

Vilniaus universitetas
Fizikos fakultetas
Lazerinių tyrimų centras

Laboratorinis darbas Nr. MNFT-4

LŪŽIO RODIKLIO MODIFIKAVIMAS STIKLE VEIKIANT ULTRATRUMPAISIAIS
LAZERIO IMPULSAIS

Lazerinė fizika ir optinės technologijos ir Lazerinė technologija magistro programų studentams

Vilnius 2018

1 Darbo tikslai

Susipažinti su stiklo lūžio rodiklio modifikavimo (I ir II tipo modifikacijos), panaudojant femtosekundinį lazerį, technologija.

2 Namų darbas (Pasirinktinai)

Sugalvoti sau patinkantį fotoninį komponentą, aprašyti jo geometriją 3D Poly programiniu kodu ir teoriškai apskaičiuoti bent vieną šio fotoninio elemento parametą (kurį būtų galima patikrinti eksperimentiškai naudojant monochromatinės šviesos šaltinį, pvz. HeNe lazerį). Ši užduotis nėra privaloma (jos neatlikus - darbo metu formuosite tūrines fazines gardeles) tačiau tai paiki proga atlikti originalų darbą ir gauti papildomų balų.

3 Uždaviniai

1. Naudojant tiesioginio lazerinio rašymo sistemą, suformuoti tūrines fazines gardeles (arba Jūsų pasirinktus ir sumodeliuotus fotoninius elementus) kalcio-natrio silikatiniam stikle (soda-lime glass), varijuojant darinių geometrinius parametrus (gardelių atveju - periodą) ir eksponavimui naudojamo pluošto intensyvumą.
2. Naudojant optinį mikroskopą, vizualiai įvertinti kokio tipo (I, II ar mikroertmių) modifikacijos dominuoja suformuotuose dariniuose naudojant skirtingus eksponavimo parametrus.
3. Naudojant optinio charakterizavimo stendą, sudarytą iš HeNe lazerio, pluošto formavimo optinės grandinės ir ekrano (ar galios matuoklio) palyginti tūrinių fazinių gardelių difrakcijos efektyvumą (arba kitą Jūsų pasirinktą ir sumodeliuotą parametą). Išmatuoti atstumą tarp nulinės ir pirmos (jei įmanoma ir aukštesnių) eilių difrakcinių maksimumų. Apskaičiuoti tiriamųjų gardelių periodus, gautas vertes palyginti su nustatytais programiniame kode.

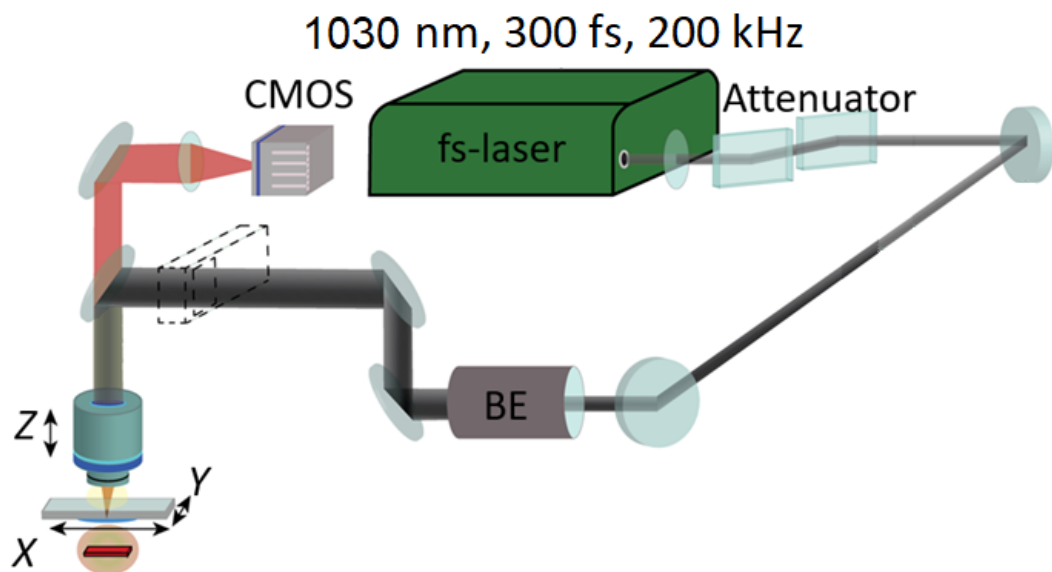
4 Kontroliniai klausimai

1. Skaidrių terpių modifikacijos ir pažeidimų skirtumai.
2. Modifikacijų skaidriose terpėse tipai ir jų savybės.
3. Tipiniai lazerio spinduliuotės parametrai naudojami skirtingų tipų modifikacijoms sukurti.
4. Praktinis modifikacijų skaidriose medžiagose panaudojimas.

5 Darbo priemonės ir įranga

Laboratorinio darbo metu bus naudojama tiesioginio lazerinio rašymo sistema su femtosekundiniu lazeriu "Pharos" (6 skyrius). Mikrodarinių charakterizavimui naudojamas optinis mikroskopas (Olympus BX51) bei optinio charakterizavimo stendas, sudarytas iš HeNe lazerio, pluošto formavimo ir nukreipimo optinės grandinės bei galios matuoklio. Dariniai formuojami kalcio-natrio silikato stikluose.

6 Tiesioginio lazerinio rašymo sistemos sandara



1 pav. Principinė TLR sistemos optinė schema. XYZ žymi bandinio transliavimo koordinačių ašis.

Mikrodarinių formavimui naudojamos tiesioginio lazerinio rašymo sistemos principinė optinė schema pateikiama 1 paveiksle. Pagrindinis TLR sistemos elementas yra femtosekundinis, sinchronizuotų modų režime veikiantis, diodais kaupinamas kieto kūno lazeris "Pharos" (Šviesos konversija, Lietuva). Šio lazerio aktyvusis elementas yra Yb:KGW kristalas, o centrinis fundamentinės spinduliuotės bangos ilgis $\lambda_f = 1030$ nm. Lazeris generuoja $\tau_{imp} < 300$ fs trukmės impulsus, kurių pasikartojimo dažnis gali būti reguliuojamas 1-200 kHz ribose.

