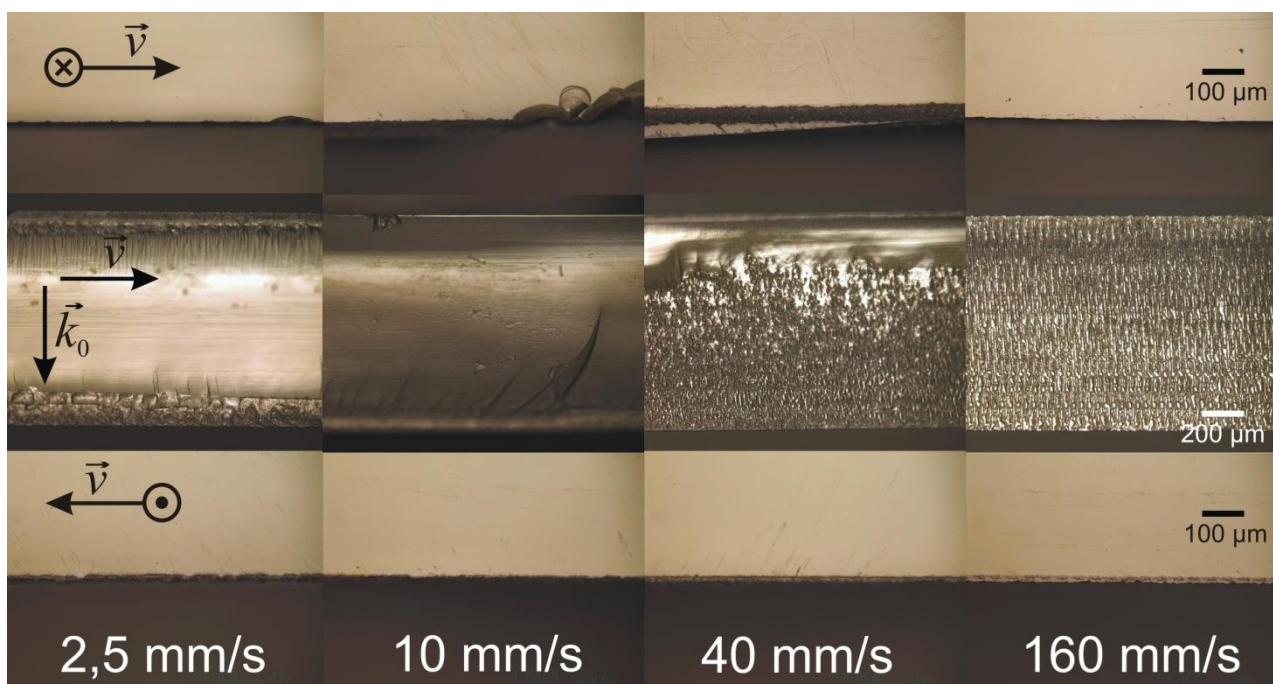
5.22 pav. Pjūvio sienelių šiurkštumo priklausomybė nuo skenavimo greičio, naudojant $f_1/f_2 = 5$ vaizdo perkėlimo sistemą.

5.6 Stiklo pjovimas 10 ps trukmės impulsais

Naudojant pikosekundinį lazerį Atlantic buvo pademonstruotas 1 mm storio stiklo plokštelės pjovimas. Šio lazerio maksimali impulso energija ($175 \mu\text{J}$) yra eile mažesnė negu Atlantic HE ($2,3 \text{ mJ}$), todėl tam, kad būtų padidintas energijos tankis, Gauso pluošto diametras prieš eksikoną buvo sumažintas iki $2,7 \text{ mm}$, taip pat pjovimui naudotos vaizdo perkėlimo sistemos su didesniu mažinimu $f_1/f_2 = 10$. Dėl mažesnio Gauso pluošto diametro sumažėjo Beselio zonos ilgis, todėl bandinys turėjo būti skenuojamas keletą kartų skirtingame aukštyje tam, kad būtų suformuota tolygi pažeidimų plokštuma (5.23 pav.). Po apdirbimo bandinys buvo laužiamas rankomis.



5.23 pav. Stiklo pjovimo metodika formuojant pažeidimus skirtingame aukštyje bandinio tūryje.



5.24 pav. Perpjautos ir perlaužtos 1 mm storio stiklo plokštelės nuotraukos iš viršutinės, profilio ir apatinės pusės.

