



Titas
GERTUS

Yb:KGV FEMTOSEKUNDINĖ
LAZERINĖ SISTEMA MEDŽIAGŲ
MIKROAPDIRBIMUI IR
JOS TAIKYMAI

DAKTARO DISERTACIJOS SANTRAUKA

TECHNOLOGIJOS MOKSLŲ SRITIS, MEDŽIAGŲ INŽINERIJOS KRYPTIS (08 T)
LAZERINĖ TECHNOLOGIJA (T 165)

VILNIUS 2012

VILNIAUS UNIVERSITETAS
FIZINIŲ IR TECHNOLOGIJOS MOKSLŲ CENTRO
FIZIKOS INSTITUTAS

Titas Gertus

**Yb:KGV FEMTOSEKUNDINĖ LAZERINĖ SISTEMA MEDŽIAGŲ
MIKROAPDIRBIMUI IR JOS TAIKYMAI**

Daktaro disertacijos santrauka

Technologijos mokslų srities, Medžiagų inžinerijos kryptis (08T)

Lazerinė technologija (T165)

Vilnius, 2012

Disertacija rengta 2009–2012 m. Vilniaus universiteto, Fizikos fakulteto Kvantinės elektronikos katedros Lazerinių tyrimų centre (Saulėtekio g. 10, Vilnius, Lietuva) ir *Workshop of Photonics* laboratorijoje (UAB *Altechna*, Konstitucijos pr. 23B, Vilnius, Lietuva).

Mokslinis vadovas

Prof. habil. dr. **Valerijus Smilgevičius** (Vilniaus universitetas, technologijos mokslai, medžiagų inžinerija – 08T, lazerinė technologija – T165)

Disertacija ginama Vilniaus universiteto Medžiagų inžinerijos krypties gynimo taryboje:

Pirmininkas

Prof. habil. dr. **Alfonsas Grigonis** (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, medžiagų inžinerija – 08T, lazerinė technologija – T165)

Nariai:

Dr. **Rimantas Grigonis** (Vilniaus universitetas, technologijos mokslai, medžiagų inžinerija – 08T, lazerinė technologija – T165)

Dr. **Andrejus Michailovas** (Fizinių ir technologijos mokslų centro Fizikos institutas, technologijos mokslai, medžiagų inžinerija – 08T, lazerinė technologija – T165)

Prof. dr. **Arturas Jukna** (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, fiziniai mokslai, fizika – 02P, puslaidininkų fizika – P265)

Dr. **Edmundas Širmulis** (Fizinių ir technologijos mokslų centro Puslaidininkų fizikos institutas, fiziniai mokslai, fizika – 02P, puslaidininkų fizika – P265)

Oponentai:

Doc. dr. **Ona Balachninaitytė** (Vilniaus universitetas, technologijos mokslai, medžiagų inžinerija – 08T, lazerinė technologija – T165)

Dr. **Šarūnas Meškiniš** (Kauno technologijos universitetas, fiziniai mokslai, fizika – 02P, puslaidininkų fizika – P265)

Disertacija bus ginama viešame posėdyje 2012 m. rugsėjo 26 d., 13 val. Vilniaus universiteto Fizikos fakultete. Adresas: Saulėtekio al. 9, LT-10222, Vilnius, Lietuva.

Disertacijos santrauka pavišinta 2012 m. rugpjūčio 10 d.

Su disertacija galima susipažinti Vilniaus universiteto ir FTMC Fizikos instituto bibliotekose.

VILNIUS UNIVERSITY
CENTER FOR PHYSICAL SCIENCES AND TECHNOLOGY
PHYSICS INSTITUTE

Titas Gertus

**Yb:KGW FEMTOSECOND LASER MATERIAL MICROMACHINING SYSTEM
AND APPLICATIONS**

Doctoral dissertation summary

Technology Science for Material Engineering (08T)

Laser Technology (T165)

Vilnius 2012

The research described in this thesis was performed in 2009 – 2012 in Vilnius University, Physics faculty, Department of Quantum Electronics, Laser Research Center (Saulėtekio Ave. 10, Vilnius, Lithuania) and in *Workshop of Photonics* laboratory (*Altechna Co. Ltd.*, Konstitucijos Ave. 23B, Vilnius, Lithuania).

Scientific supervisor

Prof. Habil. Dr. **Valerijus Smilgevičius** (Vilnius University, Technology Science for Material Engineering – 08T, Laser Technology – T165)

The dissertation will be defended at the council of Technology Science for Material Engineering:

Chairman

Prof. Habil. Dr. **Alfonsas Grigonis** (Kaunas University of Technology, Technology Science for Material Engineering – 08T, surfaces and coatings Engineering - T155)

Members:

Dr. **Rimantas Grigonis** (Vilnius University, Technology Science for Material Engineering – 08T, Laser Technology – T165)

Dr. **Andrejus Michailovas** (Center for Physical Sciences and Technology, Physics institute, Technology Science for Material Engineering – 08T, Laser Technology – T165)

Prof. Dr. **Artūras Jukna** (Vilnius Gediminas Technical University, physical Sciences, Physics – 02P, Semiconductor Physics - P265)

Dr. **Edmundas Širmulis** (Center for Physical Sciences and Technology, Semiconductor Physics Institute, physical Sciences, Physics – 02P, Semiconductor Physics - P265)

Opponents:

Doc. Dr. **Ona Balachnaitė** (Vilnius University, Technology Science for Material Engineering – 08T, Laser Technology – T165)

Dr. **Šarūnas Meškiniš** (Kaunas University of Technology, physical Sciences, Physics – 02P, Semiconductor Physics - P265)

The dissertation will be defended on the 26th of September 2012 (13 h), at the Faculty of Physics of Vilnius University. Address: Saulėtekio Ave. 9, LT-10222, Vilnius, Lithuania.

The summary of the dissertation was distributed on the 10th of August 2012.

The dissertation is available at Vilnius University and Center for Physical Sciences and Technology Physics Institute libraries.

Padėka

Esu dėkingas visiems Lazerinių tyrimų centro darbuotojams, vienaip ar kitaip prisidėjusiems prie šios disertacijos atsiradimo. Ypač dėkoju savo disertacijos vadovui prof. habil. dr. Valerijui Smilgevičiui. Taip pat reiškiu padėką visiems publikacijų bendraautoriams:

prof. R. Gadonui, dr. M. Malinauskui, M. Rutkauskui, dr. M. Peckui (Vilniaus universitetas, Kvantinės elektronikos katedra, Lazerinių tyrimų centras, Lietuva),

prof. S. Juodkaziui (Svisburno universitetas, Australija),

prof. K. Staliūnui ir L. Maigytei (Katalonijos politechnikos universitetas, fizikos ir inžinerijos katedra, Ispanija),

prof. P. Kazansky, M. Beresna ir M. Gecevičius (Sautamptono universitetas, Optoelektronikos tyrimų centras, Anglija),

prof. D. Čipliui, dr. P. Každailiui ir dr. R. Rimeikai (Vilniaus universitetas, Fizikos fakultetas, Radiofikos katedra, Lietuva),

dr. G. Račiukaičiui ir E. Stankevičiui (Fizinių ir technologijos mokslų centras, Lietuva).

Taip pat esu dėkingas UAB Altechna kolektyvui, ypač dr. G. Šlekiui ir M. Mikučiui.

Ižanga

Jau prabėgo daugiau nei 50 metų, kai T. H. Maiman Hughes tyrimų laboratorijoje pademonstravo pirmąjį rubino lazerį [1]. Šiais laikais lazeriai yra plačiai taikomi įvairiose mokslo, pramonės, karybos ir medicinos srityse [2]. Skirtingose srityse naudojami skirtingi lazeriai. Vieni iš pažangiausių – ypač trumpus šviesos impulsus generuojantys – kietakūniai lazeriai. Jie plačiai naudojami Ramano spektroskopijoje, lazerių indukuoto pažeidimo spektroskopijoje, atmosferos stebėjimams, atomų gaudyklėms, konfokalinėje lazerinėje skenavimo mikroskopijoje, dvifotonėje mikroskopijoje, medžiagų apdirbimui ir kt. Šios disertacijos tema – medžiagų mikroapdirbimas femtosekundiniais šviesos impulsais (ang. *Femtosecond laser micromaching*).

Medžiagų mikroapdirbimo femtosekundiniais šviesos impulsais (MAFŠI) metu dalis apdirbamos medžiagos yra išgarinama arba pakeičiamos jos savybės. Sufokusuoto femtosekundinio šviesos impulsų pluošto sąsmaukoje smailinis intensyvumas gali nesunkiai siekti $I = 10^{15} \text{ W/cm}^2$. Toks intensyvumas yra daugiau nei pakankamas lokaliai bet kokios medžiagos (metalų, polimerų, stiklo ar kt.) jonizavimui. Dielektrinės medžiagos, kurių draustinių energijų juosta gana didelė (kalcio fluoridas (CaF_2), safyras, kvarcas), tampa neskaidrios krintančiai spinduliuotei. Sugertis tampa nepriklausoma nuo medžiagos [3]. Aštriai sufokusuotas femtosekundinis pluoštas gali indukuoti lokalius liekamuosius medžiagos struktūros pokyčius. Erdviškai apribotas poveikis ir lazerio pluošto skenavimo ar bandinio pozicionavimo sistema leidžia atlikti geometriškai sudėtingos formos trimatį medžiagų mikroapdirbimą. Pirmą kartą medžiagų mikroapdirbimas femtosekundiniais šviesos impulsais buvo pademonstruotas 1994 metais prancūzų mokslininko G. Mourou. Jis pademonstravo mikrometrinių matmenų darinių lazerinį plazminį garinimą ant kvarco ir sidabro bandinių paviršiaus [4]. Neprabėgus nei 10 metų, pademonstruotas nanometrinių matmenų darinių formavimas [5]. MAFŠI esminis privalumas (palyginti su medžiagų apdirbimu ilgesniais impulsais) yra gebėjimas tiksliai ir sparčiai medžiagai perduoti didelį energijos kiekį [6].

Titanu legiruotas safyras yra pati populiariausia stiprinimo terpė femtosekundinės trukmės impulsus generuojančiuose lazeriuose. Tokie lazeriai generuoja $\lambda = 800 \text{ nm}$ bangos ilgio, $\tau = 5 \text{ fs}$ trukmės [7], didelės energijos $E_p = 5 \text{ mJ}$ šviesos impulsus $f = 1 \text{ kHz}$ pasikartojimo dažniu [8]. Tačiau mikroapdirbimo darbai reikalauja didesnio impulsų pasikartojimo dažnio. Alternatyva – iterbiu legiruotas kalio gadolinio volframoto (Yb:KGV) femtosekundiniai kietakūniai lazeriai, gebantys generuoti $\lambda = 1030 \text{ nm}$ bangos ilgio, $\tau < 200 \text{ fs}$ impulso trukmės, $f = 200 \text{ kHz}$ pasikartojimo dažnio spinduliuotę. Vidutinė spinduliuotės galia tokiose lazerinėse sistemose siekia $P = 15 \text{ W}$, o impulsų energija $E_p = 0,2 \text{ mJ}$. Disertacijos eksperimentams naudotas

Lietuvoje pagamintas Yb:KGV femtosekundinis lazeris PHAROS (gamintojas – UAB Mokslinė–gamybinė firma *Šviesos konversija*).

Darbo tikslai ir uždaviniai

- Sukurti medžiagų apdirbimo femtosekundiniais šviesos impulsais sistemą, kuria naudojantis būtų galima atlikti mikroapdirbimo užduotis medžiagų paviršiuje ir skaidrių medžiagų tūryje.
- Atlikti plonų metalinių sluoksnių selektyvaus lazerinio plazminio garinimo nuo dielektrinių padėklų tyrimus. Užrašyti įvairius funkcinis darinius: hologramas, elektroakustinius keitiklius bei fononinius kristalus.
- Atlikti femtosekundinių šviesos impulsų sąveikos su skaidrių dielektrinių terpių tūriu tyrimus. Užrašyti funkcinis darinius: poliarizacijos keitiklius ir fotoninius kristalus, skirtus erdviniam pluoštų filtravimui pademonstruoti.

Naujumas ir aktualumas

Medžiagų apdirbimas femtosekundiniais šviesos impulsais yra sparčiai besivystanti technologija. Tai yra raktinė technologija įvairių medžiagų mikroapdirbimo užduotims atlikti. Disertacijos metu buvo sukurta unikali femtoLAB medžiagų apdirbimo femtosekundiniais šviesos impulsais sistema. Joje yra įdiegti antros, trečios ir ketvirtos harmonikų generatoriai, poliarizacijos rotatoriai, pluošto skenavimo ir moduliavimo posistemės. Sukurti sistemos valdymo algoritmai, įgalinantys suformuoti unikalius funkcinis darinius: hologramas, elektroakustinius keitiklius, fononinius kristalus ir mikrometrinių matmenų vamzdelius.

Pirmą kartą buvo užrašyti fotoniniai kristalai, skirti erdviniam pluoštų filtravimui pademonstruoti, naudojant femtosekundinius šviesos impulsus. Taip pat sukurti paviršinių akustinių bangų keitikliai ir fononiniai kristalai. Atliktas mikrometrinių matmenų vamzdelių polimerizavimas bei pademonstruota galimybė modifikuoti skaidrių terpių tūrį naudojant femtosekundinius šviesos sūkurių pluoštus.