Lazerio vidutinė galia, naudojama stiklų eksponavimui, nustatoma dviejų pakopų galios keitikliais. Pirmoji galios keitiklio pakopa, sudaryta iš rankiniu būdu sukamos $\lambda/2$ fazinės plokštelės ir Briusterio kampo poliarizatoriaus, naudojama apytiksliam į optinę sistemą patenkančio pluošto vidutinės galios nustatymui. Antroji galios keitiklio pakopa, sudaryta iš $\lambda/2$ fazinės plokštelės, patalpintos kompiuteriu valdomame rotatoriuje, ir Briusterio kampo poliari-

zatoriaus, skirta tiksliam vidutinės galios paderinimui lazerinio formavimo metu. Automatinis galios kalibravimas yra atliekamas į lazerio pluošto kelią patalpinant galios matuoklio sensorių. Pluošto fokusavimui tiriamojo polimero tūryje naudojamas objektyvas ($NA = 0,8, 20x$). Siekiant užtikrinti, kad pluoštas maksimaliai užpildytų fokusuojančio objektyvo apertūrą, pluošto kelyje sumontuotas 2x didinantis teleskopas. Po bandinio tvirtinimo vieta įrengtas diodinis šviesos šaltinis, o bendraašis apdirbimo proceso vaizdinimas atliekamas *CMOS* kamera.

Bandinio transliavimui atžvilgiu lazerio pluošto sąsmaukos *XY* plokštumoje naudojami submikrometrinio tikslumo pozicionavimo stalai ANT130-110 (Aerotech, JAV) su tiesinių variklių pavaramis. Transliavimas *Z* ašyje atliekamas pozicionuojant fokusuojantį objektyvą. Tam naudojamas ANT130-60 pozicionavimo stalas. Tokia pozicionavimo sistema užtikrina $+/- 75$ nm pozicijos atsikartojamumą kiekvienoje ašyje ir leidžia transliuoti bandinius maksimaliu 300 mm/s greičiu. Sistemos automatizavimui panaudotas programinės įrangos paketas "3DPoli" (Femtika, Lietuva).

7 Darbo eiga

Prieš pradėdami darbą, susipažinkite, kokie yra darbo saugos reikalavimai dirbant su lazerio spinduliuote. Šiame darbe naudojamas 4 pavojingumo klasės lazeris, kurio net išsklaidyta spinduliuotė, nesilaikant saugos reikalavimų, gali sukelti akių ir odos pažeidimus.

1. Lazerio įjungimas ir paruošimas darbui (reikalingas destytojo leidimas ir priežiūra).
2. Tūrinių mikrodarinių formavimas.
 - (a) Įjungiamą „wxPropView“ programą, kad būtų galima tiesiogiai stebėti darinių įrašymo procesą. Norint, kad programa taptų aktyvi, reikia spragtelėti mygtukus Use ir Live. Naudojimo patogumui šios programos langas atvaizduojamas pagalbiniame sistemos monitoriuje.
 - (b) Įjungiamos 3DPoli 6.17 Compiler ir 3DPoli 6.17 Fabrication programos. Pirmoji bus naudojama lazerinio formavimo algoritmų rašymui ir redagavimui, o antroji automatizuotai valdo tiesioginio lazerinio rašymo sistemą.
 - (c) Prieš pradėdant darinio formavimo procesą, reikia surasti lazerio spinduliuotę fokusuojančio objektyvo židinio padėtį bandinio atžvilgiu. Tai atliekama keičiant pozicionavimo sistemos padėtį „3DPoli Fabrication“ programa. Objektyvo padėtis yra keičiama nurodžius atstumą, per kiek norima pajudėti, ir spragtelėjus atitinkamas *x*, *y* ar *z* koordinatėmis pažymėtas rodykles. Atstumas nurodomas mikrometrais. Surandama objektyvo padėtis kai matomas aiškus stiklinio bandinio paviršiaus vaizdas. Žinodami, kad stiklo storis yra apie 1 mm, o objektyvo darbinis atstumas 0,55 mm judame žemyn dar 0,3-0,32 mm. Dabar galima paleisti mikrodarinio formavimo

programą. Pasibaigus mikrodarinio formavimo procesui, paleidžiama kita programa arba išimamas bandinys. Prieš išimant bandinį, objektyvą reikia pakelti saugiu atstumu (20-30 mm) į viršų.

3. Bandinių charakterizavimas optiniu mikroskopu. Apžiūrimos ir užregistruojamos pakitusio (padidėjusio ar sumažėjusio) lūžio rodiklio sritys. Įvertinama kokio tipo tai modifikacijos, ar suformuotose modifikacijose yra mikro įtrūkimų ar kitų nepageidaujamų defektų.
4. Bandinių charakterizavimas optinio charakterizavimo stendu. Tiriamąjį bandinį įtvirtinti fokusuoto HeNe lazerio pluošto kelyje taip, kad pluošto sąsmauka bandinio vietoje būtų šiek tiek siauresnė nei tiriamasis darinys. Žinomą atstumą nuo tiriamojo darinio pastatyti ekraną, užregistruoti ant ekrano stebimą difrakcinį vaizdą - nustatyti atstumus tarp stebimų difrakcinių maksimumų. Kai pluoštas krinta statmenai į gardelę, difrakcinės gardelės lygtis gali būti užrašoma:

$$m \cdot \lambda = \Lambda \cdot \sin \theta_D, \quad (1)$$

kur m - difrakcinio maksimumo eilės numeris, λ - bangos ilgis, Λ - gardelės periodas, θ_D - kampas tarp normalės ir m -tosios eilės difrakcinio maksimumo.

Galios matuokliu užregistruoti difragavusių pluoštų vidutinę galią. Naudojantis Jums patinkančiu difrakcijos efektyvumo įvertinimo artiniu, kiekybiškai palyginti skirtingais eksponavimo parametrais įrašytų gardelių difrakcijos efektyvumus.