Pažeidimų formavimas buvo inicijuojamas nuo priešingos bandinio pusės, po kiekvieno skenavimo leidžiant bandinį žemyn nustatytu žingsniu. Bandinio poslinkis buvo $50 \mu\text{m}$, o įvertinus stiklo lūžio rodiklį (30), atstumas tarp pažeidimų vertikalia kryptimi buvo $75 \mu\text{m}$, todėl bandiniui perpjauti reikėjo ~ 13 skenavimų. Apdirbimo metu buvo naudojamas didesnis – 20 skenavimų – skaičius. Pjūvio kontūro ilgis buvo 26 mm , o atstumas tarp gretimų pjūvio linijų buvo padidintas iki 10 mm . Lazerio impulso energija buvo $150 \mu\text{J}$, impulsų pasikartojimo dažnis 4 kHz , Skenavimo

greitis buvo keičiamas nuo 2,5 mm/s iki 160 mm/s. Įvertinus skenavimų skaičių, efektyvusis pjovimo greitis yra 8 mm/s, tačiau Atlantic lazeris gali dirbti 400 kHz pasikartojimo dažniu, todėl naudojant tokią metodiką galima pasiekti 800 mm/s pjovimo greitį. Kita vertus, pluošto skenavimo greitis tokiu atveju turėtų siekti 16 m/s, todėl nėra realus naudojant bandinio pozicionavimo sistemas.

Nors ir pavyko perlaužti apdirbtas stiklo plokšteles naudojant 160 mm/s skenavimo greitį, tačiau pjūvio kontūras buvo nelygus, o laužimo paviršius nesutapdavo su defektų plokštuma. Tai galima matyti nuotraukose, pateiktose 5.24 pav. Laužimo procesas buvo nestabilus ir naudojant mažesnę skenavimo greitį.

Pagrindiniai rezultatai ir išvados

1. Elipsės formos pagrindo kūgine prizme su užapvalinta viršūne suformuotas Beselio-Gauso pluoštas pasižymi asimetriniu intensyvumo skirstiniu bei centrinės smailės skersmens mažėjimu ir intensyvumo moduliacija išilgai pluošto sklidimo ašies. Didėjant pluošto sklidimo nuotoliui, intensyvumo skirstinys palaipsniui persiformuoja į keletą maksimumų.
2. Apdirbant stiklą tokiu pluoštu, susiformuojantys įtrūkliai išplinta kryptimi, kuri sutampa su elipsės formos centrinės smailės ilgąja ašimi. Suformuotų įtrūkių ilgis siekė 183 μm , kuomet 300 ps trukmės lazerio impulso energija buvo 2 mJ.
3. Naudojant 300 ps impulsų trukmės lazerio fundamentinę harmoniką, buvo pademonstruotas stabilus 1 mm storio stiklo pjovimo procesas, formuojant tūrinius medžiagos pažeidimus vienu skenavimu Beselio-Gauso pluoštu ir orientuojant kūginę prizmę taip, kad formuojami įtrūkliai išplistų pluošto skenavimo kryptimi. Maksimalus stabilaus pjovimo greitis buvo 240 mm/s, kuomet impulso energija buvo 2 mJ, impulsų pasikartojimo dažnis 1 kHz.
4. Optimalus stiklo pjovimo greitis, kuomet pasiekiamas mažiausias pjūvio sienelės šiurkštumas, tiesiškai priklausė nuo lazerio impulso energijos. Apdirbant 300 ps trukmės impulsais, mažiausias pasiektas vidutinis šiurkštumas buvo 1,6 μm , kuomet impulso energija buvo 0,6 mJ, skenavimo greitis 10 mm/s.
5. Stiklo apdirbimas Beselio-Gauso pluoštu yra itin perspektyvus metodas, taip pat technologiškai lengvai realizuojamas bei pritaikomas lazerinio apdirbimo staklėse.