Bendradarbiaujant su prof. P. Kazansky grupe iš Sautamptono universiteto buvo sukurtas, užrašytas ir rinkai pristatytas unikalus radialinės ir azimutinės poliarizacijų keitiklis. Jo veikimas paremtas skaidrių terpių tūryje suformuotų savitvarkių nanometriniu periodo gardelių formavimu femtosekundiniais šviesos impulsais.

Ginamieji teiginiai

1. Sukurta unikali medžiagų mikroapdirbimo femtosekundiniais šviesos impulsais sistema ir jos valdymo algoritmai įgalinantys tiksliai atlikti įvairias medžiagų mikroapdirbimo užduotis.
2. Plonų metalinių sluoksnių selektyvus lazerinis plazminis garinimas nuo skaidriųjų terpių paviršiaus femtosekundiniais šviesos impulsais įgalina sukurti binarines hologramas, elektroakustinius keitiklius ir fononinius kristalus paviršinių akustinių bangų filtravimui.
3. Skaidriųjų terpių lūžio rodiklio pokyčio liekamasis moduliavimas femtosekundiniais šviesos impulsais įgalina suformuoti fotoninius kristalus, skirtus erdviniam pluoštų filtravimui.
4. Savitvarkių nanometrinių matmenų gardelių indukavimas skaidriųjų terpių tūryje femtosekundiniais šviesos impulsais įgalina sukurti radialinės ir azimutinės poliarizacijų keitiklį.
5. Femtosekundiniais šviesos sūkurių pluoštais galima mikrometrinių matmenų vamzdelius formuoti daugiafotonės fotopolimerizacijos būdu.

Darbo aprobacija

Disertacijos tyrimų rezultatai publikuoti 6 moksliniuose žurnaluose. 5 publikacijos yra įtrauktos į ISI sąrašą. Disertacijos tema moksliniai pranešimai skaityti 14 konferencijų.

Straipsniai

[P1] L. Maigyte, **T. Gertus**, M. Peckus, J. Trull, C. Cojocar, V. Sirutkaitis and K. Staliunas, “Signatures of light beam spatial filtering in three-dimensional photonic crystal”, *Phys. Rev. A* **82**, 043819 (2010).

[P2] **T. Gertus**, P. Kazdailis, R. Rimeika, D. Ciplys, V. Smilgevičius, “Surface acoustic wave transducers fabricated by femtosecond laser ablation”, *Electron. Lett.* **46** (17), 1175–1176 (2010).

[P3] M. Beresna, M. Gecevičius, P. G. Kazansky, **T. Gertus**, “Radially polarized optical vortex converter created by femtosecond laser nanostructuring of glass”, *Appl. Phys. Lett.* **98** (20), 201101–201103 (2011).

[P4] **T. Gertus**, M. Mikutis, V. Smilgevičius, “**Dielectric materials volume and surface processing using femtosecond vortex beam**”, *LiM2011, Physics Proc.* **12** (2), 94–98 (2011).

[P5] **T. Gertus**, M. Mikutis, P. Kazdailis, R. Rimeika, D. Ciplys, and V. Smilgevičius, “**Surface-acoustic-wave phononic crystal device fabricated by femtosecond laser ablation**”, *Microwave and Opt. Tech. Lett.*, **54** (5), 1286–1287 (2012).

[P6] E. Stankevicius, **T. Gertus**, M. Rutkauskas, G. Raciukaitis, R. Gadonas, V. Smilgevičius and M. Malinauskas, “**Fabrication of micro-tubes array in photopolymer SZ2080 by using three different methods of multi-photon polymerization technique**”, *J. Micromech. Microeng.* **22**, 065022 (2012).

Autoriaus indėlis

Publikacijose aprašytų darinių (trimačių fotoninių kristalų (P1), paviršinių akustinių bangų keitiklių (P2), fononinių kristalų (P5), mikrometrinių matmenų vamzdelių (P6)) formavimas. Taip pat atlikti femtosekundinių šviesos sūkurių pluoštų sąveikos su dielektrinėmis terpėmis tyrimai (P4), sukurti fabrikavimo algoritmai, skirti poliarizacijos keitiklio užrašymui (P3). Suformuotų funkcinių darinių charakteristikų matavimus atliko publikacijų bendraautoriai.

Pranešimai konferencijose

1. **T. Gertus**, P. Kazdailis, R. Rimeika, D. Čiplys, Valerijus Smilgevičius, “**Paviršinių akustinių bangų keitiklio gamyba lazerinio plazminio garinimo būdu**”, LNFK38, Vilnius, Lithuania, 2009.
2. **T. Gertus**, G. Šlekys, “**Femtosecond micromachining Activities and Applications**”, LON2009, Vilnius, Lithuania, 2009.

3. **T. Gertus**, R. Razgaitis, “**Laser-induced backside wet etching using femtosecond laser pulses**”, Open Readings, Vilnius, Lithuania, 2010.
4. **L. Maigytė**, **T. Gertus**, M. Peckus, V. Sirutkaitis and K. Staliūnas “**Experimental evidences of light beam filtering by three-dimensional photonic crystal**”, ICTON, Munich, Germany, 2010.
5. L. Maigytė, **T. Gertus**, M. Peckus, J. Trull, C. Cojocar, V. Sirutkaitis and K. Staliūnas, “**Signatures of Light Beam Spatial Filtering in Three Dimensional Photonic Crystal**”, Alexander von Humboldt Forum, Vilnius, Lithuania, 2010.
6. **M. Malinauskas**, A. Žukauskas, G. Bičkauskaitė, M. Rutkauskas, K. Belazaras, H. Gilbergs, P. Danilevičius, V. Purlys, D. Paipulas, **T. Gertus**, R. Gadonas, A. Piskarskas, D. Baltriukienė, V. Bukelskienė and A. Gaidukevičiūtė, “**Fabrication of Three-Dimensional Nanostructures by Laser Polymerization Technique**”, Proc. CYSENI, Kaunas, Lithuania, 2010.
7. **P. Stanislovaitis**, **T. Gertus**, V. Smilgevičius, “**Control of Optical Vortex Dislocations Using Optical Methods**”, Open Readings, Vilnius, Lithuania, 2011.
8. **T. Gertus**, M. Mikutis, V. Smilgevičius, “**Dielectric materials volume and surface processing using femtosecond vortex beam**”, LiM2011, Munich, Germany, 2011.
9. **L. Maigytė**, J. Trull, V. Mižeikis, M. Malinauskas, S. Juodkazis, C. Cojocar, M. Rutkauskas, M. Peckus, V. Sirutkaitis, **T. Gertus** ir K. Staliūnas, “**Collimated beams by woodpile photonic crystals**”, CLEO, Munich, Germany, 2011.
10. **T. Gertus**, M. Mikutis, P. Každailis, R. Rimeika, D. Čiplys, V. Smilgevičius, “**Phononic crystal for surface acoustic wave filtering fabrication using femtosecond laser ablation**”, LNFK39, Vilnius, Lithuania, 2011.
11. **T. Gertus**, M. Rutkauskas, M. Malinauskas, R. Gadonas, V. Smilgevičius, “**Micro tube fabrication using optical vortex beam with laser polymerization technique**”, LNFK39, Vilnius, Lithuania, 2011.
12. **T. Jankauskas**, T. Gertus, V. Smilgevičius, M. Beresna, M. Gecevičius, “**Radial polarization beams in femtosecond micromachining**”, LNFK39, Vilnius, Lithuania, 2011.
13. **T. Jankauskas**, T. Gertus, M. Beresna, M. Gecevičius, “**Comparison of radial, azimuthal, linear and circular polarization in laser micromachining under normal focusing conditions**”, Open Readings, Vilnius, Lithuania, 2012.
14. **T. Gertus**, „**Radial/azimuth polarization converter manufacturing using femtosecond laser system**“, Forum Lasers in Action, LASYS 2012, Stuttgart, Germany, 2012.

1. Medžiagų apdirbimas femtosekundiniais šviesos impulsais

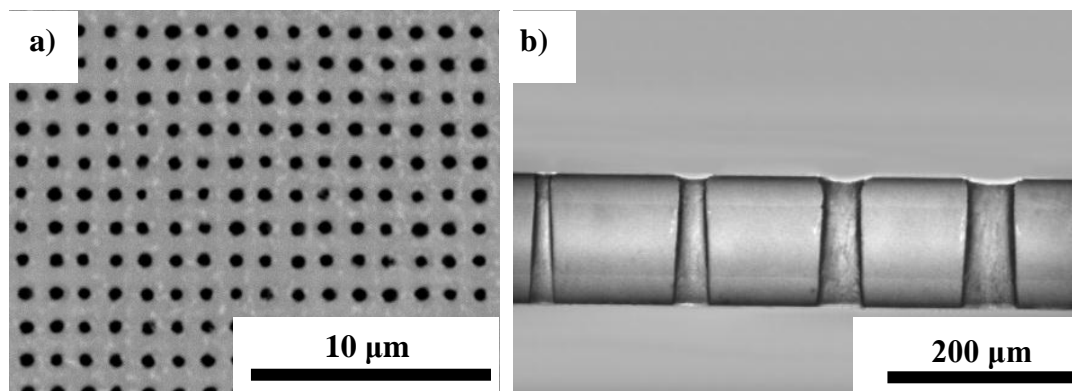
1.1. Medžiagų apdirbimo femtosekundiniais šviesos impulsais privalumai

Pagrindiniai medžiagų mikroapdirbimo femtosekundiniais šviesos impulsais privalumai yra šie:

- tiesioginis – vienproceso medžiagų apdirbimas, nereikalaujantis tolesnio apdirbimo (ang. *post treatment*),
- nekontaktinis – nėra tiesioginio įrankio kontakto su apdirbamąja medžiaga,
- nešiluminis – trumpos šviesos impulsų ir apdirbamos medžiagos impulsų sąveikos metu neišsiskiria šiluma,
- lankstus – yra galimybė nesunkiai keisti apdirbimo proceso parametrus,
- lokalizuotas – spinduliuotės pluoštas gali būti sufokusuotas į dėmę, kurios diametras artimas naudojamam bangos ilgiui.

1.2. Medžiagų apdirbimo femtosekundiniais šviesos impulsais taikymai

Medžiagų mikroapdirbimas femtosekundiniais šviesos impulsais yra taikomas įvairiose sferose. Pavyzdžiui, mikrometrinių skylių gręžimas taikomas purkštukų, apertūrų, mikroelektronikos ar mikroskysčių sistemų gamyboje. 1 paveikslo a) dalyje pavaizduota elektroninio mikroskopo diametro $d = 2 \mu\text{m}$ skilučių, išgręžtų plonoje aliuminio folijoje, nuotrauka, o b) dalyje pavaizduota skylutės išgręžtos kiaurai šviesolaidį. Šviesolaidyje išgręžtos skylutės gali pasitarnauti konstruojant įvairius jutiklius [9].



1 pav. Mikroapdirbimo pavyzdžiai: a) diametro $d = 2 \mu\text{m}$ skilyčių, išgręžtų plonoje aliuminio folijoje elektroninio mikroskopo nuotrauka, b) skylutės išgręžtos kiaurai šviesolaidį. Nuotraukų savininkas – UAB *Altechna* (Lietuva)

Medžiagų mikroapdirbimas femtosekundiniais šviesos impulsais įgalina medžiagų paviršių savybių (atspindį, drėkinimą, spalvą, grublėtumą, sugertį ir kt.) modifikavimą, pavyzdžiui, „juodojo“ silicio gamybą [10], kuris savo ruožtu suteikia naują funkcionalumą mikrosistemose [11]. Nanometrinių matmenų raibulių (periodas ~190 nm) formavimas silicio karbido paviršiuje gali būti naudojamas paviršiaus sustiprintos Ramano sklaidos (ang. *surface-enhanced Raman scattering*) šviesą stiprinančių sensorių gamyboje [12].

Selektyvus plazminis garinimas (SPG) femtosekundiniais šviesos impulsais įgalina plonų metalinių ar dielektrinių dangų šalinimą nepažeidžiant padėklo. Kristalinių saulės elementų gamyboje SPG leidžia pašalinti pasivacinius silicio nitrido ir silicio oksido sluoksnius. SPG taip pat įgalina lazerinį valymą – paviršiaus nešvarumų šalinimą nepaveikiant valomo paviršiaus. SPG taikoma ir fotokaukių taisymui [13] ar net pačių kaukių užrašymui [14]. Galiausiai selektyvus indžio alavo oksido (ang. *indium tin oxide*) [15] plazminis garinimas gali būti naudojamas permatomų, lietimui jautrių įrengimų gamyboje. Medžiagų plazminis garinimas femtosekundiniais šviesos impulsais įgalina dvimačių mikroelektromechaninių sistemų gamybą [16], širdies ir kraujagyslių stentų pjovimą iš nikelio ir titano lydinio [17].

Galimybė lokaliai modifikuoti skaidrių dielektrinių terpių tūrį naudinga fotoninių mikrosistemų gamyboje: tiesių ir kreivų bangolaidžių [18, 19, 20], pluošto daliklių [21], kryptinių šakotuvų [22], *Bragg'o* gardelių [23,24], bangolaidinių stiprintuvų [25], mikrorezonatorių [26]. Atsiranda galimybė formuoti penkiamatę atmintį [27] ar draustinių energijų tarpą turinčius fotoninius kristalus [28].