8 Teorinė medžiaga

Parengta dr. D. Paipulo daktaro disertacijos "Lūžio rodiklio modifikavimas stikluose ir kristaluose veikiant ultratrumpaisiais lazerio impulsais" pagrindu. Nuorodos į tekste naudojamus šaltinius gali būti randamos originaliame disertacijos tekste, kuris prieinamas viešai: <https://epublications.vu.lt/object/elaba:2004292/2004292.pdf>

8.1 Skaidriųjų terpių modifikavimas

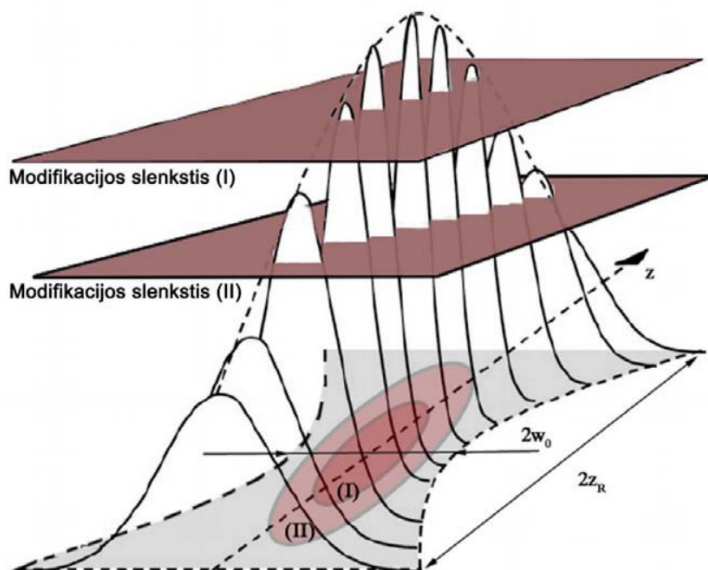
Slenkstinio intensyvumo, kuriam esant atsiranda lazerinis pažeidimas, egzistavimas atveria unikalias taikymo skaidriųjų medžiagų apdirbimui galimybes. Kontroliuojant lazerio impulso intensyvumą, galima parinkti tokias sąlygas, kad slenkstinis intensyvumas būtų viršijamas tik pluoštą fokusuojančio lęšio židinyje. Tokiu būdu lazerio indukuoto pažeidimo zona bus griežtai apibrėžta skaidriosios medžiagos tūryje. Pamažu keičiant židinio poziciją, skaidrioje terpėje

galima formuoti įvairius trimačius objektus, fotoninius elementus ar integruotas optines sistemas su mikrometrine ar submikrometrine skiriamąja geba.

Literatūroje terminu lazerio indukuotas medžiagos pažeidimas paprastai yra vadinamas bet koks lazerio spinduliuotės sukeltas negrįžtamas terpės savybių pakitimas, įprastai detektuojamas optiniais metodais. Tačiau tam tikromis sąlygomis darinys, susiformavęs po medžiagos pažeidimo, išsiskiria itin aukštu reguliarumu, būna vienalytiškas ir jį galima aiškiai klasifikuoti. Tokie dariniai formuojasi todėl, kad lazerio impulsas, kurio intensyvumas yra artimas pažeidimo slenksčiui, gali reguliariai pakeisti ir modifikuoti medžiagos struktūrą. Todėl norint išskirti šiuos darinius iš kitų, šiame apraše bus vartojamas terminas lazerio indukuota medžiagos modifikacija. Sąvoka medžiagos pažeidimas toliau vartojama tik tais atvejais, kai turima omenyje neregulius darinius, vizualiai detektuojamus medžiagos įskilimus ir pan.

8.1.1 Tūrinis medžiagos modifikavimas

Norint pasiekti didesnius nei TW/cm^2 lazerio impulso intensyvumus reikalingus medžiagai modifikuoti, neišvengiamai tenka lazerio pluoštą fokusuoti. Kita vertus, fokusavimas leidžia selektyviai parinkti erdvės vietą, kurioje spinduliuotės intensyvumas pakankamas netiesinei sugerčiai inicijuoti.



2 pav. Gauso pluošto intensyvumo pasiskirstymas židinyje (z – pluošto sklidimo kryptis). Medžiagos modifikavimas yra įmanomas tik slenkstinio intensyvumo apribotoje srityje. Atsižvelgiant į slenksčio vertę (ar spinduliuotės intensyvumą), pačios modifikuotos srities dydis gali būti mažesnis nei difrakcijos apribotas sąsmaukos diametras ($2w_0$) ar sąsmaukos ilgis ($2z_R$).

Difrakcija apriboja minimalią erdvės sritį, į kurią lazerio pluoštas gali būti sufokusuotas. Jeigu fokusuotume plokščiąją bangą lęšiu, kurio skaitmeninė apertūra yra NA ($NA = n \sin \theta$, čia

θ yra lęšio fokusavimo kampas, apibrėžiamas kaip suformuoto fokusavimo kūgio puskampis, o n – terpės, kurioje yra židinio vieta, lūžio rodiklis), tada minimalus galimas pluošto spindulys sąsmaukoje apytiksliai būtų lygus

$$w_0 = \frac{0.61\lambda_0}{n \cdot NA}, \quad (2)$$

čia λ_0 – spinduliuotės bangos ilgis. Šis dydis iš tiesų nusako susiformavusio Airy disko spindulį. Lazerio pluošto profilis paprastai yra artimesnis Gauso pasiskirstymui, tačiau jei lygintume tokių pluoštų erdvinį energijos pasiskirstymą, šis skirtumas būtų labai nedidelis. Plokščiosios bangos atveju 83 % energijos yra sutelkta Airy diske, o Gauso pluošto atveju 86 % energijos patenka po Gauso gaubtine $1/e^2$ lygyje. Todėl (2) formulė gana tiksliai aprašo fokusuotos dėmės dydį, aišku neįskaitant fokusuojančios optikos aberacijų. Gauso profilio pluošto pačios sąsmaukos ilgis, vadinamasis konfokalus parametras, atitinka dvigubą Reilėjaus ilgį (atstumą, kai spinduliuotės intensyvumas sumažėja du kartus):

$$2z_R = 2 \frac{\pi w_0^2}{\lambda_0} n. \quad (3)$$

Kaip jau minėjome, norint modifikuoti medžiagą, reikia pasiekti tokį spinduliuotės intensyvumą, kuris būtų didesnis už tam tikrą slenkstinę vertę. Kaip matyti iš 2 paveikslo, nesunkiai galima įgyvendinti tokią situaciją, kad slenkstinis intensyvumas būtų viršijamas tik židinio aplinkoje. Taigi šiuo būdu galima kurti modifikuotus darinius medžiagos tūryje visiškai nepažeidžiant jos paviršiaus. Tai unikalus lazerinio apdirbimo pritaikymas, nes nėra daugiau technologijų, kuriomis būtų galima pasiekti panašius rezultatus. Parenkant intensyvumą, artimą pažeidimo slenkščiui, įmanoma sukurti darinius, kurie yra mažesni nei difrakcijos apribotas pluošto diametras. Tokia technologija ypač sėkmingai taikoma kuriant trimačius darinius su submikrometrine skiriamąja geba polimeruose. Stikluose panašią skiriamąją gebą taip pat galima pasiekti, tačiau dėl netiesinių procesų, tokių kaip šviesos gijos formavimasis, modifikuotos medžiagos sritis padidėja. Nepaisant to, trimačių mikrodarinių formavimas yra sėkmingai įgyvendinamas.

