



Kauno technologijos universitetas
Matematikos ir gamtos mokslų fakultetas

**Pilnai spalvas perteikiančių taškinių hologramų apjungtų su
skaitmeninėmis hologramomis mikrostruktūrų skaičiavimai ir
įrašymas femtosekundinės lazerinės abliacijos būdu**

Baigiamasis magistro projektas

Tomas Klinavičius
Projekto autorius

Prof. Tomas Tamulevičius
Vadovas

Kaunas, 2020



Kauno technologijos universitetas
Matematikos ir gamtos mokslų fakultetas

**Pilnai spalvas perteikiančių taškinių hologramų apjungtų su
skaitmeninėmis hologramomis mikrostruktūrų skaičiavimai ir
įrašymas femtosekundinės lazerinės abliacijos būdu**

Baigiamasis magistro projektas
Taikomoji fizika (6211CX015)

Tomas Klinavičius
Projekto autorius

Prof. Tomas Tamulevičius
Vadovas

Doc. Aleksandras Iljinas
Recenzentas

Kaunas, 2020



Kauno technologijos universitetas

Matematikos ir gamtos mokslų fakultetas

Tomas Klinavičius

Pilnai spalvas perteikiančių taškinių hologramų apjungtų su skaitmeninėmis hologramomis mikrostruktūrų skaičiavimai ir įrašymas femtosekundinės lazerinės abliacijos būdu

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad mano, Tomo Klinavičiaus, baigiamasis projektas tema „Pilnai spalvas perteikiančių taškinių hologramų apjungtų su skaitmeninėmis hologramomis mikrostruktūrų skaičiavimai ir įrašymas femtosekundinės lazerinės abliacijos būdu“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

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

Tomas Klinavičius

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)

Klinavičius, Tomas. Pilnai spalvas perteikiančių taškinių hologramų apjungtų su skaitmeninėmis hologramomis mikrostruktūrų skaičiavimai ir įrašymas femtosekundinės lazerinės abliacijos būdu. Magistro baigiamasis projektas. Vadovas prof. dr. Tomas Tamulevičius; Kauno technologijos universitetas, Matematikos ir gamtos mokslų fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypčių grupė): Fiziniai mokslai, Fizika (C02).

Reikšminiai žodžiai: Femtosekundinė lazerinė abliacija, taškinė holograma, skaitmeninė holograma, spalva, difrakcija

Kaunas, 2020. 74 p.

Santrauka

Difracciniai optiškai kintančio atvaizdo prietaisai yra optiniai elementai, kuriuose šviesos difrakcija naudojama holografinio vaizdo sukūrimui. Jie yra plačiai naudojami siekiant apsaugoti dokumentus bei prekes apsaugoti nuo padirbinėjimo. Taškinės hologramos yra vienas iš daugelio šių prietaisų tipų. Dėl taškinių hologramų gamybos paprastumo jos tapo rinkoje išsigalėjusia technologija. Didėjantis padirbinėtojų išradingumas reikalauja į apsauginius ženklus diegti naujas technologijas, pavyzdžiui, Furje transformacijos pagrindu difraccinį atvaizdą sukuriančias skaitmenines hologramas. Jos nuo padirbinėjimo apsaugo efektyviau nei taškinės hologramos nes jų formavimo technologija yra sudėtingesnė. Naujos kartos difracciniai apsaugos nuo padirbinėjimo ženklai turės būti sudėtingesni, negu taškinės hologramos, tačiau taip pat nesudėtingai masiškai gaminami. Norint sukurti tokius ženklus reikia apjungti keletą skirtingų technologijų pranašumus tuo pat metu kompensuojant jų trūkumus.

Šio darbo metu buvo sukurtas difraccinis apsaugos nuo padirbinėjimo ženklas, naudojantis taškinės hologramos technologiją ir skaitmeninės hologramos technologiją. Siekiant aukštesnio apsaugos lygio šalia paprastų taškinių hologramų šiame darbe naudotos pilnai spalvas perteikiančios taškinės hologramos. Sukurta taškinių hologramų struktūrai apskaičiuoti skirta speciali programinė įranga, kurios veikimas pagrįstas universaliu matematiniu šviesos difrakcijos aprašymu ir žmogaus spalvinį regėjimą aprašančia spalvų sistema. Taip pat sukurta programinė įranga skirta apskaičiuoti skaitmeninės hologramos struktūrai. Apsauginio ženklo dalis sudaryta iš taškinės hologramos buvo realizuota naudojant femtosekundinės lazerinės interferencinės abliacijos mikroformavimo metodą, o dalis sudaryta iš skaitmeninės hologramos – naudojant femtosekundinės lazerinės abliacijos metodą. Teoriškai bei eksperimentiškai nustatytos sąlygos efektyviam abiejų tipų hologramų formavimui nikelio folijos paviršiuje.

Klinavičius, Tomas. Rendering and calculation of combined true color dot - matrix and computer generated holograms and their origination employing femtosecond laser ablation. Master's Final Degree Project. Supervisor prof. Tomas Tamulevičius; Faculty of Mathematics and Natural Sciences, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): Physical sciences, Physics (C02)

Keywords: Femtosecond laser ablation, dot matrix hologram, computer generated hologram, color, diffraction

Kaunas, 2020. 74 pages.

Summary

Diffraction optically variable image devices are optical elements that use diffraction to form a holographic image. These devices are widely used to prevent counterfeiting of documents and goods. A dot-matrix hologram is one of many types of optically variable image devices. Due to its ease of mass fabrication it has become a well-established technology in the anti-counterfeiting holographic label market. The ever increasing ingenuity of counterfeiters requires introduction of novel technologies into security labels, such as computer generated holograms. This type of hologram is a more effective means of anti-counterfeiting, however its production is usually more complicated. The next generation of anti-counterfeiting labels will have to be more complex than dot matrix holograms, yet maintain their ease of mass production. In order to create these labels it is necessary to combine the advantages offered by several different technologies while also compensating their shortcomings.

In this work a diffractive optically variable anti-counterfeiting security label that combines dot-matrix hologram technology and computer generated hologram technology was created. In order to achieve higher level of security true color dot-matrix holograms were used in this work alongside of ordinary dot-matrix holograms. Custom software was made to calculate the structure of dot-matrix holograms. Custom software was also created to calculate the structure of computer generated holograms. The part of the label that is comprised of dot-matrix hologram was realized by using direct femtosecond laser interference patterning, while the part comprised of computer generated hologram was produced by direct femtosecond laser writing. Optimal formation conditions of both types of holograms on the surface of a nickel foil were determined.

Turinys

Lentelių sąrašas	7
Paveikslų sąrašas	8
Santrumpų ir terminų sąrašas	11
Įvadas.....	12
1. Literatūros apžvalga	13
2. Medžiagos ir tyrimų metodai	30
2.1. Teoriniai metodai.....	30
2.1.1. Taškinės hologramos struktūros apskaičiavimas.....	30
2.1.2. Skaitmeninės hologramos struktūros apskaičiavimas	32
2.1.3. Skaitmeninės hologramos difrakcijos našumo įvertinimas	33
2.2. Eksperimentiniai metodai.....	34
2.2.1. Mikroformavimo metodai	34
2.2.2. Analitiniai metodai	35
3. Tyrimų rezultatai ir jų aptarimas	40
3.1. Hologramų struktūrų apskaičiavimas	40
3.2. Geriausių sąlygų parinkimas skaitmeninės hologramos mikroformavimui femtosekundinės lazerinės abliacijos būdu.....	43
3.3. Geriausių sąlygų parinkimas taškinės hologramos mikroformavimui femtosekundinės lazerinės abliacijos būdu.....	49
3.4. Taškinių hologramų struktūros apskaičiavimo programos rezultatų eksperimentinis validavimas.....	54
3.5. Skaitmeninių hologramų struktūros apskaičiavimo programos rezultatų eksperimentinis validavimas.....	57
3.6. Skaitmenines ir taškinės hologramas apjungiančio apsaugos nuo padirbinėjimo ženklo projektavimas ir gamyba	60
Išvados	63
Literatūros sąrašas	64
Priedai.....	72
1 priedas. Mikroformavimui naudotos įrangos savybės.....	72
2 priedas. Bandomųjų taškinių hologramų spalvų duomenys	73

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Lazerinio mikroformavimo sistemos „FemtoLab“ suformuojamų difrakcinių gardelių nominalaus ir realaus periodo palyginimas	51
2 lentelė. Užduotų, sumodeliuotų ir eksperimentiškai nustatytų spalvų ΔE CIE LAB spalvų sistemoje.	56
3 lentelė. Skirtingos raiškos skaitmeninių hologramų difrakcinių atvaizdų signalo ir triukšmo santykiai.....	59
4 lentelė. Skirtingos raiškos skaitmeninių hologramų absoliutusis ir santykinis difrakcijos efektyvumai	60
5 lentelė. Pagrindinės femtosekundinio lazerio „Pharos“ savybės	72
6 lentelė. Pagrindinės mikroapdirbimo sistemos FemtoLAB savybės.....	72
7 lentelė. Bandomųjų taškinių hologramų užduotojo difrakcinio atvaizdo („U“) spalvų koordinatės CIE LAB spalvų sistemoje, sRGB spalvų sistemoje ir CIE XYZ spalvų sistemos spalvingumo diagramoje.....	73
8 lentelė. Bandomųjų taškinių hologramų pirmojo sumodeliuoto difrakcinio atvaizdo („M1“) spalvų koordinatės CIE LAB spalvų sistemoje, sRGB spalvų sistemoje ir CIE XYZ spalvų sistemos spalvingumo diagramoje.....	73
9 lentelė. Bandomųjų taškinių hologramų antrojo sumodeliuoto difrakcinio atvaizdo („M2“) spalvų koordinatės CIE LAB spalvų sistemoje, sRGB spalvų sistemoje ir CIE XYZ spalvingumo diagramoje.....	73
10 lentelė. Bandomųjų taškinių hologramų eksperimento metu gautais spektrais pagrįstų atvaizdų atitikmenų („E“) spalvų koordinatės CIE LAB spalvų sistemoje, sRGB spalvų sistemoje ir CIE XYZ spalvingumo diagramoje.....	74

Paveikslų sąrašas

1 pav. Pasauliniai padirbinėjimo mastai: a) geografinis pasaulinės vaistų rinkos pasiskirstymas 2007 m. [2], b) geografinis padirbinėjimo atvejų pasiskirstymas pasaulinėje vaistų rinkoje 2008 m. [2], c) padirbtų cheminės sudėties analizės prietaisų pasaulinės rinkos pasiskirstymas pagal rūšį 2016 m. [5], d) padirbtų prietaisų, skirtų aptikti padirbtas pakuotes pasaulinės rinkos pasiskirstymas pagal rūšį 2016 m. [5]	13
2 pav. Taškinės hologramos struktūra skirtingais masteliais: a) visa holograma, kurioje matomi atskiri holografiniai taškai [14], b) vienas holografinis taškas gretimų taškų apsuptyje [15], c) holografinį tašką sudarančios difrakcinės gardelės fragmentas [15].....	14
3 pav. Taškinės hologramos struktūros nehomogeniškumas tampa jos atvaizdo spalvos nehomogeniškumu ją apšvietus [18]	15
4 pav. Atspindžio (a) ir pralaidumo (b) difrakcinių gardelių palyginimas [19]	15
5 pav. Nuo difrakcinės gardelės atsispindėjusių bangų optinių kelių skirtumas [24]	16
6 pav. Šviesos difrakcijos matematinis aprašymas: a) Dekarto erdvėje esančio vektoriaus krypties aprašymas krypties kosinusais [27], b) bendro kūginės difrakcijos atvejo atvaizdavimas [28], c) realios difrakcinės gardelės generuojamos difrakcinės eilės pasiskirstysios diskretiškai, nors kiekvieną eilę sudarantis spektras yra tolydus [29].....	18
7 pav. CIE XYZ spalvų sistemos esminiai komponentai: a) CIE XYZ sistemos pagrindinių spalvų svorių funkcijos [31], b) CIE XYZ sistemos spalvingumo diagrama su pavaizduota sRGB sritimi ir spektrinių spalvų koordinatėmis bei baltos spalvos koordinate (D65) [32]....	19
8 pav. Makadamo elipsės (padidintos 10 kartų) pavaizduotos a) CIE XYZ spalvingumo diagramoje, ir b) CIE LAB spalvingumo diagramoje, kuomet šviesio vertė lygi 80 [36]	20
9 pav. Pilnai spalvas perteikianti taškinė holograma [38]	22
10 pav. Skaitmeninės hologramos veikimo principo esmė: a) Furje transformacijos veikimo principas [68], b) skaitmeninės hologramos difrakcinis atvaizdas – jos plokštuminio atvaizdo dvimatė Furje transformacija [69].....	24
11 pav. Lazerinės abliacijos fizikinis veikimo principas atominame lygmenyje. T_0 – pradinė elektronų ir jonų temperatūra, T_i - jonų temperatūra abliacijos metu, T_e – elektronų temperatūra abliacijos metu [80]	25
12 pav. Lazerinės abliacijos būdu suformuoti pažeidimai medžiagos paviršiuje kuomet abliacijai naudojamas a) nanosekundinis lazeris ir b) femtosekundinis lazeris [84]	26
13 pav. Lazerio impulsų sekos parametrai [86]	27
14 pav. Gauso pluošto fokusavimas lęšiu [89]	27
15 pav. Medžiagos mikrostruktūravimas trumpų impulsų lazerinės abliacijos būdu naudojant a) vieną lazerio pluoštą, b) dviejų lazerio pluoštų interferenciją	28
16 pav. Pirmos eilės santykinio difrakcijos našumo priklausomybė nuo paviršinio lazerinės spinduliuotės energijos tankio ir gardelei formuoti naudoto impulsų skaičiaus [17]	29
17 pav. Pilnai spalvas perteikiančios taškinės hologramos struktūros apskaičiavimo algoritmo blokinė schema	31
18 pav. Gerchbergo – Sakstono algoritmo principinė schema [73]	32
19 pav. Struktūros modeliavimas griežtai susietų bangų analizės metodu: a) modeliujama struktūra, b) ir jos aproksimacija (pavaizduotas vienas modeliujamos struktūros periodas)	34
20 pav. Principinė lazeriniam mikroformavimui naudotos įrangos schema: 1 – femtosekundinis lazeris „Pharos“, 2, 7, 8, 9, 10, 11 – veidrodžiai, 3 – antrosios harmonikos	

generatorius „Hiro“, 4 – pusės bangos vėlinimo plokštelė, 5, 6 – Briusterio kampo poliarizatorius (4 – 6 sudaro atenuatorių), 12 – skaitmeninė kamera, 13 – apšvietimo lempa, 14 – pluoštą fokusuojantis objektyvas, 15 – precizinis trijų ašių poslinkio staliukas, 16 – pluošto plėtiklis, 17 – apertūra, 18 – difrakcinis puošto daliklis, 19 – nulinio maksimumo blokatorius, 20 – pluoštų kolimavimo ir fokusavimo lęšiai	35
21 pav. Šiame darbe naudoti mikroskopijos metodai: a) optinis mikroskopas „B-600 MET“, b) atominių jėgų mikroskopas NT – 206 [105], c) skenuojantis elektroninis mikroskopas „Quanta 200 FEG“ [106]	37
22 pav. Difrakcinių gardelių tyrimui naudota įranga: a) – fotodiodas „PD300-UV“ [107], b) 405 nm bangos ilgio lazeris, c) 650 nm bangos ilgio lazeris, d) 532 nm bangos ilgio lazeris, e) lazerio pluošto skerspjuvio kamera „WinCamD-LCM“ [108], f) supaprastinta matavimo eksperimento schema	38
23 pav. Spektrometriniam hologramų tyrimui naudota įranga: a) optinio spektrometro „AvaSpec-2048“ principinė schema: 1 – šviesolaidžio įvadas, 2 – kolimuojantis veidrodis, 3 – difrakcinė gardelė, 4 – fokusuojantis veidrodis, 5 – detektorius [113], b) spektrometrino stendo schema: 1 – šviesos šaltinis, 2, 4 – fokusuojantys lęšiai, 3, 5 – apertūros, 6 – bandinio laikiklis, 7 – šviesolaidžio įvadas ir jo laikiklis.....	39
24 pav. Programos vartotojo sąsajos įvesties kortelė : a) kuomet yra pabaigtas hologramos struktūros skaičiavimas, b) kuomet yra pabaigtas hologramos struktūros skaičiavimas	41
25 pav. Skaitmeninės hologramos struktūros apskaičiavimas: a) struktūrai apskaičiuoti skirtos programos vartotojo sąsajos langas su pavyzdiniu skaičiavimo rezultatu, b) tipinė vidutinės kvadratinės paklaidos priklausomybė nuo skaičiavimo iteracijų. Paklaida apskaičiuota pagal (30) formulę	42
26 pav. Modeliuojama struktūra su pavaizduotomis apšvietimo sąlygomis ir gardelės parametrais	43
27 pav. Difrakcijos efektyvumo modeliavimas griežtai susietų bangų metodu: a) absoliučiojo difrakcijos efektyvumo priklausomybė nuo gardelės gylio ir periodo nuliniam maksimumui su pavaizduotu vienmačiu dvimačio grafiko pjūviu, b) absoliučiojo difrakcijos našumo priklausomybė nuo gardelės gylio trims skirtingiems bangos ilgiams, pavaizduoti taškai žymi efektyvumo lokaliuosius maksimumus (gyliai ties kuriais jie pasireiškia nurodyti prie kiekvieno bangos ilgio)	44
28 pav. a) Abliacijos kraterių masyvas naudotas elektrochemiškai nusodinto nikelio abliacijos slenksčio nustatymui, b) nikelio lazerinės abliacijos slenksčio nustatymas D kvadrato metodu naudojant mažiausių kvadratų metodu apskaičiuotą tiesinį kreivės priderinimą su pavaizduota priderinimo determinacijos koeficiento verte. Determinacijos koeficiento vertė apskaičiuota pagal (32) formulę	45
29 pav. Abliacijos kraterių gylio tyrimas: a) abliacijos kraterio, suformuoto naudojant 13 lazerio impulsų, skerspjuvis su paryškinta profilio pjūvio sritimi, b) to paties kraterio pjūvis a dalyje paryškintoje srityje (profilograma), c) abliacijos kraterio vidutinio gylio priklausomybė nuo jam suformuoti naudoto impulsų skaičiaus ir mažiausių kvadratų metodu apskaičiuotas tiesinis kreivės priderinimas su pavaizduota priderinimo determinacijos koeficiento verte. 0 eilės difrakcijos efektyvumo padidėjimą atitinkantys gyliai atitinkamiems šviesos bangos ilgiams pavaizduoti brūkšninėmis linijomis. Determinacijos koeficiento vertė apskaičiuota pagal (32) formulę	47
30 pav. Skaitmeninės hologramos tarptaškinio atstumo parinkimas: a) abliacijos kraterių masyvo struktūra su pavaizduotu tarptaškiniu atstumu d ir vieno kraterio spinduliu R skirta	

nustatyti tinkamą tarptaškinį atstumą. Ablacijos kraterių masyvo, kurio tarptaškinis atstumas yra b) 1,3 μm , c) 1 μm , d) 0,5 μm skenuojančio elektroninio mikroskopo mikrofotografijos	48
31 pav. Difrakcinės gardelės srities ploto kitimas: a) difrakcinių gardelių matrica, gauta keičiant joms formuoti naudotą impulsų skaičių nuo 10 iki 2000 impulsų žingsniu 10, b) matricą atitinkantis gardelių santykinių plotų pasiskirstymas (siekiant lengviau orientuotis nurodyta impulsų kitimo tvarka, spalva reiškia santykinį gardelės plotą), c) gardelių santykinio ploto priklausomybė nuo joms formuoti naudoto impulsų skaičiaus kaip grafikas su pavaizduota įsisotinimo riba	50
32 pav. Santykinio ploto įsisotinimo sąlygomis suformuotos difrakcinės gardelės periodo matavimas	51
33 pav. Difrakcijos efektyvumo priklausomybė nuo difrakcinės gardelės periodo skirtingiems bangos ilgiams: a) absoliutinio ir b) santykinio difrakcijos efektyvumų priklausomybės	52
34 pav. Difrakcijos efektyvumo priklausomybė nuo difrakcinei gardelei suformuoti naudoto impulsų skaičiaus skirtingiems bangos ilgiams: a) absoliutinio ir b) santykinio difrakcijos efektyvumų priklausomybės.....	53
35 pav. Hologramų teorinių ir realių spalvų atitikmens tyrimas: a) užduotieji hologramų difrakciniai atvaizdai („U“), jų modeliai naudojant baltą spektrą („M1“) ir naudojant spektrą, kuris labiau atitinka spektrometro lempos spektrą („M2“) ir eksperimento metu gautais spektrais pagrįsti atvaizdų atitikmenys („E“), b) nurodytos spalvos išmatuotas spektras, c) difrakcinių atvaizdų spalvų padėtys CIE XYZ spalvingumo diagramoje (žymeklių spalvos atitinka užduotąsias spalvas).....	55
36 pav. Taškinių hologramų struktūros apskaičiavimui naudotas baltas spektras (5500 K temperatūros juodojo kūno spinduliuotė), spektrometro lempos spektras ir jo aproksimacija apskaičiavimo programoje	57
37 pav. Skaitmeninės hologramos raiškos tyrimas: a) 100x100 taškų raiškos skaitmeninės hologramos fragmentas, suformuotas naudojant tinkamiausias sąlygas formuoti skaitmeninėms hologramoms (paviršinis lazerio spinduliuotės energijos tankis 0,73 mJ/cm^2 , 9 lazerio impulsai, atstumas tarp gretimų taškų 1 μm), b) jos pilnasis difrakcinis atvaizdas suprojektuotas ant popieriaus lapo su pavaizduotais 0 ir 1 eilės difrakciniais maksimumais bei jų difrakciniais atvaizdais. Hologramos struktūros ir jos difrakcinio atvaizdo kompiuteriniai modeliai pavaizduoti 25 pav. a	58
38 pav. Tipinis lazerio pluošto skerspjūvio kamera užfiksuotas difrakcinio atvaizdo galios pasiskirstymas su nurodytais signalo ir triukšmo regionais. Matricos vienetai – kameros taškai, spalva atitinka registruojamą galią (procentais).....	59
39 pav. Paprastas taškines, pilnai spalvas perteikiančias taškines bei skaitmenines hologramas apjungiančio apsaugos nuo padirbinėjimo ženklų sandara.....	61
40 pav. Abi hologramines technologijas apjungiančio apsauginio ženklų veikimas: a) apsaugos nuo padirbinėjimo ženklas apjungiantis pilnai spalvas perteikiančią taškines hologramą, paprastą taškines hologramą ir skaitmeninių hologramų masyvai (jų diametras yra 2 mm), b) apsauginio ženklų skaitmeninės hologramos difrakcinis atvaizdas suprojektuotas ant popieriaus lapo.....	61

Santrumpų ir terminų sąrašas

Santrumpos:

RFID – radio dažnio identifikacija (*angl.* radio frequency identification);

CIE – Tarptautinė apšvietimo komisija (*pranc.* Commission International de l'Éclairage – C.I.E.);

RGB – spalvų sistema „Raudona žalia mėlyna“ (anglišku žodžių „red“, „green“, „blue“ pirmosios raidės);

sRGB – standartinė RGB (RGB spalvų sistemos variantas).

Įvadas

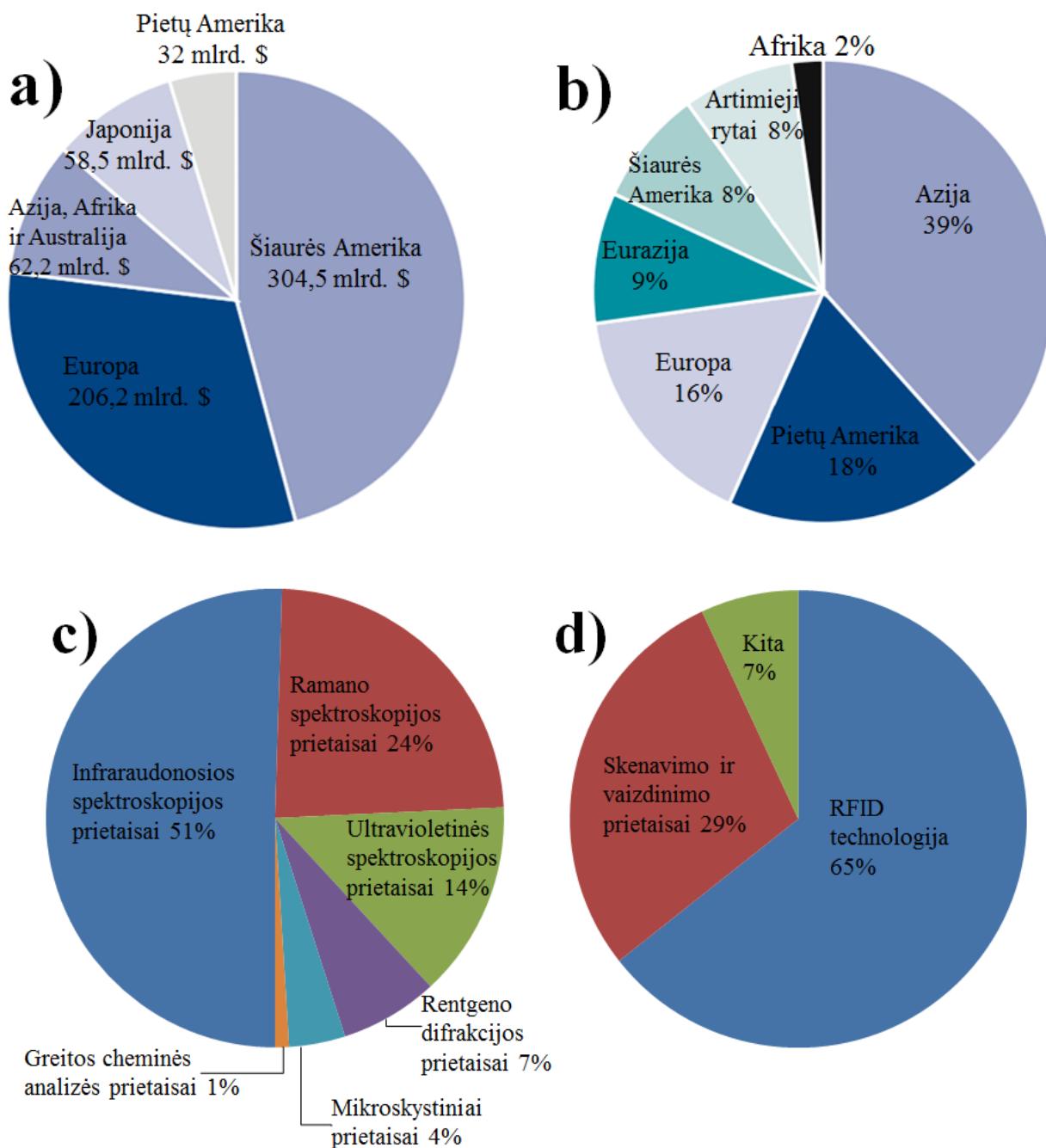
Difrakciniai optiškai kintančio atvaizdo prietaisai yra optiniai elementai, kuriuose šviesos difrakcija naudojama holografinio vaizdo sukūrimui. Jie yra plačiai naudojami kaip apsaugos nuo padirbinėjimo ženklai, siekiant užtikrinti dokumentų, pinigų bei kai kurių prekių, pavyzdžiui vaistų, autentiškumą. Yra daug skirtingų šių prietaisų tipų, vienas populiariausių iš jų – taškinės hologramos. Taškinė holograma yra ant šviesą atspindinčios medžiagos paviršiaus sudarytas atspindžio difrakcinių gardelių masyvas. Jos yra patrauklios tuo, kad šio tipo apsauginių ženklų masinė gamyba yra paprastesnė nei kitų tipų apsauginių ženklų. Deja, šių difrakcinių apsaugos ženklų suteikiama apsauga yra ribota, jie gali būti padirbti. Dėl šios priežasties būtina į apsauginius ženklus diegti naujas technologijas, pavyzdžiui, skaitmenines hologramas. Skaitmeninė holograma yra specialaus plokštuminio (dvimačio) atvaizdo difrakcinė gardelė, kurios plokštuminio vaizdo Furje transformacija yra holografinis atvaizdas. Šio tipo hologramos plokštuminio atvaizdo struktūra yra sugeneruojama kompiuteriu, dažniausiai – naudojant iteracinius skaičiavimo metodus. Skaitmeninių hologramų gamybos procesas yra sudėtingesnis nei taškinių hologramų, tačiau jos suteikia didesnę apsaugą nuo padirbinėjimo. Norint sukurti geresnius apsaugos nuo padirbinėjimo ženklus, reikia apjungti abiejų šių technologijų pranašumus taip, kad jie kompensuotų vienas kito trūkumus – ženklo originalas turi būti pagaminamas bei masiškai tiražuojamas ne ką sudėtingiau nei taškinė holograma, tačiau užtikrinti panašų apsaugos lygį kaip skaitmeninė holograma. Tai leistų masinėje apsauginių ženklų gamyboje naudoti geresnę apsaugą pasižyminčius, tačiau lengvai pagaminamus ženklus.

Šio magistro projekto tikslas – sukurti difrakcinį apsaugos nuo padirbinėjimo ženklą, naudojant pilnai spalvas atkuriančias taškinės hologramos ir skaitmeninės hologramos technologijas. Kad būtų pasiektas šis tikslas, buvo išsikelti uždaviniai:

1. Nustatyti tinkamas sąlygas (i) taškinių ir (ii) skaitmeninių hologramų formavimui nikelio folijos paviršiuje (i) femtosekundinės lazerinės interferencinės abliacijos bei (ii) femtosekundinės lazerinės abliacijos mikroformavimo būdais;
2. Suprojektuoti (i) taškinę ir (ii) skaitmeninę hologramas;
3. Įrašyti suprojektuotąsias (i) taškines ir (ii) skaitmenines hologramas nikelio folijos paviršiuje naudojant (i) femtosekundinę lazerinę interferencinę abliaciją ir (ii) femtosekundinę lazerinę abliaciją ir šias hologramas ištirti;
4. Apjungti abejomis technologijomis pagamintas hologramas viename apsaugos nuo padirbinėjimo ženkle.

1. Literatūros apžvalga

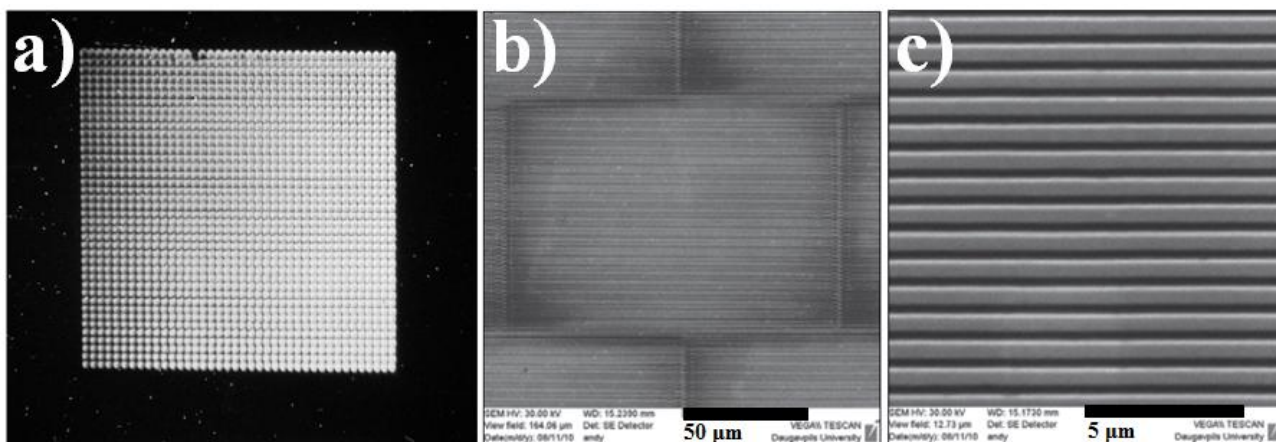
Dokumentų, pinigų, vaistų, elektronikos, prabangos ir akcizinių prekių, bei kitos rinkoje plačiai vartojamos produkcijos padirbinėjimas – viena opiausių šio amžiaus pramonės ir ekonomikos problemų. Produkcijos padirbinėjimas brangiai atsieina ne tik pramonės įmonėms [1,2], tačiau taip pat sukelia žalą ir galutiniam vartotojui [3,4]. Pasauliniai padirbinėjimo mastai vaistų rinkoje pavaizduoti 1 paveikslo a ir b dalyse. Padirbinėjimo taip pat neišvengia ir prietaisų, skirtų aptikti padirbtus vaistus bei atpažinti padirbtas pakuotes, rinkos (padirbinėjimo mastai šiose rinkose pavaizduoti 1 paveikslo c ir d dalyse) [5].



1 pav. Pasauliniai padirbinėjimo mastai: a) geografinis pasaulinės vaistų rinkos pasiskirstymas 2007 m. [2], b) geografinis padirbinėjimo atvejų pasiskirstymas pasaulinėje vaistų rinkoje 2008 m. [2], c) padirbtų cheminės sudėties analizės prietaisų pasaulinės rinkos pasiskirstymas pagal rūšį 2016 m. [5], d) padirbtų prietaisų, skirtų aptikti padirbtas pakuotes pasaulinės rinkos pasiskirstymas pagal rūšį 2016 m. [5]

Kasmet augantys klastojimo mastai reikalauja naudoti efektyvias priemones, galinčias užkirsti kelią klastočių plitimui [6]. Prekių autentifikacijai dažnai naudojami RFID (*angl.* radio frequency identification) lustai [7]. Tapatybės dokumentuose ir banknotuose, taip pat dokumentuose (pavyzdžiui, universiteto diplomuose) dažniausiai naudojamos pažangesnės technologijos. Iš pilnai išvystytų technologijų vandens ženklai, metalizuoti polimeriniai bei fluorescuojantys siūlai, lazeriu išgraviruoti mikroskopiniai reljefai, makroskopiniai medžiagos įspaudimai, termochrominio bei fluorescuojančio rašalo raštai, taip pat įvairių rūšių optiniai elementai modifikuojantys į juos kritusią šviesą, tokie kaip interferencinių filtrų dangos, šviesą poliarizuojančios dangos bei optiškai kintančio atvaizdo prietaisai: 2D, 3D ir 2D/3D klasikinės hologramos, stereogramos, pilnai spalvas perteikiančios klasikinės hologramos, pikselgramos, ekselgramos, kinogramos ir taškinės hologramos. Visų rūšių difrakciniai elementai yra suderinami su mikrolęšių ir mikroveidrodžių masyvais [8-11]. Taškinės hologramos vis plačiau pradedamos naudoti ne tik dokumentų ir valiutos apsaugai, bet ir prekių apsaugai [12].

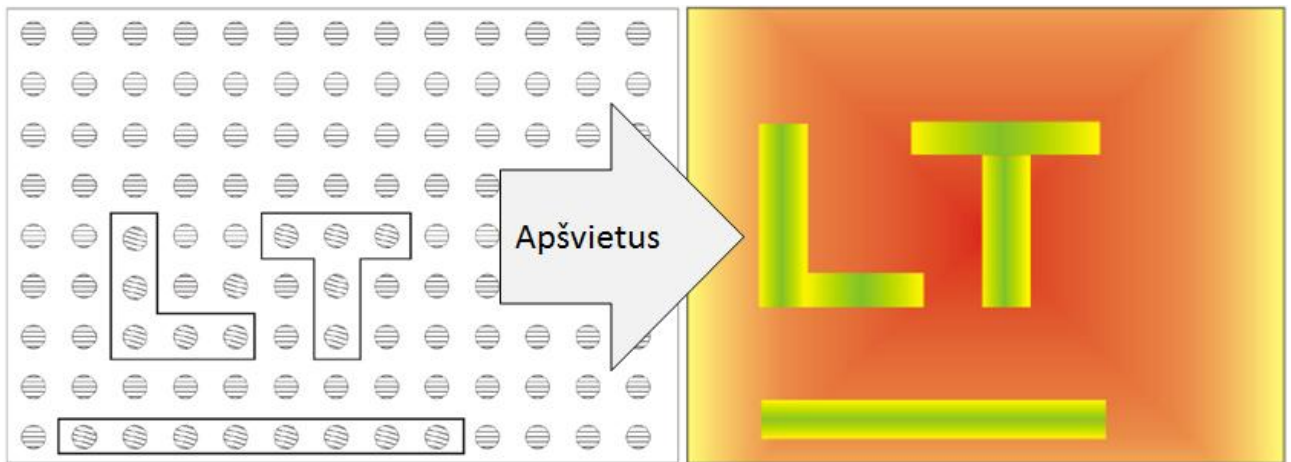
Taškinė holograma yra sudaryta iš dvimačio elementų masyvo (matricos), kurio kiekvienas elementas yra mikrometrinio arba sub-mikrometrinio [1] periodo difrakcinė gardelė arba keletas difrakcinių gardelių rinkinys (holografinis taškas) [13]. Kiekvienas masyvą sudarantis holografinis taškas yra nepriklausomas nuo kitų masyvo holografinių taškų – jis veikia kaip minimalus taškinės hologramos vienetas. Hologramą sudarančios difrakcinės gardelės turi kelis esminius parametrus – gardelės periodą, orientaciją plokštumoje bei padėtį hologramoje. Pačios srities, kurioje yra suformuota gardelė, skersmuo (apskritos srities atveju) arba kraštinės (stačiakampės srities atveju) paprastai būna nuo keliolikos iki keliasdešimties mikrometrų, o pačios sritys būna glaudžiai sudėliotos viena šalia kitos [1,9]. Taškinės hologramos struktūros sandara pavaizduota 2 paveiksle.



