

VILNIAUS UNIVERSITETAS
FIZIKOS FAKULTETAS
KVANTINĖS ELEKTRONIKOS KATEDRA

Julius Vaicenavičius

STATINIŲ IR DINAMINIŲ FAZINIŲ OBJEKTŲ TYRIMAS PANAUDOJANT
SKAITMENINĖS HOLOGRAFIJOS IR MODIFIKUOTĄ *SHACK-HARTMANN* METODUS

Magistro baigiamasis darbas

(studijų programa – LAZERINĖ FIZIKA IR OPTINĖS TECHNOLOGIJOS)

| | |
|------------------|-------------------------------------|
| Studentas | Julius Vaicenavičius |
| Darbo vadovas | Doc. dr. Andrius Melninkaitis |
| Recenzentas | Dr. Mangirdas Malinauskas |
| Katedros vedėjas | Prof. habil. dr. Valdas Sirutkaitis |

Vilnius 2017

Turinys

| | |
|---|----|
| Įvadas | 1 |
| 1 Literatūros apžvalga | 3 |
| 1.1 Vaizdo formavimo principai | 3 |
| 1.2 Interferencija ir difrakcija | 4 |
| 1.3 Skaitmeninė holografija..... | 6 |
| 1.3.1 Skaitmeninės hologramos formavimas..... | 7 |
| 1.3.2 Skaitmeninių hologramų atkūrimas | 8 |
| 1.3.2.1 Frenelio-Kirkhofo algoritmas | 8 |
| 1.3.2.2 Šašūkos metodas | 9 |
| 1.4 <i>Hartmann</i> fazinis fronto vaizdinimas | 11 |
| 1.5 Keturbangė šoninio poslinkio interferometrija | 12 |
| 1.5.1 Interferogramos formavimas | 13 |
| 1.5.2 Interferogramos atkūrimas | 15 |
| 2 Tyrimo metodai | 16 |
| 2.1 Objektas | 16 |
| 2.2 Skaitmeninių hologramų eksperimentinis įrašymas..... | 18 |
| 2.3 Skaitmeninis žadinimo-zondavimo holografinis mikroskopas..... | 20 |
| 2.4 Skaitmeninių holografinių vaizdų atkūrimas | 21 |
| 2.5 Keturbangė šoninio poslinkio interferencinė kamera <i>SID4bio</i> | 21 |
| 2.6 Eksperimentams naudotų lazerio pluoštų apibūdinimas | 22 |
| 3 Rezultatai ir jų aptarimas | 25 |
| 3.1 Fazinio objekto atvejo studija..... | 25 |
| 3.2 Kraterių morfologijos tyrimas..... | 29 |
| 3.3 Dinaminių fazinių objektų tyrimas | 30 |
| 3.3.1 Lydytame kvarce | 30 |
| 3.3.2 Hafnio dioksido dangoje..... | 32 |
| 4 Pagrindiniai rezultatai ir išvados | 35 |
| Literatūros sąrašas | 36 |
| Santrauka | 38 |
| Summary | 39 |

Įvadas

Vienas iš sudėtingiausių praktinių uždavinių optikoje – kuo tiksliau apibūdinti ir pritaikyti šviesos pluoštą. Siekdami šio tikslo, mokslininkai atrado daug skirtingų metodikų, gebančių registruoti ne tik šviesos intensyvumą, bet ir fazę [1]. Kuo tiksliau pavyksta registruoti šviesą, tuo daugiau galime sužinoti apie mus supantį pasaulį. Fazinis vaizdinimas pradėtas aktyviai naudoti fizikoje, siekiant nustatyti lūžio rodiklio pokytį medžiagoje, biologijoje ir medicinoje – tiriant biologinius vyksmus ląstelėse, karo pramonėje ir kitose srityse. Vienos iš naujausių ir perspektyviausių fazinio vaizdinimo technologijų yra skaitmeninė holografija ir keturbangės šoninio poslinkio interferometrija – KŠPI (angl. *Quadri-wave Lateral Shearing Interferometry*).

Skaitmeninė holografija – tyrimų metodas, pagrįstas interferencijos ir difrakcijos reiškiniais, t.y. koherentinių šviesos bangų sklaida nuo tiriamo objekto ir šios šviesos interferencija su atraminiu optiniu signalu. KŠPI metodiką 2000 metais užpatentavo Prancūzijos kompanija „Phasics“, kurios veikimas yra pagrįstas modifikuota Hartmano kauke – MHK (angl. *Modified Hartmann Mask*). Skirtingai nei skaitmeninėje holografijoje čia nereikalingas atraminis pluoštas, tai padaro sistemą kompaktiškesnę ir paprastesnę.

Abiejų metodikų atveju vaizdo jutikliu yra įrašomas ne tik objekto atvaizdo intensyvumas, kaip tai yra daroma įprastinėse nuotraukose, bet ir objekto atvaizdo bangų fazė. Pastaroji yra itin jautri menkiausiems medžiagos lūžio rodiklio ir storio pokyčiams [2]. Taigi, abu metodai suteikia galimybę iš interferogramų atkurti vaizdus matematinių skaičiavimų pagalba.

Trumpų impulsų lazeriai sukuria tokį stiprų šviesos lauką, kuris sklisdamas per skaidrias medžiagas gali sukelti šviesos fokusavimąsi, daugiafotonę sugertį, optinį medžiagos pažeidimą ir daugelį kitų reiškinių. Būtent skaitmeninės holografijos ir keturbangės šoninio poslinkio interferometrijos metodikos yra tinkamos fizikinių reiškinių, vykstančių skaidriose terpėse eksperimentiniam tyrimui. Mokslinis darbas buvo atliktas bendradarbiaujant su Prancūzijos mokslininkų grupe iš Frenelio instituto, vykdant atviros prieigos laboratorijų „LaserLab-Europe“ projektą.

Pagrindinis šio darbo tikslas yra ištirti statinius ir dinامينius fazinius objektus skaitmeninės holografijos ir keturbangės šoninio poslinkio interferometrijos vaizdinimo metodikomis.

Siekiant šio tikslo, išskirti tokie darbo uždaviniai:

- eksperimentiškai užregistruoti fazinio etalono sukuriamą optinio kelio skirtumą skaitmeninės holografijos ir KŠPI metodikomis, rezultatus palyginti;
- atlikti nežinomų fazinių objektų tyrimą, nustant pažeidimų įnešamus optinio kelio skirtumus abiejomis metodikomis, rezultatus palyginti;
- atlikti lazerio šviesa indukuotų dinaminų darinių vaizdinimą lydyto kvarco pagrindu ir Hafnio dioksido dangoje panaudojant laikinės skyros žadinimo-zondavimo principą, rezultatus palyginti.

1 Literatūros apžvalga

1.1 Vaizdo formavimo principai

Į klausimą kas yra šviesa atsakymo ieškota daugybę amžių. Pagal Maksvelo (angl. *Maxwell*) pasiūlytą ir visuotinai priimtą elektromagnetizmo teoriją šviesa yra elektromagnetinės bangos, sklindančios elektrinio ir magnetinio laukų pavidalu [3]. Šviesai sklindant per objektus, kurių dydis yra daug didesnis už bangos ilgį, šviesos sklidimas gali būti tinkamai aprašytas pasinaudojant geometrinės optikos artiniu [4], šviesos sklidimas apibūdinamas pasitelkiant spindulio sąvoką. Spindulių optika yra banginės optikos ribinis atvejis, kai bangos ilgis yra be galo mažas.

Siekiant apibendrinti paprasčiausius vaizdų formavimosi principus aptarkime pirmuosius du geometrinės optikos postulatus [4]:

- Šviesa sklinda spindulių pavidalu. Spinduliai yra išspinduliuojami šviesos šaltinių ir gali būti stebimi patekę į optinį detektorių.
- Optinė terpė yra aprašoma lūžio rodikliu $n \geq 1$. Lūžio rodiklis yra santykinis dydis parodantis, kiek kartų šviesos greitis yra didesnis vakuume nei medžiagoje.

$$n = \frac{c}{v}, \quad (1)$$

čia $c = 3 \cdot 10^8$ m/s - šviesos greitis vakuume, v - šviesos greitis medžiagoje.