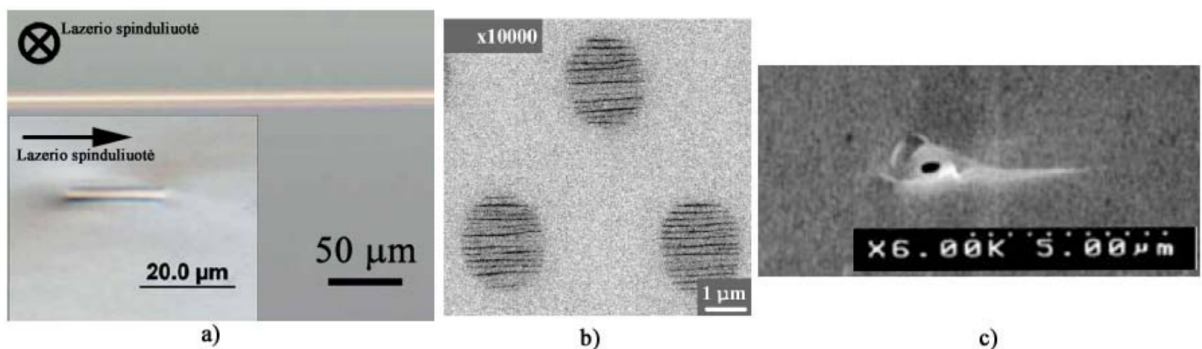
8.2 Skaidriųjų terpių modifikacijų tipai

Parenkant skirtingus lazerio spinduliuotės parametrus, skaidrioje medžiagoje galima sukurti įvairių tipų modifikacijas. Nors pats modifikuotos srities pobūdis dažnai priklauso nuo medžiagos fizikinių savybių, iš esmės galima išskirti tam tikrus modifikacijų tipus, būdingus didžiąjai daliai skaidrių medžiagų (3 pav.). Veikiant medžiagą impulsu, kurio intensyvumas yra mažesnis nei modifikacijos slenkstis, terpėje jau gali atsirasti trumpai gyvuojantys nestabilūs dariniai, kurie išsiskiria pakitusia sugertimi ar lūžio rodikliu. Tokios modifikacijos vadinamos nestabiliosiomis. Kai spinduliuotės intensyvumas tik viršija slenkstinę liekamosios modifikacijos

atsiradimo vertę, joje formuojasi vienalytė sritis su pakitusiu lūžio rodikliu (dažnai literatūroje dar vadinama I tipo modifikacija). Didinant intensyvumą, modifikuotos sritys vienalytiškumas ima mažėti, be to, joje atsiranda dvigubas šviesos lūžimas (II tipo modifikacija). Dar smarkiau išaugus intensyvumui bei parinkus atitinkamas fokusavimo sąlygas, medžiagoje galima formuoti mikrosprogimų inicijuotas mikroertmės. Tipinės modifikacijų iliustracijos pateiktos 4 paveiksle. Tokie yra šiandienai žinomi pagrindiniai skaidriose medžiagose lazerio indukuojamų modifikacijų tipai. Vienose medžiagose tam tikro tipo modifikacijos gali dominuoti, o kitų tipų iš viso nebūti. Kitose medžiagose, pavyzdžiui, lydytame kvarce, galima realizuoti visų tipų modifikacijas.



3 pav. Ultratrumpaisiais lazerio impulsais indukuojamų modifikuotų darinių pobūdis.

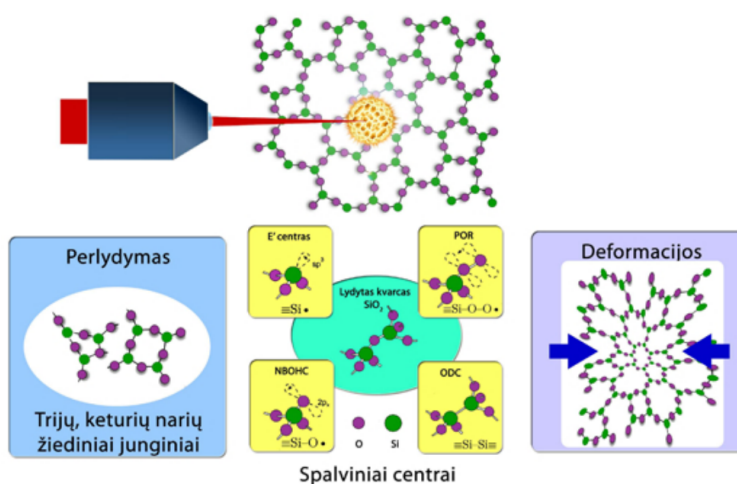


4 pav. Ultratrumpaisiais lazerio impulsais modifikuota medžiaga. a) Šviesolaidis įrašytas fosfatiniame stikle (išilginis ir skersinis vaizdas, I tipo modifikuotas darinys); b) nanogardelės lydytame kvarce (II tipo modifikuotas darinys); c) mikroertmės lydytame kvarce.