2 pav. Taškinės hologramos struktūra skirtingais masteliais: a) visa holograma, kurioje matomi atskiri holografiniai taškai [14], b) vienas holografinis taškas gretimų taškų apsuptyje [15], c) holografinį tašką sudarančios difrakcinės gardelės fragmentas [15]

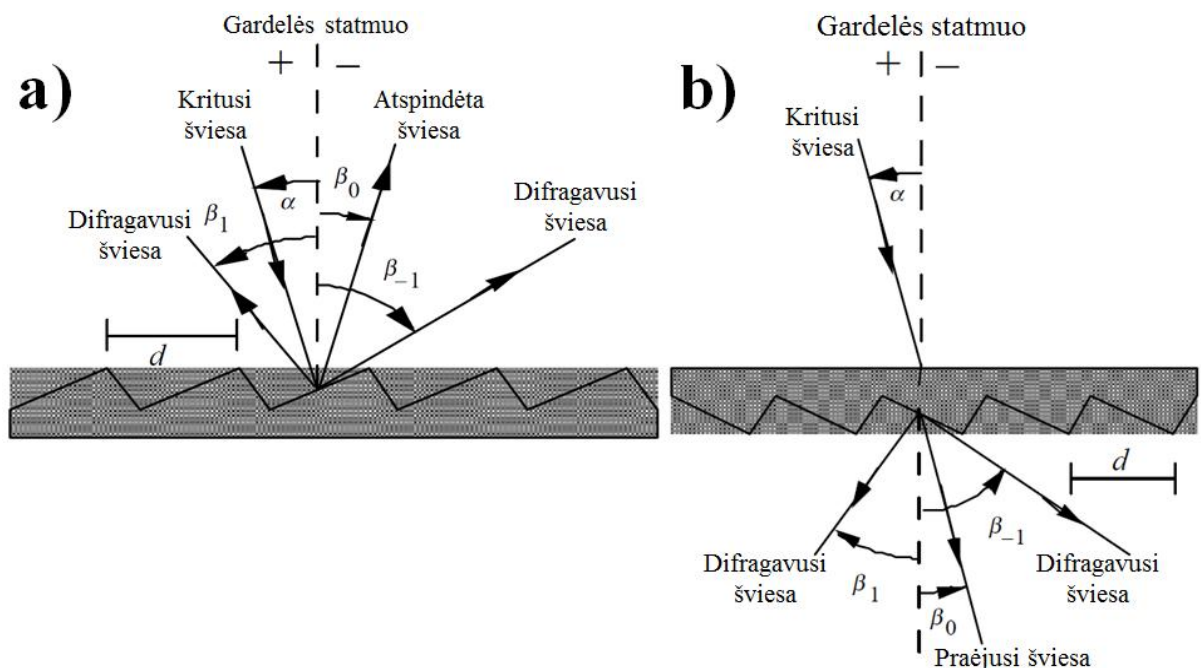
Vykstant difrakcijos reiškiniui į ženklą krentanti balta šviesa išskleidžiama į jos spektrą, kuris hologramą stebinčiam žmogui sukuria spalvos pojūtį [16]. Priklausomai nuo gardelės parametru, ji stebėtojų gali pasirodyti vis kitokia spalva – skirtingo gardelės periodo difrakcinės gardelės esančios tokioje pačioje orientacijoje sukuria skirtingas spalvas, o skirtingos gardelių orientacijos leidžia sukurti atvaizdus, kurie yra matomi skirtingais kampais. Kintant hologramos stebėtojo arba apšvietimo šaltinio padėčiai kinta holografinių taškų difraguojamas šviesos bangos ilgis kuris patenka į stebėtoją, dėl to atrodo, kad kinta jo įgyjama spalva. Šis kitimas hologramai suteikia kinetinius bei multipleksiškumo (keleto skirtingų atvaizdų vienoje hologramoje buvimo) efektus.

Žinant hologramą sudarančių holografinių taškų parametrus galima dideliu tikslumu įvertinti jos sukuriamo difrakcinio atvaizdo formą, spalvas bei vizualinius efektus [17]. Taškinės hologramos esminis veikimo principas pavaizduotas 3 paveiksle



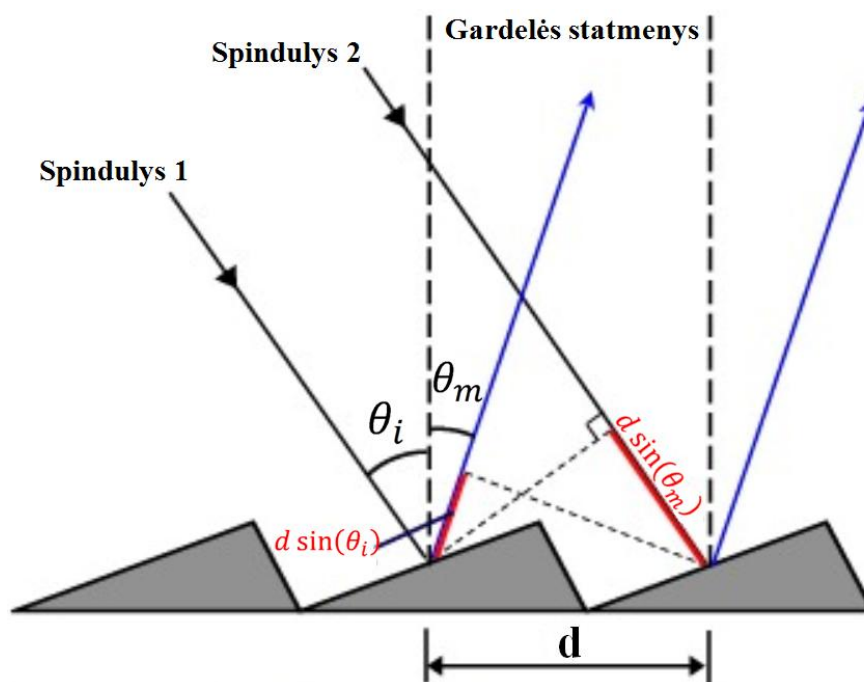
3 pav. Taškinės hologramos struktūros nehomogeniškumas tampa jos atvaizdo spalvos nehomogeniškumu ją apšvietus [18]

Kadangi mažiausias nedalomas taškinės hologramos struktūrinis vienetas yra difrakcinė gardelė, jos sandara ir veikimo principas bus aptarti plačiau. Difrakcinė gardelė yra šviesą atspindinčių (arba šviesai pralaidžių) elementų, dažniausiai linijų, vienas nuo kito erdvėje atskirtų į difraguojamos šviesos bangos ilgį panašaus dydžio tarpais, rinkinys [19]. Difrakcinė gardelė gali būti arba atspindžio, arba pralaidumo. Jei į difrakcinę gardelę krentanti šviesa ir nuo jos difragavusi šviesa yra toje pačioje paviršiaus pusėje, tuomet tai yra atspindžio difrakcinė gardelė (4 pav. a), o jei difragavusi šviesa yra priešingoje pusėje, tuomet tai yra pralaidumo difrakcinė gardelė (4 pav. b). Difrakcinės gardelės taip pat gali būti skirstomos pagal tai, kurį į jas krentančios bangos parametru moduliuoja – galimos amplitudinės ir fazinės difrakcinės gardelės. Yra ir kitokių gardelių tipų, tačiau šie tipai yra aktualiausi šiame darbe [20].



4 pav. Atspindžio (a) ir pralaidumo (b) difrakcinių gardelių palyginimas [19]

Kalbant apie taškines hologramas aktualios tik fazinės atspindžio difrakcinės gardelės, detaliai bus aptarta tik jų sandara ir veikimo principas. Toliau šiame darbe jos bus vadinamos difrakcinėmis gardelėmis arba tiesiog gardelėmis. Tai, kad difrakcinė gardelė yra fazinė, reiškia, kad ji moduliuoja šviesos fazę. Fazinė atspindžio difrakcinė gardelė yra šviesą gerai atspindinčios medžiagos paviršiuje esanti paviršiaus reljefo struktūra. Bendru atveju ši struktūra gali būti sudaryta iš griovelių, tarpusavyje atskirtų tarpais, o griovelių gyliai ir pločiai bei tarpų pločiai neprivalo būti pastovūs dydžiai [21-23], tačiau dažniausiai grioveliai būna vienodo pločio ir gylio, o juos skiriantys tarpai taip pat vienodo pločio, skiriasi tik griovelio ir tarpelio pločio santykis [17]. Priklausomai nuo to, kurioje difrakcinės gardelės vietoje buvo atspindėta šviesa, ji gali savo faze arba sutapti su, nuo lygaus paviršiaus (pavyzdžiui, gardelės keteros), atspindėta šviesa, arba būti pavėlinta faze lyginant su šviesa atspindėta nuo griovelio dugno. Difrakcinėje gardelėje fazės vėlinimą lemia griovelių gylis – šviesa keliaudama papildomą atstumą nuo griovelio viršaus iki jo dugno atsispindėdama nuo jo ir toliau keliaudama iki tarpelio keteros atsilieka atžvilgiu šviesos, kuri atsispindėjo tik nuo griovelių tarpelio (tai tolygu atsispindėjimui nuo griovelio viršaus lygio). Nuo difrakcinės gardelės atsispindinčių dviejų šviesos bangų optinių kelių skirtumas pavaizduotas 5 paveiksle.



5 pav. Nuo difrakcinės gardelės atsispindėjusių bangų optinių kelių skirtumas [24]

Pasinaudojus gardelės periodo (atstumo tarp dviejų gretimų vienodą fazės vėlinimą atitinkančių gardelės taškų) sąvoka galima įvertinti šį fazės vėlinimą formule [19]:

$$\Delta\delta = d \sin(\theta_i) + d \sin(\theta_m) \quad (1)$$

čia $\Delta\delta$ – eigos kelio skirtumas, d – gardelės periodas, θ_i – šviesos kritimo į gardelę kampas, θ_m – difrakcijos kampas. Gardelės periodas turi būti truputį didesnis nei šviesos, efektyviai difraguojančios nuo gardelės, bangos ilgis. Optiniam elektromagnetinių bangų ruožui gardelės periodas turėtų būti $\sim 1 \mu\text{m}$. Kadangi nuo gardelės atspindėtos šviesos bangos yra nevienalytės fazės, jos interferuoja tarpusavyje. Interferencijos rezultatas skirtingose erdvės vietose gali būti skirtingas – konstruktyvus arba destruktivus. Koks interferencijos rezultatas bus konkrečiame erdvės taške, priklauso nuo interferuojančių bangų ilgio ir jų eigos kelio skirtumo, užduoto

difrakcinės gardelės. Interferencijos maksimumo sąlyga gali būti tenkinama ne vieną kartą, todėl susidaro skirtingos difrakcijos eilės. Šios eilės tarpusavyje skiriasi intensyvumu – intensyviausia yra nulinė eilė (nedifragavusi šviesa), mažesnio intensyvumo – pirmoji difrakcijos eilė, dar mažesnio intensyvumo – antroji ir kitos eilės [19].

Difrakcijos maksimumų sąlygos erdvinis išsidėstymas aprašomas kūginės difrakcijos lygtimis [25]:

$$\alpha_m + \alpha_i = m \frac{\lambda}{d} \sin(\Psi) \quad (2)$$

$$\beta_m + \beta_i = -m \frac{\lambda}{d} \cos(\Psi) \quad (3)$$

čia α_m – difragavusio pluošto x koordinatė krypties kosinusų erdvėje, α_i – į gardelę kritusio pluošto x koordinatė krypties kosinusų erdvėje, β_m – difragavusio pluošto y koordinatė krypties kosinusų erdvėje, β_i – į gardelę kritusio pluošto y koordinatė krypties kosinusų erdvėje, m – difrakcinės eilės numeris (sveikas skaičius), d – gardelės periodas, λ – difraguojančios bangos ilgis, Ψ – kampas tarp y ašies krypties kosinusų erdvėje ir gardelės griovelių (6 pav. b). Šiomis lygtimis aprašoma difrakcija nuo difrakcinės gardelės, kai šviesa į ją krenta bet kokia kryptimi. Norint šviesos sklidimo kryptį aprašyti matematiškai yra patogiau naudoti vektorius – kryptines atkarpas, kurias galima išreikšti koordinatėmis. Kiekvieną vektorių galima aprašyti jo ortu – kitu, vienetinio ilgio, vektoriumi, turinčiu tą pačią kryptį. Vektoriaus ortą vietoje paties vektoriaus patogiau naudoti todėl, kad jo erdvines koordinatas Dekarto sistemoje galima susieti su kampais, kuriuos ortas sudaro su trimis Dekarto koordinačių ašimis – kiekviena orto koordinatė yra kosinusas kampo, kurį jis sudaro su tos koordinatės ašimi. Tuomet orto koordinatės vadinamos vektoriaus krypties kosinusais, vektoriaus ir jo orto sąryšis pavaizduotas 6 paveikslu a dalyje. Vektoriaus krypties kosinusai yra kosinusai kampų, kuriuos jis sudaro su Dekarto koordinačių sistemos ašimis. Krypties kosinusais aprašytas vektorius turi tą pačią kryptį, kaip ir pradinis vektorius, o jo koordinatės su pradiniu vektoriumi sieja išraiškos (4) – (6):

$$\alpha = \cos(a) = \frac{V_x}{|\vec{V}|} \quad (4)$$

$$\beta = \cos(b) = \frac{V_y}{|\vec{V}|} \quad (5)$$

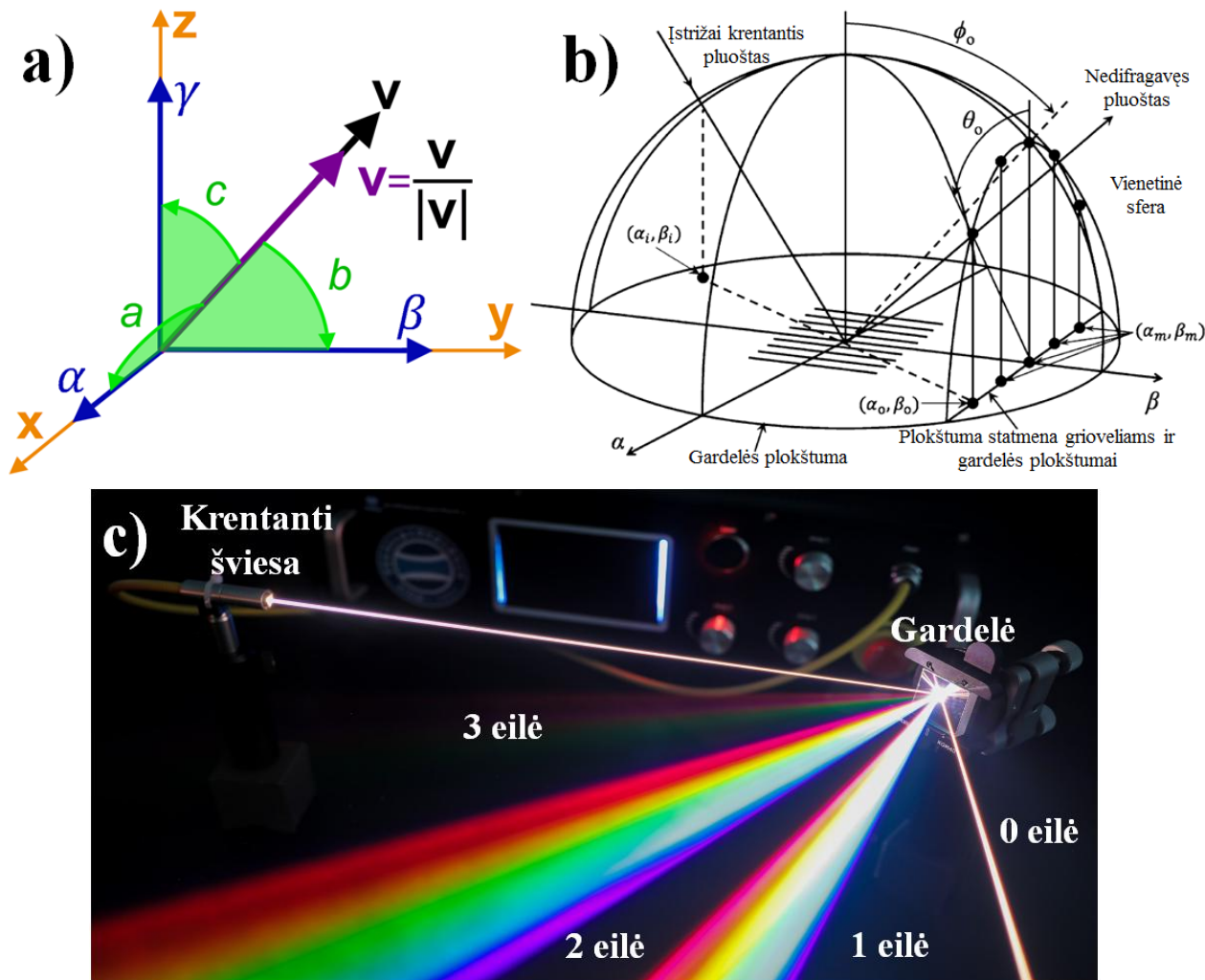
$$\gamma = \cos(c) = \frac{V_z}{|\vec{V}|} \quad (6)$$

čia $|\vec{V}|$ – vektoriaus ilgis, V_x, V_y, V_z – vektoriaus koordinatės Dekarto koordinačių sistemoje, a, b, c – vektoriaus kampai su Dekarto koordinačių ašimis, α, β, γ – vektoriaus orto koordinatės Dekarto sistemoje. Taip pat krypties kosinusais išreikštas vektorius pasižymi dar viena savybe – jo ilgis visuomet lygus vienetui:

$$\sqrt{\alpha^2 + \beta^2 + \gamma^2} = 1 \quad (7)$$

Krypties kosinusų erdvėje kiekvienas taškas nusako vektorių, tad išraiškos (2) – (3) difrakcijos kryptis aprašo kaip difrakcijos krypties vektorių koordinatės, toks difrakcijos aprašymas pavaizduotas 6 paveikslu b dalyje [26]. Dėl to, jog difrakcinės eilės numeris m yra sveikas skaičius (kinta diskretiškai), gaunama, kad ir kiekviena difrakcijos eilė sklinda diskretiškai išsidėsčiusiomis

kryptimis, dėl šios priežasties skirtingi interferencijos maksimumai (difracinių gardelių kontekste vadinami difraciniais maksimumais) stebimi skirtingose erdvės vietose. Kita vertus, šviesos bangos ilgis λ kinta tolydžiai, todėl kiekvieną difracinį maksimumą sudarantis spektras yra tolydžiai pasiskleidęs erdvėje tam tikrame erdviename kampe nors skirtingas difracijos eilės atitiktas spektrai yra pasiskirstę diskretiškai (6 paveikslas c) (1, 2, 3 eilės).



6 pav. Šviesos difracijos matematinis aprašymas: a) Dekarto erdvėje esančio vektoriaus krypties aprašymas krypties kosinusais [27], b) bendro kūginės difracijos atvejo atvaizdavimas [28], c) realios difracinės gardelės generuojamos difracinės eilės pasiskirsčiusios diskretiškai, nors kiekvieną eilę sudarantis spektras yra tolydus [29]

Kaip matoma iš lygčių (2) – (3), skirtingi bangos ilgiai nuo gardelės difraguoja kiek skirtingomis kryptimis, nors ir priklauso tam pačiam difraciniam maksimumui. Dėl šios priežasties difracinės gardelės šviesą geba išskleisti į spektrą, o ją stebėdamas žmogus mato ne baltą šviesą, o spektrines spalvas. Matematinis spalvų aprašymas vadinamas spalvų sistema. Yra daug įvairių spalvų sistemų. Šiame darbe yra aktualios žmogui matomos spalvos, todėl reikia naudoti spalvų sistemą, kuri yra sudaryta žmogaus spalvų suvokimo pagrindu. Viena iš tokių sistemų yra CIE XYZ (dar vadinama CIE 1931) spalvų sistema. Šioje spalvų sistemoje spalvų svorio funkcijos yra parinktos taip, kad būtų galima tiksliai atvaizduoti visas žmogui suvokiamas spalvas. Svarbu paminėti, kad spalvos koordinatė Y taip pat atitinka jos ryškį. Tai reiškia, kad visas CIE sistemos spalvas galima išreikšti naudojant jų šviesumą ir nuo šviesumo nepriklausančias koordinates – spalvingumo koordinates.

Spalvų koordinatės CIE XYZ sistemoje apskaičiuojamos pagal formules (8) – (10), o spalvingumo koordinatės – pagal formules (11) – (13) [16,30]:

$$X = \frac{\sum_{\lambda} \bar{x}(\lambda)R(\lambda)D65(\lambda)}{\sum_{\lambda} \bar{y}(\lambda)D65(\lambda)}; \quad (8)$$

$$Y = \frac{\sum_{\lambda} \bar{y}(\lambda)R(\lambda)D65(\lambda)}{\sum_{\lambda} \bar{y}(\lambda)D65(\lambda)}; \quad (9)$$

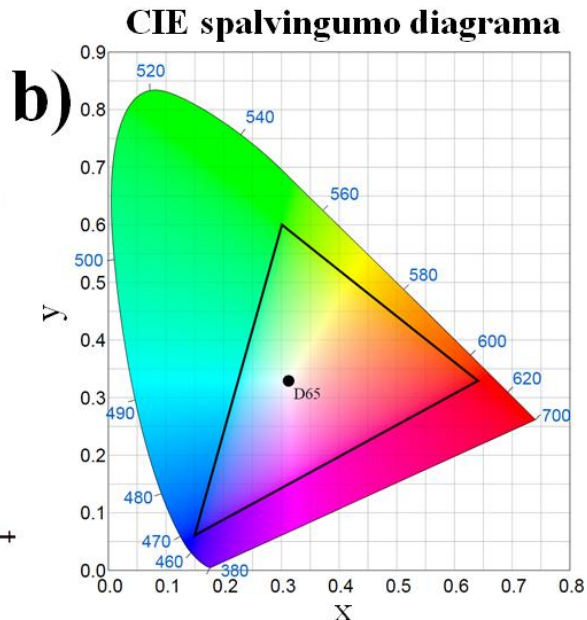
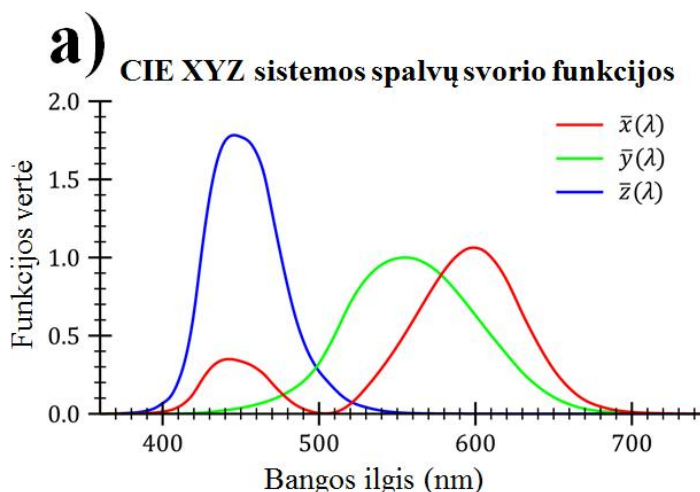
$$Z = \frac{\sum_{\lambda} \bar{z}(\lambda)R(\lambda)D65(\lambda)}{\sum_{\lambda} \bar{y}(\lambda)D65(\lambda)}; \quad (10)$$

$$x = \frac{X}{X+Y+Z}; \quad (11)$$

$$y = \frac{Y}{X+Y+Z}; \quad (12)$$

$$z = \frac{Z}{X+Y+Z}; \quad (13)$$

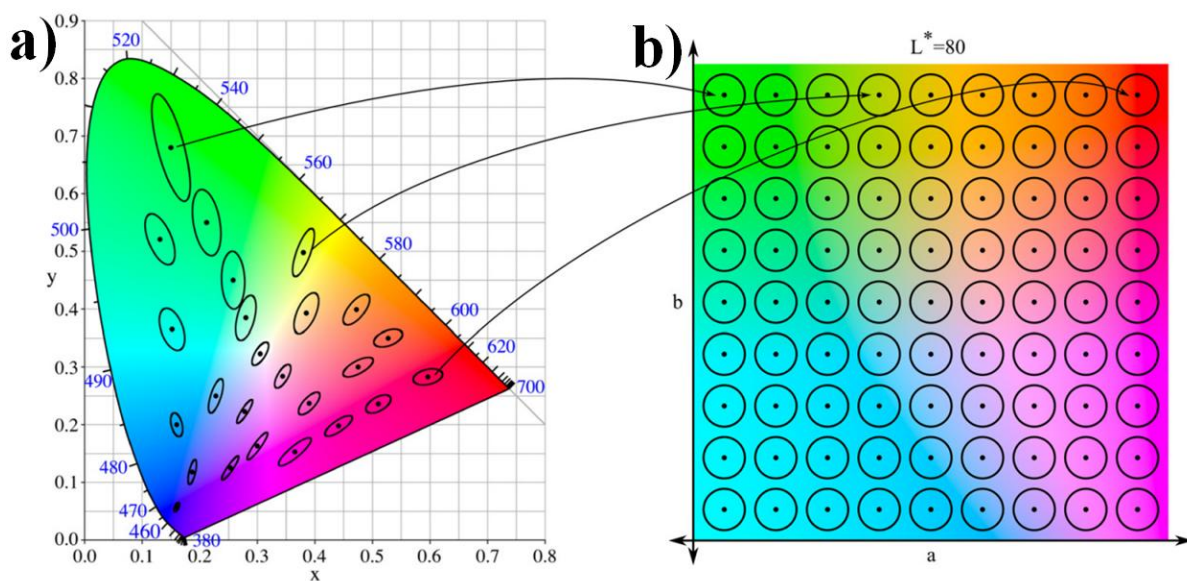
čia X, Y, Z – CIE XYZ sistemos pagrindinių spalvų koeficientai, λ – regimajam spektrui priklausančios šviesos bangos ilgis, $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ – pagrindinių spalvų svorio funkcijų vertės bangos ilgiui λ (pavaizduotos 7 paveikslo a dalyje), $D65(\lambda)$ – CIE XYZ sistemos standartinio apšvietimo šaltinio vertė bangos ilgiui λ , $R(\lambda)$ – stebėtojo matomo spektro vertė bangos ilgiui λ . x – X spalvingumo koordinatė, y – Y spalvingumo koordinatė, z – Z spalvingumo koordinatė. Kadangi jų suma lygi vienetui, žinant dvi visuomet galima apskaičiuoti ir trečiąją. Dažniausiai spalvingumo diagramai (nuo ryškio nepriklausomam spalvų atvaizdavimo būdai) sudaryti naudojamos tik x ir y spalvingumo koordinatės. CIE XYZ spalvingumo diagrama pavaizduota 7 paveikslo b dalyje. Joje telpa visos spalvos, kokias tik žmogui įmanoma pamatyti [16,30].



7 pav. CIE XYZ spalvų sistemos esminiai komponentai: a) CIE XYZ sistemos pagrindinių spalvų svorių funkcijos [31], b) CIE XYZ sistemos spalvingumo diagrama su pavaizduota sRGB sritimi ir spektrinių spalvų koordinatėmis bei baltos spalvos koordinate (D65) [32]

CIE XYZ spalvų sistema buvo pirmasis sėkmingas bandymas aprašyti visas žmogui matomas spalvas matematiškai, tačiau nėra nei vienintelis, nei geriausias. Tai ypač pastebima analizuojant spalvų skirtumus – vieną iš nedaugelio objektyviai nustatomų spalvų charakteristikų [17]. Bene

svarbiausias spalvų skirtumo parametras yra vos pastebimas skirtumas – minimalus skirtumas tarp dviejų spalvų, kurį dar gali išskirti bent pusė eksperimento dalyvių, jo egzistavimas nustatytas eksperimentinės psichologijos metodais. Kadangi žmogaus jausmų yra netobulos, šis dydis nėra nulinis – jis nustato žmogaus jautrumą ir nulemia tai, kad ne visos spalvingumo diagramoje egzistuojančios spalvos yra išskiriamos [33,34]. Vienas iš pirmųjų tyrimų skirtų įvertinti vos pastebimą skirtumą spalvai naudojo CIE XYZ spalvų sistemą. Tyrimo metu buvo tirtas žmogaus jautrumas 25 skirtingoms spalvoms. Atlikus tyrimą pastebėta, kad CIE XYZ spalvingumo diagramoje atidėtas tiesinis atstumas, atitinkantis vos pastebimą skirtumą su gretimomis spalvomis visuomet sudaro elipsę (dabar ji vadinama Makadamo (*angl.* MacAdam) elipse). Susistemintus tyrimo duomenis buvo nustatyta, kad CIE XYZ sistema (o kartu – ir šios sistemos spalvingumo diagrama) yra visiškai nehomogeniška ir anizotropinė – aplink skirtingose diagramos vietose buvusias spalvas atidėtos Makadamo elipsės viena nuo kitos skyrėsi abiejų savo pusašių vertėmis bei pačių elipsių orientacija (8 pav. a). Dėl šios priežasties CIE XYZ spalvų sistema buvo visiškai netinkama vertinti dviejų spalvų skirtumams – reikėjo sukurti tam tikslui tinkamesnę sistemą [35]. Bene sėkmingiausias ir šiandien plačiausiai naudojamas bandymas buvo CIE LAB (dar vadinama CIE 1976) spalvų sistema. Ji buvo sukurta transformuojant CIE XYZ sistemoje apskaičiuotas spalvų koordinates taip, kad būtų panaikintas jos nehomogeniškumas ir anizotropija (įvairių dydžių bei orientacijų elipsės taptų vienodo diametro apskritimais) (8 pav. b).



8 pav. Makadamo elipsės (padidintos 10 kartų) pavaizduotos a) CIE XYZ spalvingumo diagramoje, ir b) CIE LAB spalvingumo diagramoje, kuomet šviesio vertė lygi 80 [36]

CIE LAB spalvų sistemoje spalvos aprašomos trimis koordinatėmis – L , a ir b . L aprašo spalvos ryškį (funkcija analogiška CIE XYZ Y koordinatei), o a ir b aprašo jos spalvingumą (atlieka panašią funkciją kaip x ir y). Spalvų koordinatėms perskaičiuoti iš CIE XYZ sistemos į CIE LAB sistemą naudojamos išraiškos (14) – (18) [16]:

$$L = 116f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - 16 \quad (14)$$

$$a = 500\left(f\left(\frac{X}{X_n}\right) - f\left(\frac{Y}{Y_n}\right)\right) \quad (15)$$

$$b = 200 \left(f \left(\frac{Y}{Y_n} \right) - f \left(\frac{Z}{Z_n} \right) \right) \quad (16)$$

$$f(t) = \begin{cases} \sqrt[3]{t} & \text{jei } t > \delta^3 \\ \frac{t}{3x^2} + \frac{4}{29} & \text{kitais atvejais} \end{cases} \quad (17)$$

$$\delta = \frac{6}{29} \quad (18)$$

čia X, Y, Z – CIE XYZ sistemos pagrindinių spalvų koeficientai, L – CIE LAB sistemos ryškio koordinatė, a ir b – CIE LAB spalvingumo koordinatės, $X_n = 95,0489$, $Y_n = 100$, $Z_n = 108,5188$, t – funkcijos kintamasis, δ – konstanta. Kadangi CIE LAB sistema yra homogeniška ir izotropinė, skirtumas tarp dviejų spalvų (šioje sistemoje vadinamas ΔE) yra apskaičiuojamas kaip visų trijų spalvos koordinačių tarpusavio euklidinis atstumas (19) [16]:

$$\Delta E = \sqrt{(L_2 - L_1)^2 + (a_2 - a_1)^2 + (b_2 - b_1)^2} \quad (19)$$

Čia indeksai 1 ir 2 atitinka spalvų numerius, ΔE - spalvų skirtumas. Yra nustatyta, kad žmogui vos pastebimas spalvų skirtumas CIE LAB sistemoje atitinka ΔE vertę, lygią maždaug 2,3 [37].

Kompiuterių monitoriuose bei televizorių ekranuose spalvoms atvaizduoti naudojama RGB (angliškų žodžių „red“, „green“, „blue“ pirmosios raidės), kurios spalvinėmis koordinatėmis išreikštas spalvas gali atvaizduoti ekranas. sRGB (standartinė RGB) spalvų sistema dažniausiai naudojama kompiuterių ekranuose, todėl pasirinkta ši sistema. Šioje sistemoje visos spalvos yra aprašomos per tris pagrindines spalvas (raudoną, žalią ir mėlyną), kurias gali atkurti ekranai. Norint kompiuterio ekrane pavaizduoti spalvas aprašomas CIE XYZ spalvų sistemoje, jas reikia konvertuoti į sRGB spalvų sistemos spalvas. Yra nustatyta, kad sRGB sistema nėra tokia plati kaip CIE XYZ sistema (spalvingumo diagramoje užima tik tam tikrą sritį – pavaizduotą juodu trikampių 7 pav. b), todėl naudojantis ja neįmanoma tiksliai atvaizduoti visų spalvų, kurios yra aprašomos CIE XYZ spalvingumo diagramoje. Tai reiškia, kad spalvos diagramoje esančios už sRGB srities ribų nėra atvaizduojamos tiksliai. Tai galioja net tik apskaičiuotiems hologramų difraccinių atvaizdų modeliams, tačiau taip pat ir realių hologramų nuotraukoms. Dėl šios priežasties tiksliai spalvą, esančią už sRGB srities galima įvertinti tik žinant jos spektrą (teoriniam hologramos atvaizdo modeliui spalvos spektrą galima apskaičiuoti, o realiai hologramai jį galima išmatuoti spektrometru [19]). Spalvos iš CIE XYZ sistemos į sRGB sistemą buvo konvertuojamos tiesiškai (20 išraiška) [16]:

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3,240 & -1,5372 & -0,4986 \\ -0,9689 & 1,8758 & 0,0415 \\ 0,0557 & -0,2040 & 1,0570 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}; \quad (20)$$

čia R, G, B – spalvos koordinatės sRGB sistemoje, X, Y, Z - trijų spalvų koeficientai CIE sistemoje.

Dėl to, kad difraccinės gardelės šviesą išskleidžia į spektrą, hologramoje paprastai matomos tik spektrinės (didelio grynumo, *angl.* chroma) spalvos (esančios arti lanko su pažymėtais bangos ilgiais 8 pav. a), todėl vienoje hologramoje vienu metu esančių spalvų kiekis yra ribotas. Pilnai spalvą perteikianti taškinė holograma greta vizualinių efektų leistų atkurti tikroviškas (ne spektrines) spalvas [38]. Tokios hologramos kiekvienas holografinis taškas yra sudarytas iš keleto

skirtingais parametrais pasižyminčių difrakcinių gardelių, nuo kurių kiekvienos stebėtojo link difraguoja skirtinga šviesos spektro dalis, tokiu būdu užtikrinamas keletas spalvų maišymas į vieną nespektrinę spalvą. Tokiu būdu galima sukurti beveik neribotą kiekį spalvų, o tokios taškinės hologramos yra dar sunkiau padirbamos nei įprastinės. Pilnai spalvas perteikiančios taškinės hologramos idėja nėra visškai nauja idėja, tačiau pirmųjų publikacijų autoriai neatskleidžia būdo, kuriuo yra parenkami hologramos parametrai siekiant gauti norimą jos atvaizdą (9 pav.), todėl šis tyrimų objektas nusipelnė papildomo tyrinėjimo šiame darbe [13,38].



9 pav. Pilnai spalvas perteikianti taškinė holograma [38]

Taškinės hologramos tapo populiaria apsaugos nuo klastojimo priemone dėl keleto priežasčių. Viena iš jų – šio tipo hologramas sudėtinga padirbti, kadangi hologramos projektavimas reikalauja specifinių žinių [1,17,39]. Taip pat, taškinės hologramos technologija yra suderinama su masine gamyba, tai leidžia atpiginti šiuos apsaugos ženklus ir padaryti juos prieinamus prekių gamintojams, siekiantiems nuo padirbinėjimo apsaugoti didelį produkcijos kiekį. Kadangi taškinės hologramos yra sudarytos iš difrakcinių gardelių, norint jas pagaminti galima naudoti tą pačią technologinę seką kaip ir difrakcinėms gardelėms. Taškinės hologramos pramoninis pagaminimo procesas susideda iš trijų etapų – hologramos originalo suformavimo, spaudo užauginimo ir jo antrinimo [40]. Pirmasis žingsnis – hologramos originalo suformavimas – gali būti atliekamas naudojant įvairių rūšių litografinius metodus – elektronų pluošto litografiją [41], nanoįspaudimo litografiją [42] bei interferencinę litografiją [10]. Litografija – technologinis procesas, kurio paskirtis yra kieto kūno (padėklo) paviršiuje suformuoti reljefinį piešinį [43,44]. Po litografijos padėklo paviršius su jame suformuotu hologramos reljefu yra vadinamas hologramos originalu. Antrasis žingsnis – spaudo užauginimas – atliekamas ant hologramos originalo elektrochemiškai užauginant mikrometrinio storio nikelio sluoksnį. Kadangi sluoksnis auga ant mikrostruktūruoto paviršiaus (hologramos originalo), ji įgyja mikroreljefą, kuris yra originalo reljefo negatyvas [45]. Vėliau sluoksnis atskiriamas nuo originalo, nuo tuomet jis vadinamas folija. Nikelis apsaugos nuo padirbinėjimo ženklų pramonėje yra mėgstamas naudoti todėl, kad tai yra kietas, dilimui atsparus, feromagnetinėmis savybėmis pasižymintis bei elektros srovei laidus metalas. Visos šios savybės, kartu su faktu, jog nikelio folijos reljefas yra hologramos originalo negatyvas, yra svarbios trečiajame žingsnyje – hologramos antrinėje terminio įspaudimo būdu. Procesu metu

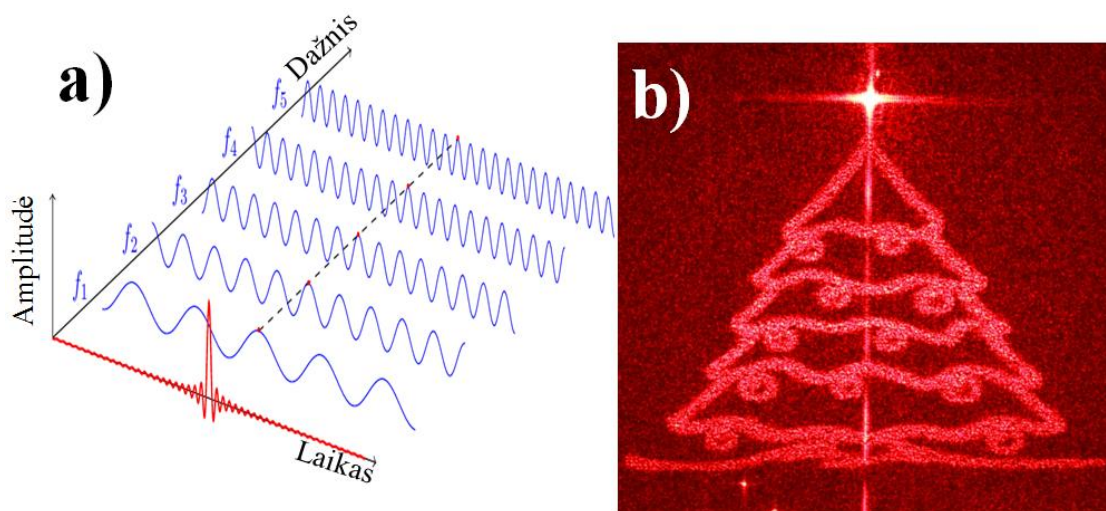
mikrostruktūruota nikelio folija yra naudojama kaip spaudas – ji įtvirtinama ant magnetinio volo (nikelio feromagnetizmo savybė leidžia folijai idealiai prie jo priglusti), tuomet per ją paleidžiama tekėti elektros srovė (nikelio elektrinio laidumo svarba) ir juo voluojama (vykdomas ruloninis spausdinimas). Dėl srovės tekėjimo folija įkaista, tuomet ja voluojamas metalizuoto plastiko (jo atspindžio koeficientas didesnis), kuriame bus antrinama holograma, paviršius. Antrinimui dažniausiai naudojamas polimeras polietileno tereftalatas (PET). Kadagi spaudo reljefas yra originalo negatyvas, į polimerą įspaudžiamas originalo reljefas. Dėl nikelio atsparumo dilimui tą patį spaudą galima naudoti daug kartų. Būtent terminio įspaudimo technologija atveria kelių taškinių hologramų masinei gamybai [46-49].