Medžiagose su skirtingais lūžio rodikliais n šviesa sklinda skirtingais greičiais. Būtent tai ir buvo pastebėta eksperimentiškai, jog spindulys kritęs į dviejų skirtingų medžiagų sandūrą (lūžio rodikliai n_1 ir n_2) yra išskiriamas į atsispindėjusį ir lūžusį spindulius (1 pav.). Tiek lūžęs, tiek atsispindėjęs spinduliai yra kritimo plokštumoje.

Lūžusio spindulio kampas θ_1 susijęs su krtimo kampu θ_2 pagal Snelio (*Snell*) dėsnį [4]:

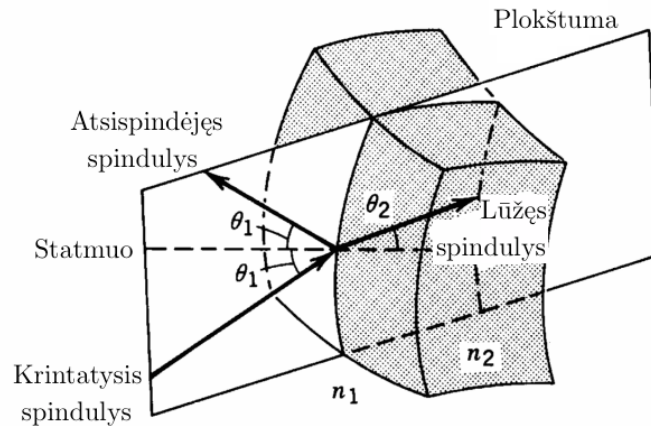
$$n_1 \sin(\theta_1) = n_2 \sin(\theta_2), \quad (2)$$

čia n_1 apibūdina medžiagą iš kurios krinta spindulys, n_2 - medžiagą į kurią krinta spindulys.

Homogeniškoje aplinkoje lūžio rodiklis n yra pastovus dydis, todėl šviesa sklinda tiesiomis linijomis. Siekiant formuoti vaizdus bendru atveju tiesiaieigio šviesos sklidimo nepakanka, todėl yra pasitelkiamas vienas labiausiai optikoje naudojamų optinių komponentų - lęšis. Spindulys kritęs į lęšį lūžta du kartus terpių n_1 - n_2 ir n_2 - n_1 sandūrose.

Plonojo lęšio formulė susieja židinio nuotolį f su lęšio lūžio rodikliu n bei lęšio kreivumo spinduliais R_1 ir R_2 [3]:

$$\frac{1}{f} \approx (n - 1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right). \quad (3)$$



1 pav. Atspindys ir lūžimas dviejų terpių riboje [4].

1.2 Interferencija ir difrakcija

Norint suprasti bei įsisavinti holografijos tyrimo metodą, geometrinės optikos artinio nepakanka. Holografija yra ypatingas tyrimų metodas, pagrįstas interferencijos bei difrakcijos reiškiniais, t.y. koherentinių šviesos bangų sklaida nuo tiriamo objekto ir šios šviesos interferencija su atraminiu optiniu signalu. Šiuos du reiškinius aptarsiu išsamiau.

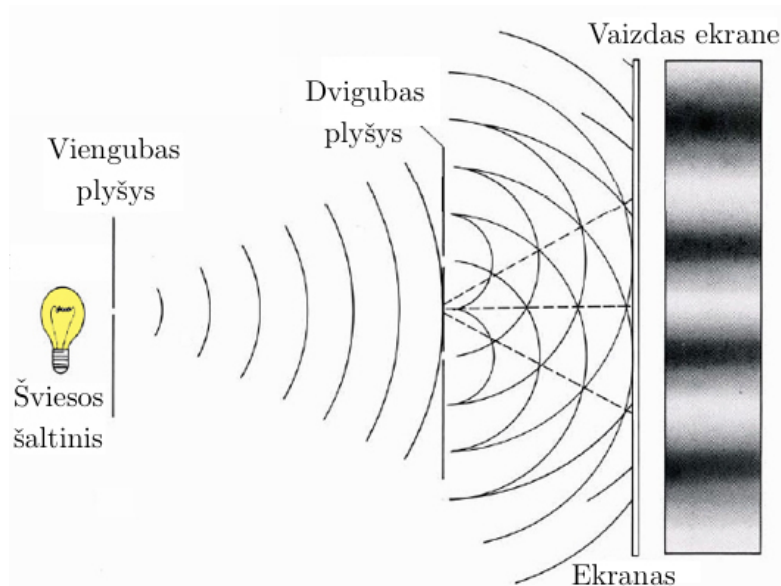
Aiškinant šviesos interferencijos reiškinį būtina paminėti bangų superpozicijos principą – svarbiausią bangų optikos principą.

Tarkime, kad kuriame nors erdvės taške vienu metu yra fiksuojami atskirų bangų sukelti trikdžiai s_1, s_2, \dots, s_n , tai atstojamasis trikdys yra algebrinė jų suma:

$$s = s_1 + s_2 + \dots + s_n. \quad (4)$$

Superpozicijos principas yra fizikinė hipotezė, pagal kurią šviesos bangos trikdys, susidarantis kuriame nors erdvės taške tam tikru laiko momentu pereinant kelioms bangoms, lygus atskirų bangų trikdžių algebrinei sumai. Tai išreiškiama (4) lygtyje.

Šviesos interferencija yra kelių ar daugiau koherentinių (vienodų bangos ilgių, dažnių, poliarizacijų ir pastovaus fazių skirtumo) bangų sudėtis erdvėje. Dvigubojo plyšio eksperimentą pirmasis 1804 metais pademonstravo anglų mokslininkas Tomas Jungas (*Thomas Young*) (2 pav.) [5]. Pastarasis eksperimentas atliko itin svarbų vaidmenį, kadangi jis gali būti paaiškintas tik pasinaudojant šviesos, kaip bangų, savybėmis ir interferencijos reiškinium, t.y. dviejų ar daugiau bangų superpozicija erdvėje [4].



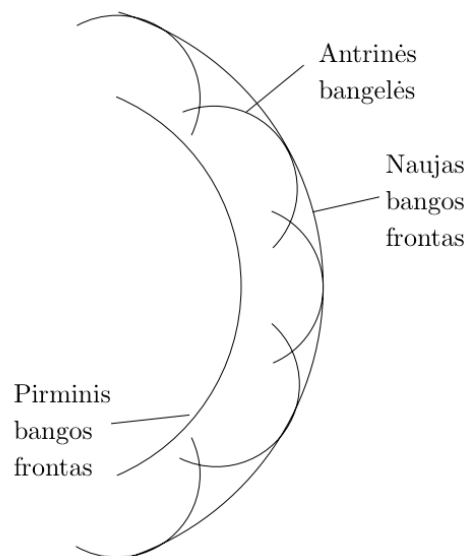
2 pav. Dvigubo plyšio eksperimentas [6].

Interferencinis reiškinys, kurio metu nagrinėjama daug šviesos bangų, vadinamas difrakcija. Apibendrintai, difrakcija – tai bet koks šviesos nukrypimas nuo tiesiaieigio sklidimo. Šį reiškinį geriau suprasti padeda Hiugenso (ol. *Huygens*) principas, kuris teigia, jog kiekvienas bangos fronto taškas gali būti laikomas taškiniu antrinių sferinių bangų šaltiniu [7]. Grafiškai Hiugenso principas iliustruotas 3 paveikslėlyje.

Pačių smulčiausių elementų, kurių dydis yra bangos ilgio eilės, atvaizdavimas yra labai sudėtingas. Kiekvienos optinės atvaizdavimo sistemos (mikroskopo, teleskopo, kameros ir kt.) maksimali skyra yra apribota fundamentinės difrakcijos ribos. 1873 metais Ernstas Abė (*Ernst Abbe*) pateikė apytiksliai mikroskopo difrakcijos ribą:

$$d = \frac{\lambda}{2n \sin(\theta)}, \quad (5)$$

čia d – mažiausias išskiriamos objekto diametras, λ – bangos ilgis, n – medžiagos, kurioje sklinda šviesa, lūžio rodiklis, θ – kampinės apertūros kampas, kuriuo krenta šviesa į konkretų tašką. Vardiklyje esantis $n \sin(\theta)$ yra vadinamas skaitine apertūra (angl. *numerical aperture* – *NA*), kuris moderniojoje optikoje gali siekti apie 1,4 – 1,6. Žaliai šviesai (500 nm ilgio) su skaitine apertūra 1, Abės difrakcijos riba apytiksliai yra lygi $d = \lambda/2 = 250$ nm.