8.2.1 Vienalytis lūžio rodiklio pakitimas

Spinduliuotės intensyvumui viršijant tam tikrą kritinę vertę, modifikuotos medžiagos darinys jau tampa stabilus. Reguliarios formos skaidrius darinius įvairių tipų stikluose 1996 m. pirmasis pademonstravo Davis ir kt. Buvo nustatyta, kad sukurti dariniai turi izotropinį lūžio

rodiklio pokytį, kuris gali siekti iki 10^{-2} . Toks pokytis yra pakankamas, kad terpės tūryje galėtų būti realizuoti veikiantys bangolaidžiai, kuriuos ta pati mokslininkų grupė pademonstravo vėlesniuose darbuose. Šie darbai smarkiai pastūmėjo integrinės optikos technologijos vystymąsi. Nepaisant gausių tyrinėjimų, fizikiniai mechanizmai, lemiantys lūžio rodiklio pokytį, šiandienai nėra iki galo suprasti. Paveikus intensyviu lazerio impulsu, kietakūnėje terpėje gali vykti daug skirtingų procesų, kurie vienaip ar kitaip gali keisti lūžio rodiklį. Išskiriami trys galimi modeliai, aprašantys lūžio rodiklio pokyčius: terminis modelis, ilgai gyvuojančių defektų modelis bei gardelės deformacijų modelis (5 pav.).



5 pav. Lūžio rodiklio pokyčio atsiradimo mechanizmai lydytame kvarce. Intensyvia spinduliuote paveikta medžiaga po perlydymo gali sutankėti. Dėl cheminės struktūros pakitimo vietoj dominuojančių 5, 6 narių žiedinių darinių formuojasi 3 ir 4 narių dariniai. Taip pat galimas taškinių defektų - spalvinių centrų formavimasis. Medžiagą sparčiai kaitinant, susiformuoja vidinis slėgis, todėl vyksta gardelės deformacija. Visi šie reiškiniai daro įtaką lūžio rodiklio pokyčiui medžiagoje

Terminis modelis.

Šis modelis yra grindžiamas tuo, jog medžiagos temperatūra židinio aplinkoje gali būti pasiekama pakankamai aukšta, kad galėtų įvykti medžiagos fazinis virsmas. Dielektrinių terpių šilumos laidumo koeficientas yra mažas, karštoji zona yra sukoncentruota mažoje erdvės srityje, todėl net ir esant mažoms impulso energijoms (≈ 500 nJ) galima įkaitinti medžiagą iki 2000 K ir daugiau. Pasibaigus kaitinimui, dėl didelio temperatūros gradiento ši sritis sparčiai aušta (charakteringa relaksacijos trukmė $> 1 \mu\text{s}$). Tokiu būdu terpės tūryje susiformuoja perlydytos medžiagos sritis, turinti peršaldyto skysčio savybių, kurios skiriasi nuo nepaveiktos medžiagos savybių. Žinoma, kad lydyto kvarco lūžio rodiklis būna didesnis ($\approx 10^{-3}$), jei aukštos temperatūros būsenos kvarcas yra greitai atšaldomas. Toks pokytis atsiranda dėl anomalaus šios medžiagos sutankėjimo: lydyto kvarco gardelė turi žiedinį darinį, suformuotą iš -O-Si-O- ele-

mentų. Įprastame kvarce dominuoja 5 ir 6 elementų žiedai, tačiau greitai aušinant karštos būsenos kvarcą itin ženkliai padaugėja 3 ir 4 elementų žiedų, todėl medžiaga tampa tankesnė. Iš tiesų lazerio modifikuotos zonos Ramano spektroskopiniai tyrimai patvirtina tokių žiedų atsiradimą, o eksperimentiniai darbai demonstruoja lūžio rodiklio padidėjimą lydytame kvarce.

Toks lūžio rodiklio modifikavimo aiškinimas remiantis terminė medžiagos elgsena leidžia kokybiškai numatyti galimus medžiagos lūžio rodiklio pokyčius, tačiau toli gražu nepakankamas norint paaiškinti visus modifikuotos zonos ypatumus. Mikroskopinė modifikuotos zonos analizė rodo, kad lazerio impulso paveiktoje srityje lūžio rodiklio pasiskirstymas yra gana sudėtingas, stebimos įvairios lūžio rodiklio variacijos, kurios, be to, labai priklauso nuo krintančios spinduliuotės parametru. Paprastai jei modifikacijos centre yra padidėjęs lūžio rodiklis, tai periferijoje stebimos sumažėjusio lūžio rodiklio zonos, ir atvirkščiai. Parenkant atitinkamus impulso parametrus, galima toje pačioje medžiagoje indukuoti zonas su priešingo ženklo lūžio rodiklio pokyčiais. Tokia situacija leidžia manyti, kad lazerio impulso sugerties metu vykstantys spartūs dinaminiai procesai sukelia papildomas gardelės deformacijas, kurios taip pat daro įtaka lūžio rodiklio pokyčiui.

Deformacinis modelis.

Femtosekundiniu impulsu sugeneruotų laisvųjų elektronų relaksacija vyksta labai sparčiai (< 1 ps). Iškart po relaksacijos didelis energijos kiekis yra žaibiškai perduodamas gardelei, todėl pakeliamas jos temperatūra ir smarkiai apribotoje erdvėje sukuriama aukšta termoelastinė įtempis. Relaksuodamas įtempis medžiagoje gali sukelti stiprias akustines bangas, kurios savo ruožtu gali sukelti plastines gardelės deformacijas. Tokių bangų egzistavimas yra patvirtintas eksperimentais. Sklindanti banga sąveikauja su įkaitusia gardele ir sukuria nevienalytes tankio variacijas, kurios turi įtakos ir lūžio rodiklio pokyčiui. Kad vyksta toks medžiagos suspaudimas, taip pat patvirtina ir molekulinio ryšio kampo kitimas SiO_2 molekulėje, fiksuojamas Ramano spektruose. Lokalūs tankio pakitimai neišvengiamai sukelia įtempio lauką lazerio nepaveiktoje srityje, matomą poliarizuojančiu mikroskopu. Tačiau lūžio rodiklio pokyčio modeliavimai parodė, kad gardelės deformacijos sudaro tik apie 10 % viso stebimo lūžio rodiklio pokyčio, taigi vien toks modelis negali išsamiai paaiškinti lūžio rodiklio atsiradimo priežasties.

Spalvinių centrų modelis.