Literatūros sąrašas

- [1] S. Nisar, L. Li and M. A. Sheikh, Laser glass cutting techniques—A review, *J. Laser Appl.* **25**(4), p. 042010 (2013).
- [2] S. Russ, C. Siebert, U. Eppelt, C. Hartmann, B. Faißt and W. Schulz, Picosecond laser ablation of transparent materials, in *Proc. of SPIE*, Vol. 8608 (2013).
- [3] G. Savriama, J. Mendez, L. Barreau, C. Boulmer-Leborgne and N. Semmar, Crack-free laser dicing of glass in the microelectronics industry, *J. Laser Appl.* **25**(5), p. 052010 (2013).
- [4] D. Ashkenasi, T. Kaszemeikat, N. Mueller, A. Lemke and H. J. Eichler, Machining of glass and quartz using nanosecond and picosecond laser pulses, in *Proc. of SPIE*, Vol. 8243 (2012).
- [5] Z. K. Wang, W. L. Seow, X. C. Wang and H. Y. Zheng, Effect of laser beam scanning mode on material removal efficiency in laser ablation for micromachining of glass, *J. Laser Appl.* **27**(S2), p. S28004 (2015).
- [6] G. David, L. Desbiens, L. Steeve, T. Yves and G. Pierre, Cutting strengthened glass using bursts of picoseconds pulses from a MOPA fiber laser, in *Proc. of SLPC2014 – the 1st Smart Laser Processing Conference*, (2014).
- [7] C. Moorhouse, Advantages of picosecond laser machining for cutting-edge technologies, *Phys. Procedia*, **41**, 381–388 (2013).
- [8] A. P. Stabinis and G. Valiulis, Ultratrumpųjų šviesos impulsų netiesinė optika (Leidykla TEV, Vilnius, 2008).
- [9] M. K. Bhuyan, O. Jedrkiewicz, V. Sabonis, M. Mikutis, S. Recchia, A. Aprea, M. Bollani and P. Di Trapani, High-speed laser-assisted cutting of strong transparent materials using picosecond Bessel beams, *Appl. Phys. A* **120**(2), pp. 443–446 (2015).
- [10] M. K. Bhuyan, F. Courvoisier, M. Jacquot, P. A. Lacourt, L. Froehly, R. Salut, L. Furfaro and J. M. Dudley, Femtosecond non-diffracting Bessel beams and controlled nanoscale ablation, in *2011 XXXth URSI General Assembly and Scientific Symposium*, (2011).
- [11] M. Duocastella and C. B. Arnold, Bessel and annular beams for materials processing, *Laser Photonics Rev.* **6**(5), pp. 607–621 (2012).
- [12] R. Inoue, K. Takakusaki, Y. Takagi and T. Yagi, Micro-ablation on silicon by femtosecond laser pulses focused with an axicon assisted with a lens, *Appl. Surf. Sci.* **257**(2), pp. 476–480 (2010).
- [13] Y. Matsuoka, Y. Kizuka and T. Inoue, The characteristics of laser micro drilling using a Bessel beam, *Appl. Phys. A Mater. Sci. Process.* **84**(4), pp. 423–430 (2006).
- [14] I. Alexeev, K. H. Leitz, A. Otto and M. Schmidt, Application of Bessel beams for ultrafast laser volume structuring of non transparent media, *Phys. Procedia* **5**, pp. 533–540 (2010).
- [15] X. Yu, J. Ma and S. Lei, Femtosecond laser scribing of Mo thin film on flexible substrate using axicon focused beam, *J. Manuf. Process.* **20**, pp. 349–355 (2015).
- [16] J. Durnin, Exact solutions for nondiffracting beams. I. The scalar theory, *J. Opt. Soc. Am. A* **4**(4), pp. 651–654 (1987).
- [17] S. Akturk, Tailored-Beam Ultrashort Laser Pulses, *Quantum Phys. Lett.* **112**(3), pp. 97–112 (2012).
- [18] O. Brzobohaty, T. Cizmar and P. Zemanek, High quality quasi-Bessel beam generated by round-tip axicon., *Opt. Express* **16**(17), pp. 12688–12700 (2008).
- [19] P. Wu, C. Sui and W. Huang, Theoretical analysis of a quasi-Bessel beam for laser ablation, *Photonics Res.* **2**(3), p. 82 (2014).
- [20] F. Courvoisier, J. Zhang, M. K. Bhuyan, M. Jacquot and J. M. Dudley, Applications of femtosecond Bessel beams to laser ablation, *Appl. Phys. A Mater. Sci. Process.* **112**(1), pp. 29–34 (2013).
- [21] J. Durnin, J. Miceli and J. H. Eberly, Diffraction-free beams, *Phys. Rev. Lett.* **58**(15), pp. 1499–1501 (1987).
- [22] Y. Wang, W. Qu, L. Jiao and Y. Zhang, Generation and control of Bessel beams based on annular reflections, *Appl. Phys. B Lasers Opt.* **119**(2), 241–245 (2015).
- [23] Z. Kuang, W. Perrie, S. P. Edwardson, E. Fearon and G. Dearden, Ultrafast laser parallel