3 pav. Hiugenso principas [7].

Pasinaudodami Hiugenso principu ir interferencijos reiškiniais galime matematiškai aprašyti

difrakcijos reiškini. Kiekvienos bangos įnašas susumuojamas pagal superpozicijos principą. Kiekybiškai difrakcija aprašoma Frenelio-Kirkhofo integralu [8]. $\Gamma(\xi', \eta')$ yra bangų laukas atvaizdo plokštumoje:

$$\Gamma(\xi', \eta') = \frac{i}{\lambda} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} A(x, y) \frac{\exp(-i\frac{2\pi}{\lambda}\rho')}{\rho'} Q dx dy, \quad (6)$$

čia

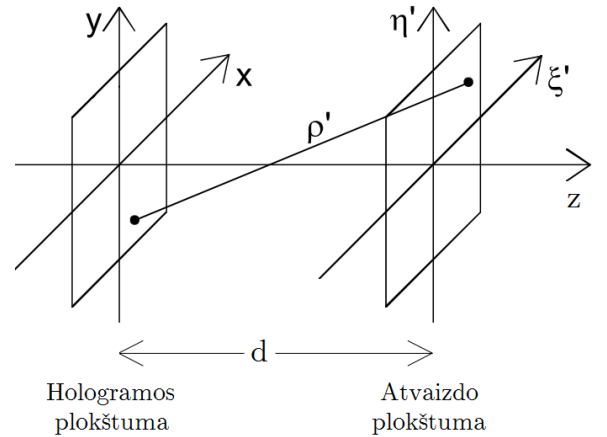
$$\rho' = \sqrt{(x - \xi')^2 + (y - \eta')^2 + d^2}, \quad (7)$$

čia λ – bangos ilgis, x, y – koordinatės interencinio vaizdo plokštumoje, ξ', η' – koordinatės atvaizdo plokštumoje, kurioje skaičiuojamas difrakcinis vaizdas, d – atstumas nuo šviesos šaltinio plokštumos iki atvaizdo plokštumos – ekrano, $A(x, y)$ – daikto arba pradinio vaizdo kompleksinė amplitudė, Q – polinkio daugiklis. Dekarto koordinatčių sistema pateikta 4 paveikslėlyje.

Šio dvigubo integralo, aprašančio difrakciją, privalumas yra toks, kad atkurtas laukas Γ yra kompleksinė funkcija. Tai reiškia, kad iš šio integralo gali būti atkurtas tiek amplitudinis, tiek fazinis vaizdai [9].

Aptartas Hiugenso principas antrinėmis bangomis gali sklisti ne tik viena kryptimi, tačiau taip pat ir atgaline kryptimi spinduliuotės šaltinio link. Tam, kad būtų pašalintas šis nefizikinis reiškiny, yra įvedamas polinkio daugiklis Q . Daugumoje praktinių situacijų $Q \approx 1$, kadangi kampai, kuriais šviesa difraguoja praėjusi hologramą, yra nedideli.

6 formulė yra matematinė Hiugenso principo formuluotė.



4 pav. Dekarto koordinatčių sistema hologramos plokštumoje (kairėje) bei atvaizdo plokštumoje (dešinėje) [7].

1.3 Skaitmeninė holografija

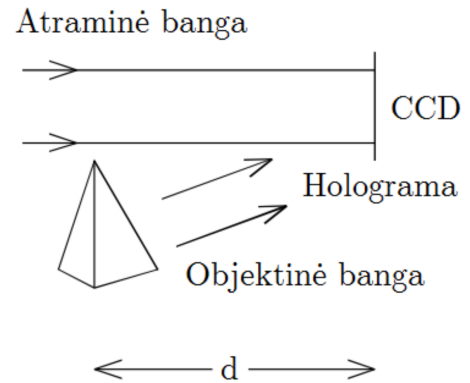
Holografiją išrado vengrų fizikas Denis Gaboras (*Dennis Gabor*) 1948 metais kaip metodą, skirtą įrašyti ir atkurti bangų lauko amplitudinį ir fazinį vaizdus. Už šį išradimą jis buvo apdovanotas Nobelio premija. Holograma – tai fotografiniu ar kitu būdu įrašytas interferencinis vaizdas: objekto išsklaidytos šviesos ir koherentinio atraminio šviesos pluošto elektromagnetinių laukų sumos rezultatas [10].

Esminis holografijos tyrimų metodas yra pagrįstas interferencijos bei difrakcijos reiškiais (aptartais 1.2 skyriuje), kai objekto išsklaidyta koherentinė spinduliuotė (objektinė banga) in-

terferuoja su atraminiu optiniu signalu (atramine banga) (5 pav.). Šio proceso metu įrašomas ne tik objekto atvaizdo intensyvumas, kaip tai yra daroma įprastinėse nuotraukose, bet ir objekto bangų fazė, kuri yra itin jautri medžiagos lūžio rodiklio ir mažiausiems storio pokyčiams medžiagoje [2].

Labai svarbus žingsnis pereinant nuo tradicinės optinės holografijos prie skaitmeninės holografijos buvo Frenelio hologramų (interferogramų) tiesioginio įrašymo išradimas krūvio sąsajos kamera (angl. *charged coupled device* – *CCD*) [11].

Optiniai signalai skaitmeninėje holografijoje yra nuskaityti ir apdorojami elektronikos pagalba. Skirtingai nuo įprastos holografijos, skaitmeninėje holografijoje nėra naudojamos fotojautrios plokštelės. Vietoj jų optinis signalas yra konvertuojamas į skaitmeninį pirminėje hologramos susidarymo stadijoje ir fiksuojamas skaitmeninėmis kameromis. Toks holografinių vaizdų įrašymo būdas suteikia galimybių atkurti amplitudinį bei fazinį



5 pav. Skaitmeninės hologramos įrašymas [7].

bangų laukus tiesiogiai iš skaitmeninių hologramų [9]. Į skaitmeninės holografijos terminą įeina du dalykai:

- hologramos skaitmeninis užrašymas (formavimas),
- hologramos skaitmeninis atkūrimas.

1.3.1 Skaitmeninės hologramos formavimas

Skaitmeninės hologramos įrašymo principas pavaizduotas 5 paveikslėlyje. Atraminė (plokščioji) ir objektinė (išsklaidyta objekto plokščioji) bangos interferuoja CCD matricos plokštumoje. Holografinis vaizdas yra elektroniskai išsaugomas ir įrašomas skaitmeniniame pavidale kompiuterio atmintyje. Objektas gali būti erdvinis su difuziškai sklaidančiu paviršiumi.

Holografinis vaizdų įrašymas yra aprašomas interferencijos bei difrakcijos reiškiniais. Objektinės (E_0) ir atraminės (E_R) bangų kompleksinės amplitudės yra išreiškiamos:

$$E_0(x, y) = a_0(x, y)e^{i\varphi_0(x, y)}, \quad (8)$$

$$E_R(x, y) = a_R(x, y)e^{i\varphi_R(x, y)}, \quad (9)$$

čia a_0 – reali objektinės bangos amplitudė, φ_0 – objektinės bangos fazė, a_R – reali atraminės bangos amplitudė, φ_R – atraminės bangos fazė.