Kita vertus, taškinės hologramos turi keletą trūkumų. Bene pagrindiniai trūkumai yra technologiniai – brangi įranga [50], taip pat ilga proceso trukmė nuo hologramos struktūros suprojektavimo iki hologramos replikavimo, tačiau yra bandymų ją sutrumpinti nauojant išankstinį hologramos difrakcinio atvaizdo modeliavimą [17,51]. Dėl to, kad šių ženklų išvaizda priklauso nuo jų apšvietimo bei stebėjimo sąlygų [17], galutiniam vartotojui gali reikėti specialios techninės arba programinės įrangos norint nustatyti ar apsauginis ženklas nėra padirbtas [52,53]. Dėl šių trūkumų taškinės hologramos nėra pati patogiausia apsaugos nuo padirbinėjimo priemonė, todėl būtina kurti pažangesnes apsaugos nuo padirbinėjimo technologijas.

Yra sukurta daug inovatyvių apsaugos nuo padirbinėjimo priemonių, tokių kaip atspindimos šviesos dažnį keičiančios dangos [54], Muaro efektą naudojančios apsaugos ženklai [55], metamedžiagų hologramos [56-58], fiziškai neatkartojami paviršiaus reljefai [59,60], struktūros pagamintos iš fotoninių kristalų [61] bei skaitmeninės hologramos [62].

Kuomet difrakcinę gardelę pasiekia plokščiosios šviesos bangos (pavyzdžiui, gardelę apšviečiantis šviesos šaltinis yra toli nuo jos) ir gardelės sukeltos difrakcijos rezultatas stebimas atstumu, daug didesniu nei difrakciją sukeliančio elemento matmenys (*angl.* far-field), tuomet sakoma, kad vyksta Fraunhoferio difrakcija [63,64]. Naudojant Fraunhoferio difrakcijos matematinį formalizmą galima įrodyti, kad šios difrakcijos rūšies rezultatas nuo difrakcinės gardelės difraguojančios šviesos Furje transformacija [65]. Kitaip tariant, difrakcinė gardelė yra optinis prietaisas fiziškai vykdamas Furje transformaciją elektromagnetinėms bangoms. Furje transformacija yra matematinė operacija, kuri periodinį signalą (funkciją, priklausančią nuo laiko) paverčia jo dažnių spektru (nuo dažnio priklausančia funkcija) [66]. Kitaip tariant, difrakcinė gardelė išskleidžia polichromatinę šviesą į jos spektrą (6 pav. c, lygtys (2 – (3))), ir netgi ne vieną kartą (dėl to, kad difrakcijos maksimumo sąlyga gali būti tenkinama keletą kartų, galima gauti keletą difrakcijos eilių). Jeigu difrakcinė gardelė apšviečiama monochromatine (vieno bangos ilgio) spinduliuote, tuomet šviesa nėra skleidžiama į spektrą, tėra gaunami kiekvieną difrakcijos eilę atitinkantys interferencijos maksimumai. Šie maksimumai turi ryšį su pačios gardelės plokštuminiu vaizdu (vaizdu, matomu žvelgiant statmenai į gardelės plokštumą) – jų intensyvumo pasiskirstymo profilis yra difrakcinės gardelės plokštuminio vaizdo Furje transformacija [65]. Jos esmė yra gerai atskleista 10 paveikslo a dalyje – iš harmoninių signalų sudarytas kompozicinis signalas Furje transformacijos yra paverčiamas jį sudarančių harmoninių signalų dažnių (su atitinkamais intensyvumais) spektru. Furje transformaciją galima atlikti ne tik vienmatei, bet ir dvimatei funkcijai. Paprastos difrakcinės gardelės plokštuminis vaizdas visuomet yra dvimatis, tačiau jo Furje transformacija yra vienmatis vaizdas (spektras) dėl to, kad gardelės vaizdas vienoje ašyje nekinta. Jei gardelės plokštuminis vaizdas kistų abejose ašyse, jo Furje transformacija būtų dvimatis vaizdas. Skaitmeninė holograma (*angl.* Computer Generated Hologram) yra difrakcinė gardelė, kurios plokštuminis vaizdas yra toks, kurio Furje

transformacija yra koks nors prasmingas vaizdas. Skaitmeninė holograma veikia lygiai taip pat kaip ir paprasta difrakcinė gardelė, tačiau kiekvienas jos difrakcinis maksimumas turi skaitmeninės hologramos plokštuminio vaizdo užduotą pavidalą stebėjimo plokštumoje. Vienas iš jų geriausiai žinomų taikymo pavyzdžių – žaislinių lazerinių šviestukų antgaliai, kurie lazerio pluoštui suteikia geometrinės figūros pavidalą (10 pav. b) [67].

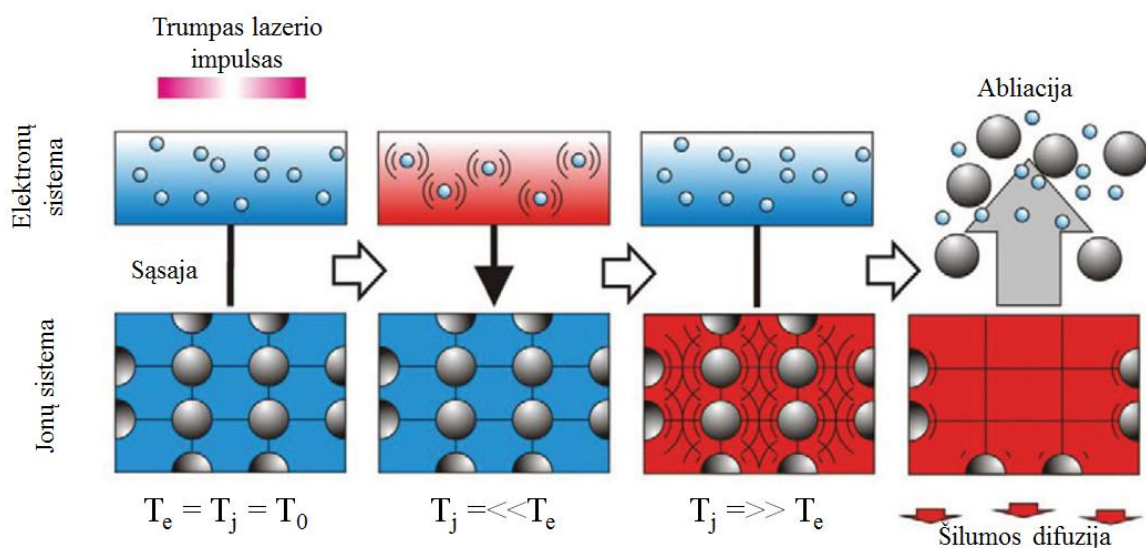


10 pav. Skaitmeninės hologramos veikimo principo esmė: a) Furje transformacijos veikimo principas [68], b) skaitmeninės hologramos difrakcinis atvaizdas – jos plokštuminio atvaizdo dvimatė Furje transformacija [69]

Norint, kad skaitmeninė holograma veiktų, reikia teisingai parinkti jos plokštuminį vaizdą – jo Furje transformacija turi būti siekiamas gauti hologramos difrakcinis atvaizdas. Yra daugelis būdų apskaičiuoti skaitmeninės hologramos struktūrą – aplinkinės fazės algoritmas (*angl.* detour phase algorithm), kinoformos metodas (*angl.* kinoform method), bangos frontą įrašančios plokštumos metodas (*angl.* wavefront recording plane method), taip pat visi algoritmai priklausantys iteracinės Furje transformacijos algoritmų grupei (*angl.* iterative Fourier transform algorithms) prisitaikantis – pridedantis algoritmas (*angl.* addaptive – additive algorithm), amplitudės kitimo skirtinguose regionuose algoritmas (*angl.* mixed region amplitude freedom algorithm) bei Gerchbergo – Sakstono algoritmas (*angl.* Gerchberg – Saxton algorithm) [70-73].

Skaitmeninės hologramos gali būti fiziškai pagaminamos daugeliu būdų, pavyzdžiui, fotolitografija [74] arba elektronine litografija [75], panašiai kaip ir taškinės hologramos originalas. Tačiau yra dar vienas mikroformavimo metodas, kuris tinka gaminti ir taškinėms hologramoms, ir skaitmeninėms hologramoms – lazerinė abliacija [76,77]. Lazerinė abliacija yra staigus paviršinio medžiagos sluoksnio išgaravimas dėl intensyvios lazerio spinduliuotės poveikio [78]. Naudojant šį metodą nėra būtina formuoti taškinės hologramos originalą ir ant jo elektrochemiškai auginti nikelio spaudą, kadangi galima tiesiogiai struktūruoti nikelio foliją ir ją naudoti kaip spaudą masiniam taškinės hologramos replikavimui iškart. Lygiai taip pat masiniam replikavimui galima paruošti ir skaitmeninės hologramos spaudą. Tai reikia, kad naudojant lazerinės abliacijos technologiją galima susieti abiejų šių tipų hologramų gamybą – ant tos pačios nikelio folijos suformuoti tiek taškinę hologramą, tiek skaitmeninę hologramą ir paskui jas replikuoti iš vieno spaudo. Dėl šio privalumo lazerinės abliacijos metodas ir yra naudojamas abiejų tipų hologramų mikroformavimui. Lazerinės abliacijos fizikinis principas aptariamas šioje darbo dalyje, o šiame darbe naudotas techninis jos įgyvendinimas – poskyryje „2.2 Eksperimentiniai metodai“.

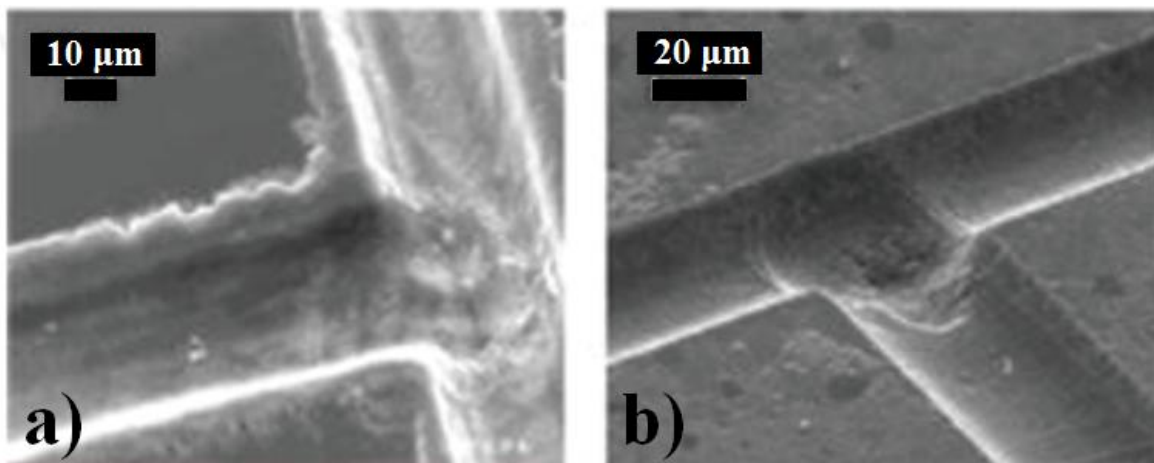
Lazerinė abliacija galima apdirbti daugumą medžiagų. Kadangi šiame darbe skaitmeninė holograma buvo formuojama metalo (nikelio) folijoje, toliau detaliau aptariamas lazerinės abliacijos mechanizmas metaluose (11 pav.). Kaip žinoma, šviesai (įskaitant lazerio spinduliuotę) sąveikaujant su kito kūno paviršiumi dalis šviesos yra atspindima, dalis – praleidžiama ir dalis – sugerama. Medžiagos sugertis apsprendžia kokia dalis krentančio šviesos pluošto energijos bus perduodama medžiagai. Metalai (pavyzdžiui, nikelis) pasižymi didelėmis elektromagnetinių bangų sugerties koeficiento vertėmis regimajame ir artimame infraraudonajame bangų ruožuose, todėl norint medžiagai efektyviai perduoti energiją reikia ją apšviesti šviesa iš to bangos ilgių intervalo. Metaluose elektromagnetinių bangų sugertį sukelia laisvieji elektronai. Dėl to, kad jie nėra susieti su jokių konkrečių atomu, jiems elektromagnetinė banga gali lengvai perduoti savo energiją. Elektronai, įgiję papildomos energijos iš elektromagnetinės bangos (sužadintieji elektronai) gali keistis energija su greta esančiais nesužadintais elektronais, taip sukurdami didesnę kiekį elektronų, kurie yra didesnės energijos negu nesužadintieji medžiagos elektronai, tačiau mažesnės energijos, negu į medžiagą kritusios spinduliuotės proceso pradžioje sužadinti elektronai. Kadangi laisvieji elektronai yra apsupti kristalinės gardelės jonų, susidūrimų su jonais metu jie gardelei perduoda iš elektromagnetinės bangos sugertą energiją [79]. Naudojant pakankamą galią turintį lazerio pluoštą dėl smarkios metalų sugerties paviršinių medžiagos sluoksnių galima įkaitinti iki staigaus išgaravimo. Toks staigus lazerio spinduliuotės indukuotas išgaravimas iš kieto būvio ir yra lazerinė abliacija.



11 pav. Lazerinės abliacijos fizikinis veikimo principas atominiame lygmenyje. T_0 – pradinė elektronų ir jonų temperatūra, T_i - jonų temperatūra abliacijos metu, T_e – elektronų temperatūra abliacijos metu [80]

Kadangi visos medžiagos pasižymi šiluminiu laidumu, abliacijos metu medžiagai lokaliai suteikiama energija neišvengiamai išplinta toliau negu abliacijos sritis. Tai gali sukelti aplinkinės medžiagos išsilydymą ir prastesnę mikrostruktūros raišką, mikroskopinius įtrūkius ir kt. Geriausia lazerinei abliacijai yra naudoti femtosekundinius lazerius, kadangi jų impulsai perduoda energiją medžiagai greičiau negu gali pasireikšti šilumos difuzija (daugelyje medžiagų tai yra ~10 ps eilės dydis). Jei lazerio impulso sukeltas medžiagos garavimas baigiasi anksčiau negu gali prasidėti šilumos difuzija į aplinkinę medžiagą, šiluma nebus perduodama toliau nuo apšviesto regiono esančiai medžiagai. Jei lazerio impulsas turi pakankamai energijos, kad medžiagos tame tūryje temperatūrą pakeltų iki lydymosi temperatūros, išlydytų, tada dar pakeltų iki virimo temperatūros ir išgarintų – visa tai per kelias pikosekundes – medžiaga patirs spartų perėjimą iš kietos fazės į dujinę

– įvyks lazerinė abliacija, aplink abliacijos sritį nesusidarys reikšmingų matmenų išlydytos medžiagos sritis. Tai reiškia, kad norint atlikti aukštos raiškos paviršiaus mikroformavimą lazerinės abliacijos būdu reikia naudoti mažiausios trukmės impulsus. Šiuo metu trumpiausius impulsus užtikrina komerciškai prieinami femtosekundiniai lazeriai [80-83]. Lazerinės abliacijos, atliktos skirtingos trukmės impulsais, palyginimas pateiktas 12 paveiksle.



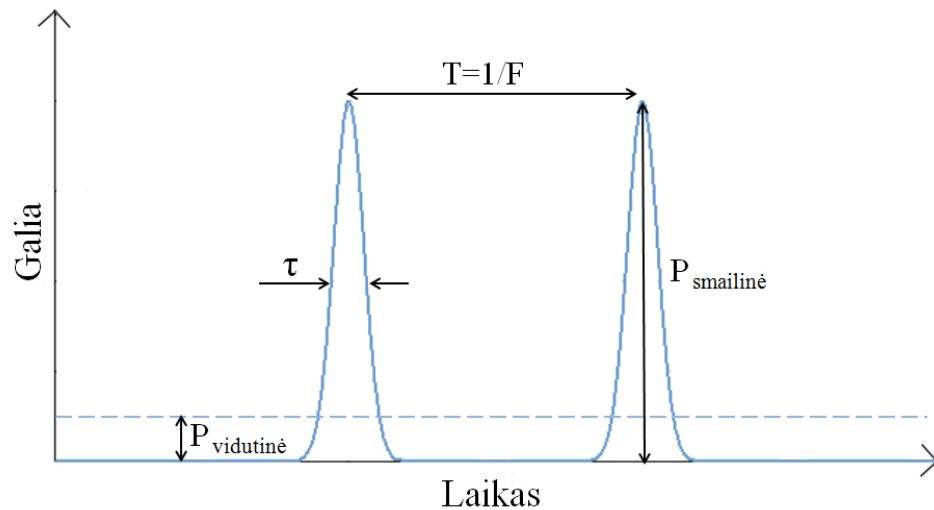
12 pav. Lazerinės abliacijos būdu suformuoti pažeidimai medžiagos paviršiuje kuomet abliacijai naudojamas a) nanosekundinis lazeris ir b) femtosekundinis lazeris [84]

Yra pastebėta, kad lazerinė abliacija pradeda vykti tik tada, kai medžiagos paviršius veikiančios lazerio spinduliuotės energijos tankis (energijos kiekis, tenkantis vienetiniam abliuojamos medžiagos plotui, tipiška matuojamas mJ/cm^2) viršija tam tikrą kritinę ribą – abliacijos slenkstį. Lazerinės abliacijos slenkstis yra svarbi medžiagos charakteristika parenkant lazerio pluošto galią, su kuria bus apdirbamas paviršius. Abliacijos slenkstis nustatomas tiriant daugelį abliacijos būdu suformuotų kraterių su skirtingos galios impulsais. Atlikus abliaciją yra išmatuojami kraterių diametrai. Naudojant (21) formulę sudaromas kraterio diametro priklausomybės nuo pluošto energijos tankio:

$$D^2 = 2\omega^2 \ln\left(\frac{\Phi}{\Phi_0}\right) \quad (21)$$

čia D – abliacijos kraterio diametras, ω – pluošto diametras, Φ – lazerio pluošto energijos tankis apdirbamo paviršiaus plokštumoje, Φ_0 – lazerio pluošto energijos tankis apdirbamo paviršiaus plokštumoje, kuriai esant pradeda vykti abliacija (abliacijos slenkstis). Realiai abliacijos slenkstis nėra nustatomas pagal (21) formulę, o tik pagal bendrinę priklausomybę nuo paviršinio energijos tankio. Taip yra dėl to, kad dėl neidealaus medžiagos homogeniškumo, lokalių paviršiaus reljefo pokyčių bei kitų neprognozuojamų veiksnių abliacijos kraterių diametrai paklūsta (1) lygčiai tik apytiksliai. Ašyse $D^2 - \ln(\Phi)$ atidėti taškai yra tinkinami tiese pagal mažiausių kvadratų metodą ir randama ties kokia verte tiesė kerta $\ln(\Phi_0)$ ašį. Ta vertė yra $\ln(\Phi_0)$ – abliacijos slenkščio logaritmas [85]. Šis lazerinės abliacijos slenkščio nustatymo metodas vadinamas D kvadrato metodu.

Abi iki šiol minėtos sąlygos (trumpa abliuojančio impulso trukmė bei didelė smailinė galia), yra išpildomos naudojant ultratrumpų impulsų femtosekundinius lazerius. Jie generuoja τ laiko trukmės impulsus, pasikartojančius periodu T kuomet generuojamų impulsų trukmė τ yra daug mažesnė nei impulsų pasikartojimo periodas T (13 paveikslas):



13 pav. Lazero impulsų sekos parametrai [86]

Pagal (22) formulę tai reiškia, kad impulso smailinė galia $P_{smailinė}$ yra daug didesnė negu vidutinė galia $P_{vidutinė}$ [87]:

$$P_{smailinė} = P_{vidutinė} \frac{T}{\tau} \quad (22)$$

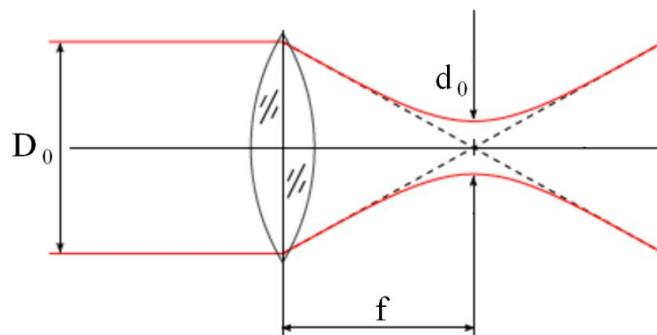
Pavyzdžiui, 4W vidutinės galios impulsinius lazeris, kurio vieno impulso galia yra 0,2 mJ o trukmė 230 fs, turi 1 GW smailinę galią. Visą vieno impulso nešamą energiją E su impulsinio pluošto vidutine galia ir impulsų pasikartojimo dažniu F sieja (23) formulė [87]:

$$E = \frac{P_{vidutinė}}{F} \quad (23)$$

Tam, kad būtų pasiekiamas dar didesnis galios (o kartu ir energijos) tankis, lęšiu (arba objektyvu) fokusuojant šviesą galima sumažinti pluošto diametrą [88]:

$$d_0 = M^2 \frac{4\lambda f}{\pi D_0} \quad (24)$$

čia d_0 – fokusuoto pluošto diametras, M^2 – pluošto kokybė, λ – bangos ilgis, f – židinio nuotolis, D_0 – pluošto diametras prieš fokusavimą (14 paveikslas).

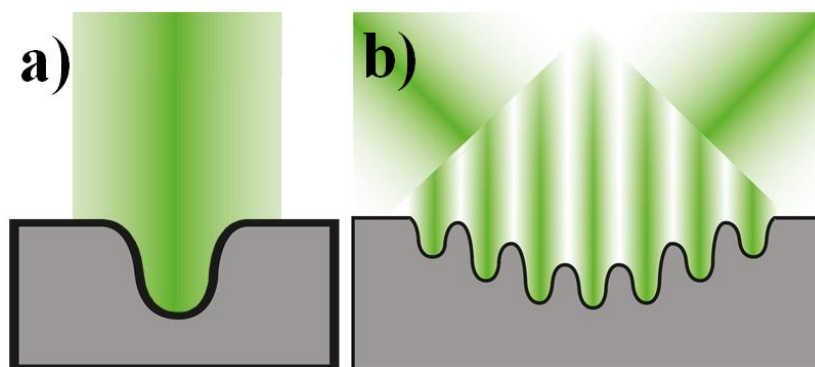


14 pav. Gauso pluošto fokusavimas lęšiu [89]

Tuomet paviršinis energijos tankis, naudojamas (21) lygtyje yra:

$$\Phi = \frac{4E}{\pi d_0^2} \quad (25)$$

Femtosekundinės lazerinės abliacijos būdu medžiagos paviršiuje galima formuoti ne tik kraterius, bet ir difrakcines gardeles. Tam reikia naudoti ne vieną impulsinį pluoštą (15 pav. a), o dviejų impulsinių pluoštų (gautų, pavyzdžiui, naudojant lazerio pluošto daliklį) interferenciją (15 pav. b) [17].



15 pav. Medžiagos mikrostruktūravimas trumpų impulsų lazerinės abliacijos būdu naudojant a) vieną lazerio pluoštą, b) dviejų lazerio pluoštų interferenciją

Kadangi skaitmeninė holograma iš esmės yra difrakcinė gardelė, o taškinė holograma yra sudaryta iš daugelio difrakcinių gardelių, tai abi šias hologramas galima apibūdinti difrakcinės gardelės savybėmis. Difrakcines gardeles galima apibūdinti daugeliu svarbių charakteristikų, bene svarbiausia jų – difrakcijos efektyvumas, dar vadinamas difrakcijos našumu. Išskiriamos dvi našumo rūšys – absoliutusias ir santykinis. Realiai stebimos difragavusios šviesos intensyvumą nusako absoliutusias našumas. Absoliutusias difrakcijos našumas kažkuriai konkrečiai difrakcijos eilei ir kažkokiam konkrečiam bangos ilgiui λ apibrėžiamas kaip į tą eilę difragavusios optinės galios ir į gardelę kritusios optinės galios santykis [20,90]:

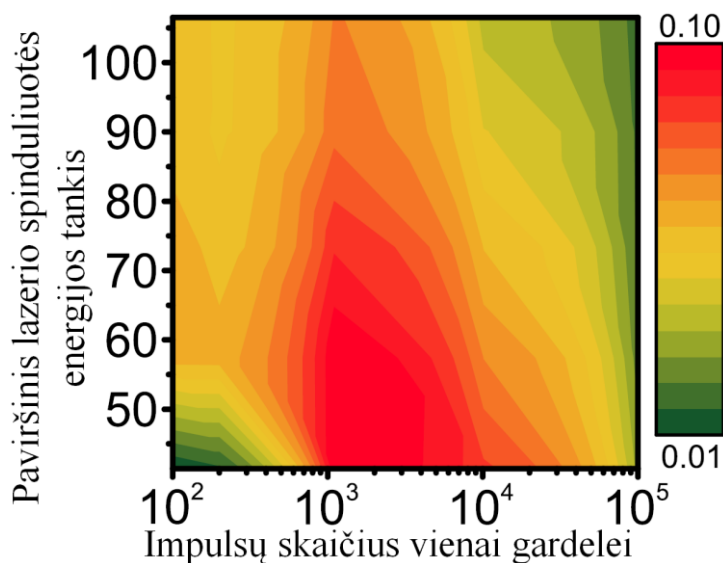
$$H_m(\lambda) = \frac{P_{difragavusi,m}(\lambda)}{P_{kritusi}(\lambda)} \quad (26)$$

čia $H_m(\lambda)$ – difrakcijos absoliutusias našumas bangos ilgiui λ esančiam difrakcijos eilėje m ir, $P_{kritusi}(\lambda)$ – visa į difrakcinę gardelę kritusi optinė galia ties bangos ilgiu λ , $P_{difragavusi,m}(\lambda)$ – visa optinė galia, difragavusi į difrakcijos eilę m ties bangos ilgiu λ . Kiek skirtingai apibrėžiamas santykinis difrakcijos efektyvumas – tai yra santykis tarp į difrakcijos eilę m ties bangos ilgiu λ difragavusios optinės galios ir nuo gardelės nesudarancio medžiagos paviršiaus atspindėto pluošto optinės galios ties tuo pačiu bangos ilgiu [20,90]:

$$\eta_m(\lambda) = \frac{P_{difragavusi,m}(\lambda)}{P_{atspindėta}(\lambda)} \quad (27)$$

Esminis skirtumas tarp šių dydžių yra tas, kad santykinis difrakcijos efektyvumas apibrėžia tik pačios struktūros gebėjimą difraguoti šviesą, o absoliutusias difrakcijos našumas aprašo struktūros gebėjimą difraguoti šviesą, kai ji pagaminta iš tos medžiagos. Taip yra todėl, kad difragavusių šviesos bangų galia normalizuojama į maksimalią galimą difraguoti galią tai medžiagai. Pavyzdžiui, jeigu difrakcinė gardelė yra pagaminta iš medžiagos, kuri turi mažą atspindžio koeficientą kažkokiam konkrečiam bangos ilgiui, absoliutusias tos gardelės difrakcinis našumas tam bangos

ilgiui bus mažas, kadangi medžiagos atspindys tam bangos ilgiui irgi yra mažas, o santykinis difrakcijos našumas gali būti didelis, kadangi jis atsižvelgia į tai, jog medžiaga tą bangos ilgį prastai atspindi [20,90]. Paprastai gaminant difrakcinius apsaugos nuo padirbinėjimo ženklus stengiamasi, kad jų difrakcijos absoliutusis našumas būtų kuo didesnis. Pasiiekti kuo didesnę absoliutųjį našumą svarbu dėl to, kad difrakciniai ženklai difragavimui naudoja aplinkoje esančią šviesą ir turi gerai veikti net prasto apšvietimo sąlygomis. Taip pat yra pravartu pasiekti didžiausią įmanomą našumą su kuo paprastesnio profilio difrakcine struktūra, kadangi sudėtingiems profiliams išgauti reikia atlikti daugiau mikroformavimo (pavyzdžiui, litografijos) operacijų, o tai prailgina ir apsunkina holografinio ženklo originalo gamybą [91]. Atlikus literatūros paiešką nustatyta, kad didžiausias difrakcijos efektyvumas pirmai difrakcijos eilei yra pasiekiamas, kuomet interferencinei abliacijai naudojamas paviršinis energijos tankis yra tarp 40 mJ/cm^2 ir 60 mJ/cm^2 , o impulsų skaičius vienai gardelei yra tarp 1000 ir 10000. Ši priklausomybė pavaizduota 16 paveiksle [17].



16 pav. Pirmos eilės santykinio difrakcijos našumo priklausomybė nuo paviršinio lazerinės spinduliuotės energijos tankio ir gardelei formuoti naudoto impulsų skaičiaus [17]

Iš atliktos literatūros apžvalgos matoma, kad banknotų, dokumentų bei prekių padirbinėjimas yra rimta viso pasaulio ekonomikos problema. Taškinė holograma yra apsaugos nuo padirbinėjimo rinkoje plačiai paplitusi technologija dėl savo suderinamumo su masine gamyba bei aukšto saugumo lygio, tačiau tai nėra tobula technologija – jos gamybos procesas yra brangus ir ilgas, taip pat gali būti sudėtinga atskirti autentišką hologramą nuo padirbtos neturint specialios įrangos. Dėl šios priežasties buvo sukurta kitokių, pažangesnių pasaulio apsaugos nuo padirbinėjimo priemonių. Viena iš jų – skaitmeninės hologramos technologija. Ši technologija darosi vis labiau patraukli industriniam taikymui, kadangi skaitmenines hologramas padirbti yra tiek pat sudėtinga kaip ir taškines hologramas, o jų autentiškumui patvirtinti reikia paprastesnės įrangos (arba išvis nereikia įrangos [92]) nei taškinėms hologramoms. Taip pat skaitmeninės ir taškinės hologramos pasižymi panašiu spaudo, naudojamo jų masinės gamybos procese, pagaminimo būdu, todėl abi jas galima integruoti į vieną masinei gamybai tinkamą apsaugos nuo padirbinėjimo ženklą. Toks ženklas užtikrintų aukštą apsaugos lygį, o jo autentiškumą būtų galima nesudėtingai patikrinti. Iki šiol taškinių hologramų ir skaitmeninių hologramų kombinavimo atvejų buvo nedaug [15], todėl siekiant plėtoti šią jungtinę technologiją yra būtina atrasti efektyvias masiniam jų replikavimui naudojamo spaudo formavimo sąlygas bei atrasti patogų būdą integruoti abi technologijas į apsauginio ženklo projektą. Tai ir yra atliekama šiame darbe.

2. Medžiagos ir tyrimų metodai

Šiame darbe naudoti metodai pagal savo pobūdį gali būti skirstomi į dvi rūšis – teorinius ir eksperimentinius. Teoriniai metodai yra būdai, skirti apskaičiuoti hologramų struktūras bei jų parametrus, tokius kaip difrakcijos našumas – matematinės išraiškos, algoritmai ir speciali programinė įranga. Eksperimentiniai metodai yra būdai, skirti įrašyti hologramas bei jas ištirti – mikroformavimo aparatūra bei analitinė įranga. Šiame darbe suformuotų hologramų struktūrų modeliavimui naudoti matematiniai algoritmai bei programinė įranga aprašyti poskyryje „2.1 Teoriniai metodai“, o hologramų struktūroms formuoti bei ištirti naudota įranga aprašyta poskyryje „2.2 Eksperimentiniai metodai“.

2.1. Teoriniai metodai

Šiame darbe naudoti trys skirtingi teoriniai metodai – pirmasis metodas naudotas apskaičiuoti taškinės hologramos struktūrai (aprašomas 2.1.1 skyrelyje), antrasis metodas naudotas apskaičiuoti skaitmeninės hologramos struktūrai (aprašomas 2.1.2 skyrelyje) bei trečiasis metodas naudotas apskaičiuoti skaitmeninės hologramos difrakciniam našumui (aprašomas 2.1.3 skyrelyje). Pirmieji teoriniai metodai buvo įgyvendinti originaliose programose, kurių programiniai kodai buvo parašyti MATLAB programavimo kalba (gamintojas „MathWorks“ [93]). Skaitmeninės hologramos našumas buvo modeliuotas naudojant dedikuotą programinę įrangą „GSolverV52“, veikiančią griežtai susietų bangų analizės metodu (gamintojas „Grating Solver Development Company“ [94]).

2.1.1. Taškinės hologramos struktūros apskaičiavimas

Principinė pilnai spalvas perteikiančios taškinės hologramos struktūros parametrų nustatymo idėja yra paprasta – reikia rasti holografinio taško parametrus, kurie yra atsakingi už jo įgyjamą spalvą (tai yra gardelių periodai, jų orientacijos plokštumoje ir difrakcijos našumai santykinai vienas kitam) ir atlikti tai kiekvienam hologramą sudarančiam taškui. Šiame darbe aptariama pilnai spalvas perteikianti holograma, kurioje naudojamas trijų spalvų maišymas stengiantis atkartoti sRGB spalvų sistemą. Ši sistema pasirinkta dėl to, kad lyginant šia spalvų sistema sudarytų hologramų atvaizdus su kompiuterio monitoriuje matomais užduotaisiais atvaizdais gaunamas mažesnis iškraipymas, nes kompiuterio monitorius visas spalvas, neatvaizduojamas sRGB sistemoje aproksimuoja iki spalvų, kurias gali perteikti. Kiekvieną tokios pilnai spalvas perteikiančios taškinės hologramos tašką sudaro trijų rūšių difrakcinės gardelės. Kiekviena gardelių rūšis atsakinga už atskiros spalvos atkūrimą hologramos difrakciniame atvaizde. Siekiant maksimaliai panaudoti holografinio taško plotą, kiekvienai gardelių rūšiai buvo skiriama po 3 lygių plotų sritis, išdėstytas taške siekiant maksimalios rūšių variacijos.