Tiesioginis rašymas (daugiafotonė fotopolimerizacija) leidžia formuoti sudėtingos formos trimačius skaidrius darinius: biolustus [29], laboratorijų lustus (ang. *lab-on-chip*) [30] ar mikroelektrooptomechanines sistemas [31]. Integruota mikrooptika (mikrolęšiai, mikroprizmės, mikrofazinės plokštelės ar fotoniniai kristalai) [32] taip pat gali būti formuojama tiesioginio rašymo būdu. Taip pat, didelio kraštinių santykio mikrokanalų formavimas [33] reikalingas trimačių mikroskysčių sistemų formavime [34].

Medžiagų mikroapdirbimas femtosekundiniais šviesos impulsais taikomas ir medicinoje. Pavyzdžiui, neseniai buvo pademonstruota, kaip per operacijas vienas lazeris gali atlikti skirtingas akių korekcijos užduotis (ang. *laser assisted in situ keratomileusis*) [35]. Karkasai (ang. *scaffold*) ląstelių auginimui gali būti formuojami pasitelkiant daugiafotonę fotopolimerizaciją. Biofotoniniai lustai [36] ir mikromechaniniai vožtuvai gliaukomos implantams [37] taip pat gali būti formuojami femtosekundiniais šviesos impulsais.

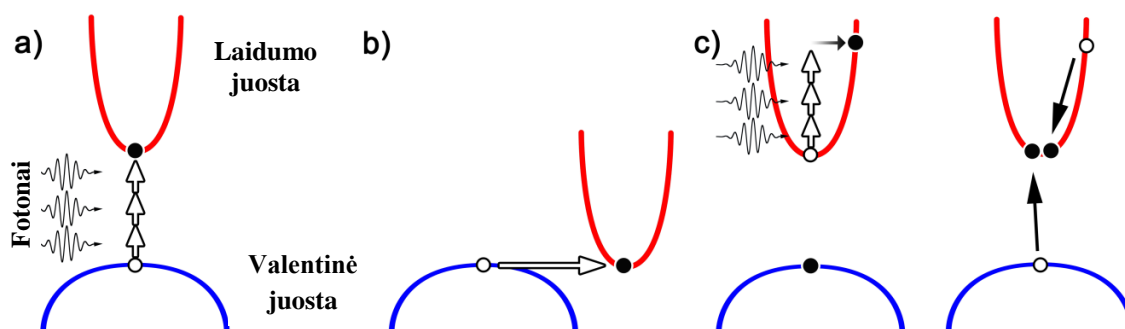
1.3. Medžiagų apdirbimo femtosekundiniais šviesos impulsais pagrindai

Šviesos sąveiką su medžiaga aprašo Maksvelo lygtys [38]. Iš jų išplaukia medžiagos netiesinio poliarizuotumo atsako į krintantį elektromagnetinį lauką:

$$P = \epsilon_0 \chi^{(1)} \cdot E + \epsilon_0 \chi^{(2)} \cdot EE + \epsilon_0 \chi^{(3)} \cdot EEE + \dots ; \quad (1)$$

čia $\epsilon_0 = 8,853 \cdot 10^{-12} \text{ A} \cdot \text{s/V}$ – vakuumo dielektrinė skvarba, P – poliarizuotumas, E – elektromagnetinio lauko stipris, $\chi^{(i)}$ – netiesiniai i -osios eilės elektriniai jautriai. Netiesinės poliarizacijos nariai $\chi^{(i)}$ ($i > 1$) yra atsakingi už netiesinius vyksmus medžiagoje, kurie vyksta, kai krintantis elektromagnetinis lauko stipris viršija elektrinio lauko stiprį (10^9 V/m) jungiantį valentinius elektronus atome [2]. Kai krintančio elektromagnetinio lauko intensyvumas ($I_{\text{peak}} < 10^{13} \text{ W/cm}^2$) ir $\chi^{(2)}$ yra nelygus 0, medžiagoje gali vykti netiesiniai procesai: antrosios harmonikos generavimas, suminio, skirtuminio dažnio generavimas, trečiosios harmonikos generavimas, fokusavimasis, savimoduliavimasis ar keturbangis maišymasis.

Kai krintančio elektromagnetinio lauko intensyvumas pasiekia $I_{\text{peak}} \approx 10^{13} \text{ W/cm}^2$, vyksta netiesinės fotojonizacijos procesas. Keldyšo [39] parametras aprašo, koks mechanizmas dominuoja fotojonizacijos procese: daugiafotonė, tunelinė ar griūtinė jonizacija (žr. 2 pav.). Netiesinės fotojonizacijos proceso metu lazerinės spinduliuotės energija perduodama medžiagai.



2 pav. Netiesinės fotojonizacijos procesas: a) daugiafotonė jonizacija, b) tunelinė jonizacija, c) griūtinė jonizacija (laisvųjų dalelių sugertis, vykstant smūginei jonizacijai)

Kai krintančio elektromagnetinio lauko intensyvumas pasiekia $I_{\text{peak}} > 10^{13} \text{ W/cm}^2$, vyksta optinis medžiagų pramušimas – lazerinis plazminis medžiagų garinimas, leidžiantis atlikti įvairius medžiagų apdirbimo uždavinius.

1.4. Pagrindiniai medžiagų apdirbimo šviesos impulsais parametrai

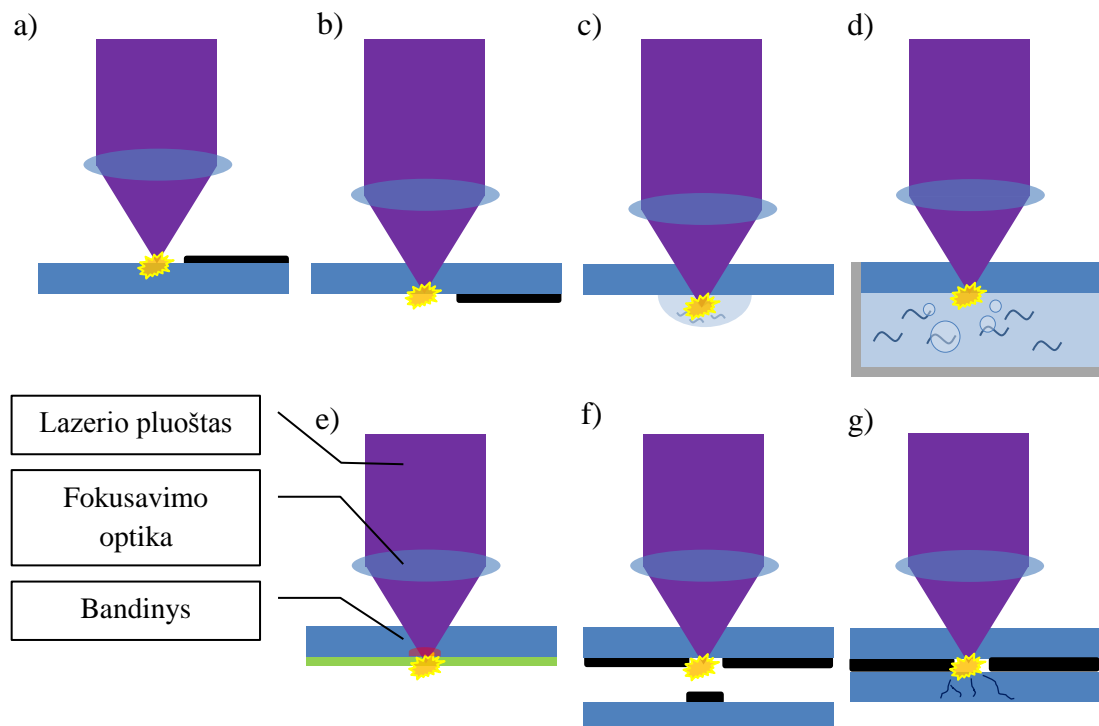
Pagrindiniai parametrai, į kuriuos reikia atsižvelgti derinant medžiagų mikroapdirbimo femtosekundiniais šviesos impulsais procesą, yra šie: impulsų trukmė τ , bangos ilgis λ , impulsų pasikartojimo dažnis f , impulsų energija E_p , impulsų smailinė galia P_p , energijos tankis ϕ , spinduliuotės intensyvumas I , poliarizacija, impulsų tankis P_D , fokusavimo sąlygos.

Norint sukurti sistemą ir atlikti medžiagų apdirbimo femtosekundiniais šviesos impulsais tyrimus, būtina įvertinti išvardytus parametrus.

1.5. Medžiagų apdirbimo femtosekundiniais šviesos impulsais technikos

Pagrindinės medžiagų mikroapdirbimo femtosekundiniais šviesos impulsais technikos yra tokios: tiesioginis lazerinis plazminis garinimas (ang. *direct laser ablation*), tiesioginis lazerinis rašymas (ang. *direct laser writing*), lazerio spinduliuote indukuoto galinio paviršiaus drėgnas ėsdinimas (ang. *laser induced back side wet etching*), lazerio spinduliuote indukuoto galinio paviršiaus sausas ėsdinimas (ang. *laser induced back side dry etching*), lazeriu indukuota medžiagos pernaša (ang. *laser-induced forward transfer*), lazerio spinduliuote indukuotas kietųjų kūnų ėsdinimas (ang. *laser induced solid etching*).

Išvardytos technikos schemiškai pavaizduotos 3 paveiksle.



3 pav.: a) ir b) tiesioginis lazerinis plazminis garinimas, c) tiesioginis lazerinis rašymas (daugiafotonė fotopolimerizacija), d) lazerio spinduliuote indukuoto galinio paviršiaus drėgnas išdūrimas, e) lazerio spinduliuote indukuoto galinio paviršiaus sausas išdūrimas, f) lazeriu indukuota medžiagos pernaša, g) lazerio spinduliuote indukuotas kietų kūnų išdūrimas

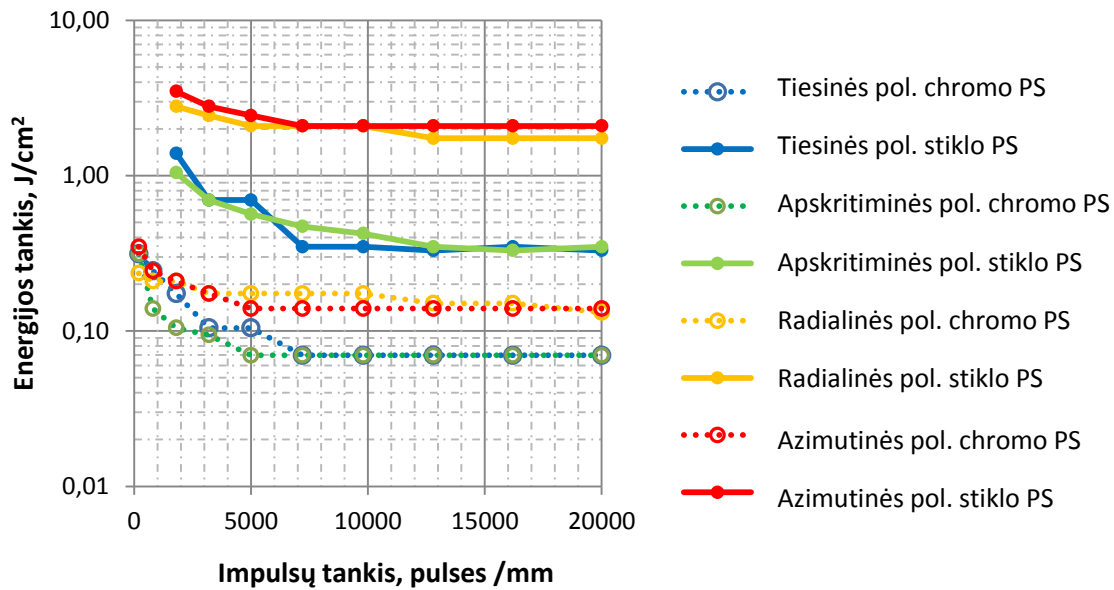
Disertacijoje toliau nagrinėjamos lazerinio plazminio garinimo ir tiesioginio lazerinio rašymo technikos.