Dar praeito amžiaus viduryje pradėti plėtoti elektronų paramagnetinio rezonanso (EPR), liuminescencijos, šviesos sugerties matavimo metodai leido identifikuoti įvairius stiklo defektus, stebėti jų dinamikos kitimą veikiant įvairia spinduliuote, apšaudant didelės energijos dalelėmis ir pan. Stiklai yra amorfinės struktūros, todėl juose gausu įvairių gardelės defektų. Tokios pat konsistencijos stiklų terminė istorija gali skirtis, todėl skiriasi ir defektų pobūdis bei kiekis. Taigi defektų tyrimai yra gana komplikuoti.

Nagrinėjant gryną lydytą kvarcą, būtų galima išskirti keturias būdingiausias defektų grupes: E' centrai ($\equiv\text{Si}\cdot$), čia ir toliau nesuporuotą elektroną žymėsime \cdot), nesurištieji deguonies – skylės centrai ($\equiv\text{Si}-\text{O}\cdot$) (angl. non bonded oxygen hole centers – NBOHC), peroksi radikalai ($\equiv\text{Si}-\text{O}-\text{O}\cdot$) (angl. peroxy radicals – POR) bei deguonies vakancijos ($\equiv\text{Si}-\text{Si}\equiv$) (angl. oxygen deficiency centers – ODC). Šių defektų formulės ir sandara pavaizduotos 5 paveiksle. Kiekvienas defektas turi ir atskirus poklasius, kurių čia neanalizuosime (detalią apžvalgą galima rasti). Visi išvardyti defektai gali būti indukuoti tiek ultravioletine lazerio spinduliuote, tiek femtosekundine infraraudonąja spinduliuote. Kituose stikluose aptinkami panašių tipų defektai: germaniosilikatiniuose stikluose dominuoja germanio-deguonies skylės centrai, borosilikatiniuose stikluose – boro-deguonies skylės centrai ir pan.

Spalvinių centrų įtaka lūžio rodiklio pokyčiui yra diskutuotina. EPR matavimai rodo, kad sužadintoje medžiagoje gali atsirasti iki 10^{19} cm^{-3} defektų, kurie atitinkamai sukeltų lūžio rodiklio pokytį iki 10^{-3} . Kita vertus, tiesiogiai matuojant sugertį, dėl defektų fiksuojamas gerokai mažesnis lūžio rodiklio pokytis (10^{-8}) onė, kad spalviniai centrai neišsiskiria ilgalaikiu stabilumu ir gali būti išnaikinti terminio apdorojimo metu (atkaitinant $200 \text{ }^\circ\text{C}$ temperatūroje). Tačiau pačios lūžio rodiklio modifikacijos yra gana stabilios iki $700 \text{ }^\circ\text{C}$.

Reali lūžio rodiklio pokyčio atsiradimo priežastis, ko gero, slypi visuose trijuose modeliuose. Manoma, kad dažniausiai lūžio rodiklio pokytis atsiranda dėl terminio medžiagos poveikio, kuris savo ruožtu sukelia gardelės deformacijas. Tačiau terminiu modeliu pilnai negalima paaiškinti lūžio rodiklio pokyčio atsiradimo medžiagą veikiant mažo intensyvumo (nepakankamo medžiagos faziniam virsmui sukelti), bet didelio impulso pasikartojimo dažnio lazerio spinduliuote. Kita vertus, deformaciniu ar spalvinių centrų modeliu prognozuojamas gerokai mažesnis pokytis nei yra stebimas.

8.2.2 Dvejopai laužianti sritis. Nanogardelės

Esant didesnėms energijoms, modifikuotos zonos vienalytiškumas sumažėja, be to, šie dariniai pasižymi dvejopu šviesos lūžimu. Kad būtų galima atskirti nuo kitų, šios modifikacijos pavadintos II tipo modifikacijoms. Tik visai neseniai surastos priežastys, lemiančios dvejopo lūžio rodiklio atsiradimą. Buvo nustatyta, kad jis atsiranda dėl nanostruktūrizacijos, vykstančios lazerio paveiktoje zonoje.

Tokių nanodarinių formavimo fizika dar nėra suprata, nes kol kas trūksta eksperimentinių duomenų. Vienas iš aiškinimų grindžiamas tuo, kad intensyvios elektromagnetinės bangos ir elektronų plazmos kuriamo elektrinio lauko interferencija gali suformuoti panašius darinius. Dėl šios interferencijos, spinduliuotė moduliuoja plazmos tankį ir iš esmės padalija plazmą į atskiras nanoplokštumas, kurios atskirtos viena nuo kitos periodu, lygiu pusei spinduliuotės bangos ilgio. Kituose darbuose gardelių periodiškumas gaunamas gerokai mažesnis nei pusė bangos ilgio. Be to, pastebima, jog gardelės periodui turi įtakos impulsų pasikartojimų dažnis. Šie rezultatai leidžia abejoti interferencine gardelės formavimosi teorija ir plazmos nanoplokštumų

formavimasis aiškiamas remiantis plazmoniniais efektais. Sąlygos, reikalingos plazmos tankio pasiskirstymui susidaryti, yra neišaiškintos. Reikia pastebėti, kad gardelės periodiškumas ir reguliarumas išsilaiko ir makroskopiniais atstumais, įrašymo metu lėtai transliuojant bandinį fiksuotos židinio pozicijos atžvilgiu. Todėl galima teigti, kad plazmos tankio persiskirstymą gali lemti ir medžiagos defektai. Vieno lazerio impulso sukurti medžiagos defektai „atsime-na” pirminį plazmos pasiskirstymą ir šią informaciją perduoda kitiems impulsams pakartotinai veikiant tą pačią vietą arba lėtai transliuojant bandinį.

Toks nanogardelių, orientuotų viena kryptimi, buvimas paaiškina dvejetainio rodiklio atsiradimą II tipo modifikacijose. Keičiant spinduliuotės poliarizaciją, intensyvumą bei modifikuotos zonos plotą, galimam manipuliuoti šiuo dvejetainiu lauziančiu efektu. Jau yra demonstruojamostokiu principu suformuotos fazinės plokštelės.