Šios abi bangos interferuoja hologramos plokštumoje. Jų intensyvumas yra apskaičiuojamas:

$$I(x,y) = |E_0(x,y) + E_R(x,y)|^2 = [E_0(x,y) + E_R(x,y)] [E_0(x,y) + E_R(x,y)]^* = \\ = E_R(x,y)E_R^*(x,y) + E_0(x,y)E_0^*(x,y) + E_0(x,y)E_R^*(x,y) + E_R(x,y)E_0^*(x,y). \quad (10)$$

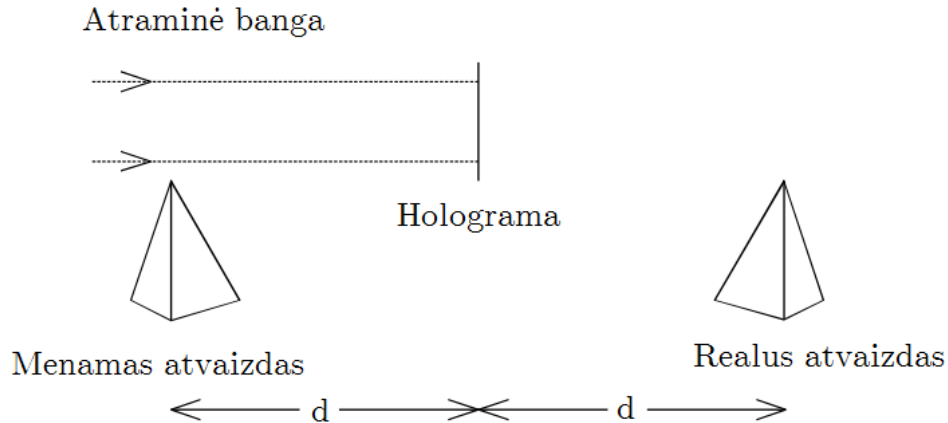
Fotografinės plokštelės ar kitos įrašymui naudojamos medžiagos amplitudinė pralaidumo funkcija $h(x,y)$ yra proporcinga intensyvumui $I(x,y)$:

$$h(x,y) = h_0 + \beta \tau I(x,y), \quad (11)$$

čia β – amplitudės perdavimo koeficientas, τ – ekspozicijos trukmė. Skaitmeninėje holografijoje įrašant holografinius vaizdus CCD kamera h_0 narys gali būti atmestas [7].

1.3.2 Skaitmeninių hologramų atkūrimas

Nuo kiekvieno hologramos plokštumoje įrašyto interferencinio vaizdo taško pasinaudojant Hiugenso ir superpozicijos principais (aptartais 1.2 skyrelyje) yra skaičiuojama sferinė banga atstumu ρ' iki atvaizdo plokštumos. Koordinačių sistema pavaizduota (4 pav.).



6 pav. Skaitmeninės hologramos atkūrimas su plokščia atramine banga [7].

1.3.2.1 Frenelio-Kirkhofo algoritmas

Optiniame holografinių vaizdų atkūrimo virtualus objekto vaizdas susidaro originalaus vaizdo vietoje, o realus atvaizdas susidaro atstumu d , tačiau priešingoje pusėje negu CCD (6 pav.).

Šviesos bangų difrakcija nuo apertūros (šiuo atveju nuo hologramos), kuri yra padėta statmenai krentančiam pluoštui yra aprašoma Frenelio-Kirkhofo (*Fresnel-Kirchhoff*) integralu. Pagal (6) formulę turime:

$$\Gamma(\xi', \eta') = \frac{i}{\lambda} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} h(x, y) E_R(x, y) \frac{\exp(-i \frac{2\pi}{\lambda} \rho')}{\rho'} dx dy, \quad (12)$$

čia λ – bangos ilgis, $h(x, y)$ – hologramos funkcija, $E_R(x, y)$ – atraminė plokščioji banga, ρ' – atstumas tarp taško hologramos plokštumoje ir taško atvaizdo plokštumoje (7 formulė), i – menamasis vienetas.

1.3.2.2 Sąsūkos metodas

Skaitmeninis Frenelio-Kirkhofo integralo apdorojimas be papildomų aproksimacijų trunka labai ilgai, kadangi reikia skaičiuoti dvigubą integralą pagal x ir y koordinates: (12) formulė. Šio integralo apdorojimas gali būti pagreitintas pritaikius sąsūkos teoremą, kurioje panaudojama greitoji Furjė transformacija GFT (angl. *Fast Fourier Transform - FFT*), pažymėta raide \mathcal{F} ir atvirkštinė Furjė transformacija (angl. *Inverse Fast Fourier Transform - IFFT*) [12], pažymėta raide \mathcal{F}^{-1} .

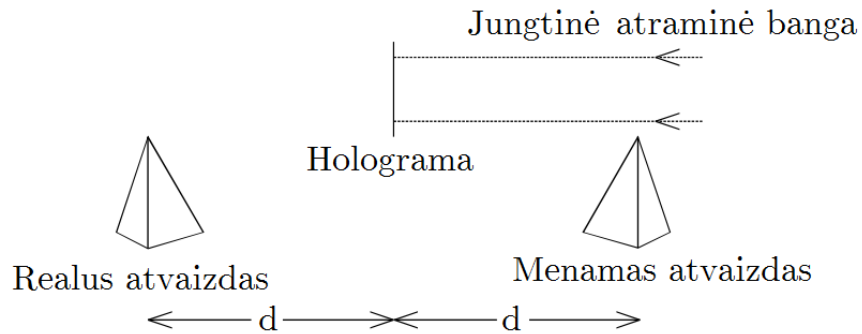
Greitoji Furjė transformacija dvimačiams signalams yra skaičiuojama kaip diskrečioji Furjė transformacija (DFT). Matematiškai dvimatę DFT galima aprašyti:

$$y(u, v) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} x(m, n) e^{-i2\pi mu/M} e^{-i2\pi nv/N}, \quad (13)$$

$$u = 0, 1, \dots, M-1, v = 0, 1, \dots, N-1,$$

čia x yra dvimatė įėjimo signalo matrica, y – dvimatės diskrečiosios Furjė transformacijos rezultatas, i – menamasis vienetas.

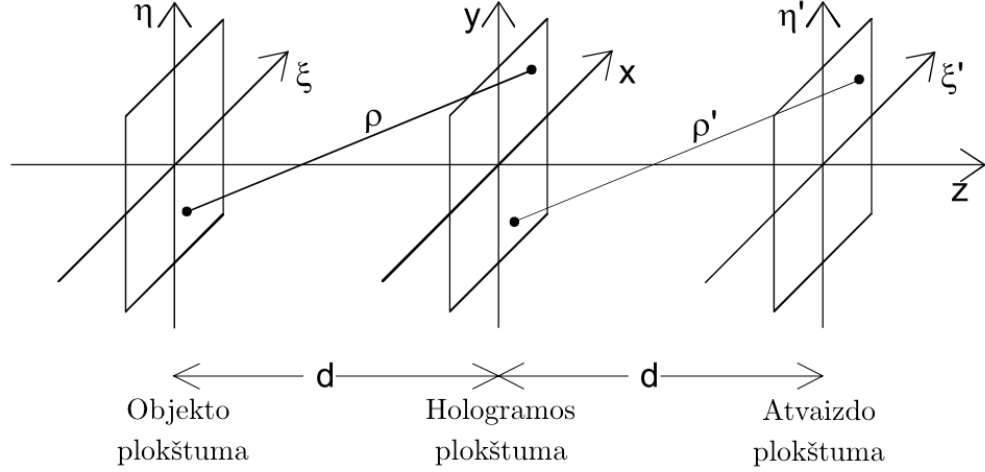
Pirmieji sąsūkos metodą skaitmeninėms hologramoms atkurti pritaikė Demetrakopoulou ir Mittra [13]. Frenelio-Kirkhofo integralą galime perrašyti pasinaudodami jungtiniu atraminiu pluoštu, kurio sklidimo kryptis pavaizduota (7 pav.).



7 pav. Skaitmeninės hologramos atkūrimas su jungtine atramine banga [7].

Dekarto koordinatinių sistema, naudota matematiniam holografinių vaizdų atkūrimo apra-

šyme, pavaizduota 8 paveikslėlyje.



8 pav. Dekarto koordinacių sistema: objekto plokštuma (kairėje), hologramos plokštuma (viduryje) ir atvaizdo plokštuma (dešinėje) [7].

$$\Gamma(\xi, \eta) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} h(x, y) E_R^*(x, y) g(\xi, \eta, x, y) dx dy, \quad (14)$$

čia impulso atsako funkcija $g(x, y, \xi, \eta)$

$$g(\xi, \eta, x, y) = \frac{i}{\lambda} \frac{\exp\left(-i\frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{d^2 + (x - \xi)^2 + (y - \eta)^2}\right)}{\sqrt{d^2 + (x - \xi)^2 + (y - \eta)^2}}, \quad (15)$$

čia E_R^* – kompleksinis jungtinis atraminis pluoštas.