- microdrilling using multiple annular beams generated by a spatial light modulator, *J. Phys. D* **47**(11), p. 115501 (2014).
- [24] T. Tsai, E. McLeod and C. B. Arnold, Generating Bessel beams with a tunable acoustic gradient index of refraction lens, in *Proc. of SPIE*, Vol. 6326 (2006).
- [25] J. H. McLeod, The Axicon : A New Type of Optical Element, *J. Opt. Soc. Am.* **44**(8), pp. 592–597 (1954).
- [26] A. Saikaley, B. Chebbi and I. Golub, Imaging properties of three refractive axicons, *Appl. Opt.* **52**(28), pp. 6910–8 (2013).
- [27] I. Golub, Fresnel axicon, *Opt. Lett.* **31**(12), pp. 1890–1892 (2006).
- [28] A. Burvall, K. Kołacz, A. V Goncharov, Z. Jaroszewicz and C. Dainty, Lens axicons in oblique illumination, *Appl. Opt.* **46**(3), pp. 312–318 (2007).
- [29] A. Marcinkevicius, S. Juodkazis, S. Matsuo, V. Mizeikis and H. Misawa, Application of Bessel Beams for Microfabrication of Dielectrics by Femtosecond Laser, *Jpn. J. Appl. Phys.* **40**(2-11A), pp. L1197–L1199 (2001).
- [30] G. S. Sokolovskii, V. V Dudevlev, S. N. Losev, M. Butkus, K. K. Soboleva and A. I. Sobolev, Influence of the axicon characteristics and beam propagation parameter M2 on the formation of Bessel beams from semiconductor lasers, *Quantum Electron.* **43**(5), pp. 423–427 (2013).
- [31] X. Zeng and F. Wu, Effect of elliptical manufacture error of an axicon on the diffraction-free beam patterns, *Opt. Eng.* **47**(8), pp. 1–6 (2008).
- [32] T. Tanaka and S. Yamamoto, Comparison of aberration between axicon and lens, *Opt. Commun* **184**, pp. 113–118 (2000).
- [33] R. Arimoto, C. Saloma, T. Tanaka and S. Kawata, Imaging properties of axicon in a scanning optical system, **31**(31), pp. 6653–6657 (1992).
- [34] D. Ashkenasi and A. Lemke, Picosecond laser-induced color centers in glass optics, *J. Laser Appl.* **23**(1), p. 012007 (2011).
- [35] J. D. Musgraves, K. Richardson and H. Jain, Laser-induced structural modification, its mechanisms, and applications in glassy optical materials, *Opt. Mater. Express* **1**(5), pp. 921–935 (2011).
- [36] N. M. Bulgakova, V. P. Zhukov, A. R. Collins, D. Rostohar, T. J.-Y. Derrien and T. Mocek, How to optimize ultrashort pulse laser interaction with glass surfaces in cutting regimes?, *Appl. Surf. Sci.* **336**, pp. 364–374 (2015).
- [37] M. Sun, U. Eppelt, S. Russ, C. Hartmann, C. Siebert, J. Zhu and W. Schulz, Numerical analysis of laser ablation and damage in glass with multiple picosecond laser pulses, *Opt. Express* **21**(7), pp. 7858–67 (2013).
- [38] M. Sun, U. Eppelt, S. Russ, C. Hartmann, C. Siebert, J. Zhu and W. Schulz, Laser ablation mechanism of transparent dielectrics with picosecond laser pulses, in *Proc. of SPIE, Laser-Induced Damage Opt. Mater.*, Vol. 8530 (2012).
- [39] C. B. Schaffer, A. Brodeur and E. Mazur, Laser-induced breakdown and damage in bulk transparent materials induced by tightly focused femtosecond laser pulses, *Meas. Sci. Technol.* **12**(11), pp. 1784–1794 (2001).
- [40] A. Collins, D. Rostohar, C. Prieto, Y. K. Chan and G. M. Oconnor, Laser scribing of thin dielectrics with polarised ultrashort pulses, *Opt. Lasers Eng.* **60**, pp. 18–24 (2014).
- [41] B. N. Chichkov, C. Momma, S. Nolte, F. von Alvensleben and A. Tunnermann, Femtosecond, picosecond and nanosecond laser ablation of solids, *Appl. Phys. A* **63**, pp. 109–115 (1996).
- [42] K. Sugioka and Y. Cheng, Ultrafast lasers—reliable tools for advanced materials processing, *Light Sci. Appl.* **3**(4), p. e149 (2014).
- [43] L. Rihakova and H. Chmelickova, Laser Micromachining of Glass, Silicon, and Ceramics, *Adv. Mater. Sci. Eng.* **2015**(5), pp. 1–6 (2015).
- [44] F. Courvoisier, R. Stoian and A. Couairon, Ultrafast laser micro- and nano-processing with nondiffracting and curved beams, *Opt. Laser Technol.* **80**, pp. 125–137 (2016).
- [45] S. M. Eaton, G. Cerullo and R. Osellame, Fundamentals of femtosecond laser modification