8.3 Spinduliuotės parametrų įtaka modifikacijoms

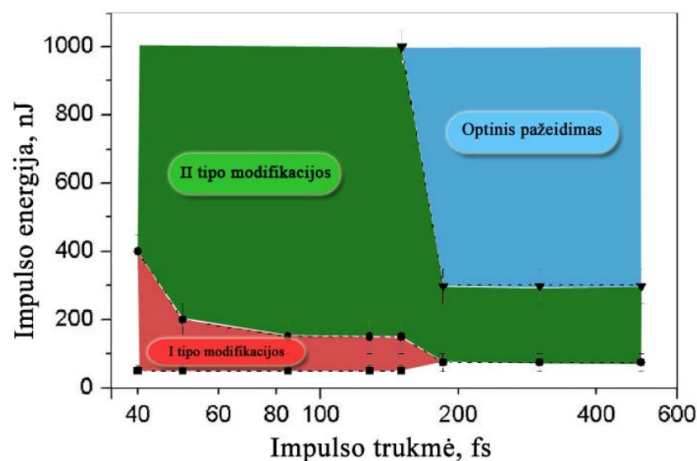
Praeitame poskyryje aptartos modifikacijos, indukuojamos ultratrumpaisiais lazerio impulsais, tačiau visiškai neanalizavome lazerio spinduliuotės parametrų, reikalingų tokioms modifikacijoms sukurti. Spinduliuotės intensyvumas, bangos ilgis, impulso trukmė, impulsų pasikartojimo dažnis, fokusavimo aštrumas, medžiagos optinės bei fizikinės savybės ir kiti parametrai gali daryti įtaką indukuojamų modifikacijų tipui ar jų kokybei. Be to, dar ne iki galo suprasti fizikiniai mechanizmai, lemiantys modifikacijų atsiradimą, apsunkina tokią šviesos ir medžiagos sąveikos analizę. Todėl, norint indukuoti norimo tipo modifikacijas su pasirinkta lazerine sistema, kol kas tenka eksperimentiniu būdu parinkti reikiamus spinduliuotės parametrus. Vis dėlto gana platus spektras mokslinių darbų, susijusių su skaidriųjų terpių modifikavimo tyrimais, leidžia perprasti esminių įrašymo parametrų įtaką modifikacijų kūrimui.

Didžiausioji dalis tyrimų buvo atlikti naudojant populiariausias, Ti:safyro pagrindu veikiančias lazerines sistemas. Jos generuoja 800 nm bangos ilgio impulsus, kurių trukmė siekia mažiau nei 100 fs. Tokių sistemų impulsų pasikartojimo dažnis būna nedidelis ir siekia 1 kHz. Vienalytės lūžio rodiklio modifikacijos lydytame kvarce naudojant tokio tipo sistemas stebimos esant impulso intensyvumui apie 40–200 TW/cm² (spinduliuotės energijos tankis 4–20 J/cm²). II tipo modifikacijos pradeda atsirasti, kai intensyvumai yra 200–600 TW/cm² (20–60 J/cm²), o mikropazeidimai atsiranda, kai intensyvumas didesnis nei 600 TW/cm² (> 60 J/cm²). Tokios vertės gaunamos fokusuojant spinduliuotę su lęšiu, kurio skaitmeninė apertūra lygi 0,65.

Intensyvumą galima keisti naudojant kitokio aštrumo fokusuojančią optiką, tačiau pats lęšio židinio nuotolis gali labai pakeisti sukurtos modifikacijos pobūdį. Naudojant mažos skaitmeninės apertūros lęšius (NA < 0,2), modifikacijos atsiradimo slenkstis yra pasiekiamas tik tada, kai spinduliuotės galia jau viršija medžiagos fokusavimosi slenkstį. Dėl to susidariusios medžiagos modifikacijos jau būna smarkiai paveiktos filamentacijos reiškinio. Gijos formavimosi metu spinduliuotės energija persiskirsto dideliame plote, todėl modifikacijos išilginiai matme-

nys smarkiai pakinta, jos išilginis matmuo gali siekti net keletą milimetrų. Židinyje padidėjusi laisvųjų elektronų koncentracija mažina medžiagos dielektrinę skvarbą, todėl spinduliuotė visada yra iš dalies sklaidoma bei atsiranda filamentacijos užuomazgos net ir naudojant vidutinio aštrumo objektyvus ($NA \in (0,4 - 1)$). Dėl šios priežasties modifikacijos morfologija tampa nevienalytė. Arti židinio esančioje srityje lūžio rodiklio pokytis paprastai būna didesnis, o jos matmenys artimi ar net mažesni nei lęšio apribotas sąsmaukos plotis ar fokusavimo gylis. Už šios zonos išilgai impulso sklidimo krypties atsiranda silpniau modifikuota sritis, kurios ilgis priklauso nuo fokusuojančio lęšio parametrų. Taigi reguliarių mikroertmių formavimas galimas tik su itin aštriai fokusuojančiais objektyvais ($NA > 1$). Mat norint inicijuoti mikrosprogimus, visa spinduliuotės energija turi būti sutelkta į kuo mažesnę tūrio vienetą. Todėl filamentacijos reiškinyms turi būti kiek įmanoma mažesnis.

Kaip jau minėta, medžiagos relaksacinės trukmės, paveikus ultratrumpaisiais lazerio impulsais, siekia mikrosekundines skales. Todėl naudojant lazerines sistemas, kurių impulsų pasikartojimų dažnis yra didelis, galimas terminės akumuliacijos efektas, nes medžiaga jau nebespėja ataušti iki to laiko, kol ateina kitas impulsas. Ši akumuliacija keičia modifikacijos pobūdį. Pastebima, kad tokiomis sąlygomis modifikuotas darinys tampa didesnis ir jo matmenys ima priklausyti nuo lazerio ekspozicijos trukmės. Svarbu pastebėti, kad šis efektas stebimas ne visose medžiagose: jis yra ypač ryškus borosilikatiniuose stikluose, bet visiškai silpnas lydytame kvarce. Toks efekto selektyvumas medžiagai nėra iki galo suprastas, tačiau manoma, kad priežastis galėtų būti didesnis lydyto kvarco draustinės juostos tarpas bei aukštesnė fazinio virsmo temperatūra (1800 °C). Ribinis lazerio impulsų pasikartojimo dažnis, kuriam esant jau pastebimas terminės akumuliacijos efektas, yra 0,5 MHz (impulsai krinta į medžiagą kas 2 μ s). Kai dažniai mažesni ($< 0,2$ MHz), šis efektas pastebimas tik esant intensyvumams, gerokai viršijantiems pažeidimo slenkstį.