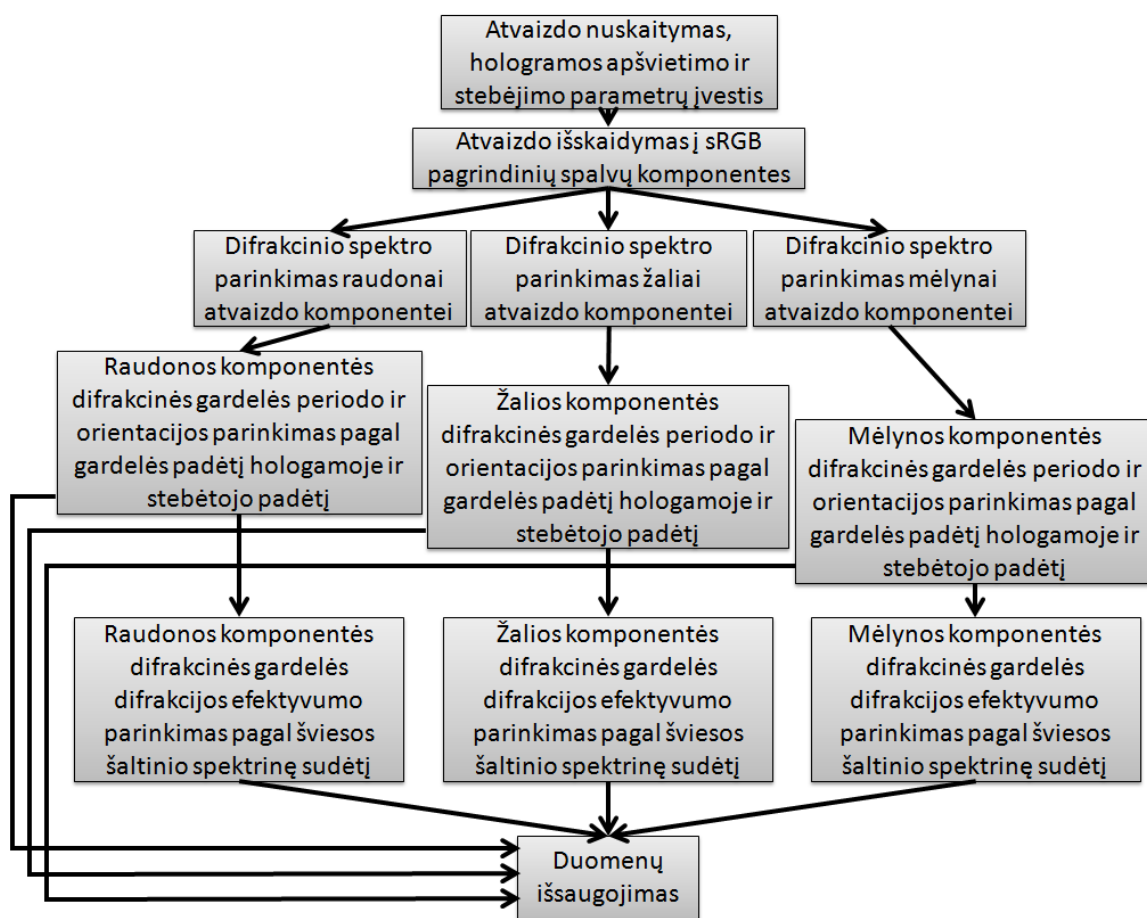
Žinant kokia konkreto taško spalva turi būti įgyta esant nustatytiems konkrečioms jo apšvietimo bei stebėjimo sąlygoms (apšvietimo šaltinio erdvinei pozicijai bei spektrinei sudėčiai ir stebėtojo pozicijai bei apertūrai), ši spalva konvertuojama į ją sukelti galintį spektrą. Bendru atveju dėl metamerizmo (kelių skirtingų spektrų galimybės sukurti tos pačios spalvos pojūtį [16]) negalima konvertuoti CIE sistemos spalvos į spektrą, nebent yra priimamos supaprastinimo sąlygos – pavyzdžiui, priimama, kad spektras turi tik vieną apibrėžto pločio smailę. Šiuo atveju tokias sąlygas yra tikslinga priimti, kadangi difrakcijos spektrai pasižymi būtent tokia savybe. Tokiu būdu nustatyta kokie spektrai atitinka sRGB sistemos 3 pagrindines spalvas. Imant centrinį smailės bangos ilgį ir žinant hologramos stebėtojo bei apšvietimo šaltinio padėtis bei atsižvelgiant į holografinio taško padėtį hologramoje, iš (2) – (3) lygčių galima apskaičiuoti kiekvieną sRGB

sistemos pagrindinę spalvą atitinkančios gardelės periodą ir orientaciją. Atlikus išvedimą, gaunamos išraiškos:

$$d = \frac{|m|\lambda}{\sqrt{(\alpha_m + \alpha_i)^2 + (\beta_m + \beta_i)^2}} \quad (28)$$

$$\Psi = \pi - \sin^{-1} \left(\frac{d(\alpha_m + \alpha_i)}{m\lambda} \right) \quad (29)$$

aprašančios gardelės periodą ir jos orientaciją kuomet į stebėtoją krenta m difrakcinės eilės maksimumo bangos ilgis λ . Čia žymėjimai atitinka žymėjimus iš (2) – (3) lygčių. Apskaičiavus hologramos parametrus galima patikrinti, ar holograma išties būtų tokios spalvos kaip nurodyta, naudojant taškinių hologramų difrakcinio atvaizdo modeliavimo algoritmą [17]. Algoritmo blokinė schema pavaizduota 17 paveiksle.

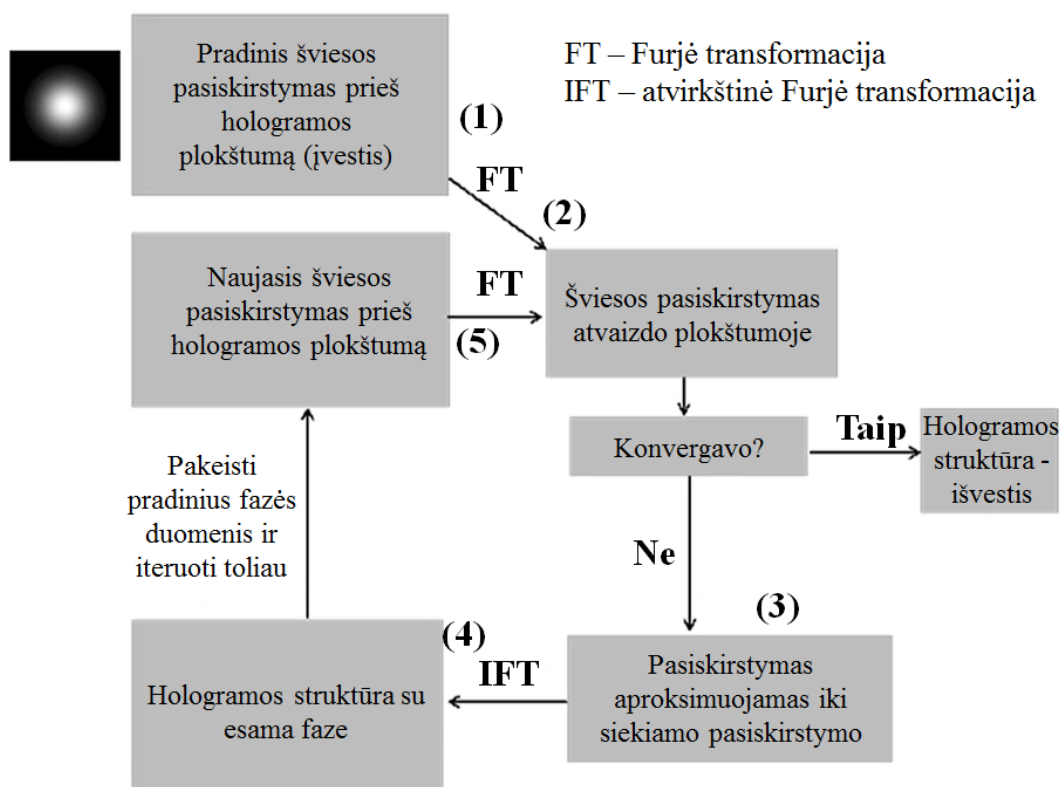


17 pav. Pilnai spalvas perteikiančios taškinės hologramos struktūros apskaičiavimo algoritmo blokinė schema

Kiekvienos rūšies difrakcinės gardelės efektyvumas yra nustatomas iš apšvietimo spektro ir tam taškui reikiamos įgyti spalvos. Būtent šis skirtingų rūšių difrakcinių gardelių našumo maišymas kiekviename holografiniame taške leidžia išgauti visas sRGB sistemos spalvas. Kadangi CIE sistemoje spalvos maišomos netiesiškai, gardelės našumo išraiška yra sudėtingos formos, todėl čia nepateikiama. Apie realios taškinės hologramos difrakcinių gardelių našumo valdymą keičiant impulsų kiekį, naudotą suformuoti gardelei femtosekundinės interferencinės lazerinės abliacijos būdu, plačiau rašoma skyriuje „3. Tyrimų rezultatai ir jų aptarimas“.

2.1.2. Skaitmeninės hologramos struktūros apskaičiavimas

Skaitmeninės hologramos struktūrai apskaičiuoti naudotas Gerchbergo – Sakstono algoritmas. Jis yra paremtas skaičiavimu atliekant daugelį iteracijų. Šis metodas buvo pasirinktas dėl savo didelio tikslumo esant sąlyginai paprastam programiniam įgyvendinimui. Algoritmo principinė schema pateikta 18 paveiksle. Skaitmeninės hologramos tikslas yra pakeisti ją apšviečiančio pluošto skersinį pasiskirstymą taip, kad jis kaip galima labiau atitiktų hologramos siekiamą sukurti difrakcinį atvaizdą. Šis algoritmas sukuria apšviečiančio pluošto fazę modifikuojančią hologramą, dėl to apšviečiančio pluošto amplitudė yra ignoruojama (nustatoma, kad visada būtų lygi vienetui). Pradžioje (žingsnis „1“ 18 paveiksle) pasirenkamas intensyvumo skirstinys, atitinkantis lazerio sugeneruojamą intensyvumo skirstinį, nustatoma jo amplitudė ir fazė. Amplitudė prilyginama vienetui, o hologramos fazė (pirmajai iteracijai) pasirenkama atsitiktinai. Intensyvumo skirstinio fazė paveikiama hologramos faze ir tuomet jai atliekama Furje transformacija bei tikrinamas gauto atvaizdo sutapimas su siekiamu intensyvumo skirstiniu („2“ 18 paveiksle). Jeigu jų tarpusavio atitikimas nėra pakankamai geras (paklaida didesnė nei nurodyta), gautas atvaizdas yra aproksimuojamas iki siekiamo skirstinio („3“ 18 paveiksle). Naudojant atvirkštinę Furje transformaciją nustatoma kokia turi būti hologramos fazė, kad ja modifikuotas pluošto skirstinys būtų toks, koks yra siekiamas gauti („4“ 18 paveiksle). Tuomet šie idealizuoti fazės duomenys pakeičia pradinis ir iteracija kartojama („5“ 18 paveiksle) iki kol nustatoma, kad siekiamas intensyvumo skirstinys pasiekė pakankamą panašumą į užduotą intensyvumo skirstinį. Ši paskutinį atvaizdą atitinkantys fazės duomenys yra išvedami kaip algoritmo grąžinamas atsakymas. Kadangi pirmosios iteracijos intensyvumo skirstinys visada turi daug neatitikimų lyginant su siekiamu skirstiniu, norint gauti tikslesnį pasiskirstymą reikia atlikti daugiau skaičiavimo iteracijų, tai reikalauja kompiuterio naudojimo, kadangi žmogui tai užtruktų labai ilgai [73].



18 pav. Gerchbergo – Sakstono algoritmo principinė schema [73]

Jeigu norima į vieną difrakcinį atvaizdą sujungti keletą skirtingų difrakcinių atvaizdų, kurie yra išgaunami naudojant skirtingas skaitmenines hologramas, tai galima pasiekti hologramas išdėliojant plokštumoje vieną šalia kitos ir jas visas apšviečiant [95].

Vienas iš būdų įvertinti algoritmo konvergavimą yra gautojo difrakcinio atvaizdo palyginimas su užduotuoju difrakciniu atvaizdu. Jei jų tarpusavio skirtumas mažesnis nei norimas, galima sakyti, kad algoritmo pateiktas rezultatas yra pakankamai tikslus. Populiarus būdas nustatyti šį skirtumą yra vidutinės kvadratinės paklaidos (*angl.* root mean square error) apskaičiavimas. Ši paklaida apibrėžiama (30) išraiška [72]:

$$PAK = \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{m,n} (|\psi(m,n)| - A(m,n))^2} \quad (30)$$

čia PAK – vidutinė kvadratinė paklaida, M, N – atvaizdo dydžiai vertikalia ir horizontalia kryptimis (taškių skaičiumi), A – užduotasis atvaizdas, ψ – difrakcinis atvaizdas, m, n – indeksai. Vidutinė kvadratinė paklaida visuomet yra teigiama ir kuo ji mažesnė, tuo geresnis atitikmuo tarp užduotojo ir gautojo atvaizdų.

Kitas svarbus skaitmeninės hologramos difrakcinio atvaizdo parametras – jo triukšmingumas, aprašomas signalo ir triukšmo verčių santykiu (*angl.* signal to noise ratio). Šis santykis apibrėžiamas (31) išraiška [62]:

$$STS = \frac{\sum_{m,n} |s_{m,n} - \tau_{m,n}|}{\sum_{m,n} |\tau_{m,n}|} \quad (31)$$

čia STS – signalo ir triukšmo santykis, m, n – indeksai, s – signalo vertė, τ – triukšmo vertė. Kuo šis santykis didesnis, tuo labiau signalas yra išskiriamas iš triukšmo. Kokybiškam difrakciniam atvaizdai yra svarbu turėti kuo didesnį šį santykį.

Dar vienas statistinis įrankis, ypač naudingas kalbant apie statistinių duomenų kitimo paaiškinimą analitiniu modeliu yra determinacijos koeficientas, dažniausiai žymimas R^2 . Jis aprašo kiek gerai analitinis modelis sutampa su eksperimentiniais duomenimis ir yra apibrėžiamas (32) išraiška [96]:

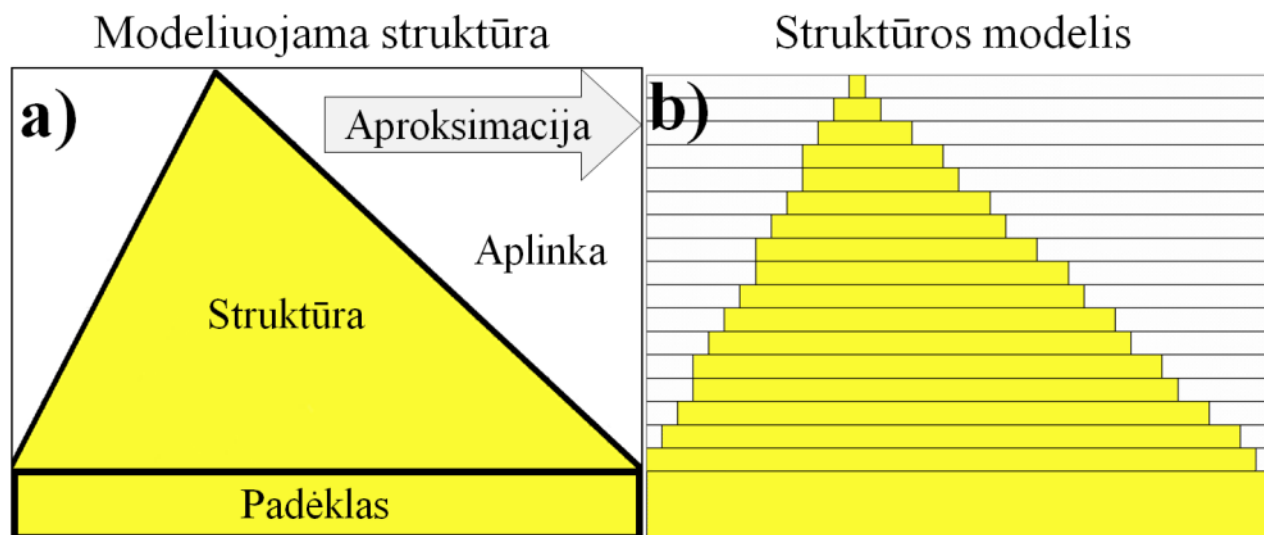
$$R^2 = 1 - \frac{\sum_i (y_i - f_i)^2}{\sum_i (y_i - \bar{y})^2} \quad (32)$$

čia i – indeksas, y_i – i – tasis eksperimentinis taškas, f_i – i tasis analitinis taškas, \bar{y} – eksperimentinių taškų vidurkis. Determinacijos koeficientas kinta ribose nuo 0 iki 1, o kuo jo vertė didesnė, tuo geriau sutampa eksperimentiniai duomenys ir juos analitiškai aprašantis modelis.

2.1.3. Skaitmeninės hologramos difrakcijos našumo įvertinimas

Kadangi šviesos sąveika su difrakcinėmis struktūromis yra sudėtinga, grynai analitiniai difrakcijos lygčių sprendimo metodai siekiant nustatyti difrakcijos našumą yra labai komplikuoti, todėl šiame darbe naudojamas skaitinis skaičiavimo metodas, konkrečiai – griežtai susietų bangų analizės metodas (*angl.* Rigorous Coupled Wave Analysis method). Šis metodas leidžia išspręsti lygtį, aprašančią elektrinio lauko pasiskirstymą periodiškai kintančios dielektrinės konstantos aplinkoje. Tuomet visą (bet kokio profilio) struktūrą galima aproksimuoti – padalinti į sluoksnius (19 pav.).

Dėl to kiekvienas sluoksnis gali būti laikomas periodiškai kintančios dielektrinės konstantos aplinka ir kiekvienam sluoksniui galima išspręsti minėtą lygtį. Kadangi po aproksimacijos tolydaus profilio struktūra tapo laiptuota struktūra, pagal jau aprašytą metodiką galima nustatyti visos struktūros sukurtus difrakcinius maksimumus bei kiekvienam difrakciniam maksimumui tenkančią elektrinio lauko (o kartu – ir intensyvumo) dalį [97].



19 pav. Struktūros modeliavimas griežtai susietų bangų analizės metodu: a) modeliujama struktūra, b) ir jos aproksimacija (pavaizduotas vienas modeliujamos struktūros periodas)

Aprašytas skaitinis modelis yra įgyvendintas šiame darbe naudotoje difrakcinių gardelių kompiuterinio modeliavimo programoje „GSolverV52“. Programa leidžia sukurti bet kokio profilio daugiasluoksnės difrakcinės struktūras, parinkti jų medžiagas ir apšvietimo parametrus. Programa taip pat leidžia nepriklausomai manipuliuoti tiek apšvietimo, tiek sukurtos difrakcinės gardelės parametrais, tokiais kaip gardelės periodas, griovelio plotis, griovelio gylis, gardelę apšviečiančios šviesos kampas, bangos ilgis ir poliarizacija [94].

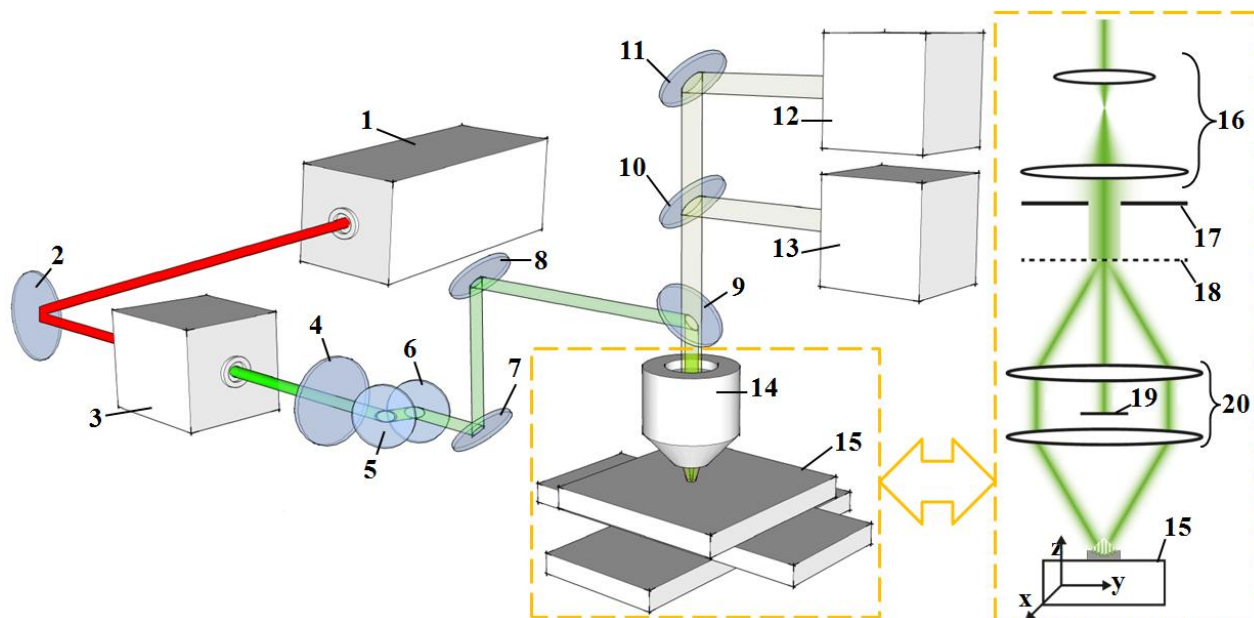
2.2. Eksperimentiniai metodai

Šiame darbe naudoti dviejų rūšių eksperimentiniai metodai – mikroformavimo metodai (aprašomi 2.2.1 skyrelyje) ir analitiniai metodai (aprašomi 2.2.2 skyrelyje). Mikroformavimo metodai yra būdai skirti suformuoti mikrostruktūras, o analitiniai metodai – ištirti suformuotas struktūras. Šiame darbe naudoti mikroformavimo metodai apima femtosekundinę lazerinę abliaciją, femtosekundinę lazerinę interferencinę abliaciją. Analogiškai, analitiniai metodai aprėpia optinę ir skenuojančią elektroninę bei atominių jėgų mikroskopiją, lazerio pluošto skerspjūvio profiliavimą, difragavusios šviesos galios matavimą bei spektroskopinį matavimą.

2.2.1. Mikroformavimo metodai

Holograminio apsaugos ženkle originalas – spaudas buvo formuojamas iš elektrochemiškai nusodinto nikelio folijos [17]. Apie folijos formavimą detalai rašoma šaltinyje [45]. Ženklo spaudui formuoti naudotas femtosekundinės lazerinės abliacijos metodas. Lazerinė abliacija buvo atlikta naudojant Yb:KGW femtosekundinį lazerį „Pharos“ (gamintojas „Light Conversion“ [98]) ir antrosios harmonikos generatorių „Hiro“ (gamintojas „Light Conversion“ [99]) bei lazerinio mikroformavimo sistemą „FemtoLab“ (gamintojas „Workshop of Photonics“ [100]). Mikroformavimo sistema gali būti dviejų konfigūracijų. Viena iš jų pritaikyta atlikti lazerinę

abliaciją vienu impulsiniu lazerio pluoštu (14 pav. a), o kita – dviejų pluoštų interferenciniu lauku (14 pav. b). Iš vienos konfigūracijos sistema yra nesudėtingai pakeičiama į kitą konfigūraciją, todėl sistema gali atlikti abiejų rūšių mikroformavimą. Sistema valdoma naudojant kompiuterinę programą „SCA“ (gamintojas „Workshop of Photonics“ [101]). Naudotos įrangos savybės pateikiamos 1 priede, o jos principinė schema pavaizduota 20 paveiksle.



20 pav. Principinė lazeriniam mikroformavimui naudotos įrangos schema: 1 – femtosekundinis lazeris „Pharos“, 2, 7, 8, 9, 10, 11 – veidrodžiai, 3 – antrosios harmonikos generatorius „Hiro“, 4 – pusės bangos vėlinimo plokštelė, 5, 6 – Briusterio kampo poliarizatorius (4 – 6 sudaro atenuatorių), 12 – skaitmeninė kamera, 13 – apšvietimo lempa, 14 – pluoštą fokusuojantis objektyvas, 15 – precizinis trijų ašių poslinkio staliukas, 16 – pluošto plėtiklis, 17 – apertūra, 18 – difrakcinis puošto daliklis, 19 – nulinio maksimumo blokatorius, 20 – pluoštų kolimavimo ir fokusavimo lęšiai

Lazeris skleidžia infraraudonosios spinduliuotės (1030 nm bangos ilgio) femtosekundžių trukmės impulsinį pluoštą. Kadangi nikelis turi didelį atspindžio koeficientą šio bangos ilgio šviesai, naudojamas antrosios harmonikos generatorius, dvigubai sumažinantis bangos ilgį (išeigos spinduliuotės bangos ilgis 515 nm). Atenuatorius leidžia valdyti vidutinę pluošto galią, pasiekiančią bandinį. Tuomet pluoštas veidrodžiais nukreipiamas į bandinį, kuris yra apšviečiamas lempa, mikroapdirbimo zonos vaizdas užfiksuojamas skaitmeninės kameros. Prieš pasiekiant bandinį pluoštas yra fokusuojamas objektyvu, pluoštu apšvitinama vieta keičiama preciziniu trijų ašių staliuku.

2.2.2. Analitiniai metodai

Prieš pradėdant ženklo lazerinį mikroformavimą yra svarbu nustatyti šiam procesui svarbias naudojamos medžiagos savybes (pavyzdžiui, lazerinės abliacijos slenkstį) bei pačios sistemos ypatybes. Abliacijos slenkščiui nustatyti lazeriu suformuotų kraterių diametrai buvo įvertinti optiniu mikroskopu. Šiame darbe buvo naudojamas mikroskopas „B-600 MET“ (gamintojas „Optika Italy“ [102]). Atliekant vaizdinimą mikroskopu bandinys (nikelio folija) padedamas ant plokštumoje judėti galinčio stalelio, įjungiamas bandinio ašinis apšvietimas ir įjungiama programa „Optika Vision Pro“, su kuria atliekamas mikroskopo išgauto vaizdo fotografavimas naudojant integruotą skaitmeninę kamerą. Mikroskopas turi keletą keičiamų objektyvų, užtikrinančių skirtingą

didinimą – 75, 150, 300, 750 ir 1500 kartų. Pasirinkus objektyvą ir suradus reikiamą bandinio vietą atliekamas vaizdo fokusavimas (judinant stalielį vertikaliaje ašyje). Sufokusavus atvaizdą jis išsaugojamas naudojant programą. Atlikus vaizdinimą taip pat padaromos kas 10 μm graduotos skalės nuotraukos esant tiems didinimams, kurie buvo naudoti vaizdinant bandinį. Kadangi žinomas skalės padalos ilgis, naudojant programą „ImageJ“ galima nustatyti nuotraukos mastelį. Kadangi visos nuotraukos, užfiksuotos esant tam pačiam didinimui, turi tokį patį mastelį, galima įvertinti bandinio paviršiuje esančių struktūrų geometrinius dydžius. Optinis mikroskopas pavaizduotas 21 paveikslo a dalyje.

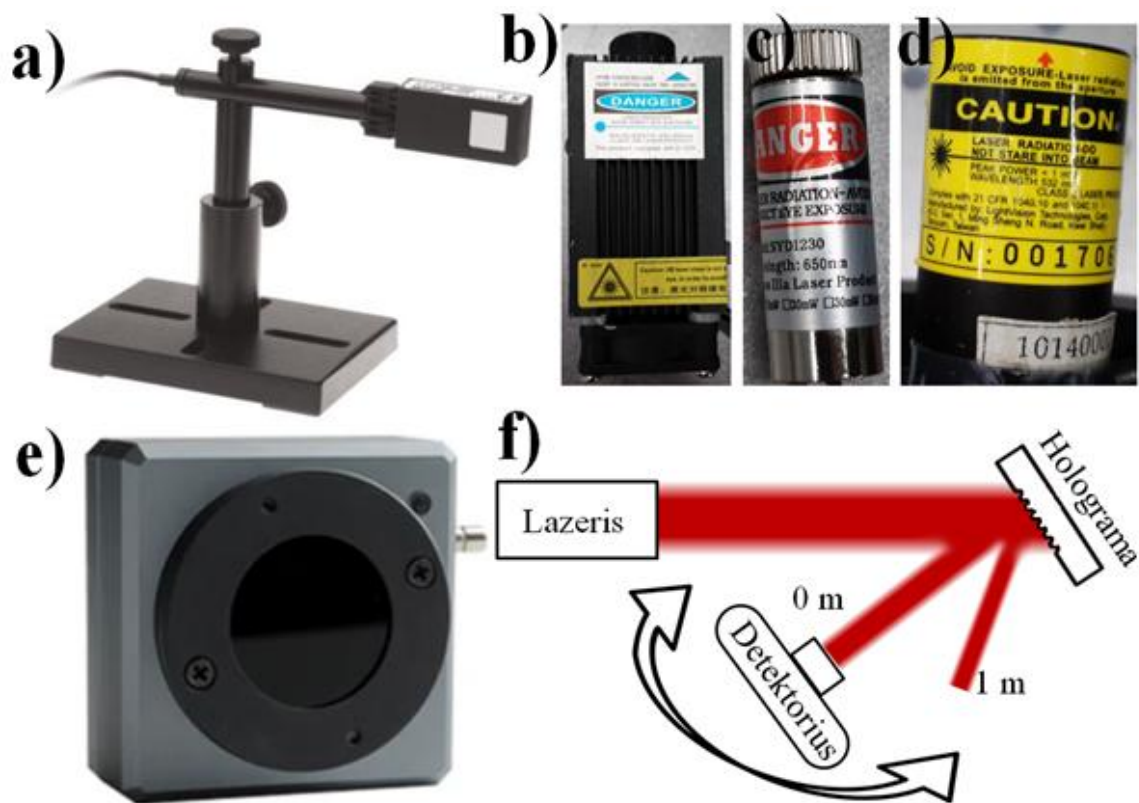
Norint nustatyti suformuotų abliacijos kraterių bei difrakcinių gardelių gylius reikia įvertinti paveikto paviršiaus morfologiją. Tam atlikti puikiai tinka atominių jėgų mikroskopas. Šiame darbe naudotas atominių jėgų mikroskopas NT – 206 (gamintojas „Microtestmachines“ [103]). Bandinio paviršiaus skenavimui naudojamas zondas yra laikomas elastingos gembės, į kurios galą šviečia lazerio spindulys. Nuo gembės galo atspindėtas lazerio spindulys yra detektuojamas padėčiai jautraus fotodetektoriaus. Zondui skenuojant objekto paviršių dėl sąveikos tarp zondo ir paviršiaus kinta zondą laikančios gembės padėtis, kuri yra fiksuojama su lazerio spinduliu ir fotodetektoriumi. Žinant gembės standumą ir atsižvelgiant į jos padėties pokytį dėl deformacijos, galima sužinoti padėtį. Tam, kad matavimo rezultatai būtų tikslūs, prieš atliekant matavimą būtina sukalibruoti prietaisą – tinkamai nustatyti lazerio pluošto padėtį ir bandinio skenavimo greitį skirtingomis kryptimis. Sukalibravus prietaisą pasirenkamas skenavimo laukas ir atliekamas skenavimas. Atlikus skenavimą naudojant programą „SurfaceXplorer“ iš gautųjų duomenų panaikinus skenavimo artefaktus galima išsaugoti bei analizuoti matavimo rezultatus, pavyzdžiui, suformuoto pažeidimo gylį bei šoninius matmenis. Gamintojo teigimu prietaiso šoninio matavimo paklaida galima iki 5 nm, o aukščio matavimo paklaida – iki 0,5 nm. Atominių jėgų mikroskopas atvaizduotas 21 paveikslo b dalyje.

Naudotas atominių jėgų mikroskopas yra labai tikslus prietaisas, tačiau turi trūkumą – juo galima matuoti tik nedidelį paviršiaus plotą – iki $12 \times 12 \mu\text{m}$. Parametrų, kuriems nustatyti reikia didelio tikslumo ir būtina įvertinti didesnę paviršiaus plotą (pavyzdžiui, gretimų kraterių persiklojimui kuris dar užtikrina linijos, sudarytos iš tų kraterių, vientisumą arba difrakcinių gardelių tiksliam periodui nustatyti), įvertinimui reikia naudoti skenuojantį elektroninį mikroskopą. Šiame darbe buvo naudojamas skenuojantis elektroninis mikroskopas „Quanta 200 FEG“ (gamintojas „FEI“ [104]). Mikroskopo vakuuminė sistema yra sudaryta iš dviejų dalių: elektronų kolonos ir bandinio kameros, kurios perskirtos suslėgtu oru valdoma sklendė. Įdedant arba išimant bandinį, sklendė uždaroma ir į bandinio kamerą prileidžiama oro. Padėjus bandinį (lazerine abliacija suformuotus kraterius) ant mikroskopo kameroje esančio laikiklio, kamera uždaroma ir įjungiama vakuuminių siurblių sistema, kuri atsiurbia aukštą vakuumą. Pasiekus reikiamą vakuumą bandinio kameroje atidaroma sklendė. Įjungiamas elektronų spindulys, nustatomi darbiniai parametrai – greitinanti įtampa, darbinis atstumas, fokusas, astigmatizmas, šviesumas bei kontrastas. Visi nustatymai atliekami naudojantis mikroskopo programos „xTMicroscope“ vartotojo sąsaja. Bandinio padėtį galima keisti – bandinį perstumti tiesia linija pasirinktos Dekarto koordinatės ašyje (X, Y, Z), taip pat bandinį pasukti kampu. Pasirinkus norimą vaizdą ir didinimą, nustatomi skenavimo skiriamoji geba ir skenavimo greitis. Atlikus nuotraukos skenavimą, ji išsaugoma kompiuteryje. Skenuojantis elektroninis mikroskopas pavaizduotas 21 paveikslo c dalyje.



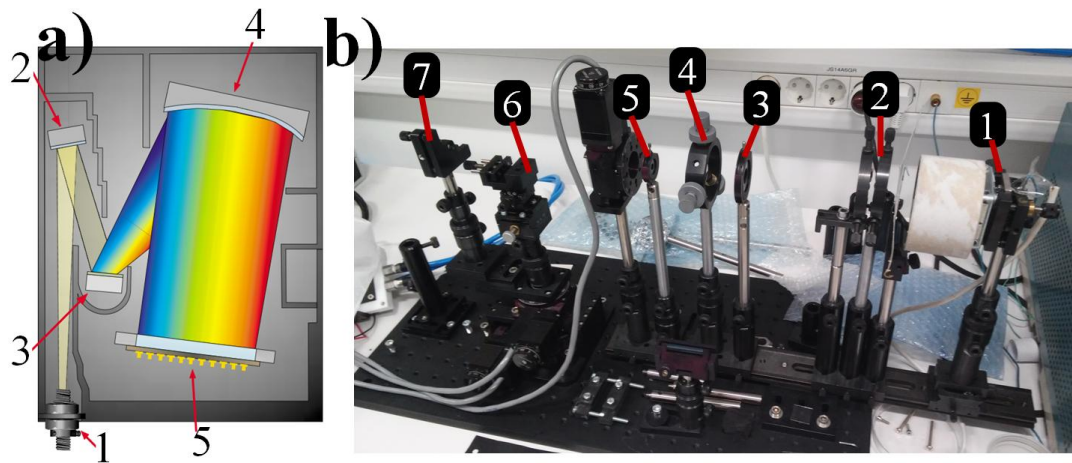
21 pav. Šiame darbe naudoti mikroskopijos metodai: a) optinis mikroskopas „B-600 MET“, b) atominių jėgų mikroskopas NT – 206 [105], c) skenuojantis elektroninis mikroskopas „Quanta 200 FEG“ [106]

Įvertinant gardelės našumą difrakciniam maksimumui tenkanti galia matuota fotodiodu „PD300-UV“ (gamintojas „Ophir“ [107]). Šis diodas turi kvadratinę 10 mm kraštinės apertūrą ir yra jautrus spinduliuotei bangos ilgių intervale nuo 200 nm iki 1100 nm bei matuoja galią nuo 20 pW iki 3 mW (su filtru – nuo 2 μW iki 300 mW), o jo maksimali galios paklaida optiniame ruože yra 3%. Diodas pavaizduotas 22 paveikslo a dalyje. Difrakcijos našumui naudoti 3 nuolatinės veikos lazeriai – raudonas 650 nm bangos ilgio ir 3,7 mW galios, žalias 532 nm bangos ilgio ir ~0,9 mW galios, mėlynas 405 nm bangos ilgio ir 274 mW galios. Difrakcijos našumui tirti naudoti lazeriai pavaizduoti 22 paveikslo b – d dalyse. Kadangi holograma ją apšviečiantį šviesos pluoštą transformuoja į atvaizdą, tiriant jas svarbus yra ne tik jų našumas, bet ir tai, kaip optinė galia pasiskirsto hologramos difrakciniame atvaizde. Lazero pluošto skerspjuvio kamera „WinCamD-LCM“ (gamintojas „DataRay“ [108]) yra skirta galios pasiskirstymo šviesos pluošte vaizdinimui, šiame darbe naudojama tirti santykiniam galios pasiskirstymui nenulinės eilės difrakciniame maksimume. Kamera labai jautri optinei spinduliuotei, todėl turi keletą skirtingų sugerties filtrų, apsaugančių kamerą nuo per didelio intensyvumo šviesos. Kamera jautri spektriniame ruože 355 nm – 1150 nm, turi kvadratinę 2048 x 2048 taškų CMOS detektorių matricą, jos kraštinė yra 11,3 mm ilgio. Pluošto skerspjuvio kamera pavaizduota 22 paveikslo e dalyje. Difrakcijos efektyvumo ir galios pasiskirstymo difrakciniame atvaizde matavimo schema pavaizduota 22 paveikslo f dalyje.



22 pav. Difrakcinių gardelių tyrimui naudota įranga: a) – fotodiodas „PD300-UV“ [107], b) 405 nm bangos ilgio lazeris, c) 650 nm bangos ilgio lazeris, d) 532 nm bangos ilgio lazeris, e) lazerio pluošto skerspjūvio kamera „WinCamD-LCM“ [108], f) supaprastinta matavimo eksperimento schema

Apibūdinant pilnai spalvas perteikiančias hologramas yra svarbus ne tik jų difrakcijos našumas, bet ir difrakcinio atvaizdo spektrinė sudėtis, lemianti hologramos spalvą. Optinė spektrometrija yra metodas tirti spektrams. Optinis spektrometras yra sudarytas iš šviesą į spektrometrą praleidžiančio plyšio (arba šviesolaidžio prijungimo, jeigu į spektrometrą šviesa patenka per šviesolaidį), difrakcinės gardelės, kolimuojančio ir fokusuojančio veidrodžių bei šviesos detektoriaus. Į spektrometrą pro plyšį įėjusi šviesa būna nelygiagreti, o difrakcinė gardelė geriausiai veikia kai į ją krentanti šviesa yra lygiagreti todėl prieš šviesai patenkant į difrakcinę gardelę ji turi atsispindėti nuo kolimuojančio veidrodžio. Tuomet lygiagreti šviesa yra difrakcinės gardelės išskleidžiama į spektrą. Dėl difrakcijos prigimties difragavusi šviesa sklinda plėtėjančiai, todėl reikalingas fokusuojanti veidrodis, kuris plėtėjančią į spektrą išskleistą šviesą sufokusuotų į baigtinio dydžio šviesos detektorius, kuris nustato kiekvieno bangos ilgio šviesos intensyvumą. Priklausomai nuo to koks spektras yra tiriamas, optinė spektrometrija gali būti keleto rūšių – emisijos, absorbcijos, atspindžio, pralaidumo ir kt [109,110]. Šiame darbe optinis spektrometras naudojamas nustatyti hologramos difrakcinio atvaizdo spektrui ir naudojantis spektru įvertinti difrakcinio atvaizdo (arba jo fragmento) spalvą. Dėl šio spektrometrijos metodo sąsajos su spalva jis vadinamas fotometrija. Šiame darbe hologramų spektrams registruoti buvo naudojamas šviesolaidinis spektrometras „AveSpec-2048“ (gamintojas „Avantes“ [111]). Jis pasižymi spektrine sritimi nuo 360 nm iki 860 nm, bei skiriamąja geba 1,2 nm [112]. Jo principinė schema pavaizduota 23 paveikslo a dalyje. Hologramos difrakcinio atvaizdo matavimams atlikti spektrometras buvo prijungtas prie matavimo stendo, pavaizduoto 23 paveikslo b dalyje. Siekiant išvengti pašalinės šviesos įtakos visi optinių dydžių matavimai buvo atliekami tamsoje.