Ši atsako funkcija yra erdvės invariantas $g(\xi, \eta, x, y) = g(\xi - x, \eta - y)$. Superpozicijos integralas gali būti laikomas kaip funkcijų $f(x, y)$ ir $g(x, y)$ sąsūka ir pritaikyta sąsūkos teorema.

Funkcijų $f(x, y)$ ir $g(x, y)$ dvimatė sąsūka apibrėžiama kaip [7]:

$$(f \otimes g)(x, y) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x', y') g(x - x', y - y') dx' dy', \quad (16)$$

čia \otimes žymi sąsūkos operaciją. Sąsūkos teorema teigia, kad dviejų funkcijų sąsūkos Furjė transformacija yra lygi atskirų funkcijų Furjė transformacijų sandaugai:

$$\mathcal{F}\{f(x, y) \otimes g(x, y,)\} = F(u, v)G(u, v). \quad (17)$$

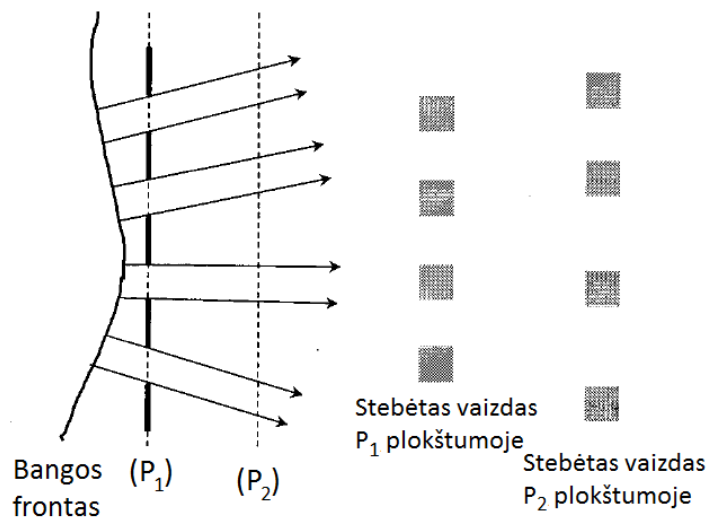
Sutrumpintai galime parašyti, jog holografinio vaizdo atkūrimas į realią atvaizdo plokštumą yra:

$$\Gamma(\xi, \eta) = \mathcal{F}^{-1}\{\mathcal{F}(h \cdot E_R^*) \cdot \mathcal{F}(g)\}. \quad (18)$$

Taigi hologramos skaitmeninį atkūrimą galima atlikti pasinaudojant Furjė transformacijomis.

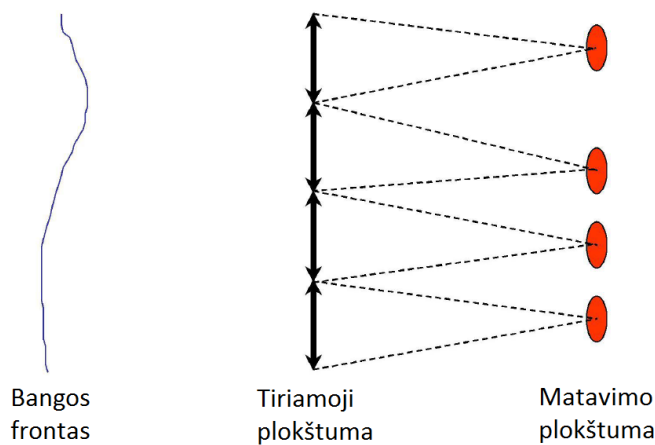
1.4 *Hartmann* fazinis fronto vaizdinimas

Principinė Hartmano metodikos, pradėtos naudoti 1880 metais astronomijoje, schema pateikta 9 pav. Iškreiptas krintantis bangos frontas yra perleidžiamas per plyšių matricą. Šviesos pluošteliai perėję per matricą P_1 , sklinda kryptimi, kuri yra proporcinga vietinio bangos fronto pokrypiui. Užregistruotą vaizdą plokštumoje P_2 iš poslinkių nuo stebėto vaizdo P_1 plokštumoje, galime atkurti tiriamosios bangos fazinį frontą.



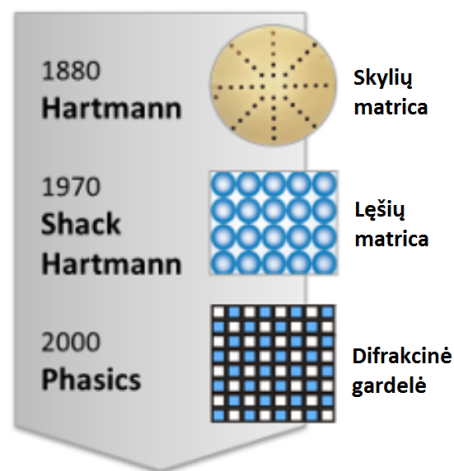
9 pav. Hartmano eksperimento principinė schema [14].

Šią metodiką 1970 metais patobulino amerikiečių mokslininkas Rolandas V. Šakas (*Roland V. Shack*), kuris plyšių matricą pakeitė mikrolęšių matrica. Principinė *Shack-Hartmann* detektoriaus veikimo schema yra pavaizduota 10 pav. Krintančios bangos frontas tiriamoje plokštumoje yra sudalomas į atskirus plotelius mikrolęšių pagalba. Kiekvienas matricos lęšis atvaizduoja krintantį bangos frontą į matavimo plokštumą, kurioje užregistruvus poslinkį nuo mikrolęšio centro galime apskaičiuoti fazės fronto išvestinę dviem matavimo plokštumai statmenomis kryptimis. Iš pastarųjų galime nustatyti krintančios bangos frontą.



10 pav. Geometrinis Shack-Hartmann bangos fronto detektorių veikimo principas [15].

Hartman metodika pagrįstų fazinių jutiklių istorijos raida pateikta 11 pav. 2000 metais Prancūzijos kompanijos „Phasics“ *Shack-Hartmann* metodika buvo patobulinta vietoje mikrolęšių matricos panaudojus difrakcinę gardelę ir pritaikius keturbangę šoninio poslinkio interferometriją.



11 pav. Hartmann fazinės vaizdinimo metodikos vystymosi raida [16].

1.5 Keturbangė šoninio poslinkio interferometrija

Keturbangės šoninio poslinkio interferometrijos (KŠPI) veikimas pasireiškia panaudojus modifikuotą Hartmano kaukę (MHK). Iškraipytas fazės frontas krintantis į gardelę difraguoja, o registruojančiame jutiklyje suinterferuoja. Iš užregistruotos interferogramos matematinų skaičiavimų pagalba gali būti atkuriami amplitudinis ir fazinis vaizdai. Veikimo principai kartu su interferogramos formavimu ir atstatymu pateikti šiame skyrelyje.

1.5.1 Interferogramos formavimas

Krentančio šviesos lauko kompleksinė amplitudė lėtai kintančios gaubtinės atveju yra:

$$A(\mathbf{r}) = \sqrt{I(\mathbf{r})} \exp(i[\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \phi(\mathbf{r})]) \quad (19)$$

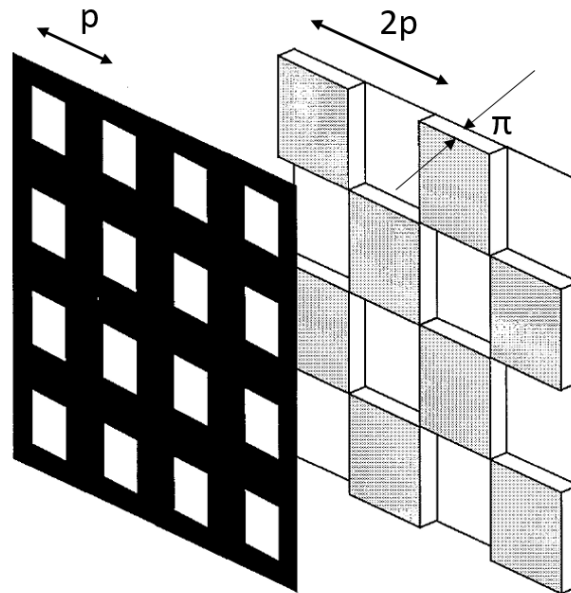
čia \mathbf{r} – pozicijos vektorius, \mathbf{k} – vidutinis bangos vektorius, I – lauko intensyvumas ir ϕ – lauko fazė.