6 pav. Lazerio impulso trukmės įtaka modifikacijos tipui lydytame kvarce (spinduliuotės bangos ilgis - 800 nm, fokusuota 0,65 NA objektyvu).

Kitas svarbus parametras, lemiantis modifikacijos tipą, yra impulso trukmė. Čia aptarsime tik eksperimentinius rezultatus, susijusius su lūžio rodiklio modifikacijų indukavimu. Modifikacijų morfologijos įtaka kintant impulso trukmei iki šiol nėra nuosekliai tyrinėta. Yra keltas darbų, kuriuose buvo gilintasi į šią problemą, tačiau jie gana skiriasi modifikacijų įrašymo režimais. Tyrinėjant modifikacijas lydytame kvarce, indukuotas šviesos gija, t. y. naudojant silpnai fokusuojančią optiką ($NA < 0,1$), buvo nustatyta, kad lūžio rodiklio modifikaciją (šiuose darbuose nebuvo tyrinėjama, kokio tipo ši modifikacija yra) galima sukelti tik tada, kai trukmė yra mažesnė nei 250 fs. Esant ilgesnėms trukmėms formuojasi intensyviai šviesą sklaidantis optinis pažeidimas. Impulso trukmės įtaką modifikacijų morfologijai naudojant aštriau fokusuojančius objektyvus tyrinėjo Hnatovsky ir kt. Pagrindiniai rezultatai pavaizduoti 6 paveiksle. Matome, kad I tipo modifikacijos formuojasi tik esant trukmėms, mažesnėms nei 200 fs. Kai trukmės yra ilgesnės, modifikacijos jau išsiskiria dvejopu lūžimu. Apie siaurėjantį I tipo modifikacijos indukavimo langą didėjant impulso trukmei praneša ir Cheng ir kt. Borosilikatiniuose stikluose, kuriuose II tipo modifikacijos nestebimos, vienalyčiai lūžio rodiklio pokyčiai gaunami ir su impulsais, kurių trukmė siekia keletą pikosekundžių.

Spinduliuotės bangos ilgio įtaka modifikacijų indukavimui vis dar lieka labai diskutuotina. Matuojant modifikacijų, indukuotų su skirtingais bangos ilgiais, atsiradimo slenksčius įvairiose skaidriose medžiagose, didelio skirtumo nepastebima – slenksčio skirtumas tarp 800 nm ir 400 nm indukuotų slenksčių sudarė tik 10 %. Remiantis Keldyšo teorija, trumpesnis bangos ilgis padidina daugiafotonės jonizacijos tikimybę, tačiau esant ilgesnėms bangoms atitinkamai išauga tunelinės jonizacijos sparta. Remiantis šiais samprotavimais, galima teigti, jog bendrasis netiesinės sugerties koeficientas mažai kinta, keičiantis bangos ilgiui. Tačiau vis dar trūksta tyrimų, kurie galėtų tvirčiau pagrįsti šį teiginį.

8.4 Fotoniniai elementai skaidriųjų medžiagų tūryje

Pastebėjus, kad ultratrumpaisiais lazerinio impulsais galima keisti skaidriųjų terpių optines savybes, net ir galutinai nesupratus šio reiškinio prigimties, prasidėjo galimų šios technologijos taikymų analizė, pademonstruota didelė gausa įvairių fotoninių elementų, įrašytų įvairaus tipo stikluose. Išsamią tokiu metodu sukurtų elementų apžvalgą galima rasti Della Valle ir kt. straipsnyje bei ten esančiose nuorodose. Todėl šiame skyrelyje apžvelgsime tik esminius taikymus, demonstruojančius įvairių tipų modifikacijų panaudojimą praktiniais tikslais.

Jau patys pirmieji skaidriųjų terpių modifikavimo darbai, atlikti Hirao grupės, pademonstravo šviesolaidinį efektą, atsirandantį dėl lokaliai pakitusio medžiagos lūžio rodiklio. Lėtai stumiant bandinį židinio padėties atžvilgiu, automatiškai formuojasi šviesolaidis, kurio forma ir struktūra priklauso nuo bandinio transliavimo geometrijos bei rašančiojo pluošto parametrų. Nors skirtingos medžiagos skirtingai reaguoja į femtosekundinius impulsus, įvairūs technologiniai sprendimai leidžia kurti šviesolaidžius įvairaus tipo medžiagose: lydytame kvarce, borosi-

likatiniame stikle, daugiakomponentiniuose stikluose, netiesiniuose kristaluose, polimeruose ir kt. Tokios technologijos lankstumą demonstruoja sudėtingesni fotoniniai elementai, tokie kaip integruoti šviesolaidiniai daugiakanaliai šakotuvai, kaupikliai, interferometrai ir kitokie mikroprietaisai. Tokie elementai kol kas atsilieka savo efektyvumu nuo šviesolaidžių, integruotų ant silicio padėklo, tačiau tokia metodika nėra tiek universali ir jos taikymo galimybės yra gana ribotos. Tiesioginio įrašinėjimo technologija yra perspektyvi unikalių elementų gamybai. Kaip pavyzdį galima pateikti tuo pačiu apdirbimo metu lydytame kvarce įrašytą šviesolaidį kartu su Brego gardele.

Kita plati taikymų sfera yra difrakcinių elementų gamyba. Plonos vienmatės gardelės, tūrinės Brego gardelės, Damano gardelės, Frenelio lęšiai, holografijos, užrašytos femtosekundiniais impulsais, demonstruojamos įvairių tipų stikluose. Paprastai tokie fotoniniai elementai nėra labai efektyvūs, nes kol kas nėra metodų, galinčių tiksliai kontroliuoti reikiamą lūžio rodiklio pokytį bei paties darinio vienalytiškumą. Vistik, taikomieji darbai, atlikti naudojant skaidriųjų medžiagų modifikavimo ultratrumpaisiais lazerio impulsais metoda, rodo didelę šios technologijos perspektyvą.

Literatūra

[1] Paipulas D. (2011), Lūžio rodiklio modifikavimas stikluose ir kristaluose veikiant ultratrumpaisiais lazerio impulsais: daktaro disertacija [Rankraštis], Vilniaus universitetas, Vilnius. Prieiga per <https://epublications.vu.lt/object/elaba:2004292/2004292.pdf>