- of bulk dielectrics, *Top. Appl. Phys.* **123**, pp. 3–18 (2012).
- [46] S. Butkus, E. Gaižauskas, D. Paipulas, Z. Viburyš, D. Kaškelytė, M. Barkauskas, A. Alesnikov and V. Sirutkaitis, Rapid microfabrication of transparent materials using filamented femtosecond laser pulses, *Appl. Phys. A Mater. Sci. Process.* **114**(1), pp. 81–90 (2014).
- [47] S. G. Monce, Improvement in tools for cutting glass, Patent US91150 A (1869).
- [48] A. Ozkan, L. Migliore, C. Dunskey, M. W. Phaneuf and E. Mail, Glass processing using microsecond, nanosecond and femtosecond pulsed lasers, in *Proc. of SPIE*, Vol. 5063 (2003).
- [49] M. Kumkar, L. Bauer, S. Russ, M. Wendel, J. Kleiner, D. Grossmann, K. Bergner and S. Nolte, Comparison of different processes for separation of glass and crystals using ultrashort pulsed lasers, in *Proc. of SPIE*, Vol. 8972 (2014).
- [50] K. Zimmer and R. Böhme, Laser-induced backside wet etching of transparent materials with organic and metallic absorbers, *Laser Chem.* **2008**, 170632 (2008).
- [51] J. Lopez, K. Mishchik, B. Chassagne, C. Javaux-Leger, C. Honninger, E. Mottay and R. Kling, Glass Cutting Using Ultrashort Pulsed Bessel Beams, in *Int. Congr. Appl. Lasers Electro-Optics*, (2015).
- [52] P. Gečys, J. Dudutis and G. Račiukaitis, Nanosecond Laser Processing of Soda-Lime Glass, *J. Laser Micro/Nanoengineering* **10**(3), pp. 254–258 (2015).
- [53] U. Loeschner, S. Mauersberger, J. Schille, R. Ebert and H. Exner, Machining of Transparent Materials with Short Pulse and Ultrashort Pulse Laser Sources, in *Proc. of 5th International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing*, (2009).
- [54] D. Ashkenasi, N. Mueller, T. Kaszemeikat and G. Illing, Advanced laser micro machining using a novel trepanning system, *J. Laser Micro Nanoeng.* **6**(1), pp. 1–5 (2011).
- [55] D. McGloin and K. Dholakia, Bessel beams: Diffraction in a new light, *Contemp. Phys.* **46**(1), pp. 15–28 (2005).
- [56] M. Clerici, Y. Hu, P. Lassonde, C. Milián, A. Couairon, D. N. Christodoulides, Z. Chen, L. Razzari, F. Vidal, F. Légaré, D. Faccio and R. Morandotti, Laser-assisted guiding of electric discharges around objects, *Sci. Adv.* **2**, pp. 1–6 (2015).
- [57] M. Mikutis, T. Kudrius, G. Slekys, D. Paipulas and S. Juodkazis, High 90% efficiency Bragg gratings formed in fused silica by femtosecond Gauss-Bessel laser beams, *Opt. Mater. Express* **3**(11), pp. 1862–1871 (2013).
- [58] A. Mathis, L. Froehly, L. Furfaro, M. Jacquot, J. M. Dudley and F. Courvoisier, Direct machining of curved trenches in silicon with femtosecond accelerating beams, *J. Eur. Opt. Soc. Publ.* **8**, p. 13019 (2013).
- [59] I. A. Litvin, M. G. McLaren and A. Forbes, Propagation of obstructed Bessel and Bessel-Gauss beams, in *Proc. of SPIE*, Vol. 7062 (2008).