Tiriant tiek biologinius, tiek fizikinius objektus dažnai labai patogu žinoti optinio kelio skirtumą – *OKS* (angl. *Optical Path Difference*), kuris su faze yra susietas sąryšiu [17]:

$$\phi(\mathbf{r}) = \frac{2\pi}{\lambda} OKS + \phi(\mathbf{r}_0) \quad (20)$$

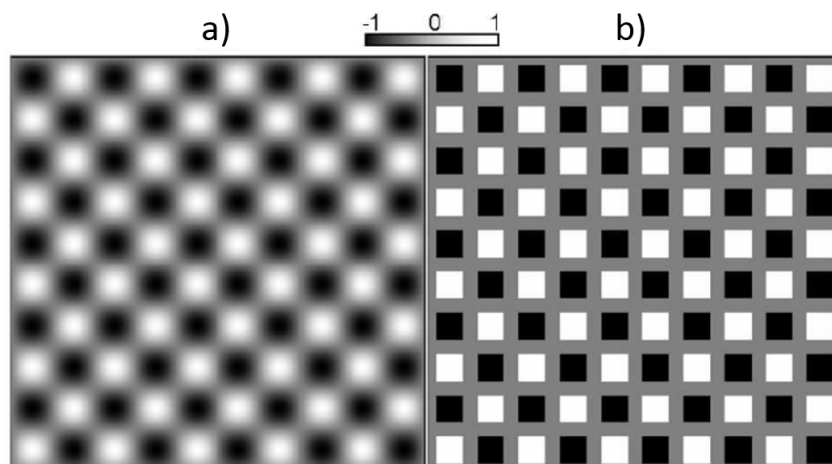
OKS atstumas atitinka fazės poslinkį tarp dviejų koherentinių bangų, kurios sklido per skirtingo lūžio rodiklio terpę: $OKS = d_1 n_1 - d_2 n_2$, čia d_1 ir d_2 yra bangų nusklistas atstumas 1 ir 2 terpėmis, $n_1 > n_2$.

KŠPI metodikoje yra naudojama modifikuota *Hartmann* kaukė (MHK). Ji yra sudaryta iš įprastinės amplitudinės Hartmano gardelės, kurios periodas p , ir fazinės gardelės su dvigubai didesniu periodu $2p$ (12 pav.). Čia kiekvienas laiptelis užvėlina fazę per π .



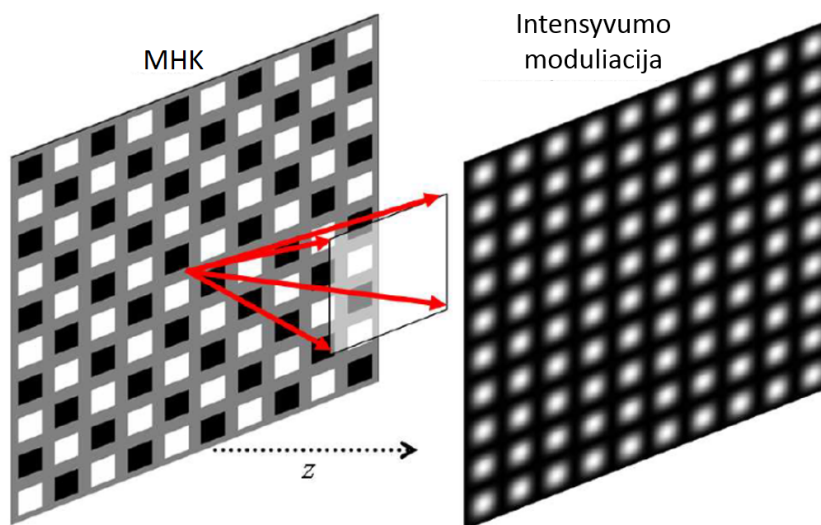
12 pav. Fazinis priedas prie Hartmano difrakcinės gardelės su dvigubai didesniu periodu $2p$ [14].

Matematinė skaičiavimų pagalba buvo nustatyta, kokia turėtų būti MHK pralaidumo funkcija, jog į šią gardelę krintanti banga difraguotų taip, jog pagrindinė šviesos intensyvumo dalis – 90%, būtų nukreipiama į pirmosios ir antrosios eilės maksimumus. Ji pavaizduota 13 pav. Praktiškai pagaminti tokią gardelę yra be galo sudėtinga, todėl yra naudojama tokios gardelės artinys, kurio pralaidumo funkcija pateikta 13 pav. b).



13 pav. a) Ideali keturbangės MCH gardelės šviesos pralaidumo funkcija. b) Idealios MCH gardelės (a) artinis naudojamas praktikoje [17].

Krintantį šviesos pluoštą difrakcinė gardelė padalina į keturis signalus, atkartodama kritusį pluoštą. Per MCH praėjusios plokščiosios bangos šviesos intensyvumo skirstinys dvimačiu atveju pateiktas 14 pav.



14 pav. 2D interferogramos formavimosi principas plokščiajai bangai sklindant per MCH (raudonomis linijomis pažymėtos 4 difragavusios bangos) [17].

Tobulos modifikuotos MCH gardelės pralaidumas, jeigu atsižvelgiama tik į 4 pirmos eilės maksimumus, yra:

$$t(x,y) = \cos\left(\frac{\pi x}{p}\right) \cdot \cos\left(\frac{\pi y}{p}\right) \quad (21)$$

Tuomet atitinkanti intensyvumo pralaidumo funkcija užrašoma $T(x,y)$ formule:

$$T(x,y) = |t(x,y)|^2 \quad (22)$$

$$= \frac{1}{4} \left\{ 1 + \left[\cos\left(\frac{2\pi}{p}x\right) + \cos\left(\frac{2\pi}{p}y\right) \right] + \frac{1}{2} \left[\cos\left(\frac{2\pi}{p}(x+y)\right) + \cos\left(\frac{2\pi}{p}(x-y)\right) \right] \right\}$$

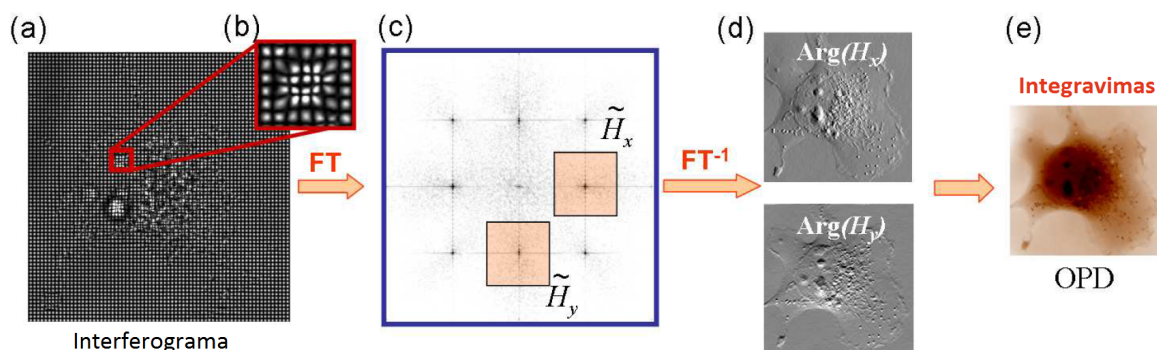
Jau anksčiau buvo parodyta (tik kita forma [15]), jog intensyvumas yra išreiškiamas formule:

$$I(\mathbf{r},z) = I_0 \left\{ 1 + \left[\cos\left(\frac{2\pi}{p}x + \frac{2\pi}{p}z\frac{\partial OKS}{\partial x}\right) + \cos\left(\frac{2\pi}{p}y + \frac{2\pi}{p}z\frac{\partial OKS}{\partial y}\right) \right] + \frac{1}{2} \left[\cos\left(\frac{2\pi}{p}(x+y) + \frac{2\pi}{p}z\frac{\partial OKS}{\partial(x+y)}\right) + \cos\left(\frac{2\pi}{p}(x-y) + \frac{2\pi}{p}z\frac{\partial OKS}{\partial(x-y)}\right) \right] \right\} \quad (23)$$

čia I_0 yra intensyvumo maksimumas ties $z = 0$.