1.5.1. Medžiagų paviršiaus apdirbimas

1.5.1.1. Selektyvus plazminis garinimas

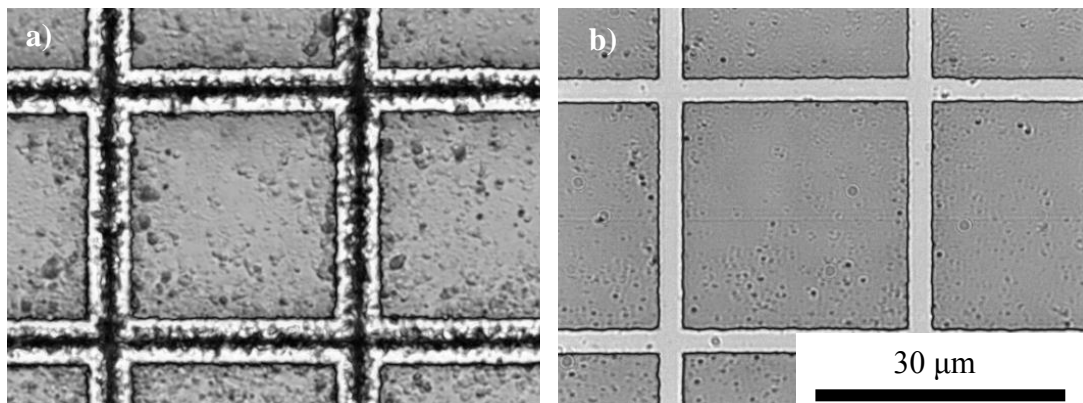
Naudojant lazerinį plazminį medžiagų garinimą galima plonas metalines plėveles selektyviai pašalinti nuo dielektrinių medžiagų paviršiaus [40]. Selektyvaus plazminio garinimo tikslas – pašalinti ploną plėvelę, nepažeidžiant padėklo. Taigi krintančio lauko energijos tankis turi būti tiksliai parinktas. Plono (~200 nm storio) chromo sluoksnio ir stiklo padėklo pažeidimo slenksčio (PS) priklausomybė nuo krintančių impulsų ($\lambda = 1030 \text{ nm}$, $\tau = 300 \text{ fs}$) tankio ir poliarizacijos parodyta 4 paveiksle. Kaip matyti, padėklo pažeidimo slenkstis ($\phi = 2 \text{ J/cm}^2$) naudojant radialinės poliarizacijos pluoštą yra

daugiau kaip 6,6 karto didesnis nei naudojant tiesinę poliarizaciją ($0,3 \text{ J/cm}^2$). Nors chromo sluoksnio PS išlieka nepakitęs ($0,06 - 0,2 \text{ J/cm}^2$).



4 pav. Plono ($\sim 200 \text{ nm}$ storio) chromo sluoksnio ir stiklo padėklo pažeidimo slenksčio priklausomybė nuo krintančių impulsų ($\lambda = 1030 \text{ nm}$, $\tau = 300 \text{ fs}$) tankio ir poliarizacijos

Ploname chromo sluoksnyje nugarinti dariniai naudojant ($\lambda = 1030 \text{ nm}$, $\tau = 300 \text{ fs}$, $\phi = 1 \text{ J/cm}^2$) tiesinės ir radialinės poliarizacijos pluoštus, pateikti 5 paveiksle. Kaip matyti, tiesinės poliarizacijos atveju buvo pažeistas metaliniu sluoksniu padengtas padėklas, o radialinės poliarizacijos atveju jis išliko nepažeistas.



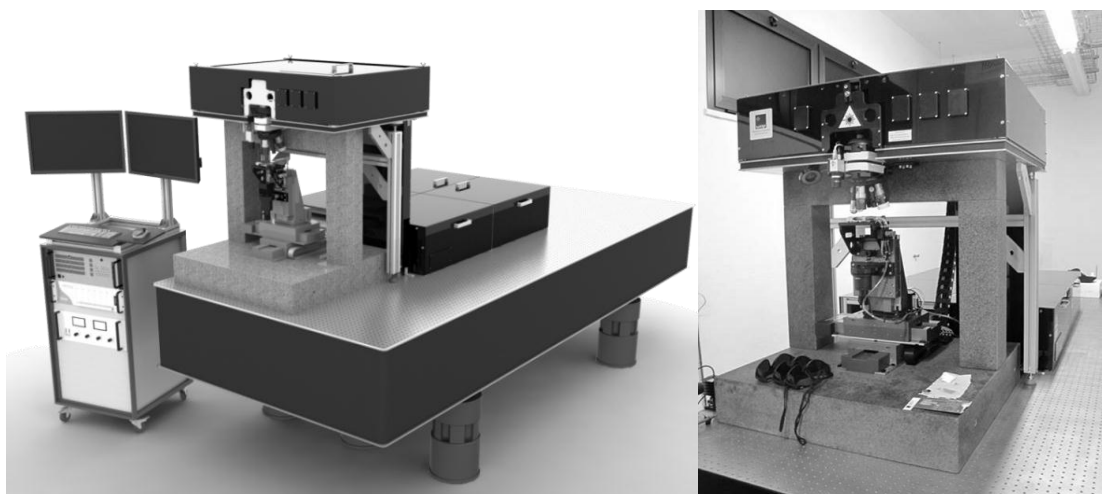
5 pav. Ploname chromo sluoksnyje nugarinti dariniai naudojant: a) tiesinės poliarizacijos pluoštą, b) radialinės poliarizacijos pluoštą. Nuotraukos darytos optiniu mikroskopu esant apšvietimui iš apačios ir iš viršaus. Ekperimento parametrai buvo šie: spinduliuotės bangos ilgis $\lambda = 1030 \text{ nm}$, impulsų trukmė $\tau = 300 \text{ fs}$, energijos tankis $\phi = 1 \text{ J/cm}^2$

1.6. Medžiagų tūrio apdirbimas

Skaidriųjų dielektrinių terpių tūryje gali būti indukuotos trijų tipų modifikacijos: lūžio rodiklio pokytis [41], savitvarkės nanogardelės [42] ir tuštumos (ang. *void*) [43].

2. FemtoLAB medžiagų apdirbimo femtosekundiniais šviesos impulsais sistema

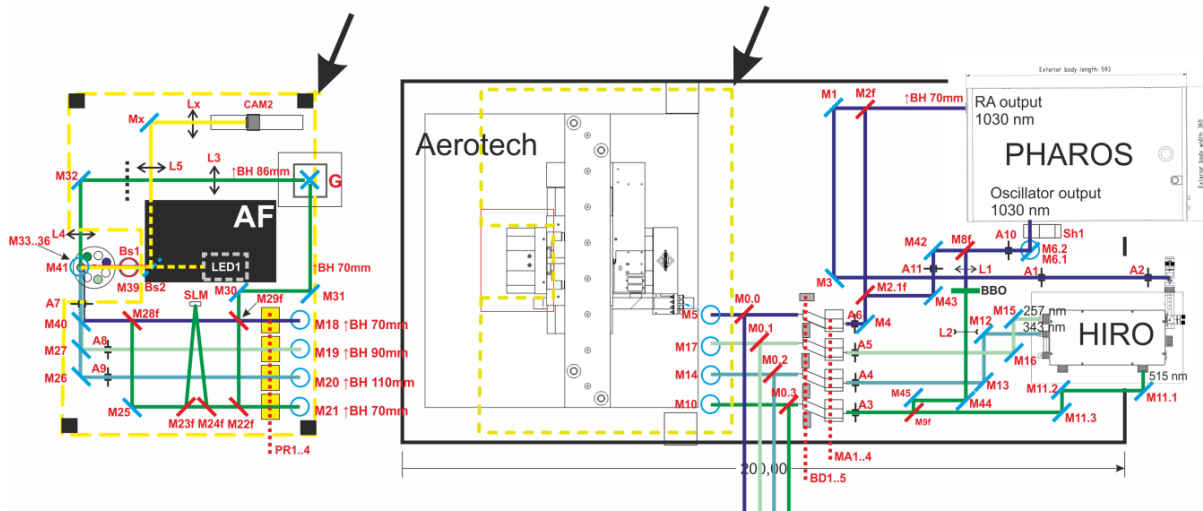
FemtoLAB – tai disertacijos metu sukurta medžiagų mikroapdirbimo femtosekundiniais šviesos impulsais sistema. Joje yra integruotas femtosekundinis Yb:KGV lazeris, antros, trečios ir ketvirtos harmonikų generavimo moduliai, keturi motorizuoti atenuatoriai, keturi motorizuoti poliarizacijos rotatoriai, galvanometrinių skeneriai, galios matuoklis, erdvinis pluošto moduliatorius, mašininės regos sistema, autofokusavimo sistema bei itin tiksli objekto pozicionavimo sistema. FemtoLAB sistema pavaizduota 6 paveiksle: kairėje – modelis sugeneruotas kompiuteriu, dešinėje – surinktos sistemos nuotrauka. Šia sistema galima atlikti medžiagų mikroapdirbimo femtosekundiniais šviesos impulsais tyrimus naudojant visas 1.5 skyriuje išvardytas technikas.



6 pav. FemtoLAB medžiagų apdirbimo femtosekundiniais šviesos impulsais sistema: kairėje – kompiuteriu sugeneruotas sistemos vaizdas, dešinėje – nuotrauka

FemtoLAB sistema buvo suprojektuota ir sukurta nanomokslo ir nanotechnologijų centrui *Istituto Italiano di Tecnologia IIT@polimi* (Milanas, Italija). Ši sistema leidžia atlikti didelio tikslumo medžiagų mikroapdirbimo užduotis, t. y. trimačių optinių mikroschemų, bangolaidžių ir kitų darinių formavimą. Šiuo metu naudodamiesi femtoLAB sistema tyrimus atlieka du doktorantai.

Principinė femtoLAB sistemos optinė schema pateikta 7 paveiksle.



7 pav. Principinė optinė femtoLAB sistemos schema

FemtoLAB sistemos unikalumas yra ją sudarančios įrangos parametrai.

2.1. Pagrindinių femtoLAB sistemos parametų apžvalga

Pagrindiniai femtoLAB sistemoje integruotos įrangos parametrai pateikti 1 lentelėje.

1 lentelė. Pagrindiniai femtoLAB sistemos komponentų parametrai

Dalis	Parametras	Reikšmė
Lazeris	Aktyvioji terpė	Yb:KGV
	Maksimali vidutinė galia (P)	10 W
	Bangos ilgis (λ)	1028 nm \pm 5 nm
	Maksimalus impulsų pasikartojimo dažnis (f_{max})	1 MHz
	Maksimali impulsų energija (E_{P_max})	200 μ J
	Impulsų trukmė (τ)	300 fs
	Pluošto kokybė (M^2)	1,2
	Impulsų stabilumas	<1 %
Osciliatorius	Vidutinė galia	2 W
	Pasikartojimo dažnis	82 MHz
	Impulsų trukmė	80 fs
	Impulsų energija	24 nJ
Harmonikų	Antros harmonikos ($\lambda = 515$ nm)	6,6 W

generatorius	maksimali vidutinė galia (P_{515_max})		
	Trečios harmonikos ($\lambda = 343 \text{ nm}$) maksimali vidutinė galia (P_{343_max})	3,3 W	
	Ketvirtos harmonikos ($\lambda = 257 \text{ nm}$) maksimali vidutinė galia (P_{257_max})	0,32 W	
	Harmonikų perjungimas	rankinis	
Bandinio pozicionavimo sistema	Ašys	XYZ	
	Pavaros tipas	Oro pagalvė	
	Maksimali eiga	150 mm x 100 mm x 50 mm	
	Tikslumas	$\pm 0,5 \mu\text{m}$	
	Pasikartojamumas	$\pm 50 \text{ nm}$	
	Lygumas ir tiesiškumas	$\pm 0,4 \mu\text{m}$	
	Maksimalus pozicionavimo greitis	300 mm/s	
	Maksimalus pozicionavimo pagreitis	10 mm/s ²	
	Maksimali apkrova	15 kg	
	Darbinis paduodamo oro slėgis	80 psi \pm 5 psi	
	Oro suvartojimas	42 l/min	
	Galvanometriniai skeneriai	Ašys	XY
		Skenavimo lauko dydis	Priklauso nuo objektyvo
		Skenavimo kampai (10% visos skalės)	$\pm 5 \text{ deg}$
		Žingsnelio atsako laikas (10% visos skalės)	1 ms
Žingsnelio atsako laikas (100% visos skalės)		3 ms	
Pasikartojamumas		$< 22 \mu\text{rad}$	
Ilgalaikis (8 va.) dreifas		$< 0,6 \text{ mrad}$	
Erdvinis pluošto modulatorius	Raiška	1920 X 1080	
	Aktyvios matricos dydis	15.36 x 8.64	
	Vaizdo elemento dydis	8 μm	
	Darbinis bangos ilgis	nuo 420 nm iki 700 nm	

3. Medžiagų apdirbimo femtosekundiniais šviesos impulsais tyrimai

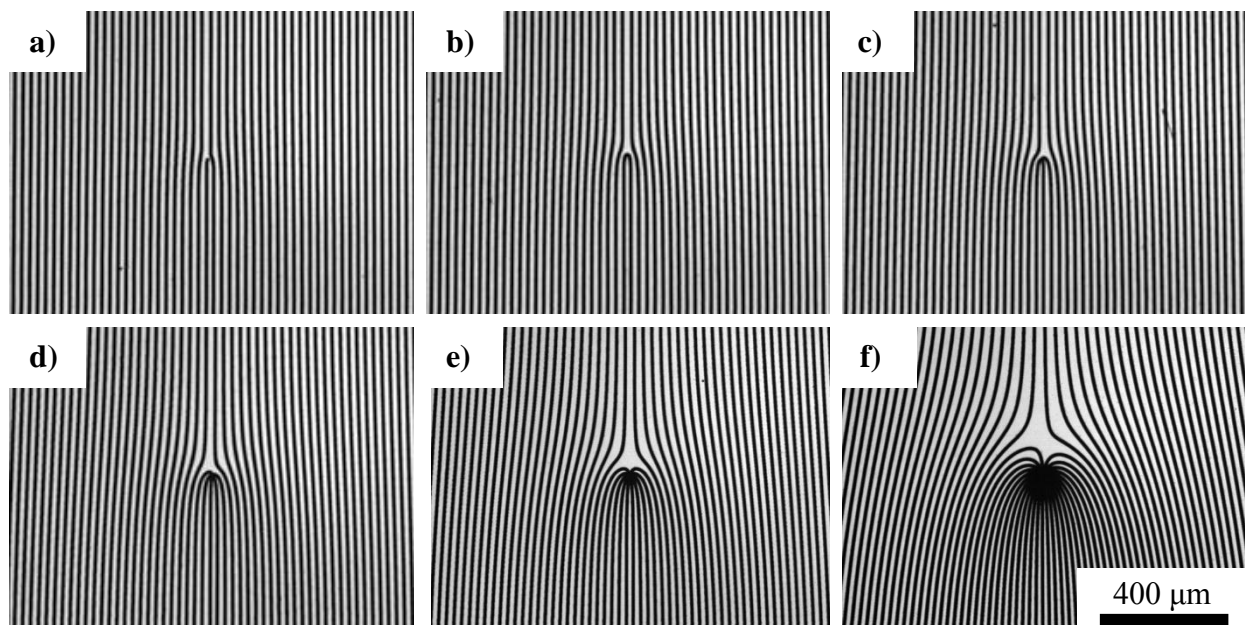
3.1. Hologramų šviesos sūkurių generavimui užrašymas

Eksperimentiniai tyrimai atlikti šalinant plonus metalizuotus sluoksnius (1.5.1.1 skyrius) parenkant impulsų energiją, jų pasikartojimo dažnį ir pluošto padėtį leido sukurti technologiją įgalinančią pagaminti elementus reikalingus išskirtinių šviesos pluoštų - šviesos sūkurių formavimui. Šviesos sūkurių pluoštai pastaruoju metu naudojami žiedo formos darinių indukavimui skaidrių dielektrinių terpių paviršiuje [44], nanometrinių matmenų adatų gamyboje [45], fotopolimerizacijoje [46]. O taip pat jie leido sukurti kokybiškus mikrometrinių matmenų vamzdelius fotopolimerizacijos technologijos būdu (3.2 skyrius).