Rezultatų viešinimas

Darbo rezultatai buvo pristatyti konferencijose:

J. Dudutis, P. Gečys, G. Račiukaitis: *Modification of Glass with Bessel Beam for Cutting Applications*, The 17th International Symposium on Laser Precision Microfabrication (LPM2016), May 23 – 27 (2016), Xi'an, China (žodinis pranešimas).

J. Dudutis: *In-Volume Modification of Soda-Lime Glass with Picosecond Bessel-Gaussian Beams*, 59th International Scientific Conference for Young Students of Physics and Natural Sciences „Open Readings“, March 15 – 18 (2016), Vilnius (stendinis pranešimas).

Autoriaus pranešimai, susiję su stiklo apdirbimu:

J. Dudutis, P. Gečys, G. Račiukaitis: *Rear Side Cutting of Soda-Lime Glass*, 4th International Summer School "Trends and new developments in Laser Technology 2015", August 24 – 28 (2015), Dresden, Germany (žodinis pranešimas).

J. Dudutis, P. Gečys, G. Račiukaitis: *Rear Side Processing of Soda-Lime Glass Using DPSS Nanosecond Laser*, Lasers in Manufacturing 2015 (LiM2015), June 22 – 25 (2015), Munich, Germany (žodinis pranešimas).

J. Dudutis, P. Gečys, G. Račiukaitis: *Silikatinio stiklo pjovimas nanosekundiniu lazeriu, inicijuojant procesą nuo apatinės bandinio pusės*, 41-oji Lietuvos nacionalinė fizikos konferencija, birželio 17 – 19 (2015), Vilnius (stendinis pranešimas).

J. Dudutis, P. Gečys, G. Račiukaitis: *Helical drilling of soda-lime glass*, The 12th IUUSTA School on Lasers in Materials Science, July 13 – 20 (2014), Isola di San Servolo, Venice, Italy (žodinis ir stendinis pranešimai).

J. Dudutis, P. Gečys, G. Račiukaitis: *Nanosecond laser processing of soda-lime glass*, The 15th International Symposium on Laser Precision Microfabrication (LPM2014), June 17 – 20 (2014), Vilnius (žodinis pranešimas).

J. Dudutis, P. Gečys: *Nanosecond laser drilling of soda-lime glass*, 57th Scientific Conference for Young Students of Physics and Natural Sciences „Open Readings“, March 19 – 21 (2014), Vilnius (stendinis pranešimas).

J. Dudutis, J. Berzinš: *Laser micro-machining of transparent substrates*, 20th Lithuania-Belarus seminar „Lasers and Optical Nonlinearity“, November 21-22 (2013), Vilnius (stendinis pranešimas).

Publikacijos, susijusios su stiklo apdirbimu:

P. Gečys, J. Dudutis, G. Račiukaitis, Nanosecond Laser processing of Soda-lime Glass, J. Laser Micro/Nanoeng. **10**(3), pp. 254-258 (2015).

Konferencijų medžiaga:

J. Dudutis, P. Gečys, G. Račiukaitis, Rear Side Processing of Soda-Lime Glass Using DPSS Nanosecond Laser, in *Proc. of Lasers in Manufacturing 2015 (LiM2015)*, (2015).

Santrauka lietuvių kalba

STIKLO PJOVIMAS KŪGINE PRIZME SUFORMUOTU BESELIO-GAUSO PLUOŠTU

Juozas Dudutis

Šio darbo tikslas buvo ištirti lazerinį stiklo pjovimo metodą formuojant modifikacijas tūryje Beselio-Gauso pluoštu ir atliekant mechaninį plokštelių perlaužimą. Eksperimentų metu buvo naudojama 10 ps ir 300 ps impulsų trukmės diodais kaupinamų kieto kūno lazerių fundamentinė harmonika (1064 nm). Beselio-Gauso pluoštas buvo formuojamas fokusuojant Gauso pluoštą kūgine prizme ir naudojant 4F vaizdo perkėlimo sistemą. Tyrimų metu buvo ištirta kūginės prizmės forma ir išanalizuotas suformuoto pluošto intensyvumo skirstinys, ištirtos suformuotos modifikacijos stiklo tūryje, atlikti stiklo pjovimo eksperimentai keičiant apdirbimo parametrus.