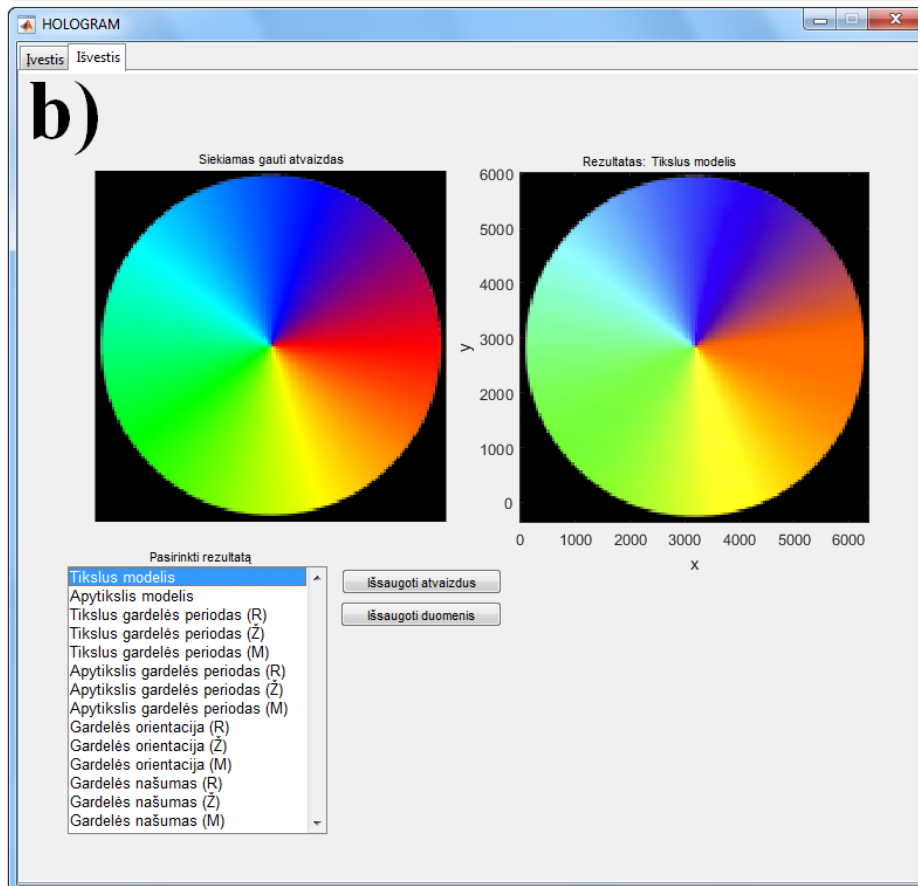
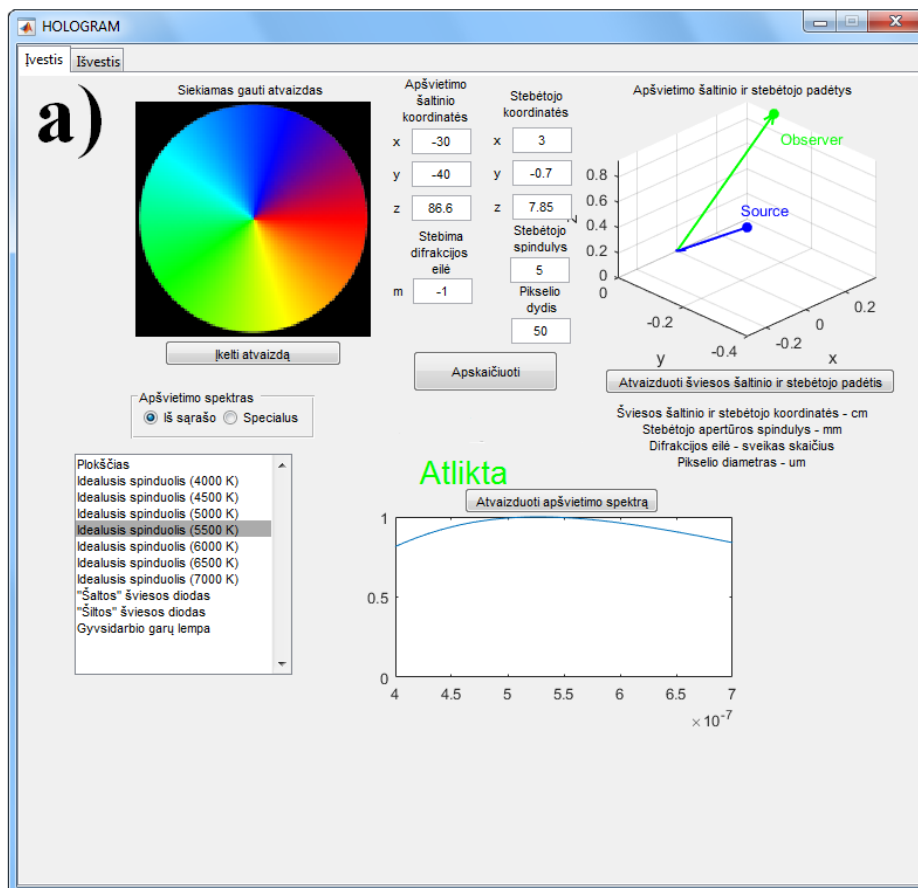
23 pav. Spektrometriniam hologramų tyrimui naudota įranga: a) optinio spektrometro „AvaSpec-2048“ principinė schema: 1 – šviesolaidžio įvadas, 2 – kolimuojantis veidrodis, 3 – difrakcinė gardelė, 4 – fokusuojantis veidrodis, 5 – detektorius [113], b) spektrometrinio stendo schema: 1 – šviesos šaltinis, 2, 4 – fokusuojantys lęšiai, 3, 5 – apertūros, 6 – bandinio laikiklis, 7 – šviesolaidžio įvadas ir jo laikiklis

3. Tyrimų rezultatai ir jų aptarimas

3.1. Hologramų struktūrų apskaičiavimas

Išraiškų (8) – (13) bei (28) – (29) pagrindu buvo sukurtas taškinės hologramos struktūros generavimo algoritmas pagal užduotą hologramos difrakcinį atvaizdą. Siekiant supaprastinti algoritmui reikalingų duomenų įvestį, „MATLAB“ programinėje aplinkoje buvo sukurta vartotojui draugiška sąsaja (programa „HOLOGRAM“). Ši programa, turint užduotą pasiekti hologramos difrakcinį atvaizdą, vartotojui leidžia nustatyti hologramos struktūros parametrus, kuriems esant gautosios hologramos difrakcinis atvaizdas bus kuo panašesnis į norimą pasiekti atvaizdą. Naudojant 2.1.1 skyrelyje aprašytą matematinį modelį atliekamas struktūrinių parametrų apskaičiavimas kiekvienam taškui – žinant taško spalvą (gaunama iš užduoto difrakcinio atvaizdo) ir hologramos apšvietimo bei stebėjimo sąlygų (nustatomos vartotojo) apskaičiuojami hologramos struktūriniai parametrai. Naudojant programą galima apskaičiuoti hologramos struktūrą – nustatyti kiekvienos difrakcinės gardelės, sudarančios vieną holografinį tašką, parametrus – periodą, orientaciją bei difrakcijos našumą.

Programos vartotojo sąsaja pavaizduota 24 paveiksle. Programa turi dvi korteles – „įvestis“ (naudojama hologramos modelio sudarymui ir apskaičiavimui) ir „išvestis“ (naudojama rezultatų apžvalgai ir išsaugojimui). Pirmiausia pasirenkamas užduodamas difrakcinis atvaizdas – įkeliamas vaizdinė byla bei nurodomas fizinis vieno holografinio taško dydis. Tuomet nustatomos taškinio apšvietimo šaltinio koordinatės Dekarto koordinatinių sistemoje bei apšvietimo šaltinio spektras. Spektras gali būti parenkamas arba iš automatiškai sugeneruotų spektrų arba sudaromas pačio vartotojo (spektro pasirinkimas „iš sąrašo“ arba „specialus“). Laikoma, kad šaltinis spinduliuoja plokščiąsias bangas. Analogiškai apšvietimo šaltinio koordinatėms nustatomos ir hologramos stebėtojo koordinatės bei pasirenkamas stebimas difrakcinis maksimumas. Stebėtojui taip pat suteikiama nurodomo dydžio apertūra, tokiu būdu imituojama akis žmogaus vizyvizas nėra taškinis objektas. Kadangi šiame darbe siekiama taškinę hologramą ne tik suprojektuoti, bet ir įrašyti, hologramos struktūros projektą būtina suderinti su turimos mikroformavimo sistemos galimybėmis. Mikroformavimo sistema „FemtoLab“ gali formuoti 15 skirtingų periodų difrakcines gardeles, kurių periodas kinta nuo 1,3 μm iki 0,8 μm (nominaliai), todėl stebėtojo koordinatės yra parenkamos tokios, kurioms esant hologramos struktūrą sudarytų gardeles su periodais iš šio intervalo. Taip pat išsaugant skaičiavimo rezultatus šalia tiksliai apskaičiuotųjų hologramos struktūrinių parametrų (gardelių periodų ir orientacijų) verčių yra išsaugomos ir iki mikroformavimo sistemos galimybių sudiskretintos vertės. Difrakcinių gardelių periodai yra suapvalinami iki 15 verčių, o gardelių orientacijos taip pat suapvalinamos iki sveiko laipsnių skaičiaus. Galiausiai paspaudžiama „apskaičiuoti“. Kuomet pasirodo žalias užrašas „atlikta“, galima pereiti į kortelę „išvestis“ ir apžvelgti bei išsaugoti rezultatus. „Išvesties“ kortelėje pateikiamas hologramos su apskaičiuota struktūra difrakcinio atvaizdo modelis sudarytas pagal metodiką aprašytą [17] naudojant tiek tiksliai, tiek mikroformavimui suapvalintas parametrų vertes. Dar galima apžvelgti tiksliai bei aproksimuotus visų rūšių difrakcinių gardelių periodus, jų orientacijas bei į vienetą sunormuotus difrakcijos efektyvumus. Apskaičiuotuosius parametrus galima išsaugoti kaip atvaizdus (rastrinės bylos) arba kaip tekstinių duomenų bylas, kurie yra suderinami su lazerinio mikroformavimo sistemos „FemtoLab“ valdymo programine įranga „SCA“.

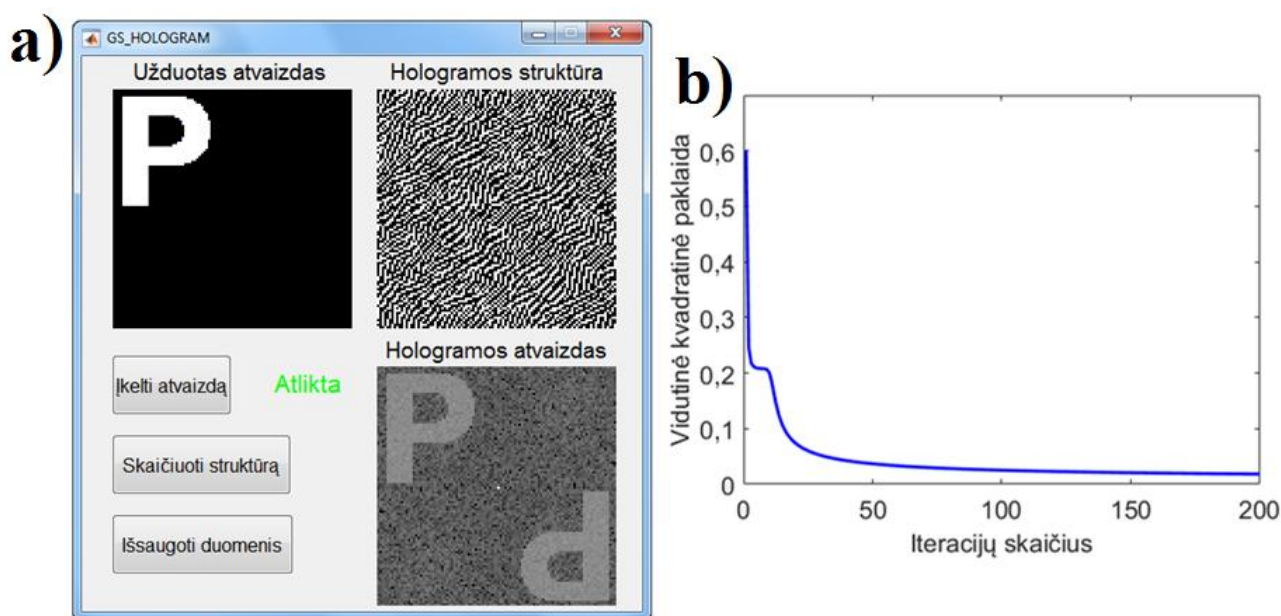


24 pav. Programos vartotojo sąrašys įvesties kortelė : a) kuomet yra pabaigtas hologramos struktūros skaičiavimas, b) kuomet yra pabaigtas hologramos struktūros skaičiavimas

Naudojant Gerchbergo – Sakstono algoritmą (jo principinė schema pateikta 16 paveiksle) „MATLAB“ programinėje aplinkoje buvo sukurta vartotojui draugiška skaitmeninės hologramos struktūros generavimo programos sąsaja (programa „GS_HOLOGRAM“). Ši programa, turint užduotą pasiekti hologramos difrakcinį atvaizdą, vartotojui leidžia apskaičiuoti hologramos struktūrą, kurios Furje transformacija (difrakcinis atvaizdas) yra užduotasis atvaizdas.

Programos vartotojo sąsaja pavaizduota 25 paveikslo a dalyje. Programa turi tris atvaizdavimui skirtas ašis bei tris mygtukus. Mygtukas „įkelti atvaizdą“ leidžia pasirinkti programai užduodamą skaitmeninės hologramos atvaizdą bei pavaizduoja jį atitinkamose ašyse. Mygtukas „skaičiuoti struktūrą“ naudodamas minėtą algoritmą apskaičiuoja hologramos struktūrą bei jos difrakcinį atvaizdą. Kuomet pasirodo žalias užrašas „atlikta“, hologramos struktūra ir atvaizdas atvaizduojami atitinkamose ašyse. Mygtukas „išsaugoti duomenis“ išsaugo hologramos difrakcinį atvaizdą kaip rastrinę bylą bei jos struktūrą kaip tekstinių duomenų bylą, kuri yra suderinamas su lazerinio mikroformavimo sistemos „FemtoLab“ valdymo programine įranga „SCA“.

Skaitmeninės hologramos difrakcinis atvaizdas sudarytas iš ją apšviečiančio lazerio skleidžiamos šviesos ir gali būti apibūdinamas tik difragavusios šviesos intensyvumo pasiskirstymu. Tai leidžia įvertinti hologramos atvaizdą skaitiškai – nustatyti jo vidutinę kvadratinę paklaidą (laikant, kad užduotasis atvaizdas yra tikrasis dydis, o difrakcinis atvaizdas – išmatuotasis dydis). Taškinių hologramų difrakcinis atvaizdas sudarytas iš difragavusios polichromatinės šviesos ir gali būti apibūdinamas atvaizdo intensyvumo bei šviesos spektro pasiskirstymu, todėl jų difrakciniams atvaizdams tirti tos pačios metodikos taikyti negalima. Apskaičiavus skaitmeninės hologramos difrakcinio atvaizdo vidutinę kvadratinę paklaidą ir ją atvaizdavus (25 pav. b) matoma, kad pasiekus tam tikrą ribą (~100 skaičiavimo iteracijų) Gerchbergo – Sakstono metodu apskaičiuoto difrakcinio atvaizdo vidutinė kvadratinė paklaida beveik nustoja mažėti. Tai reiškia, kad skaičiavimas naudojant daugiau iteracijų hologramos kokybės iš esmės nepagerins, todėl programoje naudojama 100 skaičiavimo iteracijų.

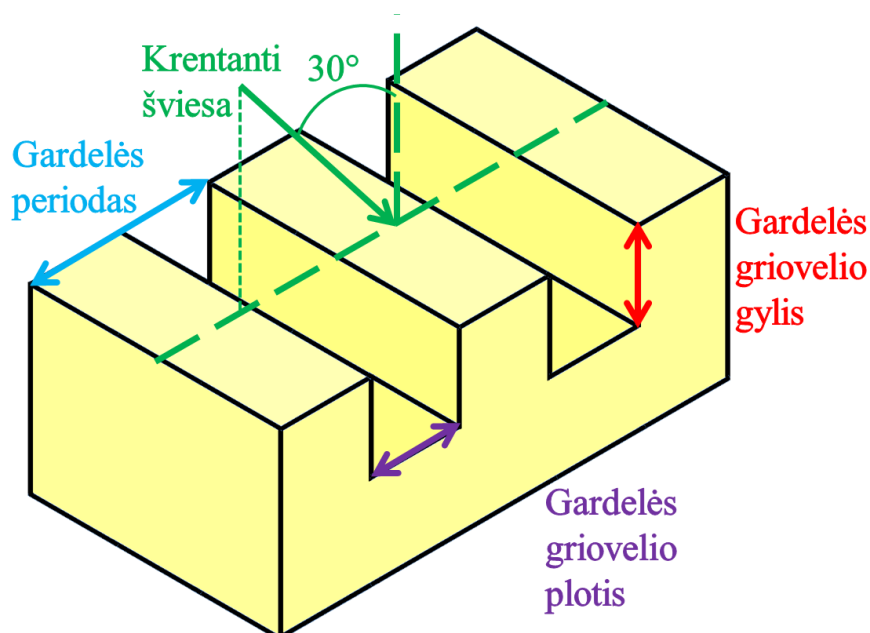


25 pav. Skaitmeninės hologramos struktūros apskaičiavimas: a) struktūrai apskaičiuoti skirtos programos vartotojo sąsajos langas su pavyzdiniu skaičiavimo rezultatu, b) tipinė vidutinės kvadratinės paklaidos priklausomybė nuo skaičiavimo iteracijų. Paklaida apskaičiuota pagal (30) formulę

3.2. Geriausių sąlygų parinkimas skaitmeninės hologramos mikroformavimui femtosekundinės lazerinės abliacijos būdu

Norint pasiekti didžiausią skaitmeninės hologramos difrakcinį efektyvumą, būtina nustatyti jos struktūros fizinius parametrus – atstumą tarp gretimų holografinių taškų bei struktūros gylį (kadangi holograma įrašoma medžiagos paviršiuje). Kadangi bendras į ją krentančios šviesos kiekis pasiskirsto po visus galimus difrakcinius maksimumus, o skaitmeninė holograma kiekvieną difrakcinį maksimumą paverčia atvaizdu, norint turėti vieną ryškų atvaizdą reikia naudoti tik nulinės eilės difrakcinį maksimumą. Kadangi skaitmeninė holograma iš principo veikia taip pat kaip difrakcinė gardelė, geriausias jos struktūros fizinių parametrų vertes galima įvertinti modeliuojant hologramą kaip difrakcinę gardelę griežtai susietų bangų analizės metodu.

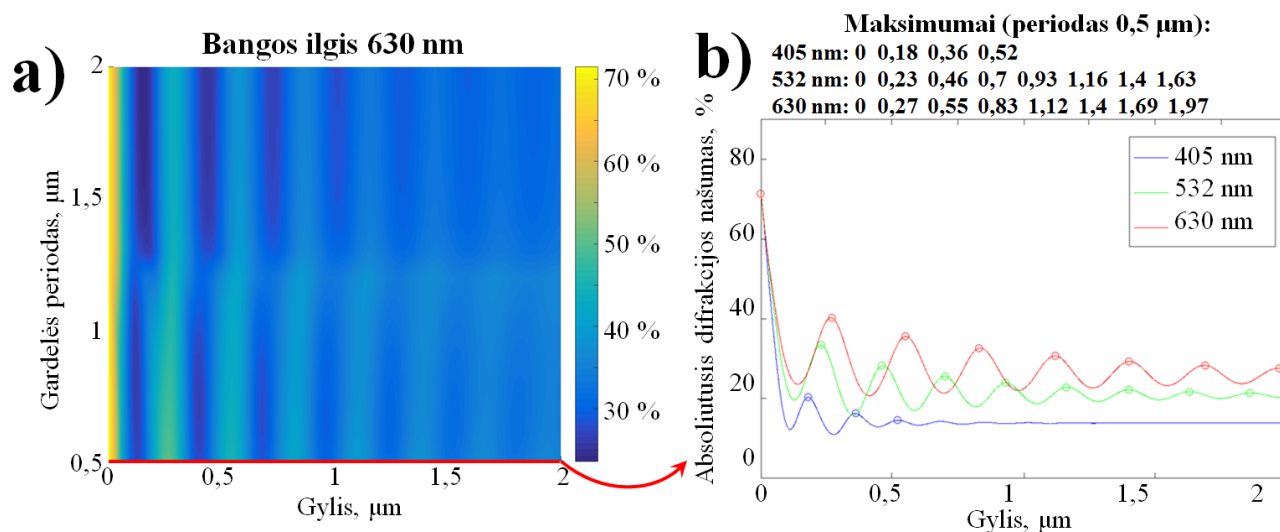
Modeliuota difrakcinė gardelė buvo sudaryta iš nikelio (struktūra ir jos padėklas) ir buvo oro aplinkoje, į gardelę šviesa krito 30° kampu nuo statmens, šios sąlygos nekito viso modeliavimo metu. Difrakcijos efektyvumas buvo modeliuojamas trimis šviesos bangos ilgiams – 405 nm, 532 nm, 630 nm. Programoje skaičiavimus galima atlikti tik su poliarizuota šviesa. Siekiant simuliuoti difrakcijos našumą esant nepoliarizuotai šviesai buvo naudojama tarpinė poliarizacija tarp skersinės elektrinės (*angl.* *transverse electric*) bei skersinės magnetinės (*angl.* *transverse magnetic*) poliarizacijų. Vienu metu modeliuojama gardelė buvo apšviečiama vieno bangos ilgio šviesa. Modelyje buvo varijuojamas gardelės griovelių gylis ir gardelės periodas laikant, kad gardelės griovelio plotis lygus pusei gardelės periodo. Gardelės griovelių gylis kito nuo 0 nm iki 2 μm žingsniu 10 nm. Gardelės periodas kito nuo 0,5 μm iki 2 μm žingsniu 0,1 μm . Gardelės griovelio gylis yra atstumas nuo griovelio apačios iki griovelio viršaus. Gardelės periodas yra atstumas nuo vieno gardelės griovelio centro iki gretimo griovelio centro. Modeliuojama struktūra pavaizduota 26 paveiksle.



26 pav. Modeliuojama struktūra su pavaizduotomis apšvietimo sąlygomis ir gardelės parametrais

Programos „GSolverV52“ sugeneruoti skaitiniai duomenys toliau buvo apdoroti ir atvaizduoti MATLAB programinėje aplinkoje parašyta programa. 27 paveikslo a dalyje pateikiama nulinės difrakcijos eilės absoliučiojo difrakcijos efektyvumo priklausomybė nuo gardelės griovelio gylis ir

periodo vienam bangos ilgiui (visiems bangos ilgiams šie grafikai buvo panašios tendencijos), o b dalyje pateikiama efektyvumo priklausomybė nuo griovelio gylio visiems modeliuotiems bangos ilgiams.

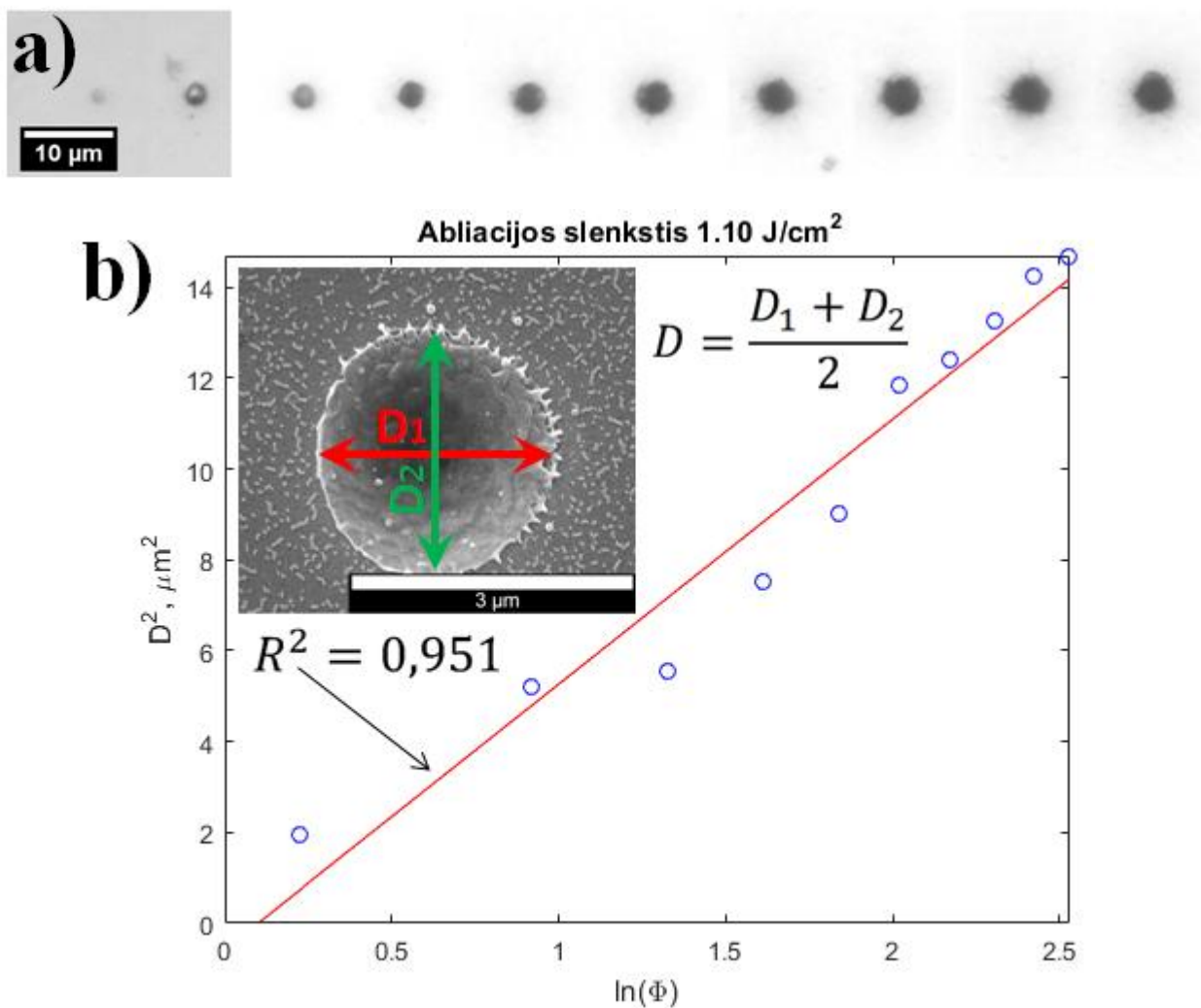


27 pav. Difrakcijos efektyvumo modeliavimas griežtai susietų bangų metodu: a) absoliučiojo difrakcijos efektyvumo priklausomybė nuo gardelės gylio ir periodo nuliniam maksimumui su pavaizduotu vienmačiu dvimačio grafiko pjūviu, b) absoliučiojo difrakcijos našumo priklausomybė nuo gardelės gylio trims skirtingiems bangos ilgiams, pavaizduoti taškai žymi efektyvumo lokaliuosius maksimumus (gyliai ties kuriais jie pasireiškia nurodyti prie kiekvieno bangos ilgio)

Iš 27 paveikle pateiktų priklausomybių grafikų matoma, kad difrakcijos našumas yra skirtingas skirtingiems bangos ilgiams – didesniai bangos ilgiui jis bendrai yra didesnis. Taip pat efektyvumo priklausomybė kinta kaip gestantys harmoniniai svyravimai priklausomai nuo struktūros gylio mažėjančia amplitude, kol galiausiai nusistovi ties kažkokia pastovia verte. Trumpesniems šviesos bangos ilgiams šis nusistovėjimas įvyksta esant mažesniai gyliui, o ilgesniems bangos ilgiams – didesniai gyliui. Vertės, ties kuriomis nusistovi difrakcijos efektyvumas taip pat didėja proporcingai šviesos bangos ilgiui. Didžiausias efektyvumas pasiekiamas esant nuliniui gyliui – kai paviršiuje nėra gardelės (tai atitinka veidrodinį atspindį nuo paviršiaus). Savaime suprantama, kad difrakcinė gardelė su nuliniu gylio grioveliais nėra įmanoma, todėl šis atvejis neturi fizikinės prasmės kuomet kalbama apie difrakcines gardeles turinčias nenulinį gylį. Kaip matoma 27 paveikslo b dalyje, efektyvumo priklausomybės patiriami lokalieji maksimumai įgyja didesnę vertę kuomet gardelės gylis yra mažesnis. Tai reiškia, kad norint pasiekti didžiausią efektyvumą reikia hologramą formuoti taip, kad jos griovelių gylis būtų kuo mažesnis, tačiau būtų kiek galima labiau artimas gyliui, ties kuriuo efektyvumas hologramą apšviečiančiam bangos ilgiui patiria lokalių maksimumą. Stebint efektyvumo priklausomybę nuo gardelės periodo didelių pokyčių nepastebėta – svyruojanti efektyvumo priklausomybė išlaikoma esant visiems gardelės periodams, o pats efektyvumas vos pastebimai mažėja didėjant periodui. Taip yra dėl to, kad bangos vėlinimo fazė keičiasi dėl gylio, tačiau ne periodo, pokyčio. Kita vertus, periodai didesni negu 1 μm nėra ypač svarbūs, kadangi tuomet difrakcinė gardelė šviesą difraguotų į keletą difrakcijos eilių, o šiame darbe siekiama išgauti tik vieną difrakcinę eilę (skaitmeninės hologramos atvaizdą).

Prieš norint mikrostruktūruoti bet kokią medžiagą impulsinės lazerinės abliacijos būdu reikia nustatyti tos medžiagos abliacijos slenkstį. Jis nustatomas pagal šio darbo teorijos skiltyje aprašytą metodiką naudojant (21) išraišką. Lazerio pluošto parametrai, reikalingi abliacijos slenksčiui

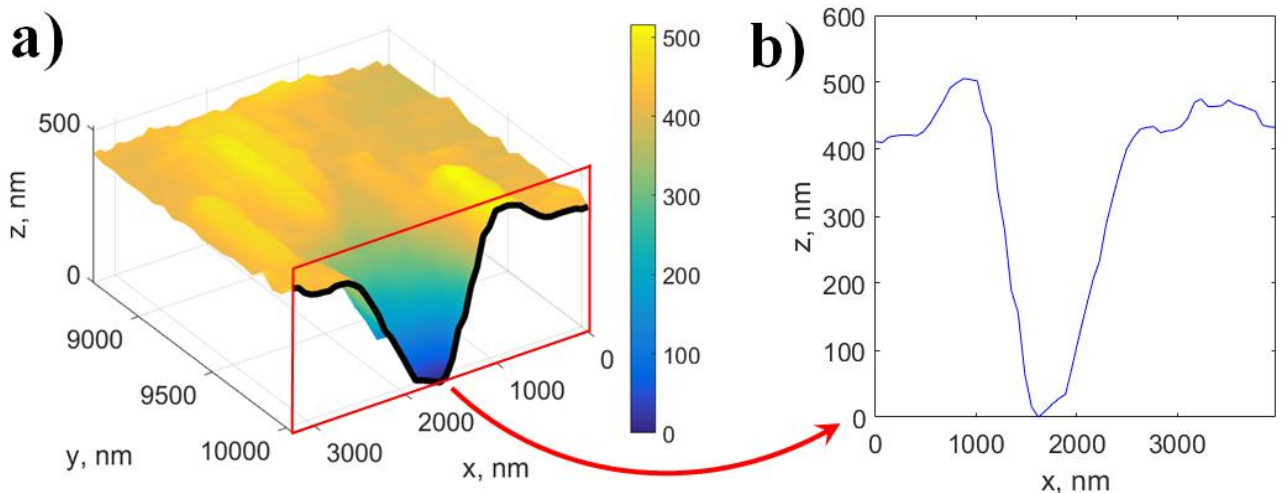
nustatyti yra parenkami lazerio nustatymuose (impulsų pasikartojimo dažnis F), išmatuojami (vidutinė pluošto galia $P_{vidutinė}$) arba apskaičiuojami pagal išraiškas (23) – (25) (vieno impulso energija E , fokusuoto pluošto diametras d_0 , medžiagos apšvietimo paviršinis energijos tankis Φ). Nustatant abliacijos slenkstį abliacijos krateriams (28 pav. a) sudaryti buvo naudojamas 515 nm bangos ilgis, impulsų pasikartojimo dažnis buvo 40 kHz, maksimali vidutinė pluošto galia buvo 9,37 mW, ji buvo keičiama nuo 10 % iki 100 % žingsniu 10 %. Atlikus abliacijos testą, išmatavus bei apskaičiavus reikiamus lazerio pluošto parametrus bei atlikus abliacijos kraterių vidutinio diametro matavimus bei šioms vertėms atlikus tiesės pritaikymą mažiausių kvadratų metodu, buvo nustatyta, kad abliacijos slenkstis elektrochemiškai nusodintai nikelio dangai yra $1,10 \text{ J/cm}^2$ (28 pav. b). Kitų autorių nustatytos slenkščio vertės kiek skiriasi – naudojant 100 fs trukmės bei 800 nm bangos ilgio lazerio impulsus jų nustatytas mechaniškai poliruoto nikelio abliacijos slenkstis buvo $0,39 \text{ J/cm}^2$ [114]. Šis abliacijos bei medžiagos apdirbimo sąlygų skirtumas gali paaiškinti abliacijos slenkščio skirtumą – dėl to, kad elektrochemiškai nusodinto nikelio paviršius yra lygesnis (ir todėl – labiau atspindintis) negu mechaniškai poliruotas [115]. Taip pat jų autorių naudota mažesnė impulsų trukmė galėjo turėti įtakos abliacijos slenkščiu.

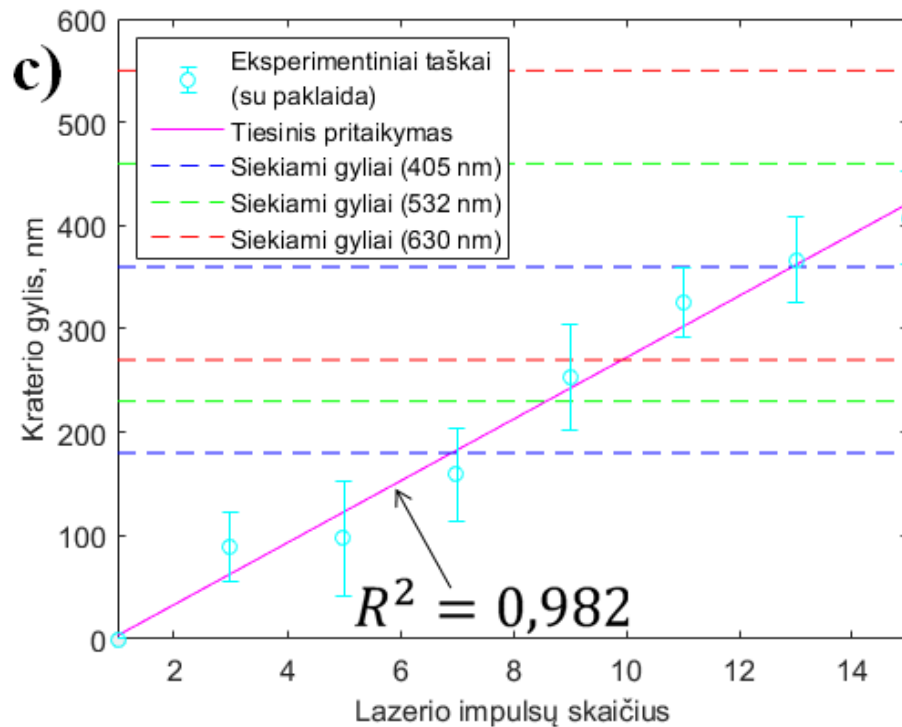


28 pav. a) Ablacijos kraterių masyvas naudotas elektrochemiškai nusodinto nikelio abliacijos slenkščio nustatymui, b) nikelio lazerinės abliacijos slenkščio nustatymas D kvadrato metodu naudojant mažiausių kvadratų metodu apskaičiuotą tiesinį kreivės priderinimą su pavaizduota priderinimo determinacijos koeficiento verte. Determinacijos koeficiento vertė apskaičiuota pagal (32) formulę

Žinant abliacijos slenkstį hologramos mikroformavimui galima parinkti pakankamą galią, kad vyktų medžiagos abliacijos procesas. Toliau nustatomas kitas svarbus mikrofabrikavimo parametras – lazerio išabliuojamo kraterio gylio priklausomybė nuo impulsų skaičiaus esant nekintamai vidutinei pluošto galiai. Kaip matoma 25 paveikslo b dalyje, absoliutinio difrakcijos efektyvumo padidėjimai stebimi, kuomet difrakcinės gardelės (realiai – skaitmeninės hologramos) įgyja tam tikras diskretines vertes. Šios vertės yra 180 nm, 360 nm ir 520 nm (kuomet hologramos difrakcinis atvaizdas formuojamas iš 405 nm bangos ilgio lazerio spinduliuotės) arba 230 nm, 460 nm ir 700 nm (kuomet hologramos difrakcinis atvaizdas formuojamas iš 532 nm bangos ilgio lazerio spinduliuotės) arba 270 nm, 550 nm ir 830 nm (kuomet hologramos difrakcinis atvaizdas formuojamas iš 630 nm bangos ilgio lazerio spinduliuotės). Yra ir kitų struktūros gylių, kuriems esant nulinės difrakcinės eilės difrakcijos efektyvumas padidėja, tačiau kuo struktūra gilesnė, tuo šie padidėjimai yra mažesni, o galiausiai jie pranyksta ir efektyvumas nebekinta (tai gerai pastebima 405 nm bangos ilgio spinduliuotei). Apie galios pasirinkimą buvo nuspręsta iš abliacijos slenkščiu nustatyti naudotų kraterių diametrų atsižvelgiant į ryšį tarp lazerinės abliacijos būdu suformuoto kraterio diametro ir jo gylio, detaliau aptarto [116]. Atsižvelgus į tai, kad siekiama formuoti kuo mažesnio gylio kraterius ir įvertinus, kad lazerinė abliacija vyksta esant vos 10% nuo naudotos vidutinės lazerio pluošto galios – 0,55 mW (tai atitinka 0,73 mJ/cm² paviršinių energijos tankį). Norint, kad kraterio gylis kistų siaurame intervale bei siekiant preciziškai nustatyti gylio kitimą impulsų skaičius buvo varijuojamas ribose nuo 1 iki 15 impulsų vienam krateriui.