[P4] publikacijoje aprašytas hologramų šviesos sūkurių generavimui užrašymas femtosekundiniais šviesos impulsais. 8 paveiksle pavaizduotos amplitudinių hologramų, su skirtingu topologiniu krūviu m , užrašytų ploname (~ 200 nm storio) chromo sluoksnyje lazeriniu plazminiu garinimo metodu, nuotraukos esant skirtingam topologiniam krūviui: a) $m = 1$, b) $m = 2$, c) $m = 3$, d) $m = 5$, e) $m = 10$, f) $m = 25$. Užrašytų hologramų periodas $\Lambda = 25 \mu\text{m}$. Hologramų trajektorijos apskaičiuotos remiantis lygtimi [47]:

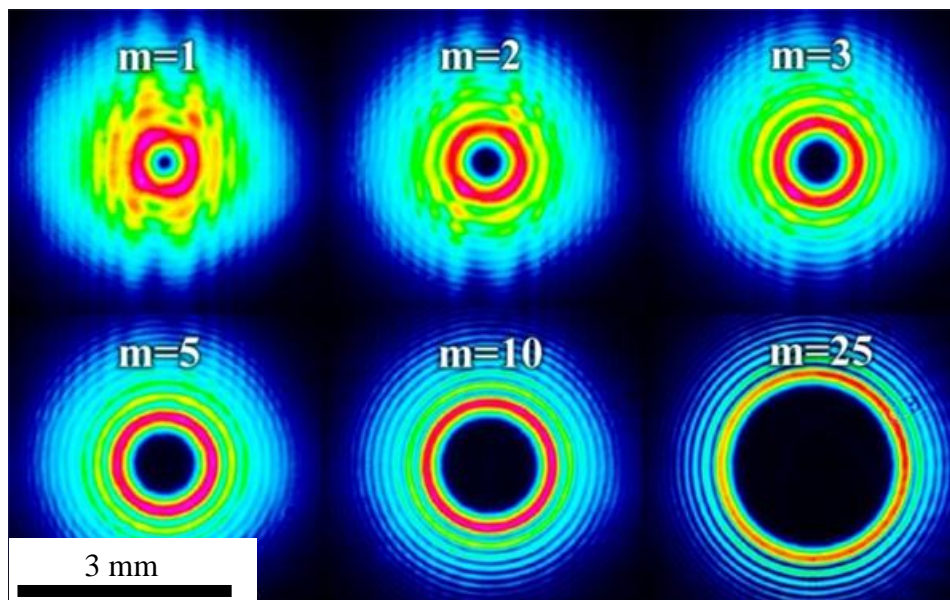
$$y(x) = x \tan\left(\frac{2\pi}{m}(n + Kx)\right); \quad (2)$$

čia m – hologramų topologinis krūvis, $K \equiv k_x/2\pi$ – gardelės linijų skaičius ilgio vienetui, $n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$.



8 pav. Amplitudinių hologramų, užrašytų ploname chromo sluoksnyje, nuotraukos esant skirtingam topologiniam krūviui m : a) $m = 1$, b) $m = 2$, c) $m = 3$, d) $m = 5$, e) $m = 10$, f) $m = 25$

Femtosekundinių (impulsų trukmė $\tau = 300$ fs, bangos ilgis $\lambda = 1030$ nm) šviesos sūkurių (esant skirtingam topologiniam krūviui m) pluoštų intensyvumo skirstiniai, užregistruoti WinCamD kamera (gamintojas *DataRay Inc.*) pateikti 9 paveiksle. Atstumas nuo kameros iki hologramos $l = 180$ mm.

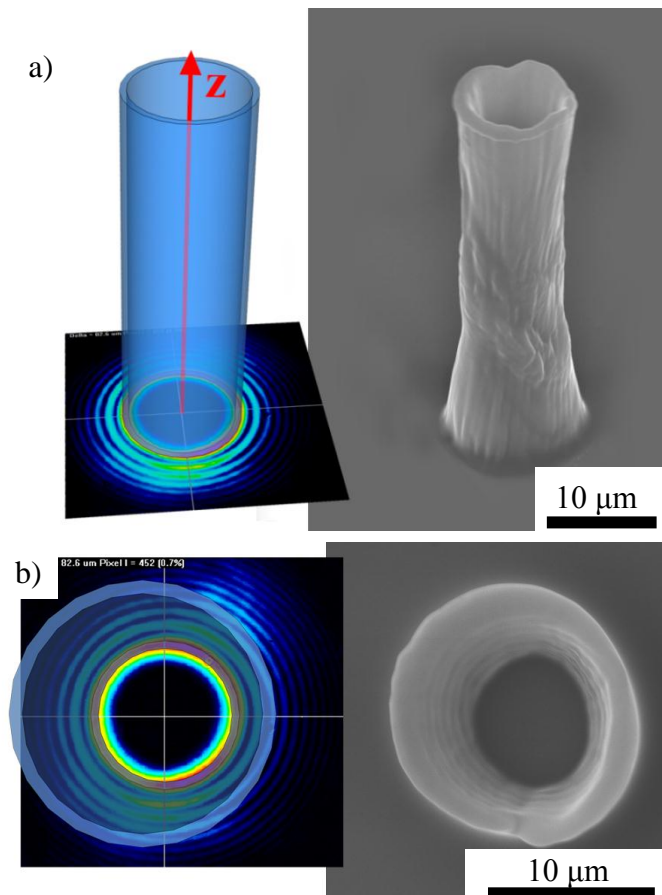


9 pav. Femtosekundinių šviesos sūkurių pluoštų intensyvumo skirstiniai, pamatuoti WinCamD kamera (*DataRay Inc.*)

Sugeneruoti femtosekundiniai šviesos sūkurių pluoštai (skirtingo topologinio krūvio) panaudoti atliekant skaidriųjų terpių paviršių ir tūrių mikroapdirbimo tyrimus. Taip pat buvo pademonstruotas žiedo formos darinių formavimas skaidriųjų dielektrinių terpių paviršiuje ir skaidriųjų terpių tūrio modifikavimas. Šviesos sūkurių pluoštas panaudotas ir mikrometrinių vamzdelių formavimui (žr. 3.2 skyrių).

3.2. Mikrometrinių matmenų vamzdelių formavimas naudojant femtosekundinius šviesos sūkurių pluoštus

Naudojant šviesos sūkurių pluoštus pademonstruotas mikrometrinių matmenų vamzdelių formavimas taikant daugiafotonę fotopolimerizaciją [P6]. Mikrometrinių matmenų vamzdelio, užrašyto naudojant femtosekundinį šviesos sūkurių pluoštą (žr. 9 pav., $m = 10$) nuotraukos, darytos elektroniniu mikroskopu, pavaizduotos 10 paveikslo dešinėje: a) paverstas 45° , b) vaizdas iš viršaus. Paveikslo kairėje parodytas vamzdelių gamybos modeliavimas. Spinduliuotės parametrai vamzdelių užrašymo metu buvo tokie: bangos ilgis $\lambda = 515$ nm, impulsų energija $E_p = 0,03$ μ J, impulsų tankis $P_D = 200000$ pulses/mm.



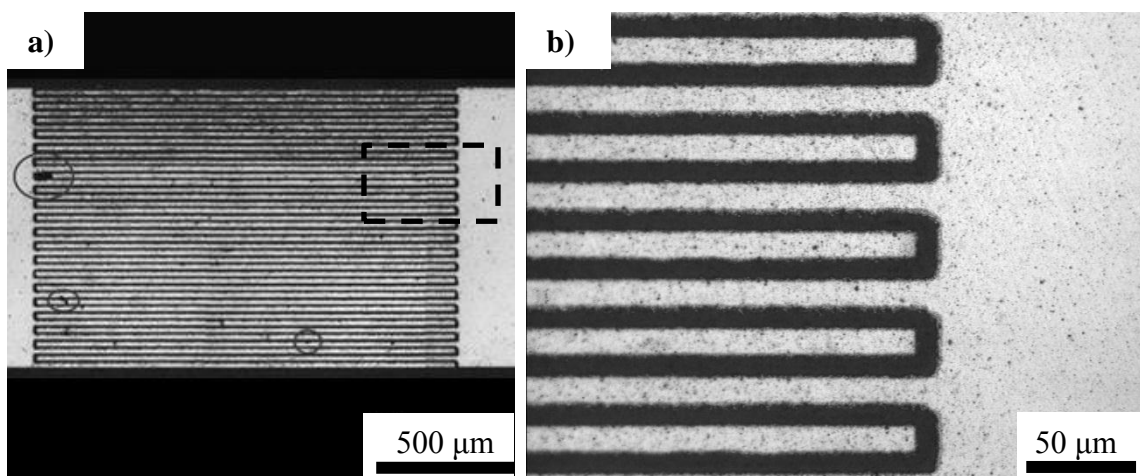
10 pav. Mikrometrinio vamzdelio, užrašyto panaudojant šviesos sūkurių pluoštą, elektroniniu mikroskopu darytos nuotraukos (dešinėje): a) paverstas 45°, b) vaizdas iš viršaus. Kairėje pavaizduotas vamzdelių gamybos modeliavimas. Spinduliuotės parametrai vamzdelių užrašymo metu: $\lambda = 515 \text{ nm}$, $E_p = 0,03 \mu\text{J}$, $P_D = 200000 \text{ pulses/mm}$

Mikrometrinių matmenų vamzdelių gaminimo panaudojant šviesos sūkurių pluoštą metodas buvo palygintas su tiesioginio rašymo ir holografiniu metodais. Šviesos sūkurių metodas užtikrina gera kokybės ir užrašymo greičio santykį. Šviesos sūkurių metodu 60 μm diametro, 3 μm vidinio radiuso vamzdelių formavimo trukmė 150 kartų mažesnė nei tiesioginio rašymo metodu ir 1,25 karto mažesnė nei holografiniu metodu.

3.3. Paviršinių akustinių bangų keitiklių užrašymas

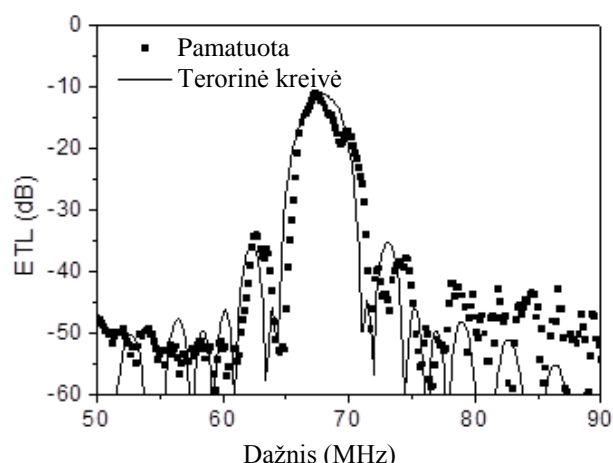
Naudojant selektyvaus lazerinio plazminio garinimo techniką sukurti unikalūs paviršinių akustinių bangų keitikliai [P2]. Paviršinių akustinių bangų (PAB) keitiklio, užrašyto selektyviai garinant ploną ($\sim 300 \text{ nm}$ storio) aliuminio sluoksnį nuo ličio niobato (LiNbO_3) kristalo paviršiaus, nuotraukos pateiktos 11 paveiksle. Nuotraukos

darytos optiniu mikroskopu esant apšvietimui iš viršaus ir skirtingiems didinimams. Nuotraukoje b) matomos lazerinio plazminio garinimo metu ant paviršiaus nusėdusios dalelės keitiklio sistemos charakteristikom įtakos neturi.