1.5.2 Interferogramos atkūrimas

Veiksmų algoritmas, kuriuo iš interferogramos yra atkuriami faziniai vaizdai, pateiktas 15 pav. Ji yra interpretuojama kaip kintanti optinių kelių skirtumo funkcija.



15 pav. KŠPI metodika užregistruotos interferogramos atkūrimo algoritmas. a) Tiriamo objekto fazinio fronto interferograma kartu su priartintu vaizdu (b). c) Interferogramos (a) Furjė vaizdas. d) Atvirkštinė Furjė transformacija raudonai pažymėtų (c) sričių (skleidžiama aplink interferogramos nešančiuosius dažnius). e) Optinių kelių skirtumą randame suintegravus (d) [17].

Optinių kelių skirtumo gradientai yra atkuriami išskleidžiant įrašytą interferogramą apie jo nešančiuosius dažnius:

$$\begin{pmatrix} H_x \\ H_y \end{pmatrix} = \frac{2\pi}{p} z \begin{pmatrix} \frac{\partial OKS}{\partial x} \\ \frac{\partial OKS}{\partial y} \end{pmatrix} \quad (24)$$

Iš (15) ir (24) lygčių turime, jog interferogramos periodas ir moduliacija dėl optinių kelių skirtumo nepriklauso nuo bangos ilgio. Dėl to šią metodiką taikant galima naudoti ir nekoherentinį šviesos šaltinį.

2 Tyrimo metodai

Šiame tyrime buvo palygintos abi anksčiau aptartos fazinio vaizdinimo metodikos: skaitmeninė holografija (SH) ir keturbangė šoninio poslinkio interferometrija (KŠPI), pagrįsta modifikuota Hartmano kauke (MHK). Eksperimentas suskirstytas į dvi dalis:

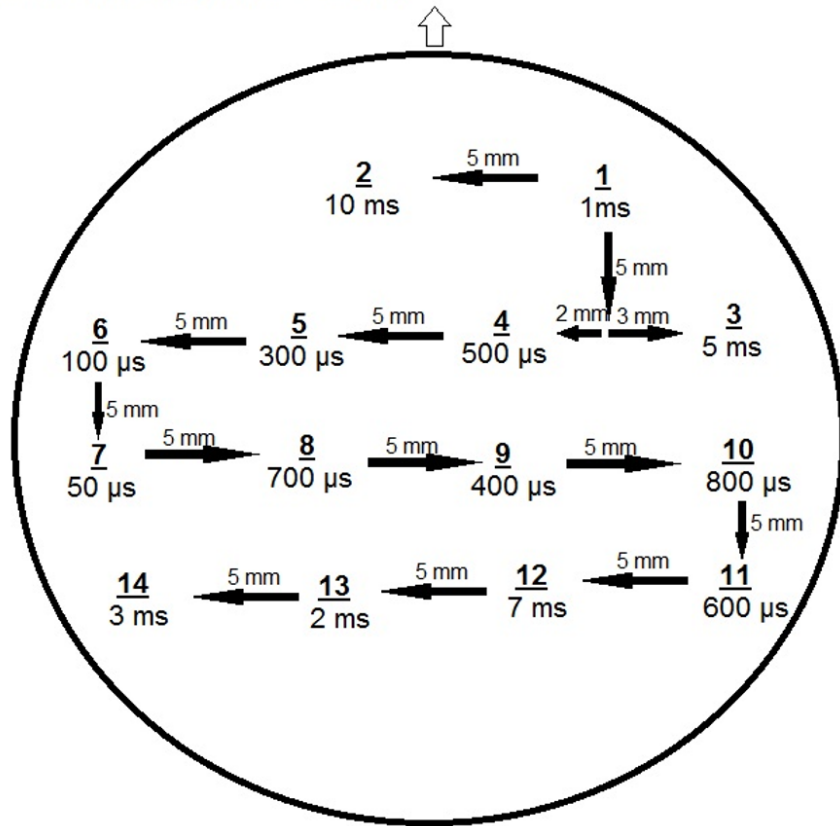
- Statinių fazinių objektų tyrimas. Lydytame kvarce suformuotas žinomo gylio fazinis etalonas ir įvertintas kraterio optinio kelio skirtumas (OKS) SH ir KŠPI metodikomis. Taip pat atliktas nežinomo gylio kraterių OKS ir morfologijos tyrimas.
- Dinaminių fazinių objektų tyrimas. Lydyto kvarco pagrindu ir Hafnio dioksido dangoje atlikti dinaminių šviesos darinių tyrimai SH ir KŠPI metodikomis.

Eksperimentas buvo atliktas bendradarbiaujant su Prancūzijos mokslininkų grupe iš Frenelio instituto, vykdam atviros prieigos laboratorijų „LaserLab-Europe” projektą.

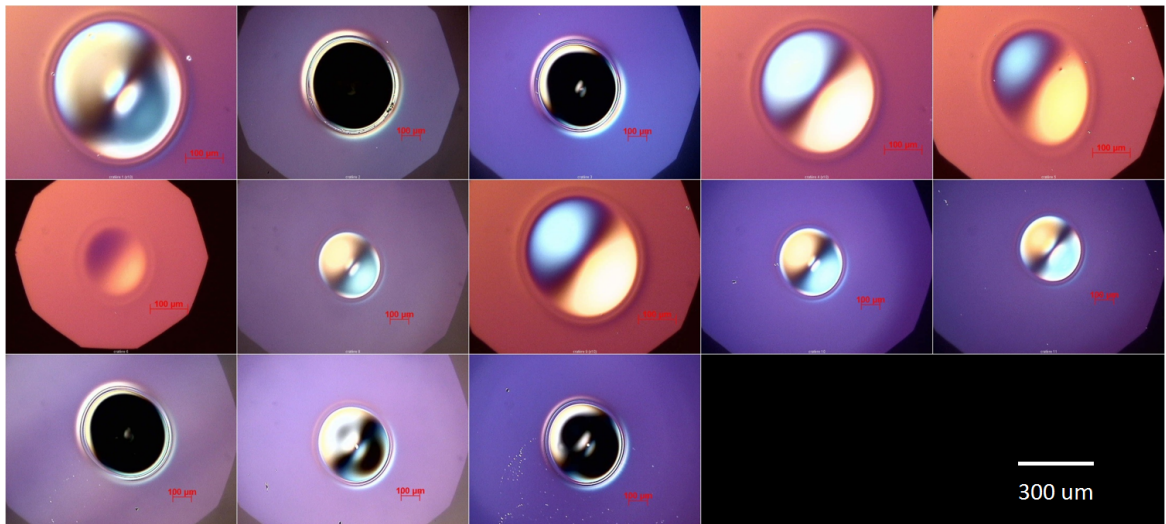
2.1 Objektas

Atliekant statinių fazinių objektų eksperimentą buvo naudoti du iš anksto paruošti etalonai: fazinis ir amplitudinis erdvinės skyros etalonai.

Fazinis etalonas buvo pagamintas iš lydyto kvarco. Jame fiksuotais atstumais CO₂ lazeriu, kurio galia $P = 83$ W, pluošto diametras 400 μm , buvo suformuoti skirtingo dydžio ir gylio krateriai. Fazinio etalono žemėlapis pateiktas 16 pav. Nomarskio mikroskopijos pagalba nufotografuoti faziniai krateriai pateikti 17 pav. Eksperimentui buvo pasirinktas 6 krateris, kurio maksimalus optinio kelio skirtumas (*OKS*) buvo (252 ± 5) nm.