Kiekvieno skirtingo impulsų skaičiaus poveikio tyrimui naudojant lazerinę abliaciją buvo suformuota po vieną 100 x 100 abliacijos kraterių masę, visi krateriai masyve formuoti tomis pačiomis sąlygomis, tarp bet kurių gretimų kraterių paliekant po keturių mikrometrų atstumą. Tipinio kraterio pjūvis pavaizduotas 29 paveikslo a dalyje, o jo profilograma pavaizduota 29 paveikslo b dalyje. Tai buvo atlikta siekiant supaprastinti matavimą atominių jėgų mikroskopu – į kraterių masę yra lengviau nusitaikyti nei į pavienį kraterį. Atlikus masyvo fragmento matavimą atominių jėgų mikroskopu iš kraterių profilogramų buvo nustatytas kiekvieno pamatuoto kraterio gylis ir išvestas visų viename masyve pamatuotų kraterių gylių aritmetinis vidurkis. Tokiu būdu nustatytas kraterio, suformuojamo esant konkrečiam impulsų skaičiui, gylis. Turint visas skirtingas sąlygas suformuotų kraterių gylius ir jiems atlikus tiesės pritaikymą mažiausių kvadratų metodu, nustatyta kraterio gylio priklausomybė nuo jam suformuoti naudoto impulsų skaičiaus (priklausomybės grafikas pavaizduotas 29 pav. c).





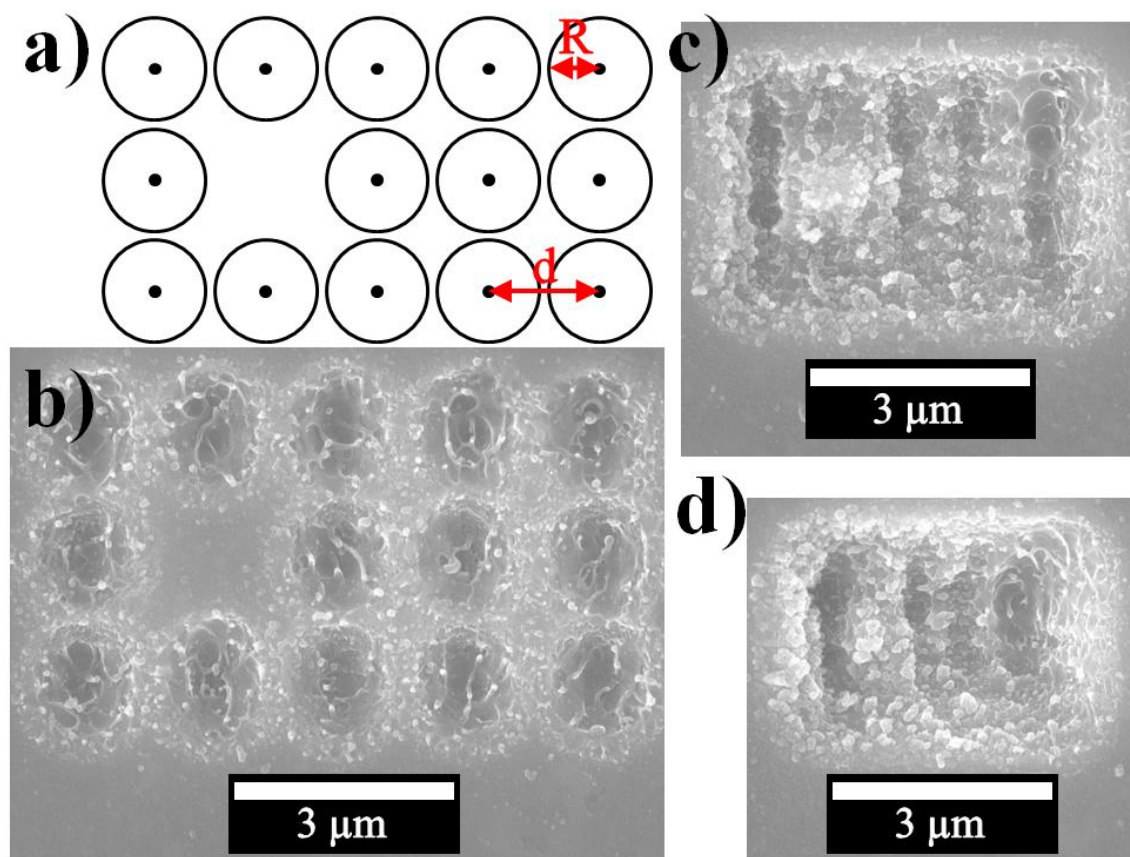
29 pav. Abliacijos kraterių gylio tyrimas: a) abliacijos kraterio, suformuoto naudojant 13 lazerio impulsų, skerspjūvis su paryškinta profilio pjūvio sritimi, b) to paties kraterio pjūvis a dalyje paryškintoje srityje (profilograma), c) abliacijos kraterio vidutinio gylio priklausomybė nuo jam suformuoti naudoto impulsų skaičiaus ir mažiausių kvadratų metodu apskaičiuotas tiesinis kreivės priderinimas su pavaizduota priderinimo determinacijos koeficiento verte. 0 eilės difrakcijos efektyvumo padidėjimą atitinkantys gyliai atitinkamiems šviesos bangos ilgiams pavaizduoti brūkšninėmis linijomis. Determinacijos koeficiento vertė apskaičiuota pagal (32) formulę

29 pav. a pavaizduotas krateris savo aplinkoje turi šiek tiek išmetos (*angl.* ejecta), tačiau tai yra įprastas reiškinys tokio tipo krateriuose [116]. Iš 29 pav. c pavaizduoto grafiko matoma, kad kuomet impulsų skaičius kinta nuo 7 iki 10 (esant $0,73 \text{ mJ/cm}^2$ lazerio pluošto energijos paviršiniam tankiui), gaunami kraterių gyliai atitinka gylius, ties kuriais yra stebimas pirmasis 0 eilės difrakcijos maksimumo padidėjimas. Kadangi skaitmeninės hologramos atvaizdo atkūrimui nuspręsta naudoti 532 nm bangos ilgio lazerio spinduliuotę, joms formuoti šiame darbe buvo pasirinkta naudoti 9 lazerio impulsus.

Kuomet yra nustatytos skaitmeninės hologramos lazerinio mikroformavimo sąlygos, galima nustatyti ir hologramos fizinius matmenis esant šioms sąlygoms. Jie yra susiję su atstumu tarp hologramos taškų bei hologramos skaitmenine raiška. Kaip matoma 23 paveikslo a dalyje pavaizduoto skaitmeninės hologramos struktūros skaičiavimo vartotojo sąsajos lango dalyje „Hologramos struktūra“, skaitmeninė holograma yra diskreti struktūra – ji sudaryta iš baigtinio skaičiaus taškų. Hologramos skaitmeninė raiška nulemia jos difrakcinio atvaizdo kokybę – kuo didesnė raiška (kuo daugiau taškų sudaro hologramą), tuo hologramos difrakcinis atvaizdas labiau panašus į užduotąjį difrakcinį atvaizdą. Realios hologramos difrakciniam atvaizdai įtakos turi ne tik jo raiška, bet ir fizinis atstumas tarp gretimų taškų. Kadangi lazerinei abliacijai naudojamas lazerio pluoštas pasižymi galios pasiskirstymu artimu Gausiniam, tokio pluošto suformuoto abliacijos kraterio gylis irgi dalinai atkartoja šį skirstinį (29 pav. b), todėl kraterio gylis bus nepastovus visame jo užimame paviršiaus plote. Pačio kraterio diametras yra $\sim 1 \mu\text{m}$. Jeigu reali holograma yra sudaryta iš taškų (abliacinių kraterių), kurie nėra susijungę, tuomet ji turės daugelį difrakcinių

maksimumų, o jei visi krateriai bus pakankamai susijungę, ji turės tik vieną difrakcinį atvaizdą (nulinį maksimumą). Taip yra dėl to, kad periodiškai pasikartojantis atstumas tarp taškų atitinka dvimatę difrakcinę gardelę su atitinkamu periodu. Norint išgauti tik vieną difrakcinį maksimumą (atvaizdą), kuriam tektų visa difraguojančios šviesos galia, reikia parinkti tokį atstumą, kuriam esant užtikrinamas gretimų kraterių jungumas. Kita vertus, atstumas tarp kraterių negali būti per mažas, kadangi tai sugadintų pačią hologramos struktūrą. Skaitmeninėje hologramoje ne visi abliuojami taškai yra greta vienas kito, lygiai taip pat ne visi neabliuojami taškai yra greta vienas kito (25 pav. a „Hologramos struktūra“). Pavyzdžiui, jei vienas taškas, kuris nėra abliuojamas, yra apsuptas abliuojamų taškų, o atstumas tarp taškų yra per mažas, atliekant abliaciją neabliuojamas taškas bus paveiktas aplinkinius taškus abliuojančios spinduliuotės ir bus išabliuotas, nors neturėtų būti išabliuotas. Tokiu atveju hologramos struktūra būtų sugadinta, o jos difrakcinis atvaizdas būtų gaunamas nekokybiškas arba išvis nebūtų gaunamas.

Norint nustatyti geriausią atstumą tarp gretimų hologramos taškų buvo suformuoti keli glaudžiai išdėstyti abliacijos kraterių masyvai, kurių kiekviename atstumas tarp gretimų kraterių buvo vis kitoks. Vieno masyvo struktūra pavaizduota 30 pav. a. Visi individualūs krateriai kiekviename masyve buvo formuojami naudojant anksčiau nusatytas geriausias sąlygas – $0,73 \text{ mJ/cm}^2$ vidutinę pluošto galią ir 8 lazerio impulsus vienam krateriui. Atstumas tarp gretimų taškų buvo keičiamas nuo $0,5 \mu\text{m}$ iki $1,3 \mu\text{m}$ žingsniu $0,1 \mu\text{m}$. Kuris atstumas tarp gretimų taškų yra tinkamiausias buvo nustatyta iš skenuojančios elektroninės mikroskopijos mikrofotografijų. Keletas būdingų masyvų su skirtingais tarptaškiniais atstumais pavaizduoti 30 paveikslu dalyse b – d.



30 pav. Skaitmeninės hologramos tarptaškinio atstumo parinkimas: a) abliacijos kraterių masyvo struktūra su pavaizduotu tarptaškinio atstumu d ir vieno kraterio spinduliu R skirta nustatyti tinkamą tarptaškinį atstumą. Abliacijos kraterių masyvo, kurio tarptaškinis atstumas yra b) $1,3 \mu\text{m}$, c) $1 \mu\text{m}$, d) $0,5 \mu\text{m}$ skenuojančio elektroninio mikroskopo mikrofotografijos

Kaip matoma iš 30 paveikslo b, kuomet tarptaškinis atstumas yra $1,3 \mu\text{m}$, abliacijos krateriai turi aiškiai apibrėžtas ribas. Kita vertus, jei atstumas tarp kraterių yra $0,5 \mu\text{m}$ (30 pav. d), kraterių apsuptas laisvas plotas irgi yra išabliuojamas, nors taip neturėtų būti. Tik esant tinkamam tarptaškiniam atstumui $1 \mu\text{m}$ (30 pav. c) gretimi krateriai susilieja į vieną visumą, bet lazeriu nepaveiktas plotas vis dar nėra pažeidžiamas. Naudojant šį atstumą bei didžiausią efektyvumą leidžiantį pasiekti gylį užtikrinančias kraterių abliavimo sąlygas šiame darbe buvo suformuotos visos skaitmeninės hologramos.

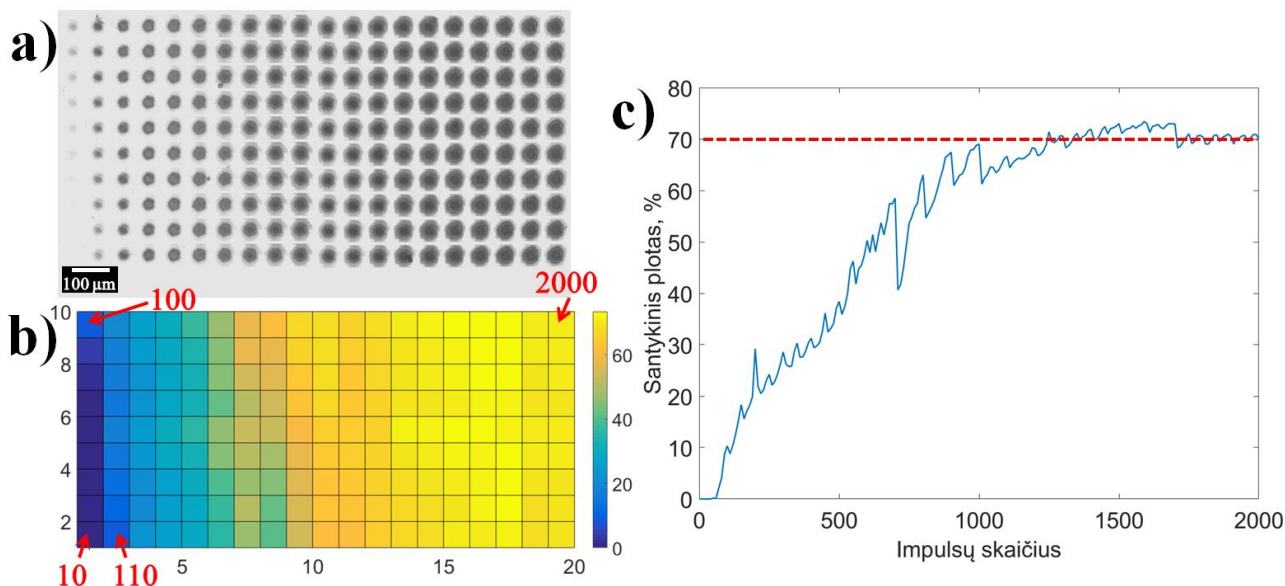
3.3. Geriausių sąlygų parinkimas taškinės hologramos mikroformavimui femtosekundinės lazerinės abliacijos būdu

Pilnai spalvas perteikiančių taškinių hologramų modeliavimo programos (24 pav.) gražinami hologramos struktūros parametrai – difrakcinės gardelės periodas, jos orientacija bei difrakcijos efektyvumas naudojant mikroformavimo sistemą „FemtoLab“ leidžia suformuoti sumodeliuotą hologramą. Pirmieji du gražinami hologramos struktūros parametrai yra nesudėtingai nustatomi mikroformavimo sistemos valdymo programoje, tačiau hologramos efektyvumo realizavimas nėra trivialis užduotis. Modeliavimo programoje jis yra išreiktas santykiniais vienetais – maksimalus efektyvumas sunormuotas į vienetą. Tai programoje leidžia paprastai atlikti skaičiavimus, tačiau dėl šio normavimo tampa neaišku koks turėtų būti realus gardelių difrakcijos efektyvumas. Norint susieti programos normuotą efektyvumą su realiu difrakcijos efektyvumu reikia pasirinkti kažkokią realią efektyvumo vertę ir ją prilyginti maksimaliai efektyvumo vertei (vienetui), ir tada visas santykinio efektyvumo vertes perskaičiuoti į realias vertes proporcingai nustatytai maksimaliai vertei.

Kompiuterinio modeliavimo programoje „GSolverV52“ kiekviena modeliuojama gardelė aprašoma vieno jos periodo struktūra ir yra laikoma, kad visa struktūra yra sudaryta iš identiškų periodiškai išdėstytų segmentų. Tai reiškia, kad visa modeliuojama difrakcinė gardelė turi būti nekintamo gylio visame savo plote. Pasak [17], interferencinės lazerinės abliacijos būdu suformuotos difrakcinės gardelės gylis nėra pastovus – jis kinta atkartodamas impulsinio pluošto skersinis optinės galios pasiskirstymas. Dėl nehomogeniškų gardelės savybių holografiniame taške joks vienas programa „GSolverV52“ sukurtas modelis nebus tinkamas aprašyti tokiu būdu suformuotai difrakcinei gardelei, dėl to taškinės hologramos gardelių pirmosios difrakcijos eilės modeliavimas nėra tinkamiausias metodas nustatyti maksimalų interferencinės lazerinės abliacijos būdu suformuotos difrakcinės gardelės efektyvumą. Tokiu atveju yra daug prasmingiau taškinę hologramą sudarančių gardelių difrakcijos efektyvumą nustatyti eksperimentiškai.

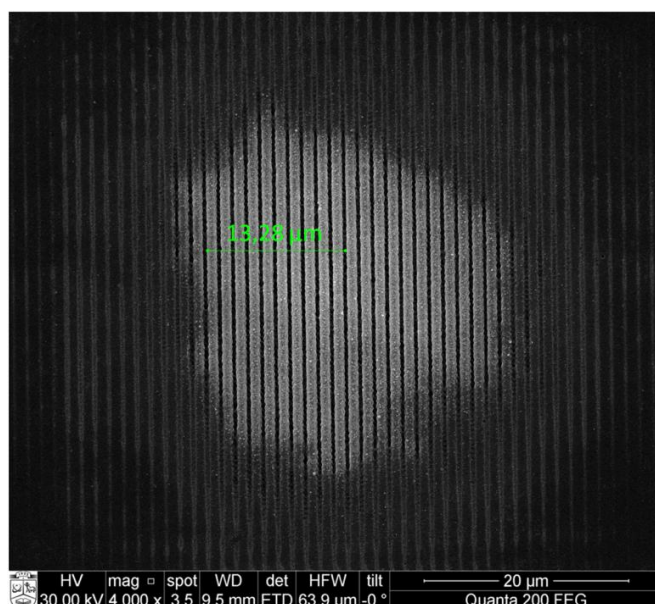
Pagal literatūrą [17], nikelyje gardelių našumas gali būti valdomas keičiant joms sudaryti naudojamą impulsų skaičių kuomet yra parinktas tinkamas abliuojančios lazerinės spinduliuotės energijos paviršinis tankis. Yra žinoma, kad mikroformavimą atliekant su šiame darbe naudojama įranga kvadratėlio, kuriame formuojama gardelė, kraštinės ilgis yra $65 \mu\text{m}$ [17]. Difrakcinės gardelės užimama to kvadratėlio dalis šiame darbe vadinama santykiniu plotu. Siekiant iš difrakcinių gardelių našumo priklausomybės panaikinti difrakcinės gardelės santykinio ploto priklausomybę nuo impulsų skaičiaus, atliktas šio ploto priklausomybės nuo difrakcinės gardelei formuoti naudoto impulsų skaičiaus tyrimas. Jo metu nustatyta, kad abliacijai naudojant antrąją femtosekundinio lazerio spinduliuotės harmoniką, (bangos ilgis 515 nm) ir parinkus abiejų interferuojančių antrosios harmonikos pluoštų galią 85 mW (tai atitinka paviršinį spinduliuotės energijos tankį lygų 50 mJ/cm^2) ir gardelei formuoti naudojamą impulsų skaičių keičiant nuo 10 iki

2000 impulsų žingsniu 10, pasiekiamas gardelės santykinio ploto išsotinimas ties maždaug 70% maksimalus gardelės srities ploto kuomet impulsų skaičius kinta ribose nuo 1500 iki 2000. Aprašytomis sąlygomis suformuotos difrakcinių gardelių matricos pavaizduota 31 pav. a, matricos gardelių santykiniai plotai pavaizduoti 31 pav. b, o gardelių santykinio ploto priklausomybė nuo joms suformuoti naudoto impulsų skaičiaus pavaizduota 31 pav. c.



31 pav. Difrakcinės gardelės srities ploto kitimas: a) difrakcinių gardelių matrica, gauta keičiant joms formuoti naudotą impulsų skaičių nuo 10 iki 2000 impulsų žingsniu 10, b) matricą atitinkantis gardelių santykinį plotų pasiskirstymas (siekiama lengviau orientuotis nurodyta impulsų kitimo tvarka, spalva reiškia santykinį gardelės plotą), c) gardelių santykinio ploto priklausomybė nuo joms formuoti naudoto impulsų skaičiaus kaip grafikas su pavaizduota išsotinimo riba

Tai, jog santykinio difrakcinės gardelės ploto išsotinimas neviršija 70% reiškia, kad dėl lazerio pluošto galios (o kartu – ir paviršinio energijos tankio) Gausinio pasiskirstymo kvadrato kraštuose gardelė nėra išabliuojama. Tai puikiai matoma 32 paveiksle – jame pavaizduota viena difrakcinė gardelė išabliuota esant jos santykinio ploto išsotinimo sąlygoms (naudojant 2000 impulsų). Atlikus sistema „FemtoLab“ visų 15 galimų suformuoti difrakcinių gardelių periodų matavimą skenuojančiu elektroniniu mikroskopu buvo nustatytos tikslesnės periodų vertės, jos pateiktos 1 lentelėje. Vienas periodas buvo nustatomas išmatuojant 10 periodų užimamą atstumą ir gautąjį matmenį padalijant iš 10. Šios patikslintos (realiai išgaunamos) periodų vertės leidžia patobulinti taškinių hologramų struktūros apskaičiavimo programą (24 pav.) joje pakeičiant nominalias gardelių periodų vertes realiomis periodų vertėmis.



32 pav. Santykinio ploto įsisotinimo sąlygomis suformuotos difrakcinės gardelės periodo matavimas

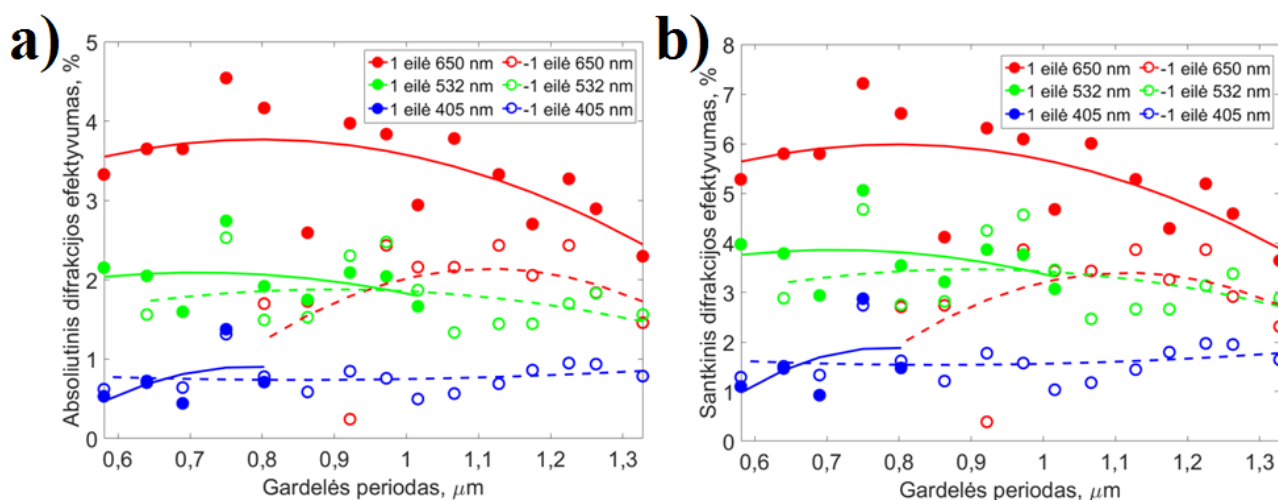
1 lentelė. Lazerinio mikroformavimo sistemos „FemtoLab“ suformuojamų difrakcinių gardelių nominalaus ir realaus periodo palyginimas

Eilės numeris	Sistemoje nurodomi periodai	Išmatuoti periodai
1	1.3	1.328
2	1.264	1.263
3	1.229	1.225
4	1.193	1.175
5	1.157	1.128
6	1.121	1.066
7	1.086	1.016
8	1.05	0.972
9	1.014	0.922
10	0.979	0.863
11	0.943	0.803
12	0.907	0.750
13	0.871	0.690
14	0.836	0.640
15	0.8	0.581

Kadangi kvadratėlio, kuriame suformuota difrakcinė gardelė plotas yra nedidelis, į jį ne tik sudėtinga nusitaikyti su lazeriu (21 pav. f), bet ir sudėtinga įvertinti pluošto galios dalį, tenkančią tam kvadratėlio plotui. Norint įvertinti tokios gardelės difrakcijos efektyvumą reikia (esant nekintamiems mikroformavimo parametrams) suformuoti tokio dydžio identiškų difrakcinių gardelių masyvą, kad į masyvo plotą galėtų patekti visas lazerio pluošto skersinis plotas. Nustačius, kad naudojant daugiau nei 2000 lazerio impulsų gardelės plotas nebedidėja, tiriant difrakcijos efektyvumo priklausomybę nuo gardelės periodo ir jai formuoti naudoto impulsų skaičiaus jos buvo formuojamos šio maksimalaus santykinio ploto. 16 pav. matoma, kad santykinio difrakcijos

efektyvumo priklausomybė monotoniškai mažėja didėjant lazerio spinduliuotės energijos paviršiniam tankiui, todėl šiame darbe buvo tiriama jo priklausomybė tik nuo impulsų skaičiaus. Yra manoma, kad interferencinės lazerinės abliacijos būdu suformuojamų difrakcinių gardelių gylio kitimas yra susijęs su joms suformuoti naudotu lazerio impulsų skaičiumi [17]. Išmatuoti visą difrakcinę gardelę atominių jėgų mikroskopu nėra įmanoma, kadangi jo matavimo laukas tėra $12 \times 12 \mu\text{m}$ dydžio palyginus su gardelės užimama sritimi – $65 \times 65 \mu\text{m}$ kvadratine sritimi, o nusitaikyti į vieną konkrečią difrakcinę gardelę dėl mikroskopo nepakankamo optinės kameros didinimo, todėl difrakcinių gardelių matavimas atominių jėgų mikroskopu nebuvo atliktas.

Siekiant ištirti difrakcijos efektyvumo priklausomybę nuo gardelės periodo buvo suformuota 15 difrakcinių gardelių kvadrato formos masių (kvadrato kraštinė 5 mm), kiekvienas iš jų sudarytas iš skirtingo periodo difrakcinių gardelių, kiekvienai difrakcinei gardelei naudota po 2000 impulsų, paviršinis spinduliuotės energijos tankis buvo 50 mJ/cm^2 . Nuo masyvo difragavusios optinės galios matavimas buvo atliekamas naudojant fotodiodą (21 pav. a), ir 3 skirtingus lazerius – 405 nm, 532 nm ir 650 nm bangos ilgio (22 pav. b – d), matavimai buvo atlikti pagal 21 pav. f pavaizduotą schemą. Į nikelio folijos paviršių kiekvieno matavimo metu lazerio pluoštas krito 10° kampu nuo statmens. Buvo matuojama -1, 0 ir +1 difrakcinių eilių galia, taip pat į gardelę krentančio pluošto galia. Visų matavimų metu buvo stengiamasi išlaikyti tokį patį 10 cm atstumą tarp gardelių masyvo ir fotodiodo. Šis atstumas buvo parinktas todėl, kad jam esant difragavusios šviesos galia nebedidėdavo mažinant atstumą labiau (į fotodiodo jautrijį plotą patekdavo visas difrakcinis maksimumas). Matavimo metu jautrusis fotodiodo paviršius buvo laikomas statmenai į jį krentančiam pluoštui. Taškinėms hologramoms svarbūs yra 1 ir -1 eilių difrakciniai maksimumai, todėl 0 eilės maksimumas čia nėra aptariamas. Kai kuriais atvejais -1 ir +1 eilių difrakcinių maksimumų nebuvo įmanoma pamatuoti, kadangi jie nesusidarė, todėl grafikuose šie taškai grafikuose nėra pavaizduojami. -2 ir +2 eilės difrakciniai maksimumai nesusidarė visais atvejais. 1 ir -1 difrakcijos eilių absoliučiojo ir santykinio efektyvumų priklausomybės nuo gardelės periodo grafikai pavaizduoti 33 paveiksle.



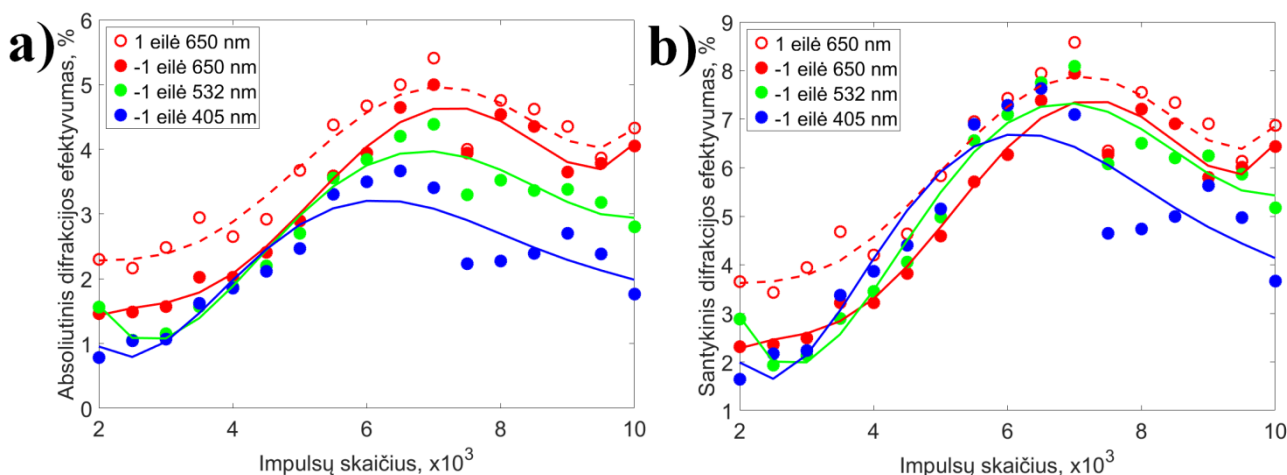
33 pav. Difrakcijos efektyvumo priklausomybė nuo difrakcinės gardelės periodo skirtingiems bangos ilgiams: a) absoliutinio ir b) santykinio difrakcijos efektyvumų priklausomybės

Kaip matoma, santykinis našumas už absoliutųjį didesnis raudonai (650 nm) šviesai buvo 1,58 karto, žaliai (532 nm) šviesai – 1,84 karto, o mėlynai (405nm) – 2,08 karto. Šių efektyvumų

santykis lygus atitinkamo bangos ilgio atspindžio koeficientui: 650 nm – 0,63, 532 nm – 0,54, 405 nm – 0,48.

Iš 33 paveikslo matoma, kad raudonos šviesos +1 ir -1 eilių difrakcijos efektyvumai smarkiai skiriasi: +1 eilės absoliutusias difrakcijos efektyvumas kinta ribose 2,5% – 4,5%, o -1 eilės absoliutusias efektyvumas pagrinde kinta ribose 1,5% – 2,5%. Tai nebuvo pastebėta kitų spalvų šviesai – abiejų žalios šviesos difrakcijos eilių efektyvumas pagrinde kinta ribose 1,5% – 2,5%, o mėlynos šviesos – ribose 0,5% – 1,5%. Pastebima, kad +1 ir -1 eilių difrakcijos efektyvumas (tiek absoliutusias, tiek santykinis) neturi ryškios priklausomybės nuo difrakcinės gardelės periodo (silpna priklausomybė pasireiškia tik +1 difrakcijos eilei su 650 nm bangos ilgio šviesa). Tai reiškia, kad papildomai atsižvelgti į difrakcinės gardelės efektyvumo priklausomybę nuo jos periodo nebūtina ir visų periodų difrakcinių gardelių efektyvumą galima valdyti keičiant joms išabliuoti naudojamą impulsų skaičių.

Toliau buvo tirta difrakcijos našumo priklausomybė nuo gardelei formuoti naudoto lazerinių impulsų skaičiaus. Formuojant gardeles šiam tyrimui impulsų skaičius kito nuo 2000 iki 10000 žingsniu 500. Matrica buvo kvadratinė, jos kraštinės ilgis buvo 5 mm. Po vieną tokią matricą buvo suformuota kiekvienam skirtingam impulsų skaičiui. Kadangi reikšminga difrakcijos našumo priklausomybė nuo gardelės periodo nepastebėta, logiška teigti, kad visoms difrakcinėms gardelėms efektyvumo priklausomybė nuo jų formavimui naudoto impulsų skaičiaus bus panaši, todėl buvo pasirinkta vieno periodo (konkrečiai – 1,328 μm periodo) difrakcinė gardelė, ir difrakcijos efektyvumo priklausomybė nuo impulsų skaičiaus buvo tiriama tik jai. Kaip matoma iš 32 paveikslo, 1,328 μm periodo gardelei +1 difrakcijos eilę įmanoma pamatuoti tik raudonai šviesai, o -1 difrakcijos eilę pamatuojama visoms spalvoms. Difrakcijos našumo priklausomybės nuo gardelei formuoti naudoto impulsų skaičiaus šioms difrakcijos eilėms jau anksčiau naudotiems bangos ilgiams matavimų rezultatai pateikiami grafikų pavidalu 33 paveiksle. +1 ir -1 difrakcijos eilių absoliučiojo ir santykinio efektyvumų priklausomybės nuo gardelems formuoti naudoto impulsų skaičiaus pavaizduoti 34 paveiksle.



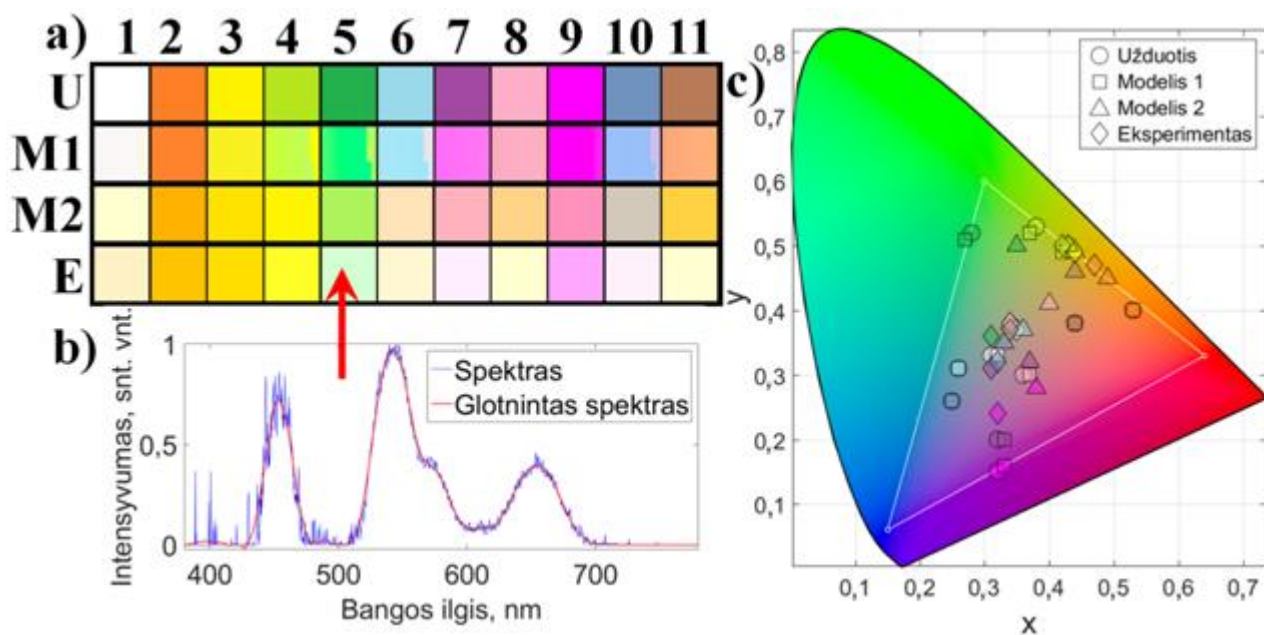
34 pav. Difrakcijos efektyvumo priklausomybė nuo difrakcinei gardelei suformuoti naudoto impulsų skaičiaus skirtingiems bangos ilgiams: a) absoliutinio ir b) santykinio difrakcijos efektyvumų priklausomybės

Iš 33 paveikslo matoma, kad visų bangos ilgių šviesos difrakcijos absoliutusias efektyvumas paklūsta tai pačiai tendencijai – didėja iki kol impulsų kiekis pasiekia maždaug 7000, o toliau ima mažėti. Visų bangos ilgių šviesos +1 difrakcinės eilės efektyvumai mažai skiriasi impulsų intervale nuo

3000 iki 6000, skirtumai išryškėja tik pasiekus maksimalią vertę. Maksimalus absoliutusias difrakcijos efektyvumas raudonai šviesai yra 5,5% -1 difrakcijos eilei ir 5% +1 difrakcijos eilei, o žaliai šviesai tai buvo ~ 4,5% ir mėlynai šviesai tai buvo ~3,5%. Toliau didinant impulsų skaičių pastebėta, kad absoliutusias difrakcijos efektyvumas pradeda mažėti, tačiau raudonai šviesai jis mažėja mažiausiai, o trumpėjant šviesos bangos ilgiui efektyvumo kritimas taip pat didėja. Galiausiai raudonai šviesai efektyvumas sumažėja iki ~4%, žaliai – iki ~3%, o mėlynai iki ~1,8% (esant impulsų kiekiui 10000). Maksimalus santykinis difrakcijos efektyvumas visiems bangos ilgiams yra vienodesnių verčių nei absoliutusias – maždaug 8%. Palyginant šias vertes su pateiktomis literatūroje (šaltinis [17], 16 paveikslas), gautas geras atitikimas tarp autoriaus gautųjų santykinio difrakcijos našumo verčių ir verčių nurodytų literatūroje. Panaši maksimali difrakcijos efektyvumo vertė (9%) buvo nustatyta iš lydinio „Invar 36“ (kurio pagrindinė sudedamoji dalis yra nikelis) lazerinės interferencinės abliacijos būdu suformuotoms difrakcinėms gardelėms, tačiau lydiniai abliuoti buvo naudojamas kiek didesnis paviršinis lazerio spinduliuotės tankis – 57 mJ/cm² [117]. Naudojant duomenis, pavaizduotus 33 ir 33 paveiksluose, taškinių hologramų struktūros apskaičiavimo programoje iš bendrinio skirtingų rūšių difrakcinių gardelių efektyvumo buvo apskaičiuotas lazerio impulsų kiekis, reikalingas pasiekti tam efektyvumui. Turint fizinius dydžius, tiksliai aprašančius difrakcinių gardelių periodus, orientacijas ir difrakcijos efektyvumus bei vienos gardelės plotą, programa galima apskaičiuoti su mikroformavimo sistemos „Femtolab“ valdymo programa „SCA“ suderinamus hologramos mikroformavimo parametrus ir pagal juos pagaminti pilnai spalvas perteikiančias taškines hologramas.