11 pav. PAB keitiklio, užrašyto selektyviai garinant ploną aliuminio sluoksnį nuo ličio niobato (LiNbO_3) kristalo paviršiaus, nuotraukos (a, b), esant skirtingam didinimui

Paviršinių akustinių bangų keitiklių sistemos dažninė perdavimo teorinė ir pamatuota charakteristikos pavaizduotos 12 paveiksle. Perdavimo charakteristika pamatuota naudojant radio dažnio tinklo analizatorių E5062A (gamintojas *Agilent Technologies*). Centrinis PAB keitiklių sistemos dažnis $f = 68 \text{ MHz}$.

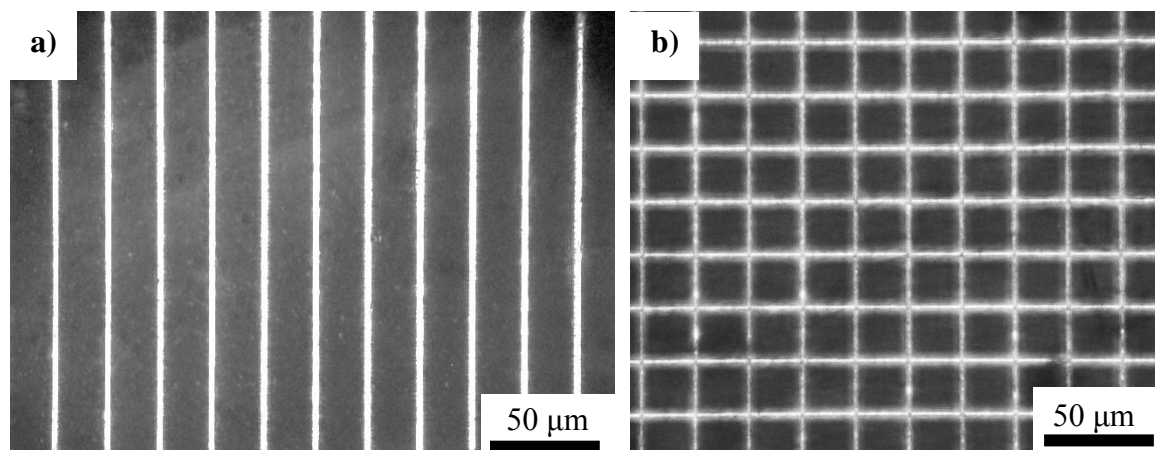


12 pav. PAB keitiklių sistemos dažninė perdavimo charakteristika

3.4. Paviršinių akustinių bangų fononinių kristalų užrašymas

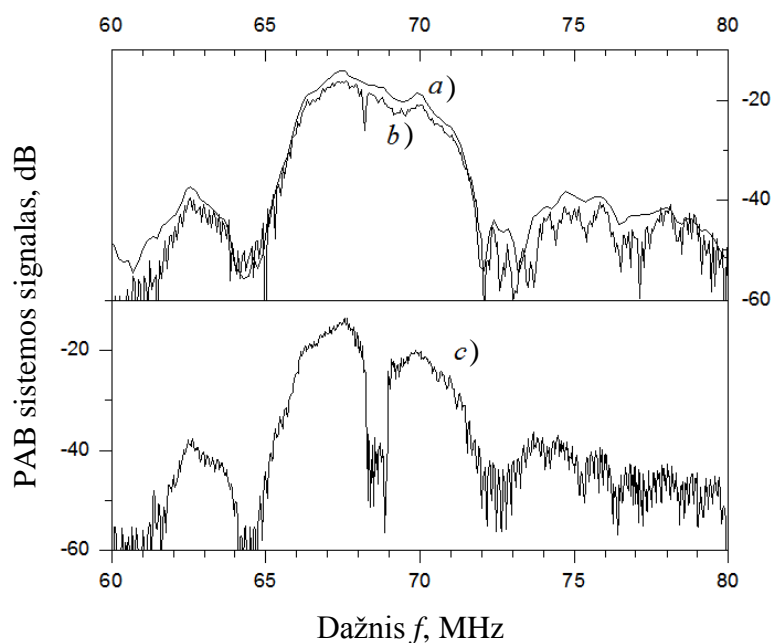
Viena iš bangų sklaidimo valdymo problemų yra medžiagos kuria jos sklinda dispersijos valdymas. Optiniame diapazone šią problemą leido išspręsti fotoninių

šviesolaidžių sukūrimas. Akustiniame diapazone ši problema dar nebuvo gvildenama, todėl naudojant selektyvų lazerinį plazminį garinimą buvo sukurti akustinių bangų fononiniai kristalai [P5]. 13 paveiksle pavaizduotos fononinių kristalų nuotraukos: a) vienmačio, b) dvimačio. Fononiniai kristalai buvo užrašyti selektyviai garinant ploną (~300 nm storio) aliuminio sluoksnį nuo LiNbO₃ paviršiaus.



13 pav. Fononinių kristalų (a) vienmačio, b) dvimačio), užrašytų selektyviai garinant ploną (~300 nm storio) aliuminio sluoksnį nuo LiNbO₃ paviršiaus, nuotraukos, darytos su optiniu mikroskopu esant apšvietimui iš apačios

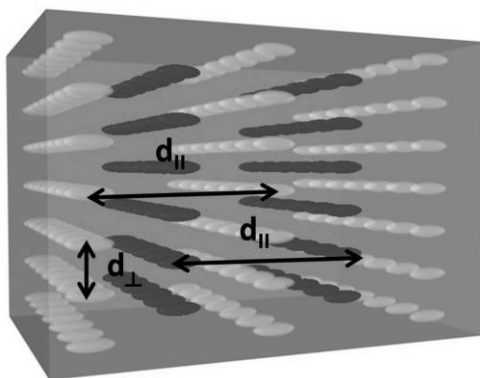
14 paveiksle pateiktos pamatuotos perdavimo tarp PAB keitiklių dažninės charakteristikos: a) be fononinio kristalo, b) su vienmačiu kristalu c) su dvimačiu kristalu. Kaip iš 14paveikslo matyti, dvimatis darinys daug efektyviau (25 dB ties $f = 68,6$ MHz dažniui) filtruoja PAB keitiklių sistemos perdavimo charakteristiką.



14 pav. Perdavimo tarp PAB keitiklių dažninės priklausomybės: a) be fononinio kristalo, b) su vienmačiu kristalu, c) su dvimačiu kristalu

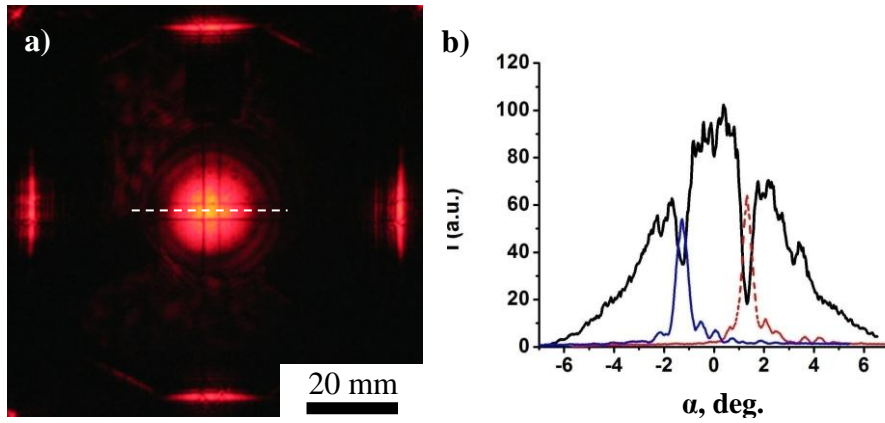
3.5. Fotoninių kristalų, skirtų pluošto filtravimui, užrašymas

Viena iš problemų kuriant lazerines sistemas yra erdvinės spinduliuotės sandaros formavimas. Šiam tikslui dažniausiai naudojami erdviniai filtrai kuriuose atliekama optinė Furje transformacija [48]. Kitas alternatyvus optinės filtracijos būdas - sukurti fotoninius kristalus įgalinančius atlikti tą pačią funkciją. Šiam tikslui pasiekti buvo panaudotas femtosekundinių šviesos impulsų indukuoti lūžio rodiklio pokyčiai kvarcinio stiklo tūryje. Ši technologija leido sukurti trimačius fotoninius kristalus erdviniam pluoštų filtravimui pademonstruoti [P1]. 15 paveiksle pavaizduotas trimačio fotoninio kristalo modelis: išilginis periodas $d_{\perp} = 1,5 \mu\text{m}$, skersinis periodas $d_{\parallel} = 10,6 \mu\text{m}$. Fotoninis kristalas formuojamas stiklo tūryje tiesioginio lazerinio rašymo būdu. Fotoninio kristalo elementai formuojami pavieniais $\tau = 300 \text{ fs}$ impulsų trukmės, $\lambda = 1030 \text{ nm}$ bangos ilgio impulsais. Kristalas formuojams naudojant 2.5D skenavimo principa.



15 pav. Trimačio fotoninio kristalo modelis: išilginis periodas $d_{\perp} = 1,5 \mu\text{m}$, skersinis periodas $d_{\parallel} = 10,6 \mu\text{m}$

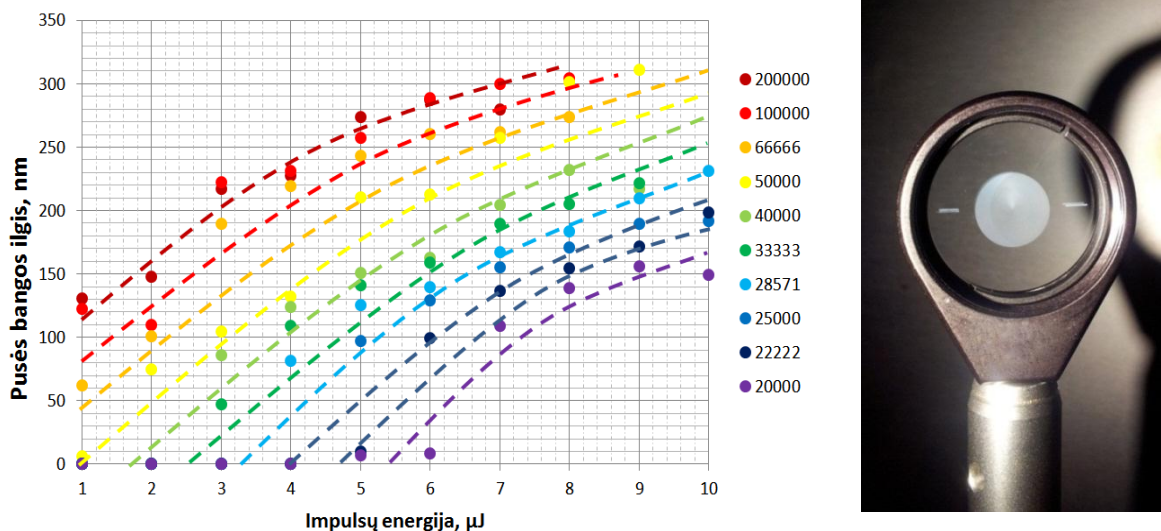
Helio neono lazerio pluošto intensyvumo skirstinys ir jo skerspjūvis už fotoninio kristalo pavaizduoti 16 paveiksle. Raudona ir mėlyna linijos (16 pav., b) atitinka pirmojo išfiltruoto difrakcinių maksimumų intensyvumų skirstinius. Tik 5 % pluošto buvo išfiltruota naudojant suformuotą fotoninį kristalą.



16 pav. Helio neono lazerio pluošto intensyvumo skirstinys: a) už fotoninio kristalo b) jo skerspjūvis. Raudona ir mėlyna linijos (b) atitinka pirmojo išfiltruoto difrakcinio maksimumo intensyvumo skirstinius

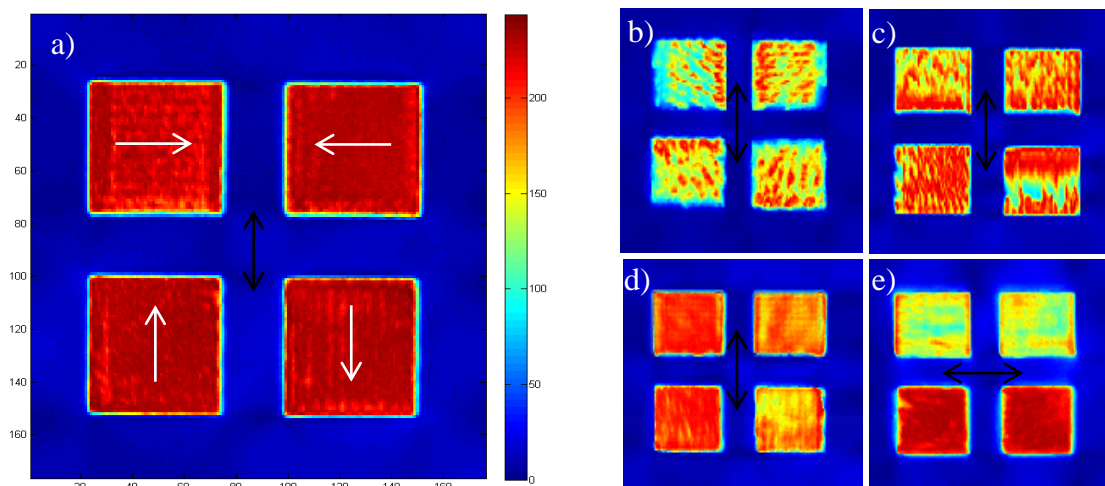
3.6. Radialinės ir azimutinės poliarizacijų keitiklio užrašymas

Cilindrinės poliarizacijos pluoštai atranda vis daugiau taikymų [49, 50, 51, 52]. Tačiau egzistuojantys keitikliai yra segmentuoti [P3]. Bendradarbiaujant su Sautamptono universiteto prof. P. Kazanskio grupe, naudojant femtosekundinius šviesos impulsus buvo sukurti radialinės ir azimutinės poliarizacijų tolygios struktūros keitiklio užrašymas kvarcinio stiklo tūryje [53]. Pusės bangos ilgio ($\lambda/2$) spinduliuotės, kuriai prasklidus indukuotus dvejetainiu lūžimu pasižyminčius darinius, poliarizacijos vektorius pasukamas 90° , priklausomybė nuo krintančių impulsų tankio ir energijos pateikta 17 paveiksle.