Tyrimų metu nustatyta, jog dėl gamybos technologinių apribojimų kūginė prizmė neatitiko idealaus kūgio formos ir turėjo elipsės formos pagrindą bei užapvalintą viršūnę. Tokia kūgine prizme suformuotas pluoštas pasižymėjo asimetriniu intensyvumo skirstiniu ir centrinės smailės mažėjimu bei intensyvumo moduliacija išilgai pluošto sklidimo ašies. Didėjant pluošto sklidimo nuotoliui, intensyvumo skirstinys palaipsniui persiformavo į keletą maksimumų. Nustatyta, jog tokiu pluoštu paveikus stiklą, medžiagoje yra suformuojami įtrūkiai, kurių dominuojanti kryptis sutampa su elipsės formos skirstinio ilgąja ašimi. Įtrūkių ilgis siekė 183 μm , kuomet 300 ps trukmės impulsų energija buvo 2 mJ. Įtrūkių ilgis tiesiškai priklausė nuo impulso energijos logaritminėje skalėje. Pademonstruota, jog yra įmanoma keisti susiformuojančių įtrūkių kryptį sukant eksikoną apie ašį.

Panaudojant Beselio-Gauso pluoštą ir 300 ps trukmės impulsus įtrūkių ir modifikacijų medžiagoje formavimui, pademonstruotas itin spartus tiesių kontūrų pjovimas. Maksimalus stabilus pjovimo greitis siekė 240 mm/s, kuomet impulsų energija buvo 2 mJ.

Pjūvio kokybė priklausė nuo impulsų energijos ir skenavimo greičio. Mažiausias pasiektas pjūvio sienelių šiurkštumas buvo 1,6 μm , kuomet impulsų energija buvo 0,6 mJ, skenavimo greitis 10 mm/s. Nustatyta, jog optimalus pjovimo greitis, kuomet pasiekiamas mažiausias pjūvio šiurkštumas, tiesiškai priklauso nuo impulsų energijos.

**GLASS CUTTING USING A BESSEL-GAUSSIAN BEAM GENERATED BY A
CONICAL LENS**

Juozas Dudutis

The goal of this work was to investigate the in-volume modification of glass combined with a mechanical cleaving process for glass cutting using picosecond Bessel-Gaussian beams. Experiments were carried out using the fundamental harmonic of diode-pumped solid-state lasers with pulse duration of 10 ps and 300 ps. The Bessel-Gaussian beam was generated by focusing the Gaussian beam with a conical lens together with a 4F optical system. The conical lens, generated intensity distribution, in-volume modifications of glass were investigated and glass cutting experiments were carried out during this research.

It was found that due to manufacturing tolerances the investigated conical lens shape deviated from an ideal cone and had an oblate tip and an ellipse-shaped cross-section. The intensity pattern, generated by such lens, was nonsymmetrical and modulated along the propagation axis. The central core diameter depended on the distance from the axicon tip. Also, as the beam propagation distance increased, the intensity pattern was gradually spread into several maxima. Such beam distribution affected the formation of cracks in the bulk of glass, which tended to orientate along the major axis of an ellipse-shaped central core of the beam. The maximum length of cracks was 183 μm when 2 mJ laser pulses with duration of 300 ps were applied. Cracks size depended linearly on the pulse energy on the logarithmic scale. It was demonstrated that the direction of cracks orientation can be adjusted by rotating an axicon.

Laser induced in-volume modifications combined with a cleaving process could be applied for thick glass cutting. Cutting of straight contours was demonstrated by single pass technique using a Bessel-Gaussian beam and 300 ps laser pulses. Maximum cutting speed of 1 mm-thick soda-lime glass sheets was 240 mm/s when 2 mJ laser pulses were applied.

Cutting quality depended on the pulse energy and scanning speed. Minimal sidewall surface roughness was 1.6 μm when the pulse energy was 0.6 mJ, scanning speed 10 mm/s. It was concluded that the optimal cutting speed with the lowest roughness depends linearly on the pulse energy.