3.4. Taškinių hologramų struktūros apskaičiavimo programos rezultatų eksperimentinis validavimas

Norint patikrinti taškinių hologramų struktūros apskaičiavimo programos (24 pav.) rezultatų patikimumą, buvo parinkta 11 spalvų (vienspalvių difrakcinių atvaizdų), kurias atkurti paprastoms taškinėms hologramoms būtų neįmanoma arba beveik neįmanoma (užduotos spalvos – 35 pav. a „U“). Naudojant programą ir baltą spektrą (36 pav. žalia kreivė) buvo sugeneruoti taškinių hologramų difrakcinio atvaizdo modeliai (apskaičiuotosios spalvos – 35 pav. a „M1“) bei apskaičiuotos jų struktūros ir suformuotos nikelio paviršiuje interferencinės lazerinės abliacijos būdu naudojant lazerinio mikroformavimo sistemą „FemtoLab“ (20 pav.). Mikroformavimui naudotas 40 kHz impulsų pasikartojimo dažnio ir 515 nm bangos ilgio femtosekundinis lazerio pluoštas. Abiejų interferuojančių impulsų paviršinis lazerio spinduliuotės energijos tankis buvo 50 mJ/cm² – toks pats, koks ir nustatant efektyviausias formavimo sąlygas. Suformuotų hologramų difrakcijos spektrai buvo išmatuoti naudojant spektrometrometrinio matavimo schemą (23 pav. b). Pagal programoje užduotas apskaičiavimo sąlygas spalvos atkuriamos teisingai kuomet šviesa krenta į hologramas statmenai jas sudarančių gardelių grioveliams, o jos kritimo kampas nuo statmens 33,7°. Naudojant spektrinius duomenis pagal formules (8) – (18), (20) buvo apskaičiuota suformuotosios hologramos spalva (realios spalvos pavaizduotos 35 pav. a „E“), kartu pateiktas vienos iš hologramų difrakcinio atvaizdo spektras (35 pav. b). Visų spalvų koordinatės pavaizduotos CIE XYZ spalvingumo diagramoje (35 pav. c), tikslios visų spalvų koordinatės nurodytos 2 priede.



35 pav. Hologramų teorinių ir realių spalvų atitikmens tyrimas: a) užduotieji hologramų difrakciniai atvaizdai („U“), jų modeliai naudojant baltą spektrą („M1“) ir naudojant spektrą, kuris labiau atitinka spektrometro lempos spektrą („M2“) ir eksperimento metu gautais spektrais pagrįsti atvaizdų atitikmenys („E“), b) nurodytos spalvos išmatuotas spektras, c) difrakcinių atvaizdų spalvų padėties CIE XYZ spalvingumo diagramoje (žymeklių spalvos atitinka užduotąsias spalvas)

Kaip matoma iš 35 pav. a, hologramos apskaičiuotasis difrakcinis atvaizdas kartais yra daugiau nei vienos spalvos. Tai yra dėl hologramos struktūros parametų diskretizacijos. Kadangi sistema „FemtoLab“ gali suformuoti tik tam tikro periodo difrakcines gardeles, apskaičiuotųjų difrakcinių gardelių periodai buvo suapvalinti iki šių verčių. Kadangi periodų vertės atsakingos už spalvos atkūrimą, staigiai pakitus šioms vertėms taip pat staigiai pakinta ir atvaizdo spalva. Tokio šulinio hologramos parametų pokyčio įtaka gerai matoma „M1“ eilutės penktame atvaizdo modelyje – atsiranda hologramos plotelis, kuriame spalva yra kitokia nei likusioje hologramoje. Formuojant taškinių hologramų originalus su šiame darbe naudojama sistema tai yra neišvengiama. Kitos spalvos įtaka matoma ir spektre (35 pav. b centrinės smailės „petys“). Galima teigti, kad užduotasis atvaizdas („U“) yra tai, ką norima gauti, o jo modelis („M1“, „M2“) yra tai, kas yra įmanoma gauti ir kiek galima labiau panašu į užduotąjį. Todėl realus atvaizdas turėtų būti lyginamas su modeliu, bet ne su užduotuoju atvaizdu, o su pastaruoju turėtų būti lyginamas tik modelis. Spalvų pozicijoms atvaizduoti šiame darbe pasirinkta CIE XYZ spalvingumo diagrama vietoje CIE LAB spalvingumo diagramos todėl, kad ji yra patogesnė – ji išlaiko savo formą esant visoms ryškio vertėms, kadangi ji yra atidėta spalvingumo koordinatėse, o ne pačiose spalvų koordinatėse (išraiškos (8) – (13)). Kita vertus, CIE LAB sistemoje spalvingumo diagrama yra atidedama $a - b$ koordinatėse, o ne specialiose spalvingumo koordinatėse kaip CIE XYZ spalvingumo diagrama, todėl visas matomas spalvas atitinkanti CIE LAB spalvingumo diagramos sritis priklauso nuo spalvos šviesio (L koordinatės), todėl joje negalima palyginti dviejų spalvų spalvingumo koordinatėms neatsižvelgiant į šviesį, kaip kad galima CIE XYZ sistemoje. Realiai 8 pav. b pavaizduota CIE LAB spalvingumo diagrama yra tik schematinė. Todėl prasmingiausia yra spalvas atvaizduoti CIE XYZ spalvingumo diagramoje, o jų tarpusavio skirtumus lyginti CIE LAB koordinatėse (išraiška (19)) [118,119]. Visų tirtų spalvų skirtumai (ΔE) CIE LAB spalvų sistemoje pateikti 2 lentelėje.

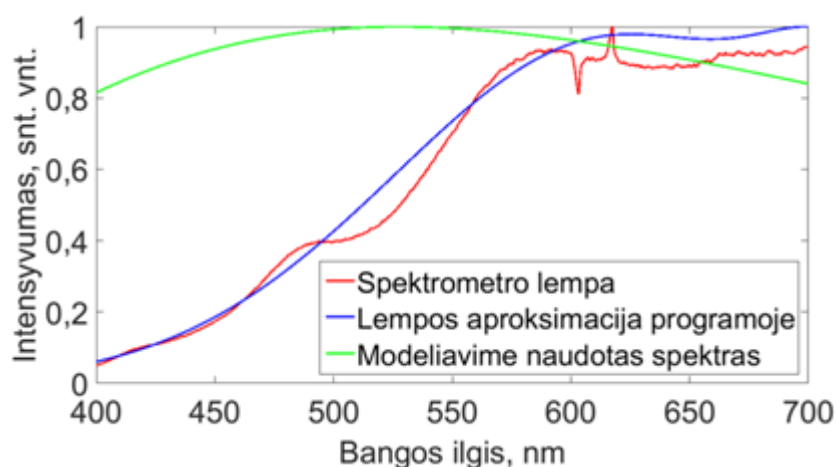
2 lentelė. Užduotų, sumodeliuotų ir eksperimentiškai nustatytų spalvų ΔE CIE LAB spalvų sistemoje.

Spalvos numeris	Užduoto atvaizdo spalvos ir jo modelio „M1“ spalvos ΔE	Užduoto atvaizdo spalvos ir jo modelio „M2“ spalvos ΔE	Atvaizdo modelio „M1“ spalvos ir realaus atvaizdo spalvos ΔE	Atvaizdo modelio „M2“ spalvos ir realaus atvaizdo spalvos ΔE
1	2,8	23.7	230,2	6.7
2	2,3	32.8	262,2	10.7
3	8,5	9.3	349,1	2.3
4	8,7	27.5	336,9	5.6
5	2,2	36.2	294,3	60.8
6	4,8	44.3	242,2	10.1
7	33,3	54.7	163,0	28.5
8	1,9	53.1	290,2	26.8
9	4,3	78.1	265,4	27.2
10	18,3	41.3	262,8	20.3
11	22,2	55.1	264,7	52.6

Atlikus spalvų palyginimą CIE LAB spalvų sistemoje nustatyta, kad algoritmo apskaičiuota spalva (1 modelio atveju) nuo užduotosios dažniausiai skiriasi ne itin daug (vyrauja skirtumai iki 10), o kai kuriais atvejais (spalvos 2, 5, 8) šis skirtumas netgi mažesnis nei vos pastebimas skirtumas. Tai reiškia, kad žmogus skirtumo tarp šių spalvų neatskirtų, nors jos ir nėra tapačios. Kadangi vos pastebimas skirtumas yra $\sim 2,3$, o dažniausiai vyrauja vos kelis kartus didesni skirtumai, galima teigti, kad algoritmas daugeliu atvejų yra didelio tikslumo. Galima išskirti 3 atvejus, kuomet ΔE yra smarkiai didesnis nei įprasta – tai spalvos 7, 10, 11. 35 pav. a galima pastebėti, kad sumodeliuotos spalvos yra kiek šviesesnės nei užduotosios, tai matoma iš jų šviesio (L) koordinatės palyginimo 2 priede (lentelės 7 – 10) – sumodeliuotųjų spalvų šviesis didesnis. Taip yra dėl to, kad minėtosios spalvos yra žemų RGB verčių. Kita vertus, sumodeliuotos spalvos maždaug išlaiko užduotosios spalvos RGB komponentių proporciją, tik pačios komponentės yra didesnės. Taip yra dėl to, kad CIE XYZ spalvų sistemoje aprašomas pačios šviesos sukeliamas spalvos pojūtis, o šviesa visuomet sukelia didelio ryškio spalvos pojūtį (nėra „pilkos“ šviesos, yra tik skirtingų intensyvumų „balta“) [118].

Kalbant apie sumodeliuotų (pirmuoju atveju) ir realių spalvų skirtumus, šie yra žymiai didesni negu lyginant užduotąsias („U“) ir sumodeliuotąsias („M1“, „M2“) spalvas. Čia prie šviesio nesutapimų didžiąja dalimi prisideda ir tai, jog spektrometriniame tyrime naudoto šviesos šaltinio spektras smarkiai skyrėsi nuo modeliavime naudoto spektro – jame smarkiai trūko trumpųjų bangos ilgių (36 pav.). Šis trūkumas lėmė sisteminį spalvingumo koordinatinių pasislinkimą į raudonąją diagramos dalį (didesnes x vertes) (35 pav. c). Hologramos struktūros skaičiavimui nebuvo naudotas lempo spektras todėl, kad tai pablogina pačios hologramos kokybę. Programa siekia parinkti tokius skirtingas sRGB komponentes užtikrinančių difrakcijos gardelių efektyvumus, kad gaunamas difrakcinio atvaizdo modelis būtų kuo panašesnis į užduotąjį atvaizdą, tačiau tai yra problema, kuomet šviesos spektras yra labai netolygus (pavyzdžiui, sudarytas tik iš ilgų bangos ilgių kaip hologramų spektriniame tyrime naudotos kaitrinės lempuotės atveju). Tokiu atveju gardelės, atsakingos už trūkstamos spektrinės srities difrakciją yra parenkamos kaip didžiausio efektyvumo, o visos kitos gardelės yra parenkamos kaip žymiai mažesnio difrakcijos efektyvumo, siekiant išlaikyti

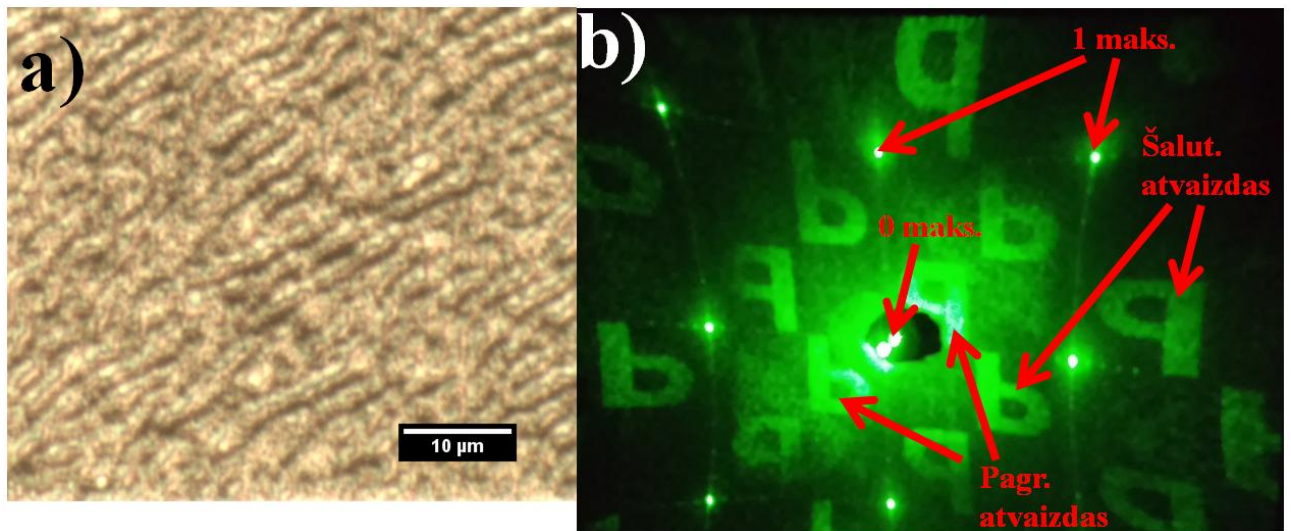
reikiamas atvaizdo sRGB komponentių proporcijas. Tai, jog efektyvios gardelės dirba su mažo intensyvumo spektro dalimi, o su intensyvia spektro dalimi dirbančios gardelės yra mažo efektyvumo galiausiai lemia, kad visa holograma yra labai mažo efektyvumo. Kadangi hologramos komponentių efektyvumas iš kompiuterinio modelio į realybę perkeliamas naudojant kažkokį konkretų lazerio impulsų skaičių, labai mažas efektyvumo vertes yra sudėtinga užtikrinti, nes tuomet gardelės medžiagoje yra tiesiog nesuformuojamos. Kita vertus, po to, kai holograma yra suformuota ir naudojant „neteisingą“ spektrą yra gautas jos difrakcinio atvaizdo spektras, galima sudaryti jos difrakcinio atvaizdo modelį naudojant šį „neteisingą“ spektrą ir jo spalvą palyginti su eksperimentiškai nustatyta (35 pav. a „M2“). Toks palyginimas yra žymiai teisingesnis nei ankstesnis palyginimas, kadangi tiek modelio, tiek realaus atvaizdo spalvingumo koordinatės yra pasisilinkę link raudonosios diagramos dalies, nors tokiu atveju atitikimas tarp užduotojo atvaizdo ir modelio yra mažesnis (35 pav. c, 2 lentelė).



36 pav. Taškinių hologramų struktūros apskaičiavimui naudotas baltas spektras (5500 K temperatūros juodojo kūno spinduliuotė), spektrometro lempos spektras ir jo aproksimacija apskaičiavimo programoje

3.5. Skaitmeninių hologramų struktūros apskaičiavimo programos rezultatų eksperimentinis validavimas

Vienas iš svarbiausių skaitmeninės hologramos difrakcinio atvaizdo parametrų – jo signalo ir triukšmo santykis. Norint parinkti tinkamą hologramos raišką, reikia nustatyti kaip šis parametras nuo jos priklauso. Naudojant nustatytus tinkamus skaitmeninių hologramų formavimo lazerinės abliacijos būdu parametrus (lazerio pluošto paviršinis energijos tankis $0,73 \text{ mJ/cm}^2$, impulsų skaičius 9, atstumas tarp gretimų kraterių $1 \mu\text{m}$) buvo atliktas skaitmeninių hologramų lazerinis mikroformavimas. Hologramos buvo suformuotos nikelio folijos paviršiuje naudojant 515 nm bangos ilgio femtosekundinę lazerio spinduliuotę. Buvo suformuoti 200×200 , 100×100 ir 50×50 skaitmeninės raiškos hologramų masyvai. Masyvo kraštinės ilgis $\sim 2 \text{ mm}$, toks pats kaip ir jį apšviečiančio lazerio pluošto diametras. Visų masyvų plotai vienodi, tačiau skirtingi masyvai yra sudaryti iš skirtingos raiškos elementų. Vienos iš suformuotų hologramų optiniu mikroskopu užfiksuoto paviršiaus fragmento atvaizdas pavaizduotas 37 paveiksle.

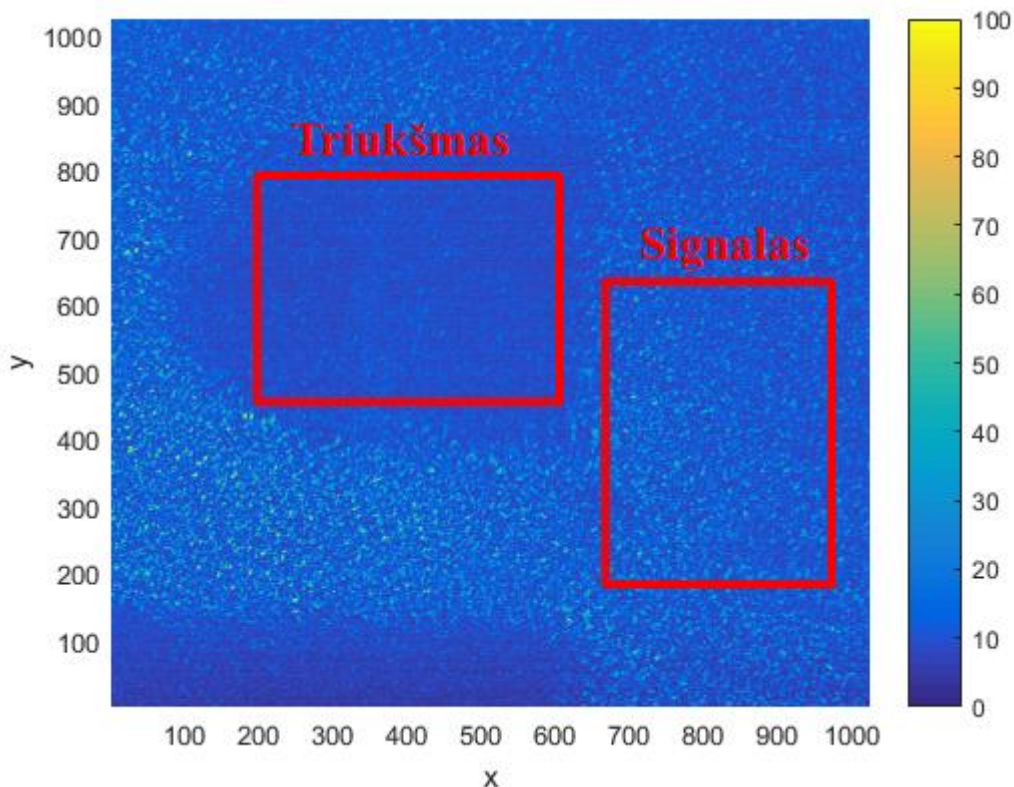


37 pav. Skaitmeninės hologramos raiškos tyrimas: a) 100x100 taškų raiškos skaitmeninės hologramos fragmentas, suformuotas naudojant tinkamiausias sąlygas formuoti skaitmeninėms hologramoms (paviršinis lazerio spinduliuotės energijos tankis $0,73 \text{ mJ/cm}^2$, 9 lazerio impulsai, atstumas tarp gretimų taškų $1 \text{ }\mu\text{m}$), b) jos pilnasis difrakcinis atvaizdas suprojektuotas ant popieriaus lapo su pavaizduotais 0 ir 1 eilės difrakciniais maksimumais bei jų difrakciniais atvaizdais. Hologramos struktūros ir jos difrakcinio atvaizdo kompiuteriniai modeliai pavaizduoti 25 pav. a

Hologramos difrakciniame atvaizde matomas dvimatis šviesių taškų masyvas. Jis atsiranda dėl to, kad holograma iš principo yra dvimatė difrakcinė struktūra – tai yra pirmosios ir antrosios eilės difrakciniai maksimumai. Nulinės eilės difrakcinis maksimumas nuotraukoje (37 pav. b) praeina pro skylę lape. Skybė buvo naudojama tam, kad fotografuojant nulinis maksimumas neužgožtų difrakcinio atvaizdo. Eksperimentiškai nustatyta, kad gaminant skaitmenines hologramas lazerinės abliacijos būdu pirmosios ir aukštesnių difrakcijos eilių panaikinimas nėra galimas – sumažinus tarpą tarp taškų pradeda žlugti pati hologramos struktūra, užtikrinanti difrakcinio atvaizdo susidarymą ir nebesusidaro joks atvaizdas. Taip yra dėl to, kad lazeriu suformuoto pažeidimo matmenys yra difrakciškai apriboti abliacijai naudojamos spinduliuotės. Dėl aukštesniųjų eilių maksimumų susidarymo atliktas nulinės eilės difrakcinio maksimumo intensyvumo modeliavimo rezultatai nesutaps su eksperimentiškai nustatytais hologramos difrakcijos efektyvumo rezultatais. Kiekviena difrakciniam maksimumui centrinę simetriją turinti „P“ raidžių pora yra hologramos difrakcinis atvaizdas. Nuliniam maksimumui priskiriama pora yra pagrindinis difrakcinis atvaizdas, o aukštesniųjų eilių – šalutiniai difrakciniai atvaizdai. Pagrindinis ir šalutiniai difrakciniai atvaizdai kartu sudaro pilnąjį hologramos difrakcinį atvaizdą.

Siekiant nustatyti hologramų nulinės ir pirmosios eilių difrakciniams maksimumams bei juos atitinkantiems difrakciniams atvaizdams tenkančią galios dalį, buvo pamatuota kiekvieno maksimumo ir atvaizdo galia naudojant fotodiodą (22 pav. a). Matuojant galią fotodiodu buvo parinktas toks atstumas, kuriam esant visas difrakcinis atvaizdas tilpdavo į jautrųjį detektoriaus paviršių. Taip pat naudojant lazerio pluošto skerspjuvio kamerą (22 pav. e) buvo užfiksuotas galios pasiskirstymas difrakciniuose atvaizduose. Tyrime naudotas 532 nm bangos ilgio lazeris (22 pav. d), visi matavimai atlikti pagal 22 pav. f dalyje nurodytą schemą. Į nikelio folijos paviršių visų matavimų metu lazerio pluoštas krito 10° kampu nuo statmens. Kadangi visi tos pačios eilės difrakciniai maksimumai bei jų difrakciniai atvaizdai turėtų būti identiški, buvo pamatuota vieno 1 eilės difrakcinio maksimumo, vieno 1 eilės difrakcinio atvaizdo, 0 eilės difrakcinio maksimumo bei

vieno 0 eilės difrakcinio atvaizdo galios bei tų pačių difrakcinių atvaizdų galios pasiskirstymai. Difrakcinių atvaizdų signalo ir triukšmo santykiai buvo apskaičiuoti pagal (31) formulę imant 38 paveiksle parodytų signalo ir triukšmo regionų vidutines vertes kaip signalo ir triukšmo vertes.



38 pav. Tipinis lazerio pluošto skerspjūvio kamera užfiksuotas difrakcinio atvaizdo galios pasiskirstymas su nurodytais signalo ir triukšmo regionais. Matricos vienetai – kameros taškai, spalva atitinka registruojamą galią (procentais)

Pagal aprašytą metodiką nustatyti signalo ir triukšmo santykiai pateikti 3 lentelėje.

3 lentelė. Skirtingos raiškos skaitmeninių hologramų difrakcinių atvaizdų signalo ir triukšmo santykiai

Hologramos raiška	Difrakcinio atvaizdo eilė	Atvaizdo signalo ir triukšmo santykis
50x50	0	0,0094
	1	0,15
100x100	0	0,28
	1	0,39
200x200	0	0,64
	1	0,24

Iš 3 lentelės duomenų galima pastebėti, kad visų difrakcinių atvaizdų signalo ir triukšmo santykis yra mažesnis nei vienetas. Tai reiškia, kad difrakciniame atvaizde yra daug pašalinės šviesos, kuri nedifraguoja nei į difrakcinį maksimumą, nei į atvaizdą, todėl pats atvaizdas yra sunkiai išskiriamas iš foninės spinduliuotės. Taip pat 1 eilės difrakciniai atvaizdai (išskyrus 200x200 raiškos) visuomet yra didesnio signalo ir triukšmo santykio nei nulinės eilės atvaizdai ir šis santykis didėja didėjant hologramos raiškai. Tai matoma ir iš 37 pveikslo b dalies – toliau nuo 0 eilės maksimumo yra

mažiau pašalinės šviesos. Vis tik, pats didžiausias santykis buvo pasiektas 0 eilės atvaizdui esant didžiausiai hologramos raiškai.

Nors signalo ir triukšmo santykis yra svarbus atvaizdo parametras, atvaizdų difrakcijos efektyvumas taip pat yra didelės reikšmės parametras – jis aprašo atvaizdui tenkančią galią. Pagal (26) lygtį apskaičiuotieji difrakcinių maksimumų ir atvaizdų difrakcijos efektyvumai pateikti 4 lentelėje.

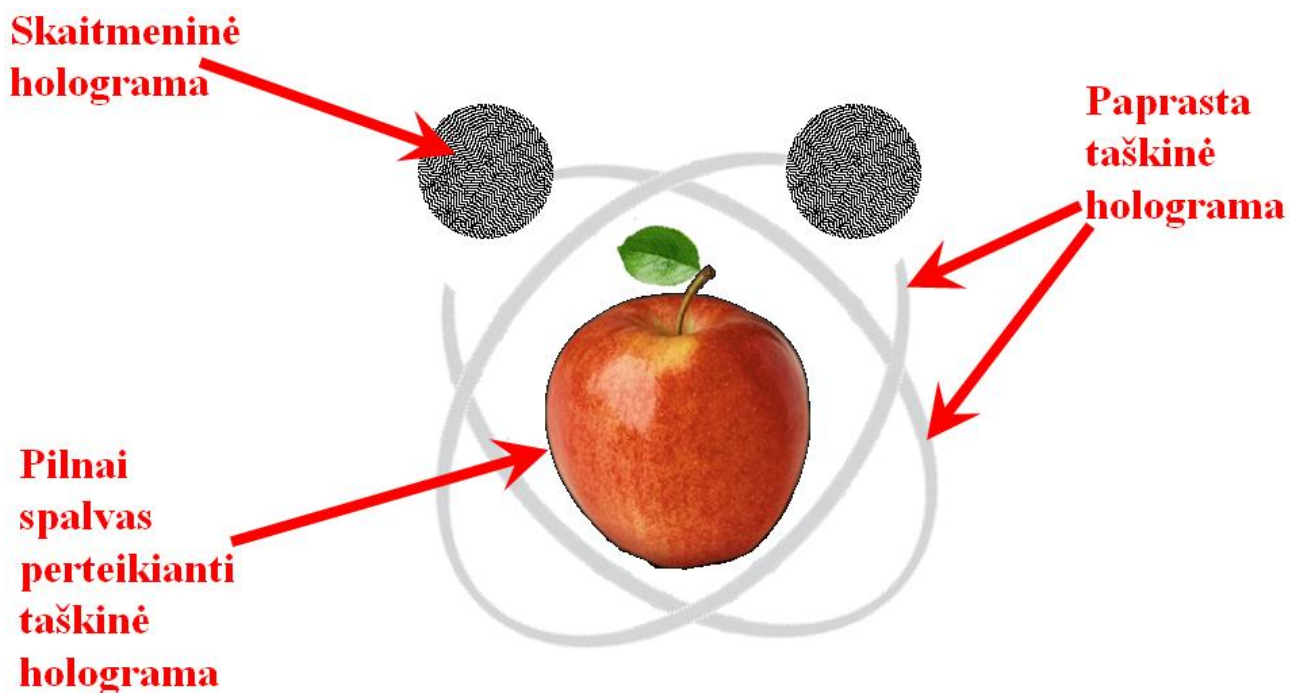
4 lentelė. Skirtingos raiškos skaitmeninių hologramų absoliutūs ir santykinis difrakcijos efektyvumai

Hologramos raiška	Difrakcijos eilė	Absoliutūs efektyvumas,%	Santykinis efektyvumas,%
50x50	0	29,1	53,9
	0 atvaizdas	0,8	1,6
	1	0,3	0,5
	1 atvaizdas	0,2	0,4
100x100	0	30,5	56,5
	0 atvaizdas	2,2	4,1
	1	0,6	1,2
	1 atvaizdas	0,7	1,4
200x200	0	23,4	43,4
	0 atvaizdas	2,7	5,1
	1	0,6	1,1
	1 atvaizdas	0,8	1,5

Iš 4 lentelės duomenų matoma, kad kuo didesnė skaitmeninės hologramos raiška, tuo didesnis difrakcinio atvaizdo efektyvumas ir tuo mažesnis difrakcinio maksimumo efektyvumas. Didesnės raiškos atveju pirmosios eilės atvaizdo efektyvumas netgi viršija pirmos eilės maksimumo efektyvumą. Visgi, svarbiausias yra pagrindinis (0 eilės) difrakcinis atvaizdas. Matoma, kad 0 eilės maksimumo efektyvumas artimai sutampa su teoriškai numatytu difrakcijos efektyvumu (27 pav. b). Atsižvelgus į jo signalo ir triukšmo santykio bei difrakcijos efektyvumo priklausomybę nuo hologramos raiškos tampa aišku, kad vertinant hologramų atvaizdus pagal šiuos parametrus geriausios hologramos yra didžiausios raiškos (200x200), kadangi difrakcinis atvaizdas yra naudingasis signalas, o difrakcinis maksimumas – nenaudingas. Dėl šios priežasties galutiniam apsauginiam ženklui buvo pasirinkta naudoti šios raiškos skaitmenines hologramas.

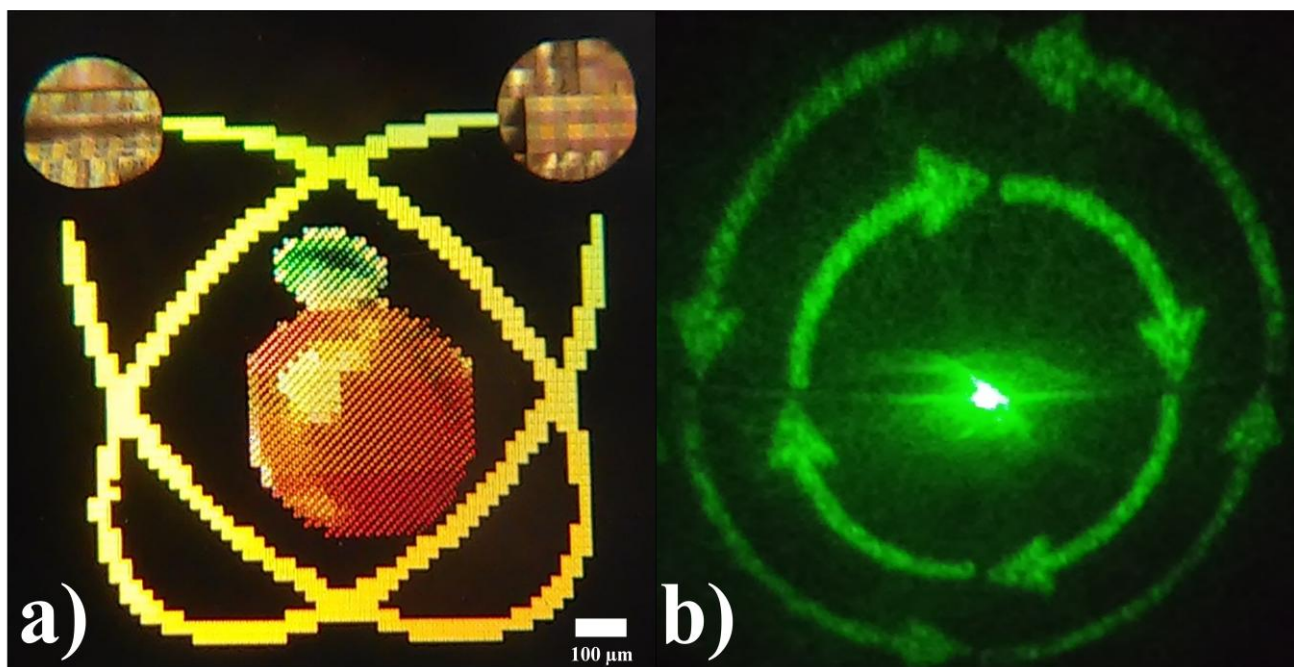
3.6. Skaitmenines ir taškines hologramas apjungiančio apsaugos nuo padirbinėjimo ženklo projektavimas ir gamyba

Visos iki šiol aprašytos apsaugos nuo padirbinėjimo technologijos – paprastos taškinės hologramos, pilnai spalvas perteikiančios taškinės hologramos ir skaitmeninės hologramos – buvo panaudotos viename apsaugos nuo padirbinėjimo ženkle, jo sandara pavaizduota 39 paveiksle. Ženklo dizainas paremtas KTU organizuojamos tarptautinės konferencijos „Advanced Materials and Technologies“ logotipu. Visos atitinkamos taškinės (tiek paprastos, tiek pilnai spalvas perteikiančios) ir skaitmeninės hologramos buvo suformuotos naudojant lazerinę interferencinę abliaciją ir lazerinę abliaciją esant anksčiau šiame darbe nurodytoms tinkamoms kiekvieno tipo hologramos formavimo sąlygoms.



39 pav. Paprastas taškines, pilnai spalvas perteikiančias taškines bei skaitmenines hologramas apjungiančio apsaugos nuo padirbinėjimo ženklo sandara

Suformuotojo apsaugos ženklo taškinių hologramų difrakciniai atvaizdai bei skaitmeninių hologramų plokštuminiai atvaizdai pavaizduoti 40 pav. a, o skaitmeninės hologramos difrakcinis atvaizdas pavaizduotas 40 pav. b dalyje.



40 pav. Abi hologramines technologijas apjungiančio apsauginio ženklo veikimas: a) apsaugos nuo padirbinėjimo ženklas apjungiantis pilnai spalvas perteikiančią taškinę hologramą, paprastą taškinę hologramą ir skaitmeninių hologramų masyvai (jų diametras yra 2 mm), b) apsauginio ženklo skaitmeninės hologramos difrakcinis atvaizdas suprojektuotas ant popieriaus lapo

40 pav. a matoma, kad obuolys yra sudarytas iš pilnai spalvas perteikiančios taškinės hologramos ir atitinka fotorealistinį obuolio iš 39 pav. atvaizdą. Kadangi pilnojo spalvų perteikimo efektą galima

išgauti tik nedideliame plote, atvaizdo raiška buvo sumažinta iki tokios, kuri leidžia tai užtikrinti, todėl dalis atvaizdo kokybės buvo prarasta atliekant šį veiksmą. Taip pat matoma hologramos parametrų diskretizacija, ji neišvengiama. Aplink obuolį išsidėstę „orbitalės“ yra paprasta taškinė holograma sudaryta iš 1,06 μm periodo difrakcinių gardelių. Dėl nedidelių hologramos matmenų ji yra beveik vienodos spalvos visame savo plote. Skaitmeninių hologramų masyvai buvo sudaryti iš daugelio identiškų skaitmeninių hologramų, kai kurios iš jų buvo apkirptos siekiant masyvui suteikti apvalią formą. Masyvas yra sudarytas iš 4 skirtingų skaitmeninių hologramų tipų (iš viso – 25 skaitmeninių hologramų), kiekvienas iš šių tipų atsakingas už skirtingą masyvo difrakcinio atvaizdo elementą 40 pav. b paveiksle atvaizduojant atitinkamos krypties rodykles.