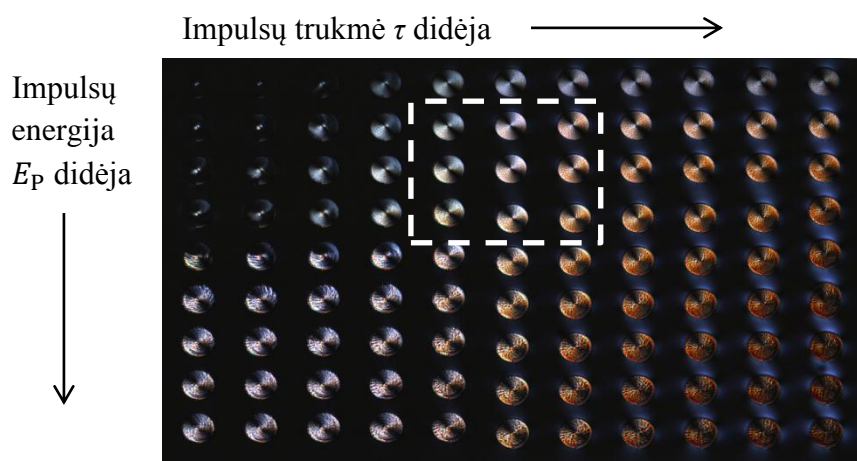
17 pav. Pusės bangos ilgio ($\lambda/2$) spinduliuotės, kuriai prasklidus indukuotus dvejetainiu lūžimu pasižyminčius darinius, poliarizacijos vektorius pasukamas 90° , priklausomybė nuo krintančių impulsų tankio ir energijos. Užrašymo parametrai: šviesos impulsų trukmė $\tau = 300$ fs, pasikartojimo dažnis $f = 200$ kHz, fokusuojančio lęšio židinio nuotolis $f = 18$ mm. Dešinėje pavaizduotas užrašytas poliarizacijos keitiklis

Kvarcinio stiklo tūryje indukuoti dvejetainiu lūžimu pasižymintys tiesiniai dariniai pavaizduoti 18 paveiksle. Darinių užrašymo parametrai: a) $3 \mu\text{J}$, 100000 pulses/mm, b) $6 \mu\text{J}$, 100000 pulses/mm, c) $3 \mu\text{J}$, 66666 pulses/mm, d) $6 \mu\text{J}$, 66666 p/mm, e) $6 \mu\text{J}$, 66666 pulses/mm (polarizacija pasukta 90°). Kaip matyti, darinių formavimas priklauso ne tik nuo impulsų energijos, bet ir nuo polarizacijos bei rašymo krypties.



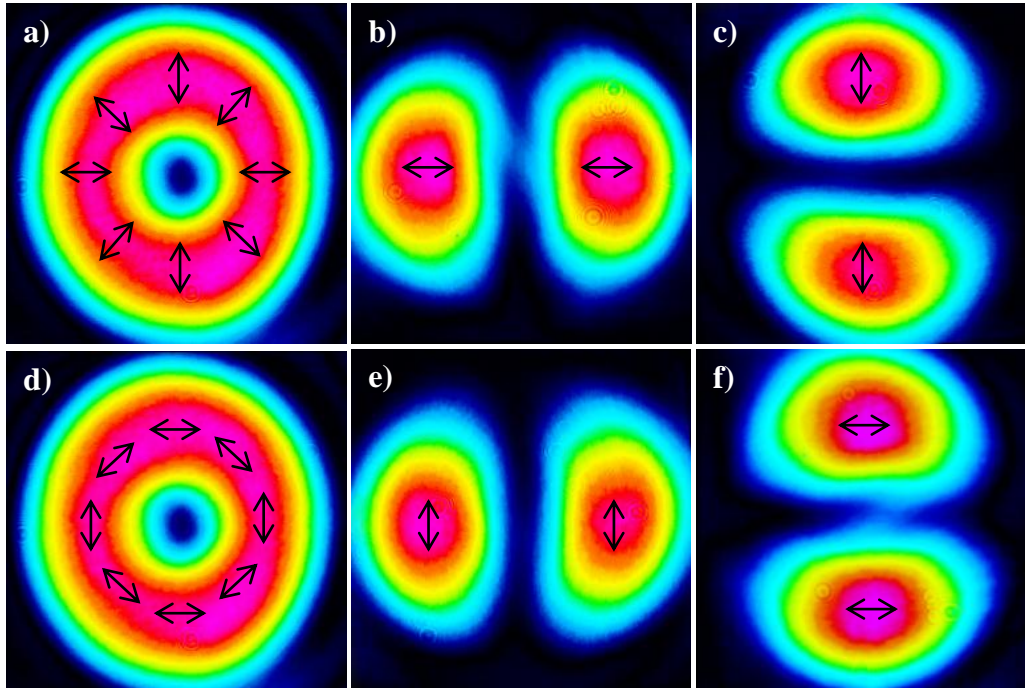
18 pav. Kvarcinio stiklo tūryje indukuoti dvejetainiu lūžimu pasižymintys tiesiniai dariniai: a) $3 \mu\text{J}$, 100000 pulses/mm, b) $6 \mu\text{J}$, 100000 pulses/mm, c) $3 \mu\text{J}$, 66666 pulses/mm, d) $6 \mu\text{J}$, 66666 p/mm, e) $6 \mu\text{J}$, 66666 pulses/mm (polarizacija pasukta 90°). Baltos rodyklės nurodo užrašymo kryptį, juodos – polarizacijos orientaciją. Užrašytų darinių dydis $d = 200 \mu\text{m}$, impulsų trukmė $\tau = 300 \text{ fs}$, pasikartojimo dažnis $f = 200 \text{ kHz}$

19 paveiksle pavaizduotas $d = 100 \mu\text{m}$ polarizacijos keitiklių masyvas, užrašytas esant skirtingoms impulsų trukmėms ir energijai. Tolygiausios struktūros dariniai indukuojami, kai impulsų trukmė $\tau \approx 700 \text{ fs}$, o impulsų energija $E_p = 1 \mu\text{J}$.



19 pav. $d = 100 \mu\text{m}$ polarizacijos keitiklių masyvas užrašytas esant skirtingoms impulsų trukmėms ir energijai. Impulsų trukmė kinta nuo $\tau = 350 \text{ fs}$ iki $\tau = 1000 \text{ fs}$, kas 70 fs . Impulsų energija kinta nuo $E_p = 0,35 \mu\text{J}$ iki $E_p = 3,15 \mu\text{J}$, kas 350 nJ . Impulsų tankis $P_D = 100000 \text{ pulses/mm}$, impulsų dažnis $f = 200 \text{ kHz}$. Punktyrine linija išskirti keitikliai, kurių tolygumas didžiausias

Radialinės (a, b, c) ir azimutinės (d, e, f) poliarizacijų pluoštų ($\lambda = 1030 \text{ nm}$) intensyvumo skirstiniai, gauti su užrašytu keitikliu pateikti 20 paveiksle. Skirstiniai pamatuoti WinCamD kamera (gamintojas *DataRay Inc.*): b) ir e) matuota papildomai įstačius tiesinį poliarizatorių, o c) ir f) pasukus įstatytą poliarizatorių 90° . Juodos rodyklės nurodo elektromagnetinio lauko orientaciją pluoštuose.



20 pav. Radialinės (a, b, c) ir azimutinės (d, e, f) poliarizacijų pluoštų intensyvumo skirstiniai, pamatuoti WinCamD kamera: b) ir e) matuota papildomai įstačius tiesinį poliarizatorių, c) ir f) pasukus įstatytą poliarizatorių 90° . Juodos rodyklės nurodo elektromagnetinio lauko orientaciją pluoštuose

Išvados

- Sukurta unikali femtoLAB medžiagų apdirbimo femtosekundiniais šviesos impulsais sistema, kurioje yra integruotas Yb:KGV femtosekundinis lazeris, antros, trečios ir ketvirtos harmonikų generatorius, keturi motorizuoti atenuatoriai, keturi motorizuoti poliarizacijos sukikai, galvanometriniai skeneriai, galios matuoklis, erdvinis šviesos moduliatorius, mašininė rega, autofokusavimo ir tiksli XYZ bandinių pozicionavimo sistemos.
- Naudojant $\tau = 300$ fs trukmės, $\lambda = 1030$ nm bangos ilgio šviesos impulsus, sukurtos binarinės hologramos, skirtos šviesos sūkurių pluoštų (su skirtingu topologiniu krūviu: $m = 1, m = 2, m = 3, m = 5, m = 10, m = 25$) generavimui. Hologramos formuojamos selektyviai garinant ploną (~ 200 nm) chromo sluoksnį nuo kvarcinio stiklo paviršiaus. Suformuotų hologramų difrakcijos efektyvumas į pirmos eilės maksimumą $\eta = 4,63$ %.
- Naudojant $\tau = 300$ fs trukmės, $\lambda = 1030$ nm bangos ilgio šviesos impulsus, sukurtas paviršinių akustinių bangų keitiklių formavimas selektyviai garinant ploną (~ 300 nm) aliuminio sluoksnį nuo LiNbO₃ kristalo paviršiaus. Užrašyto paviršinių akustinių bangų keitiklio centrinis dažnis $f = 68$ MHz, akustinės bangos ilgis $\lambda = 50$ μ m.
- Naudojant $\tau = 300$ fs trukmės, $\lambda = 515$ nm bangos ilgio šviesos impulsus, sukurtas paviršinių akustinių bangų vienmačių ir dvimačių fononinių filtrų formavimas selektyviai garinant ploną (~ 300 nm) aliuminio sluoksnį nuo LiNbO₃ kristalo paviršiaus. Dvimatis filtras įneša 25 db slopinimą esant $f = 68,6$ MHz.
- Naudojant $\tau = 300$ fs trukmės, $\lambda = 1030$ nm bangos ilgio šviesos impulsus, buvo suformuoti trimačiai fotoniniai kristalai (skersinis periodas $d_{\perp} = 1,5$ μ m, išilginis periodas $d_{\parallel} = 10,6$ μ m), skirti erdviniam pluošto filtravimui pademonstruoti. Suformuoto erdvinio filtro efektyvumas $\eta = 5$ %.
- Naudojant $\tau = 700$ fs trukmės, $\lambda = 1030$ nm bangos ilgio šviesos impulsus, sukurtas poliarizacijos keitiklis, skirtas konvertuoti $\lambda = 515$ nm bangos ilgio tiesinę poliarizaciją į radialinę poliarizaciją. Keitiklis formuojamas kvarcinio stiklo tūryje indukuojant dvejomis šviesos lūžimu pasižyminčias savitvarkes nanometrinių matmenų gardeles. Suformuoto keitiklio efektyvumas $\eta = 50$ %.
- Naudojant $\tau = 300$ fs trukmės, $\lambda = 515$ nm bangos ilgio šviesos sūkurių ($m = 10$) pluoštą, pademonstruotas $d = 10$ μ m diametro, $h = 60$ μ m aukščio tuščiavidurių vamzdelių formavimas SZ2080 fotopolimere daugiafotonės fotopolimerizacijos būdu.

Summary

This dissertation is focused on femtosecond laser material processing. It consists of three chapters. Chapter I deal with physics of femtosecond laser pulses interaction with various materials, main machining parameters and different fabrication techniques. Chapter II describes femtoLAB femtosecond laser material processing system and its key components. Chapter III defines femtosecond laser micromachining applications: 3.1. fabricating computer generated holograms for optical vortex generation, 3.2. fabricating micro-tubes using femtosecond optical vortex beam, 3.3. fabricating surface acoustic wave transducers, 3.4. fabricating surface-acoustic-wave phononic crystal device, 3.5. fabricating photonic crystals for spatial light filtering, 3.6. fabricating radial/azimuth polarization converter.