Išvados

1. Buvo nustatyta, kad esant 50 mJ/cm^2 lazerio spinduliuotės energijos tankui pasiekiamas didžiausias lazerinės abliacijos interferenciniu būdu suformuotos difrakcinės gardelės efektyvumas. Visų tirtų periodų formuojamų gardelių difrakcijos efektyvumas tiesiškai priklauso nuo joms formuoti naudojamo impulsų skaičiaus kuomet jis kinta nuo 0 iki 7000. Didžiausias absoliutinis difrakcijos efektyvumas 650 nm , 532 nm ir 405 nm bangos ilgio šviesai buvo 5,5%, 4,5%, 3,5% atitinkamai.
2. Buvo nustatyta, kad esant $0,73 \text{ mJ/cm}^2$ lazerio spinduliuotės energijos tankui bei tiesioginei lazerinei abliacijai naudojant 9 lazerio impulsus gaunamas struktūros gylis užtikrinantis didžiausią skaitmeninės hologramos absoliutųjį efektyvumą (~30%). Taip pat nustatyta, kad $1 \mu\text{m}$ tarpas tarp gretimų hologramos taškų užtikrina hologramos struktūros vientisumą.
3. Naudojant kūginę difrakcijos teoriją buvo sukurtas algoritmas, bei jo realizacija „MATLAB“ programinėje aplinkoje galinti sugeneruoti pilnai spalvas perteikiančios taškinės hologramos struktūrą pagal jai užduotą difrakcinį atvaizdą.
4. Skaitmeninių hologramų apskaičiavimui naudojant Gerchbergo – Sakstono algoritmą realizuotą „MATLAB“ programinėje aplinkoje buvo sukurta ir testuota programa skirta šių hologramų struktūros apskaičiavimui.
5. Buvo apskaičiuotos ir, naudojant femtosekundinę lazerinę interferencinę abliaciją nikelio folijos paviršiuje, įrašytos 11 skirtingų pilnai spalvas perteikiančių taškinių hologramų struktūros. Spektroskopiškai ištyrus šių hologramų difrakcinių atvaizdų spalvas buvo nustatyta, kad užduotosios ir eksperimento metu nustatytos spalvos daugeliu atvejų tarpusavyje artimai sutampa, tai įrodo algoritmo tinkamumą.
6. Ištyrus 3 skirtingų raiškų skaitmenines hologramas nikelio folijos paviršiuje suformuotas naudojant femtosekundinę lazerinę abliaciją buvo nustatyta, kad didėjant hologramų skaitmeninei raiškai difrakcinių atvaizdų efektyvumas bei signalo ir triukšmo santykis didėja. Hologramos, kurių raiška 200×200 taškų pasižymėjo didžiausiu absoliutiniu efektyvumu (2,7%) ir signalo – triukšmo santykiu (0,64).
7. Pademonstruotas paprastų taškinių, pilnai spalvas perteikiančių taškinių bei skaitmeninių hologramų integravimas į vieną apsaugos nuo padirbinėjimo ženklą. Naudojant femtosekundinę abliaciją ženklas buvo suformuotas ir pademonstruotas jo veikimas, o pats ženklas suderinamas priemonių masinės gamybos metodais.

Literatūros sąrašas

1. RÖBLER, Florian, et al. Fabrication of diffraction based security elements using direct laser interference patterning. *Optics Express*. [interaktyvus] 2017, Vol. 25, No. 19, p.p. 22959 – 22970. Prieiga per: doi: <https://doi.org/10.1364/OE.25.022959>
2. *United Nations Office on Drugs and Crime report on counterfeit products* [interaktyvus]. 2010 [žiūrėta 2020-04-21]. Prieiga per: https://www.unodc.org/documents/data-and-analysis/tocta/8.Counterfeit_products.pdf
3. ANTANAVIČIŪTĖ, Ieva et al. Femtosecond laser micro-machined polyimide films for cell scaffold applications. *Journal of Tissue Engineering and Regenerative Medicine*. [interaktyvus] 2018, Vol. 12, No. 2, pp. 760–773. Prieiga per: doi: <https://doi.org/10.1002/term.2376>
4. VIRGANAVIČIUS, D. et al. Investigation of transient dynamics of capillary assisted particle assembly yield. *Applied Surface Science*. [interaktyvus] 2017, Vol. 406, pp. 136–143. Prieiga per: doi: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.02.100>
5. *Counterfeit Drug Detection Device Market* [interaktyvus]. 2018 [žiūrėta 2020-04-21]. Prieiga per: <https://www.futuremarketinsights.com/reports/sample/REP-GB-7838>
6. *Growth and opportunity in 2018 | International Hologram Manufacturers Association* [interaktyvus]. 2017 [žiūrėta 2020-04-21]. Prieiga per: <https://www.ihma.org/news-article/growth-and-opportunity-in-2018>
7. PARKS, Louis. Securing Anti-Counterfeiting Technologies. *Pharmaceutical Manufacturing and Packing Sourcer Magazine*. [interaktyvus] London: Samedan, 2009, Vol. 15, No. 116 [žiūrėta 2020-04-21]. ISSN 1463-1245. Prieiga per: <http://www.samedanltd.com/magazine/15/issue/116/article/2446>
8. GUENTHER, B. D., et al. *Encyclopedia of modern optics*. Amsterdam: Elsevier, 2004. ISBN 9780080917962
9. CABRAL, Alexandre, et al. Diffractive optical variable image devices generated by maskless interferometric lithography for optical security. *Proceedings of SPIE*. [interaktyvus] 2011, Vol. 8001. Prieiga per: doi: <https://doi.org/10.1117/12.890750>
10. TAMULEVIČIUS, Tomas et al. Formation of OVD Using Laser Interference Lithography. *Materials Science*. Kaunas: Kauno technologijos universitetas, 2007, Vol. 13, No. 3, pp. 183–187. ISSN 2029-7289
11. *Optically Variable Devices (OVDs) – CSIROpedia* [interaktyvus]. 2013 [žiūrėta 2020-04-21]. Prieiga per: <https://csiropedia.csiro.au/optically-variable-devices>
12. *Laser Dot Matrix Holograms | Hira Holovision* [interaktyvus]. [žiūrėta 2020-04-21]. Prieiga per: <https://www.hiraholovision.com/laser-dot-matrix-holograms.html>
13. TU, Chih-Wen et al. Expanding a color presentation range with true-color dot matrix holograms. *Proceedings of SPIE*. [interaktyvus] 1999, Vol. 3637, pp. 130–140. Prieiga per: doi: <https://doi.org/10.1117/12.343764>
14. BULANOV, A., et al. Investigation of As₂S₃-Al films for dot-matrix holographic recording. *Proceedings of SPIE*. [interaktyvus] 2008, Vol. 7142. Prieiga per: doi: <https://doi.org/10.1117/12.815436>
15. BULANOV, Andrejs. Digital Holographic Recording in Amorphous Chalcogenide Films. In: *Holograms - Recording Materials and Applications* [interaktyvus]. London: Intech Open, 2011, p.p. 71-94 [žiūrėta 2020-04-21]. ISBN 978-953-307-981-3. Prieiga per:

- <https://www.intechopen.com/books/holograms-recording-materials-and-applications/digital-holographic-recording-in-amorphous-chalcogenide-films>
16. WEESTLAND, Stephen, et al. *Computational color science using MATLAB*. Chichester: John Wiley & Sons, 2001. ISBN 0-470-84562-7.
 17. TAMULEVIČIUS, Tomas et al. Dot-Matrix Hologram Rendering Algorithm and its Validation through Direct Laser Interference Patterning. *Scientific Reports*. [interaktyvus] 2018, Vol. 8, No. 1, pp. 1–11. Prieiga per: doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-018-32294-5>
 18. ANDRULEVIČIUS, Mindaugas, et al. Formation and Analysis of Dot-matrix Holograms. *Medžiagotyra*. Kaunas: Kauno technologijos universitetas, 2007, Vol. 13, No. 4, p.p. 278-282. ISSN 1392–1320
 19. LOEWEN, Erwin, et al. *Diffraction grating handbook, Sixth edition* [interaktyvus]. New York: Newport Corporation, 2005 [žiūrėta 2020-04-21]. Prieiga per: <https://web.archive.org/web/20080926185930/http://gratings.newport.com:80/library/handbook/toc.asp>
 20. BONOD, Nicolas, et al. Diffraction gratings: from principles to applications in high intensity lasers. *Advanced Optics and Photonics*. [interaktyvus] 2016, Vol. 8, No. 1, p.p. 156-199. Prieiga per: doi: <https://doi.org/10.1364/AOP.8.000156>
 21. SPILLMAN, W B et al. Fiber optic linear displacement sensor based on a variable period diffraction grating. *Applied Optics*. [interaktyvus] 1988, Vol. 28, No 17, pp. 1–4. Prieiga per: doi: <https://doi.org/10.1364/AO.28.003550>
 22. WANG, Yongjin, et al. Pitch-variable blazed grating consisting of freestanding silicon beams. *Optics Express*. [interaktyvus] 2009, Vol. 17, No. 6, p.p. 4419-4426. Prieiga per: doi: <https://doi.org/10.1364/OE.17.004419>
 23. CARPERIEN, Lucas, et al. Fabrication of diffraction gratings with electrically variable pitch and their effect on surface plasmon resonance. *Proceedings of SPIE*. [interaktyvus] 2017, Vol. 10114. Prieiga per: <https://doi.org/10.1117/12.2249176>
 24. *GratingEquationProof.jpg* [interaktyvus]. [žiūrėta 2020-04-21]. Prieiga per: <https://faculty.virginia.edu/ASTR3130/lectures/spectroscopy/GratingEquationProof.jpg>
 25. HARVEY, James E., et al. Description of Diffraction Grating Behavior in Direction Cosine Space. *Applied Optics*. [interaktyvus] 1998, Vol. 37, No. 34, pp. 8158-8160. Prieiga per: doi: <https://doi.org/10.1364/ao.37.008158>
 26. PEKARSKAS, Vidmantas. *Trumpas matematikos kursas: vadovėlis aukštųjų mokyklų studentams*. 5-oji laida. Kaunas: Technologija, 2014. ISBN 9955098589
 27. *Direction cosine – Wikipedia* [interaktyvus]. [žiūrėta 2020-04-21]. Prieiga per: https://en.wikipedia.org/wiki/Direction_cosine
 28. ALLURED, Ryan, et al. Analytical alignment tolerances for off-plane reflection grating spectroscopy. *Experimental Astronomy*. [interaktyvus] 2013, Vol. 36, pp.661–677. Prieiga per: doi: <https://doi.org/10.1007/s10686-013-9349-y>
 29. *Chinese Academy of Sciences* [interaktyvus]. 2019 [žiūrėta 2020-04-21]. Prieiga per: http://english.cas.cn/print_2019/index.shtml?docurl=http://english.cas.cn/newsroom/research_news/201904/t20190418_208560.shtml
 30. TAMULEVIČIUS, Sigitas, et al. Spalvų įvertinimas spektrofotometriniu metodu. In: *Fizikiniai medžiagų tyrimo metodai*. Kaunas: Technologija, 2005, p.p. 24-46. ISBN 9955-09-701-9.

31. *CIE_1931_XYZ_Color_Matching_Functions.svg* [interaktyvus]. [žiūrėta 2020-04-21]. Prieiga per:
https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/8f/CIE_1931_XYZ_Color_Matching_Functions.svg
32. *CIExy1931_Rec_709.svg* [interaktyvus]. [žiūrėta 2020-04-21]. Prieiga per:
https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/ef/CIExy1931_Rec_709.svg
33. *Weber's Law of Just Noticeable Difference* [interaktyvus]. [žiūrėta 2020-04-21]. Prieiga per:
<http://apps.usd.edu/coglab/WebersLaw.html>
34. JUDD, Jeane B. Chromaticity sensibility to stimulus differences. *Journal of the Optical Society of America*. [interaktyvus] 1932, Vol. 22, No. 2, p.p. 72-108. Prieiga per: doi:
<https://doi.org/10.1364/JOSA.22.000072>
35. MACADAM, David. Visual Sensitivities to Color Difference in Daylight. *Journal of the Optical Society of America*. [interaktyvus] 1942, Vol. 32, No. 5, p.p. 247-274. Prieiga per: doi:
<https://doi.org/10.1364/JOSA.32.000247>
36. HENRICH, Paul, et al. Quantification of Contrast Recognizability during Brilliant Blue G– and Indocyanine Green–Assisted Chromovitrectomy. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*. [interaktyvus] 2011, Vol. 52, p.p. 4345-4349. Prieiga per: doi:
<https://doi.org/10.1167/iovs.10-6972>
37. SHARMA, Gaurav, et al. *Digital Color Imaging Handbook* [interaktyvus]. Boca Raton: CRC Press, 2017 [žiūrėta 2020-04-21]. ISBN 9781315220086. Prieiga per: doi:
<https://doi.org/10.1201/9781420041484>
38. LEE, Chih-Kung et al. Optical configuration and color-representation range of a variable-pitch dot matrix holographic printer. *Applied Optics*. [interaktyvus] 2000, Vol. 39, No. 1, pp. 40-53. Prieiga per: doi: <https://doi.org/10.1364/ao.39.000040>
39. LEE, Chih-Kung, et al. Optical configuration and color-representation range of a variable-pitch dot matrix holographic printer. *Applied Optics*. [interaktyvus] 2000, Vol. 39, No. 1, p.p. 40-53. Prieiga per: doi: <https://doi.org/10.1364/AO.39.000040>
40. *Hologram Expert know how to make a hologram* [interaktyvus]. [žiūrėta 2020-04-21]. Prieiga per: <http://www.hologramexpert.com/Hologram%20Production%20Line.htm>
41. GONCHARSKY, A. A., et al. E-beam origination technology: Current state and development prospects. *The Holography Times*. 2012, Vol. 6, Issue 19.
42. JIANG, Menglin, et al. Hot embossing holographic images in BOPP shrink films through large-area roll-to-roll nanoimprint lithography. *Applied Surface Science*. [interaktyvus] 2014, Vol. 311, p.p. 101-106. Prieiga per: doi: <http://dx.doi.org/doi:10.1016/j.apsusc.2014.05.011>
43. Anilionis, Romualdas, et al. *Mikro- ir nanotechnologijos elektronikoje: Mokomoji knyga*. Kaunas: Technologija, 2007. ISBN 9786090200391
44. GUOBIENĖ, Asta, et al. *Medžiagų mokslas : laboratoriniai darbai : mokomoji knyga*. Kaunas: Dakra, 2013. ISBN 9786094520211.
45. Tamulevičius, T., et al. Formation of periodical microstructures using interference lithography. *Experimental Techniques*. [interaktyvus] 2008, Vol. 32, p.p. 23-28. Prieiga per: doi:
<https://doi.org/10.1111/j.1747-1567.2007.00291.x>
46. RANK, Andreas, et al. Direct Laser Interference Patterning of Nickel Molds for Hot Embossing of Polymers. *Advanced Engineering Materials*. [interaktyvus] 2016, Vol. 18, No. 7, p.p. 1280-1288. Prieiga per: doi: 10.1002/adem.201600068

47. LANG, Valentin, et al. Large Area One-Step Fabrication of Three-Level Multiple-Scaled Micro and Nanostructured Nickel Sleeves for Roll-to-Roll Hot Embossing. *Advanced Engineering Materials*. [interaktyvus] 2017, Vol. 19, No. 8. Prieiga per: doi: 10.1002/adem.201700126
48. RANK, Andreas, et al. High-Speed Roll-to-Roll Hot Embossing of Micrometer and Sub Micrometer Structures Using Seamless Direct Laser Interference Patterning Treated Sleeves. *Advanced Engineering Materials*. [interaktyvus] 2017, Vol. 19, No.11. Prieiga per: doi: <https://doi.org/10.1002/adem.201700201>
49. NEWSWANGER, Craig. Mass Replication of Holograms and Diffraction Gratings by Embossing. *IS&T's 50th Annual Conference*. 1997, Prieiga per: <https://www.imaging.org/site/PDFS/Papers/1997/IST-0-4/175.pdf>
50. *Holographic dot matrix machine | Alibaba.com* [interaktyvus]. [žiūrėta 2020-04-21]. Prieiga per: <https://www.alibaba.com/showroom/holographic-dot-matrix-machine.html>
51. SKEREN, M., et al. Design and visualization of synthetic holograms for security applications. *Journal of Physics: Conference Series*. [interaktyvus] 2013, Vol. 415. Prieiga per: doi:10.1088/1742-6596/415/1/012060
52. HARTL, Andreas, et al. Mobile User Interfaces for Efficient Verification of Holograms. *2015 IEEE Virtual Reality Conference*. [interaktyvus] 2015. Prieiga per: doi: <https://doi.org/10.1109/VR.2015.7223333>
53. PARK, Tae – Hyung, et al. Vision Inspection System for Holograms with Mixed Patterns. *6th annual IEEE Conference on Automation Science and Engineering*. [interaktyvus] 2010. Prieiga per: doi: <https://doi.org/10.1109/COASE.2010.5584721>
54. HAN, Yingdong, et al. Upconversion Modulation through Pulsed Laser Excitation for Anti-counterfeiting. *Scientific Reports*. [interaktyvus] 2017, Vol. 7. Prieiga per: doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-017-01611-9>
55. CADARSO, Victor J., et al. High-resolution 1D moire's as counterfeit security features. *Light: Science & Applications*. [interaktyvus] 2013, Vol. 2. Prieiga per: doi: <https://doi.org/10.1038/lsa.2013.42>
56. ZHENG, Gouxing, et al. Metasurface holograms reaching 80% efficiency. *Nature nanotechnology*. [interaktyvus] 2015, Vol. 10, p.p. 308-312. Prieiga per: doi: <https://doi.org/10.1038/nnano.2015.2>
57. KAMALI, Seyedeh, et al. Angle-Multiplexed Metasurfaces: Encoding Independent Wavefronts in a Single Metasurface under Different Illumination Angles. *Physical Review X*. [interaktyvus] 2017, Vol. 7. Prieiga per: doi: <https://doi.org/10.1103/PhysRevX.7.041056>
58. KHORASANINEJAD, Mohammadreza, et al. Broadband and chiral binary dielectric meta-holograms. *Science Advances*. [interaktyvus] 2016, Vol. 2, No. 5. Prieiga per: doi: <https://doi.org/10.1126/sciadv.1501258>
59. ARPPE, Riikka, et al. Physical unclonable functions generated through chemical methods for anti-counterfeiting. *Nature Reviews*. [interaktyvus] 2017, Vol. 1, No. 31. Prieiga per: doi: <https://doi.org/10.1038/s41570-017-0031>
60. BAE, Hyung Jong, et al. Biomimetic Microfingerprints for Anti-Counterfeiting Strategies. *Advanced Materials*. [interaktyvus] 2015, Vol. 27, No. 12, p.p. 2083-2089. Prieiga per: doi: <https://doi.org/10.1002/adma.201405483>

61. NAM, Hyunmoon, et al. Inkjet Printing Based Mono-layered Photonic Crystal Patterning for Anti-counterfeiting Structural Colors. *Scientific Reports*. [interaktyvus] 2016, Vol. 6. Prieiga per: doi: <https://doi.org/10.1038/srep30885>
62. RUFFATO, Gianluca., et al. Design, fabrication and characterization of Computer Generated Holograms for anti-counterfeiting applications using OAM beams as light decoders. *Scientific Reports*. [interaktyvus] 2017, Vol. 7, No. 18011. Prieiga per: doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-017-18147-7>
63. HECTH, Eugene. *Optics. Fifth edition*. Edinburgh: Pearson Education Limited, 2017. ISBN 978-1-292-09693-3.
64. *Fraunhofer Diffraction Concepts – HyperPhysics* [interaktyvus]. [žiūrėta 2020-04-21]. Prieiga per: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/phyopt/fraunhofcon.html#c1>
65. *The Fourier transform of a diffraction grating* [interaktyvus]. [žiūrėta 2021-04-21]. Prieiga per: <http://www.rodenburg.org/theory/diffractiongrating16.html>
66. PEKARSKAS, Vidmantas. *Diferencialinis ir integralinis skaičiavimas: 2 dalis*. Kaunas: Technologija, 2003. ISBN 9986-13-716-0.
67. *Custom Laser Patterns Using Holograms: 6 Steps (with Pictures)* [interaktyvus]. [žiūrėta 2020-04-21]. Prieiga per: <https://www.instructables.com/id/Custom-Laser-Patterns/>
68. *Replicate the Fourier transform time-frequency domains correspondence illustration using TikZ / LaTeX Stack Exchange* [interaktyvus]. 2014 [žiūrėta 2020-04-21]. Prieiga per: <https://tex.stackexchange.com/questions/127375/replicate-the-fourier-transform-time-frequency-domains-correspondence-illustrati>
69. *CGH XmasTree.jpg* [interaktyvus]. [žiūrėta 2020-04-21]. Prieiga per: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/0c/CGH_XmasTree.jpg
70. PASIENSKI, Matthew, et al. A high-accuracy algorithm for designing arbitrary holographic atom traps. *Optics Express*. [interaktyvus] 2008, Vol. 16, No. 3. Prieiga per: doi: <https://doi.org/10.1364/OE.16.002176>
71. NEHMETALLAH, Georges, et al. Computer-generated holography. In: *Analog and Digital Holography with MATLAB* [interaktyvus]. SPIE Press. 2015, p.p. 307-336 [žiūrėta 2020-04-21]. ISBN 9781628416596. Prieiga per: doi: <https://doi.org/10.1117/3.2190844>
72. POON, Ting-Chung, et al. Computer-generated holography. In: *Introduction to Modern Digital Holography With MATLAB* [interaktyvus]. Cambridge: Cambridge University Press. 2014, p.p. 179-213 [žiūrėta 2020-04-21]. ISBN 9781139061346. Prieiga per: doi: <https://doi.org/10.1017/CBO9781139061346.008>
73. ALSAKA, Dina, et al. A comparison of iterative Fourier transform algorithms for image quality estimation. *Optical Review*. [interaktyvus] 2018, Vol. 25, p.p. 625-637. Prieiga per: doi: <https://doi.org/10.1007/s10043-018-0456-x>
74. MORENO, Ignacio, et al. Comparison of computer-generated holograms produced by printers and lithography: application to pattern recognition. *Optical Engineering*. [interaktyvus] 1995, Vol. 34, no. 12. Prieiga per: doi: <https://doi.org/10.1117/12.215513>
75. WEST, Andrew, et al. Electron beam lithographic fabrication of computer-generated holograms. *Proceedings of SPIE*. [interaktyvus] 1991, Vol. 1507. Prieiga per: doi: <https://doi.org/10.1117/12.47039>

76. ZHAO, Quan-Zhong, et al. Direct writing computer-generated holograms on metal film by an infrared femtosecond laser. *Optics Express*. [interaktyvus] 2005, Vol. 13, No. 6. Prieiga per: <https://doi.org/10.1364/OPEX.13.002089>
77. ALQURASH, Tawfiq, et al. Femtosecond Laser Ablation of Transparent Microphotonic Devices and Computer-Generated Holograms. *Nanoscale*. [interaktyvus] 2017, Vol. 9, No. Prieiga per: doi: <https://doi.org/10.1039/C7NR04377E>
78. BALACHNINAITĖ, Ona, et al. *Lazerinė technologija*. Vilnius: Vilniaus universiteto leidykla, 2008. ISBN 978-9955-33-456-9
79. ALLMEN, Martin von, et al.. *Laser Beam Interactions with Materials: Physical Principles and Applications*. New York: Springer, 1995. ISBN 978-3-540-59401-7
80. LEITZ, Karl Heinz et al. Metal ablation with short and ultrashort laser pulses. *Physics Procedia*. [interaktyvus] 2011, Vol. 12, pp. 230–238. Prieiga per: doi: <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2011.03.128>
81. SCHAEFFER, Ronald. *Fundamentals laser micromachinig*. Bosa Roca: Taylor & Francis Inc, 2012. ISBN10 1439860556
82. *Laser Processing of Materials*. Berlin: Springer-Verlag Berlin and Heidelberg GmbH & Co., 2012. ISBN 9783642132803
83. SCHULZ, Wolfgang. Review on laser drilling: Fundamentals, modelling and simulation. *Journal of Laser Applications*. [interaktyvus] 2013, Vol. 25, No. 1. Prieiga per: doi: <https://doi.org/10.2351/1.4773837>
84. HAMAD, Abubaker Hassan. Effects of Different Laser Pulse Regimes (Nanosecond, Picosecond and Femtosecond) on the Ablation of Materials for Production of Nanoparticles in Liquid Solution.
85. S., Martin, et al. Spot-size dependence of the ablation threshold in dielectrics for femtosecond laser pulses. *Applied physics A*. [interaktyvus] 2003, Vol. 77, p.p. 883-884. Prieiga per: doi: <https://doi.org/10.1007/s00339-003-2213-6>
86. RP Photonics Encyclopedia - double pulses, multiple pulsing, passively mode-locked laser, optical spectrum [interaktyvus]. [žiūrėta 2020-04-21]. Prieiga per: https://www.rp-photonics.com/double_pulses.html
87. *Average and Peak Power* [interaktyvus]. [žiūrėta 2020-04-21]. Prieiga per: <http://hank.uoregon.edu/experiments/modelocked-fiberlaser/20063.pdf>
88. *Basic Laser Properties* [interaktyvus]. [žiūrėta 2020-04-21]. Prieiga per: <https://www.aao.org/munnerlyn-laser-surgery-center/basic-laser-properties>
89. TORTSCHANOFF, Andreas, et al. MOEMS Based Laser Scanning Device for Light-Driven Microfluidics. *Procedia Engineering*. [interaktyvus] 2015, Vol. 120, p.p. 1063-1066. Prieiga per: doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.757>
90. GLASER, Tilman. High-end spectroscopic diffraction gratings : design and manufacturing. *Advanced Optical Technologies*. [interaktyvus] 2015, Vol. 4, No. 1, pp. 25–46. Prieiga per: <https://doi.org/10.1515/aot-2014-0063>.
91. SWANSON, G. J. *Binary Optics Technology: The Theory and Design of Multi-level Diffractive Optical Elements*. Lexington, 1989.
92. MIAO, Jiahao, et la. Fabrication of Dynamic Holograms on Polymer Surface by Direct Laser Writing for High- Security Anti-Counterfeit Applications. *IEEE Access*. [interaktyvus] 2019, Vol. 7. Prieiga per: doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2944838>

93. *MATLAB - MathWorks - MATLAB & Simulink* [interaktyvus]. [žiūrėta 2020-04-21]. Prieiga per: <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>
94. *Grating Solver Development Co.* [interaktyvus]. [žiūrėta 2020-04-21]. Prieiga per: <https://www.gsolver.com/>
95. WANG, HaiYan, et al. Dynamic 2D implementation of 3D diffractive optics. *Optica*. [interaktyvus] 2018, Vol. 5, No. 10, p.p. Prieiga per: doi: <https://doi.org/10.1364/OPTICA.5.001220>
96. RAWLINGS, John, et al. *Applied Regression Analysis: a Research Tool*. Berlin: Springer Springer International Publishing, 2001. ISBN 0-387-98454-2
97. CHATEAU, Nicolas et al. Algorithm for the rigorous coupled-wave analysis of grating diffraction. *Journal of the Optical Society of America A*. [interaktyvus] 1994, Vol. 11, No. 4. Prieiga per: doi: <https://doi.org/10.1364/JOSAA.11.001321>
98. *PHAROS High Power and Energy Femtosecond Laser | Light Conversion* [interaktyvus]. [žiūrėta 2020-04-21]. Prieiga per: <http://lightcon.com/Product/PHAROS.html>
99. *Harmonics Generator HIRO | Light Conversion* [interaktyvus]. [žiūrėta 2020-04-21]. Prieiga per: <http://lightcon.com/Product/HIRO.html>
100. *Laser Micromachining Workstation For Laboratory FemtoLAB* [interaktyvus]. [žiūrėta 2020-04-21]. Prieiga per: <https://www.wophotonics.com/product/laser-micromachining-workstation-femtolab/>
101. *Laser Micromachining Software SCA for 2D and 3D tasks* [interaktyvus]. [žiūrėta 2020-04-21]. Prieiga per: <https://www.wophotonics.com/product/laser-micromachining-software-sca/>
102. *B-600.pdf* [interaktyvus]. Prieiga per internetą: <http://loeneninstruments.com/sites/pdf/Optika/B-600.pdf>
103. *Microtestmachines Co. | AFM NT-206* [interaktyvus]. [žiūrėta 2020-04-21]. Prieiga per: <http://microtm.com/nt206/nt206e.htm>
104. *Quanta SEM for Materials Science* [interaktyvus]. [žiūrėta 2020-04-21]. Prieiga per internetą: <https://www.fei.com/products/sem/Quanta-SEM-for-Materials-Science/>
105. *APCIS – Katalogas site* [interaktyvus]. [žiūrėta 2020-04-21]. Prieiga per internetą: <https://apcis.ktu.edu/lt/site/katalogas?more=6743>
106. *APCIS – Katalogas site* [interaktyvus]. [žiūrėta 2020-04-21]. Prieiga per internetą: https://apcis.ktu.edu/lt/site/katalogas?cat_id=115&more=6737&type=1
107. *PD300-UV | Ophir Photonics* [interaktyvus]. [žiūrėta 2020-04-21]. Prieiga per: <https://www.ophiropt.com/laser--measurement/laser-power-energy-meters/products/Laser-Photodiode-Sensors/Standard-Photodiode-Sensors/PD300-UV>
108. *WinCamD-LCM | DataRay Inc* [interaktyvus]. [žiūrėta 2020-04-21]. Prieiga per: <https://www.dataray.com/wincamd-lcm-beam-profiling-camera.html>
109. POTTS, P. J. *Handbook of Silicate Rock Analysis*. Springer: New York, 2003. ISBN 978-94-015-3988-3. Prieiga per: <https://doi.org/10.1007/978-94-015-3988-3>
110. *page0008.pdf* [interaktyvus]. [žiūrėta 2020-04-21]. Prieiga per: <http://www.avantes.com/catalog/files/assets/common/downloads/page0008.pdf>
111. *AvaSpec-ULS2048 StarLine Versatile Fiber-optic Spectrometer - Avantes* [interaktyvus] [žiūrėta 2020-04-21]. Prieiga per:

- <https://www.avantes.com/products/spectrometers/starline/item/208-avaspec-uls2048-starline-versatile-fiber-optic-spectrometer>
112. *APCIS – Katalogas site* [interaktyvus]. [žiūrėta 2020-04-21]. Prieiga per internetą: <https://apcis.ktu.edu/lt/site/katalogas?more=6731>
 113. *Spectrometers. Introduction Fiber Optic Spectroscopy. Optical Bench Design*. [interaktyvus] [žiūrėta 2020-04-21]. Prieiga per: <https://docplayer.net/21141181-Spectrometers-introduction-fiber-optic-spectroscopy-optical-bench-design-info-avantes-com-www-avantes-com-figure-1-optical-bench-design.html>
 114. ZHANG, Lei, et al. Investigation of femtosecond laser ablation threshold for nickel template. *Applied Mechanics and Materials*. [interaktyvus] 2014, Vol. 633-634, p.p. 665-670. Prieiga per: doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.633-634.665>
 115. *Electropolishing & Mechanical Polishing Services On-Site | Astro Pak* [interaktyvus]. [žiūrėta 2020-04-21]. Prieiga per internetą: <https://astropak.com/service/electropolishing-mechanical-polishing/>
 116. Galmed, A. H., et al. Three dimensional characterization of laser ablation craters using high resolution X-ray computed tomography. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*. [interaktyvus] 2018, Vol. 139, p.p. 75-82. Prieiga per: doi: <https://doi.org/10.1016/j.sab.2017.11.011>
 117. HOSSEIN, Goudarzi, et al. Critical femtosecond laser parameters for the fabrication of optimal reflecting diffraction gratings on Invar36. *Optics and Lasers in Engineering* [interaktyvus] 2016, Vol. 81, p.p. 97 – 102. Prieiga per: doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.optlaseng.2016.01.004>
 118. *CIELAB Boundaries – freieFarbe e.V.* [interaktyvus]. [žiūrėta 2020-04-21]. Prieiga per internetą: <https://www.freiefarbe.de/en/artikel/grenzen-des-cielab-farbraums/>
 119. HARDEBERG, Jon. *Acquisition and Reproduction of Color Image: Colorimetric and Multispectral Approaches*. Parkland: Dissertation.com, 2001. ISBN 1-58112-135-0

Priedai

1 priedas. Mikroformavimui naudotos įrangos savybės

5 lentelė. Pagrindinės femtosekundinio lazerio „Pharos“ savybės

Pharos 04-500-PP	
Didžiausia vidutinė galia	4 W
Impulso trukmė	<290 fs
Didžiausia impulslo energija	> 0,2 mJ
Pluošto kokybė	TEM ₀₀ ; M ² <1,2
Impulsų pasikartojimo dažnis	1 kHz – 500 kHz
Bangos ilgis	1028±5 nm
Aktyvi terpė	Yb:KGW (Iterbiu legiruotas Kalio Gadolinio Volframato kristalas)

6 lentelė. Pagrindinės mikroapdirbimo sistemos FemtoLAB savybės

XYZ pozicionavimo stalai	
Eiga	160x160x160 mm
Tikslumas	±300 nm
Didžiausias judėjimo greitis	350 mm/s (hor.), 75 mm/s (vert.)
Skiriamoji geba	1 nm
Didžiausia apkrova	3 kg
Sistemos pagrindas	Granito plokštė
Optinė sistema	
Pluoštų galios ir poliarizacijos motorizuotas valdymas	Visi bangos ilgiai
Pluošto fokusavimas	1030 nm, 515 nm 50x objektyvas (židinio nuotolis), 343 nm asferinis lęšis
Interferencinis mazgas	515 nm bangos ilgis, derinamas 0,8-1,3 μm periodas valdoma orientacija dėmės dydis 60 μm x 60 μm
Bandinio vaizdinimas	Ašinis apšvietimas, apšvietimas iš apačios, paviršiaus vaizdinimas skaitmenine kamera

2 priedas. Bandomųjų taškinių hologramų spalvų duomenys

7 lentelė. Bandomųjų taškinių hologramų užduotojo difrakcinio atvaizdo („U“) spalvų koordinatės CIE LAB spalvų sistemoje, sRGB spalvų sistemoje ir CIE XYZ spalvų sistemos spalvingumo diagramoje

Nr.	CIE LAB			sRGB			CIE XYZ	
	<i>L</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>R</i>	<i>G</i>	<i>B</i>	<i>x</i>	<i>y</i>
1	100,00	0,01	0	255	255	255	0,31	0,32
2	66,96	43,85	65,32	255	127	39	0,53	0,39
3	93,78	-15,30	92,04	255	242	0	0,42	0,49
4	85,25	-39,43	80,06	181	230	29	0,37	0,52
5	63,59	-57,62	40,97	34	177	76	0,28	0,51
6	83,09	-16,08	-14,79	153	217	234	0,26	0,30
7	45,95	49,83	-32,48	163	73	164	0,31	0,19
8	79,47	33,30	-1,59	255	174	201	0,36	0,30
9	60,31	98,26	-60,83	255	0	255	0,32	0,15
10	59,63	-0,37	-26,60	112	146	190	0,24	0,25
11	56,99	20,75	29,14	185	122	87	0,43	0,37

8 lentelė. Bandomųjų taškinių hologramų pirmojo sumodeliuoto difrakcinio atvaizdo („M1“) spalvų koordinatės CIE LAB spalvų sistemoje, sRGB spalvų sistemoje ir CIE XYZ spalvų sistemos spalvingumo diagramoje

Nr.	CIE LAB			sRGB			CIE XYZ	
	<i>L</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>R</i>	<i>G</i>	<i>B</i>	<i>x</i>	<i>y</i>
1	97,42	0,83	0,82	250	247	246	0,31	0,33
2	67,78	42,001	64,21	255	131	44	0,52	0,39
3	93,57	-16,06	83,48	251	242	54	0,41	0,48
4	93,46	-42,33	79,18	199	255	64	0,37	0,51
5	88,46	-77,04	47,48	0	255	126	0,27	0,50
6	87,91	-16,63	-15,42	164	231	249	0,26	0,30
7	69,04	71,38	-43,15	255	111	248	0,32	0,20
8	78,89	33,63	0,27	255	172	196	0,36	0,30
9	59,81	97,03	-56,65	255	0	246	0,33	0,15
10	77,04	1,66	-31,99	156	192	249	0,25	0,26
11	76,92	26,28	37,39	255	170	122	0,43	0,37

9 lentelė. Bandomųjų taškinių hologramų antrojo sumodeliuoto difrakcinio atvaizdo („M2“) spalvų koordinatės CIE LAB spalvų sistemoje, sRGB spalvų sistemoje ir CIE XYZ spalvingumo diagramoje

Nr.	CIE LAB			SRGB			CIE XYZ	
	<i>L</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>R</i>	<i>G</i>	<i>B</i>	<i>x</i>	<i>y</i>
1	98,95	-7,47	22,52	255	255	208	0,34	0,37
2	77,93	17,16	80,94	255	178	0	0,48	0,45

3	89,69	-7,43	89,10	255	226	0	0,44	0,48
4	94,55	-16,75	92,60	255	245	0	0,42	0,49
5	88,75	-45,22	63,87	172	243	92	0,34	0,50
6	91,55	3,47	24,05	255	227	185	0,36	0,37
7	80,07	29,66	5,24	255	178	190	0,37	0,31
8	87,05	5,66	43,10	255	212	136	0,40	0,40
9	73,21	46,05	-4,21	255	146	189	0,37	0,28
10	81,30	0,58	8,60	210	201	186	0,33	0,34
11	85,89	2,08	72,13	255	210	68	0,44	0,45

10 lentelė. Bandomųjų taškinių hologramų eksperimento metu gautais spektrais pagrįstų atvaizdų atitikmenų („E“) spalvų koordinatės CIE LAB spalvų sistemoje, sRGB spalvų sistemoje ir CIE XYZ spalvingumo diagramoje

Nr.	CIE LAB			sRGB			CIE XYZ	
	<i>L</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>R</i>	<i>G</i>	<i>B</i>	<i>x</i>	<i>y</i>
1	95,26	-1,87	22,50	255	241	198	0,34	0,37
2	82,23	7,80	83,86	255	196	0	0,46	0,46
3	88,68	-5,43	88,38	255	222	0	0,44	0,48
4	97,19	-21,06	90,12	255	255	39	0,41	0,49
5	92,11	-14,60	11,43	212	240	210	0,31	0,36
6	96,99	-3,19	18,76	255	247	210	0,34	0,36
7	95,84	8,67	-6,11	255	238	255	0,31	0,31
8	98,94	-7,61	23,00	255	255	207	0,34	0,37
9	79,47	46,23	-30,77	255	166	255	0,31	0,24
10	96,49	6,60	-3,60	255	241	252	0,31	0,31
11	98,97	-7,32	22,04	255	255	209	0,34	0,37