Literatūros sąrašas

1. T. H. Maiman, “Stimulated Optical Radiation in Ruby”, *Nature* 187, pp. 493–494 (1960).
2. N. H. Rizvi, “Femtosecond laser micromachining: Current status and applications”, *RIKEN REVIEW*, ISSU **50**, 107–112 (2003).
3. R. R. Gattass, E. Mazur, “Femtosecond laser micromachining in transparent materials”, *Nature Photonics* **2**, 219–225 (2008).
4. D. Du, X. Liu, G. Korn, J. Squier, G. Mourou, “Laser-induced breakdown by impact ionization in SiO₂ with pulse widths from 7 ns to 150 fs”, *Appl. Phys. Lett.* **64**, 3071–3073 (1994).
5. A. P. Joglekar et al. “A study of the deterministic character of optical damage by femtosecond laser pulses and applications to nanomachining”, *Appl. Phys. B* **77**, 25–30 (2003).
6. B. C. Stuart, M.D. Feit, A. M. Rubenchik, B. W. Shore, and M. D. Perry, “Laser-induced damage in dielectrics with nanosecond to subpicosecond pulses,” *Phys. Rev. Lett.* **74**, 2248 (1995).
7. F. X. Kartner, U. Morgner, R. Ell, E. P. Ippen, J. G. Fujimoto, V. Scheuer, G. Angelow, T. Tschudi, “Few-cycle-pulse generation and its applications”, *The 4th Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics*. **1**, I-606-I-607 (2001).
8. S. Backus, C. G. Durfee, M. M. Murnane, H. C. Kapteyn, “High power ultrafast lasers”, *Rev. Sci. Instrum.* **69**, 1207 (1998).
9. D. N. Wang, “Micro-engineered Optical Fiber Sensors Fabricated by Femtosecond Laser Micromachining”, in *Optical Sensors*, OSA Technical Digest, Optical Society of America, Paper STu4F.1 (2012).
10. J. E. Carey III, “Femtosecond-laser Microstructuring of Silicon for Novel Optoelectronic Devices”, Thesis Applied Physics, Harvard University, Cambridge, Massachusetts (2004).
11. M. Stubenrauch, M. Fischer, C. Kremin, S. Stobenau, A. Albrecht and O. Nagel, “Black silicon—new functionalities in microsystems”, *J. Micromech. Microeng.* **16**, S82–S87 (2006).
12. R. Buividas, L. Rosa, S. Juodkakis, “Gold coated ripple-patterned SiC substrates for SERS”, *Engineering* **96** (5), 57404 (2006).
13. K. Lieberman, Y. Shani, I. Melnik, S. Yoffe, Y. Sharon, “Near-field optical photomask repair with a femtosecond laser”, *J. Microsc.* **194**, 537–541 (1999).
14. K. Venkatakrisnan, P. Stanley and L. E. N. Lim, “Femtosecond laser ablation of thin films for the fabrication of binary photomasks”, *J. Micromech. Microeng.* **12**, 775, (2002).
15. H. W. Choi, D. F. Farson, J. Bovatsek, A. Arai, and D. Ashkenasi, “Direct-write patterning of indium-tin-oxide film by high pulse repetition frequency femtosecond laser ablation”, *Appl. Opt.*, **46** (23), 5792–5799 (2007).
16. Ming Xia, Yiliu Tu, "An Investigation of Femtosecond Laser Micromachining", MEMS, NANO and Smart Systems, ICMENS'05 proceedings, 296–300 (2005).
17. H. Y. Zheng, A. R. Zareena and H. Huang, “Femtosecond Laser Processing of Nitinol”, STR/03/028/MT (2004).
18. K. M. Davis, K. Miura, N. Sugimoto, K. Hirao, “Writing waveguides in glass with a femtosecond laser”, *Opt. Lett.* **21**, 1729–1731 (1996).
19. Ph. Bado, A. A. Said, M. Dugan, T. S. Sosnowski, S. Wright, “Dramatic improvements in waveguide manufacturing with femtosecond lasers”, *Technical Proceedings, NFOEC*, 1153–1158 (2002).
20. I. Sohn, M. Lee, J. Woo, S. Lee, and J. Chung, “Fabrication of photonic devices directly written within glass using a femtosecond laser,” *Opt. Express* **13**, 4224–4229 (2005).
21. I. Sohn, M. Lee, J. Chung, “Fabrication of optical splitter and passive alignment technique with a femtosecond laser,” *Photonics Technology Letters, IEEE* **17** (11), 2349–2351 (2005).

-
22. A. M. Streltsov, N. F. Borrelli, "Fabrication and analysis of a directional coupler written in glass by nanojoule femtosecond laser pulses", *Opt. Lett.* **26**, 42–43 (2001).
 23. C. Zhan, J. Lee, S. Yin, P. Ruffin, J. Grant, "Photoenhanced polarization mode separated fiber Bragg gratings inscribed by femtosecond laser", *Journal of Appl. Phys.* **101** (5), 053110–053110-7 (2007).
 24. A. Stefani, M. Stecher, G. E. Town, O. Bang, "Direct Writing of Fiber Bragg Grating in Microstructured Polymer Optical Fiber," *Photonics Technology Letters, IEEE* **24** (13), 1148–1150 (2012).
 25. Y. Sikorski et al., "Optical waveguide amplifier in Nd-doped glass written with near-IR femtosecond laser pulses" *Electron. Lett.* **36**, 226–227 (2000).
 26. G. Cohoon, R. Norwood, K. Tada, K. Kieu, and M. Mansuripur, "Fabrication of High-Q Microresonators using Femtosecond Laser Micromachining," in *CLEO: Science and Innovations*, Optical Society of America, Paper CM1M.6 (2012).
 27. M. Gecevičius, M. Beresna and P. G. Kazansky "5-dimensional optical recording with ultrashort light pulses", 54th Scientific Conference for Young Students of Physics and Natural Sciences, Open Readings 2011, Vilnius, Lithuania (2011).
 28. M. Ventura, M. Straub and M. Gu. "Void-channel microstructures in resin solids as an efficient way to photonic crystals", *App. Phys. Lett.* **82**, 1649–1651 (2003).
 29. A. D. Goater, J. P. H. Burt, D. J. Morris, A. Menachery, N. H. Rizvi, D. R. Matthews, H. D. Summers, "Laser micromachining of optical biochips", *Proc. SPIE* **6459**, 645909 (2007).
 30. R. Daw and J. Finkelstein, "Introduction lab on a chip", *Nature* **442**, 367 (2006).
 31. H.B. Sun and S. Kawata, "Two-photon laser precision microfabrication and its applications to micro-nano devices and systems," *J. Lightwave Technol.* **21**(3), 624–633 (2003).
 32. M. Malinauskas, A. Zukauskas, K. Belazaras, K. Tikuisis, V. Purlys, R. Gadonas and A. Piskarskas, "Laser fabrication of various polymer micro-optical components", *The Eur. Phys. J., Appl. phys.* **58**, 20501 (2011).
 33. Y. Bellouard, A. Said, M. Dugan, P. Bado, "Fabrication of high-aspect ratio, micro-fluidic channels and tunnels using femtosecond laser pulses and chemical etching", *Opt. Express* **12**, 2120–2129 (2004).
 34. Y. Kondo, J. Qiu, T. Mitsuyu, K. Hirao, T. Yoko, "Three-dimensional microdrilling of glass by multiphoton process and chemical etching", *Jpn J. Appl. Phys.* **38**, L1146–L1148 (1999).
 35. M. Vengris, E. Gabryte, A. Aleknavicius, M. Barkauskas, O. Ruksenas, A. Vaiceliunaite, R. Danielius, "Corneal shaping and ablation of transparent media by femtosecond pulses in deep ultraviolet range", *J of cataract and refractive surgery* **36** (9), 1579–1587 (2010).
 36. R. Osellame, "Biophotonic chips fabricated by femtosecond laser micromachining," *IEEE Photonics Society, 2010 23rd Annual Meeting*, 536–537 (2010).
 37. S. Siewert, C. Schultze, W. Schmidt, U. Hinze, B. Chichkov, A. Wree, K. Sternberg, R. Allemann, R. Guthoff and K. P. Schmitz, "Development of a micro-mechanical valve in a novel glaucoma implant", *Biomedical Microdevices*, 1–14 (2012).
 38. J. C. Maxwell, "A dynamical theory of the electromagnetic field", *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* **155**, 459–512 (1865).
 39. L.V. Keldysh, "Ionization in the field of a strong electromagnetic wave", *Soviet Physics JETP* **20**, 1307 (1965).
 40. K. Venkatakrisnan, P. Stanley and L. E. N. Lim, "Femtosecond laser ablation of thin films for the fabrication of binary photomasks", *J. Micromech. Microeng.* **12**, 775 (2002).
 41. V. R. Bhardwaj, E. Simova, P. B. Corkum, D. M. Rayner, C. Hnatovsky, R. S. Taylor, B. Schreder, M. Kluge, J. Zimmer, "Femtosecond laser-induced refractive index modification in multicomponent glasses", *J of Appl. Phys.* **97** (8), 083102–083109 (2005).
 42. Y. Shimotsuma, P. G. Kazansky, J. Qiu, K. Hirao, "Self-Organized Nanogratings in Glass Irradiated by Ultrashort Light Pulses", *Phys. Rev. Lett.* **91**, 247405 (2003).

43. S. Juodkazis, K. Nishimura, S. Tanaka, H. Misawa, E. G. Gamaly, B. Luther-Davies, L. Hallo, P. Nicolai and V. T. Tikhonchuk, "Laser-Induced Microexplosion Confined in the Bulk of a Sapphire Crystal: Evidence of Multimegabar Pressures", *Phys. Rev. Lett.* **96**, 166101 (2006).
44. C. Hnatovsky, V. G. Shvedov, W. Krolikowski, and A. V. Rode, "Materials processing with a tightly focused femtosecond laser vortex pulse," *Opt. Lett.* **35**, 3417-3419 (2010).
45. K. Toyoda, K. Miyamoto, N. Aoki, R. Morita, T. Omatsu, "Using optical vortex to control the chirality of twisted metal nanostructures", *Nano Lett.* **12** (7), 3645-9 (2012).
46. C. F. Phelan, R. J. Winfield, D.P. O'Dwyer, Y.P. Rakovich, J.F. Donegan, J.G. Lunney, "Two-photon polymerisation of novel shapes using a conically diffracted femtosecond laser beam", *Opt. Comm.* **284** (14), 3571-3574 (2011).
47. J. Strohaber, T. D. Scarborough, and C. J. Uiterwaal, "Ultrashort intense-field optical vortices produced with laser-etched mirrors", *Appl. Opt.* **46** (36), 20 (2007).
48. E. O'Neill, "Spatial filtering in optics," *Information Theory, IRE Transactions* **2** (2), 56–65, (1956).
49. D. P. Biss, K. S. Youngworth, T. G. Brown, "Dark-field imaging with cylindrical-vector beams," *Appl. Opt.* **45**(3), 470–479 (2006).
50. Y. Liu, D. Cline, and P. He, "Vacuum laser acceleration using a radially polarized CO2 laser beam," *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A* **424**, 296–303 (1999).
51. A. Hartschuh, "Tip-Enhanced Near-Field Optical Microscopy", *Angew. Chem. Int. Ed.*, **47**, 8178–8191, (2008).
52. Q. Zhan, "Cylindrical vector beams: from mathematical concepts to applications," *Adv. Opt. Photon.* **1**, 1–57 (2009).
53. M. Beresna, M. Gecevičius, P.G. Kazansky, T. Gertus, "Radially polarized optical vortex converter created by femtosecond laser nanostructuring of glass", *Appl. Phys. Lett.* **98**, 201101 (2011).

Curriculum Vitae



Personal information

First name(s) / Surname(s)	Titas Gertus
Address(es)	Ladygos 1- 96, Vilnius, LT-08235, Lithuania
Mobile	+37068443733
E-mail	titas.gertus@gmail.com
Nationality	Lithuanian

Date of birth	1983.05.31
Gender	male
Desired employment / Occupational field	Project management
Work experience	
Dates	From 2011 10 till now
Occupation or position held	Project manager
Main activities and responsibilities	Laser system development Project management
Name and address of employer	Altechna R&D, Konstitucijos 23c, Vilnius, Lithuania www.altechna.com
Type of business or sector	Laser technologies
Dates	from 2010 12 till now
Occupation or position held	Project manager
Main activities and responsibilities	Laser system development Project management
Name and address of employer	Altechna Co.Ltd. , Konstitucijos 23c, Vilnius, Lithuania www.altechna.com
Type of business or sector	Laser technologies
Dates	from 2006 03 to 2010 12
Occupation or position held	Physicist-manager
Main activities and responsibilities	Femtosecond micromachining research, Feasibility studies
Name and address of employer	Altechna Co.Ltd., Konstitucijos 23c, Vilnius, Lithuania www.altechna.com
Type of business or sector	Laser technologies
Education and training	
Dates	From 2008 till 2012
Title of qualification awarded	Physics doctor
Principal subjects/occupational skills covered	Laser technologies
Name and type of organisation providing education and training	Vilnius University, Physics faculty
Level in national or international classification	ISCED 6
Dates	from 2006 to 2008
Title of qualification awarded	Physics master
Principal subjects/occupational skills covered	Laser physics and optical technologies
Name and type of organisation providing education and training	Vilnius University, Physics faculty

Level in national or international classification	ISCED 5
Dates	from 2002 to 2006
Title of qualification awarded	Physics bachelor
Principal subjects/occupational skills covered	Modern technologies management
Name and type of organisation providing education and training	Vilnius University, Physics faculty
Level in national or international classification	ISCED 5
Personal skills and competences	
Mother tongue(s)	Lithuanian
Other language(s)	English C2* (* Common European Framework of Reference for Languages)
Social skills and competences	Tutor work Educational work at laboratory
Organisational skills and competences	Project management
Technical skills and competences	Laser micromachining systems development
Computer skills and competences	Proficient user
Artistic skills and competences	Photography, movie
Driving licence	B2 category (since 2001)