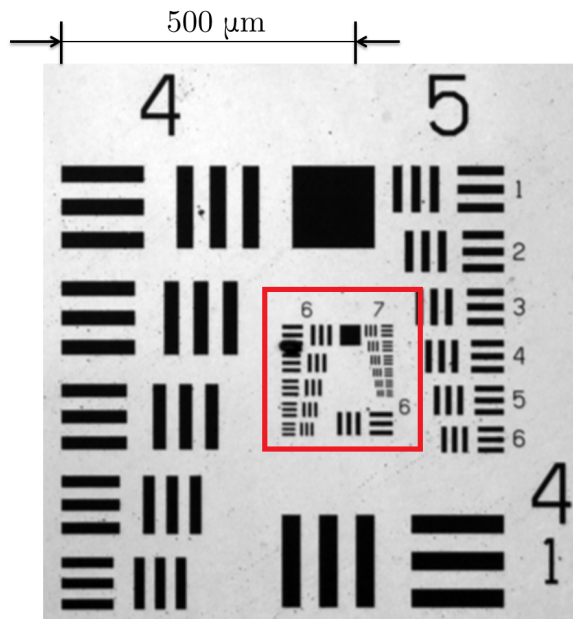


16 pav. Fazinio etalono žemėlapis.



17 pav. Fazinio etalono kraterių nuotraukos užregistruotos panaudojant Nomarskio mikroskopą.

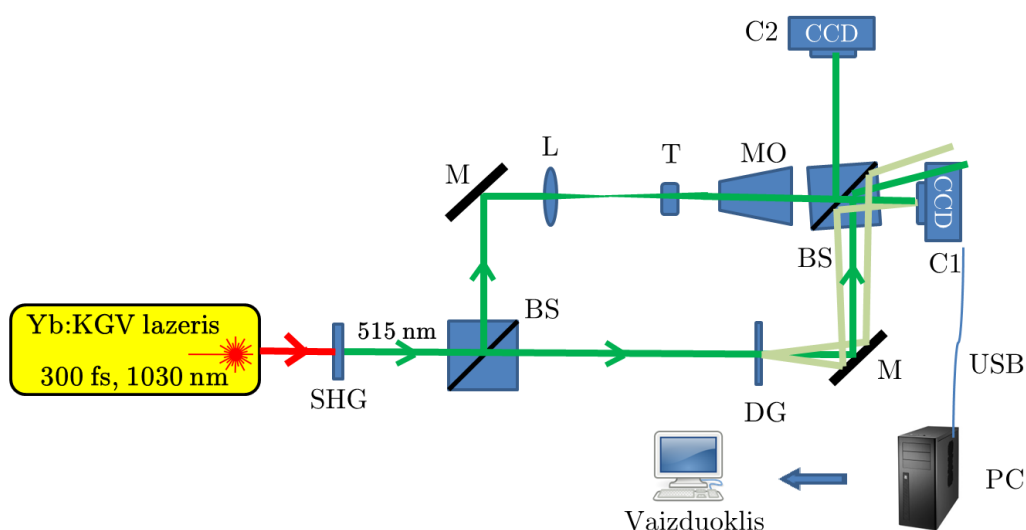
Erdvinės skyros etalonas „1951 USAF resolution test chart” skaitmeninės holografijos ir KŠPI eksperimentų metu buvo naudotas sistemų kalibravimui (18 pav.). Atvaizdo plokštumai nustatyti naudoti 6 ir 7 grupių elementai esantys 4 ir 5 grupių viduje (apvesta raudona linija). Užregistravus mažiausius etalono elementus buvo įvertinta, jog erdvinė skyra SH ir KŠPI metodikomis yra aukštesnė nei 2 μm.



18 pav. Erdvinio skyros etalono (*Target*) nuotrauka. Raudona linija apvesti 6 ir 7 grupių elementai naudoti kalibruojant optinę sistemą.

2.2 Skaitmeninių hologramų eksperimentinis įrašymas

Realiems holografiniams eksperimentams atlikti, Lazerinių tyrimų centro Taikomojoje laboratorijoje buvo surinktas optinis skaitmeninis holografinis mikroskopas (19 pav.). Eksperimento metu buvo naudojamas diodinio kaupinimo 6 W vidutinės galios, didelio pasikartojimo dažnio Yb:KGV femtosekundinis lazeris „Pharos”, kompanijos „Šviesos konversija” produktas. Centrinis bangos ilgis 1030 nm. Impulsų trukmė ~ 300 fs. Lazerinė optinė schema pavaizduota 19 paveikslėlyje.



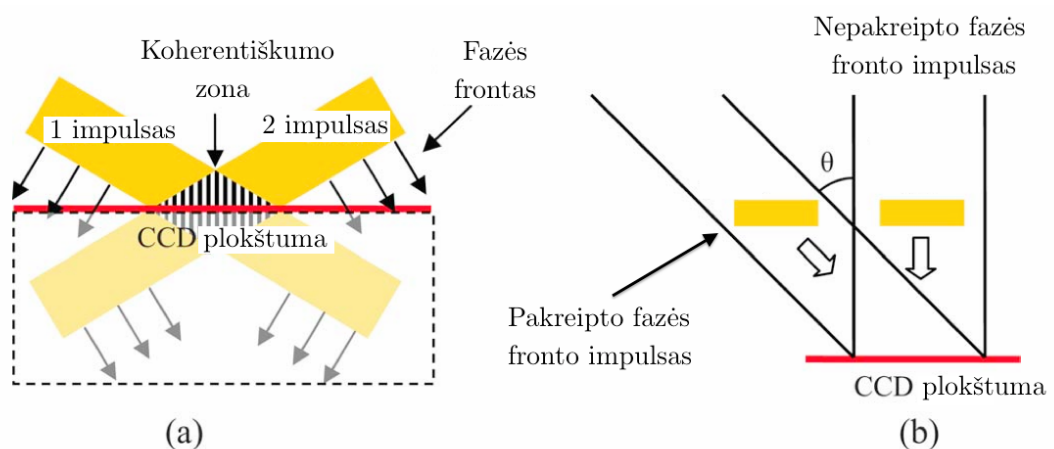
19 pav. Principinė skaitmeninio holografinio mikroskopo schema.

„BS” – pluošto daliklis, „T” – erdvinės skyros etalonas arba bandinys, „M” – dialektriniai veidrodžiai, „L” – glaudžiamasis lęšis, „MO” – objektyvas, „DG” – difrakcinė gardelė, „PC” – kompiuteris. Pastarasis kontroliuoja vaizdus gaunamus iš CCD kameros.

19 paveiksle pateikta matavimų schema yra visiškai automatizuota, eksperimento valdymas holografinių vaizdų registravimo metu vyksta kompiuteriu. Hologramų užrašymui buvo naudota neašinė (angl. *off-axis*) geometrinė eksperimento sistema. Ši metodika leidžia skaitmeniškai atskirti nulinės eilės difrakcijos narį ir rekonstruotą vaizdą. 1030 nm bangos ilgio lazerio spinduliuotė buvo nukreipta į netiesinį BBO (beta bario borato) kristalą, kuriame sugeneruota antroji harmonika (515 nm bangos ilgio). Ši spinduliuotė toliau buvo nukreipta į adaptuotą Macho-Zenderio (*Mach-Zehnder*) interferometrą [18]. Pluošto dalikliu BS spindulys buvo išskirstytas į objektinį ir atraminį pluoštus. Objektinis pluoštas surinktas mikroskopiniu objektyvu (didinimas 20 kartų, skaitmeninė apertūra $NA = 0,4$), padidintas bandinio atvaizdas buvo užfiksuojamas pagalbine kamera C2.

Skaitmeninių holografinių vaizdų registravimui buvo naudojama kompanijos „Point Grey Grasshopper” CCD kamera, kurios skyra 2048×2448 bei vieno vaizdo taško dydis $3,45 \mu\text{m} \times 3,45 \mu\text{m}$.

Atraminio pluošto kelyje buvo pastatyta difrakcinė gardelė DG (difrakcinės gardelės periodas $8 \mu\text{m}$), kuri panaudota sukuriant pakreipto fazės fronto impulsą įnešant kampinės dispersijos [19]. 20 pav. (a) pavaizduoti kampu krintantys impulsai dėl baigtinės lazerio koherentiškumo trukmės negali interferuoti visu pločiu, kadangi konkretų CCD kameros tašką 1 ir 2 impulsai pasiekia skirtingu laiku; 20 pav. (b) pavaizduoti impulsai, kurių vieno iš impulsų fazės frontas yra pakreiptas taip, kad abiejų impulsų grupiniai greičiai yra vienodi. Tokie impulsai gali suinterferuoti visu pločiu. Antruoju pluošto dalikliu abu optiniai signalai buvo nukreipti į C1 CCD kamerą.

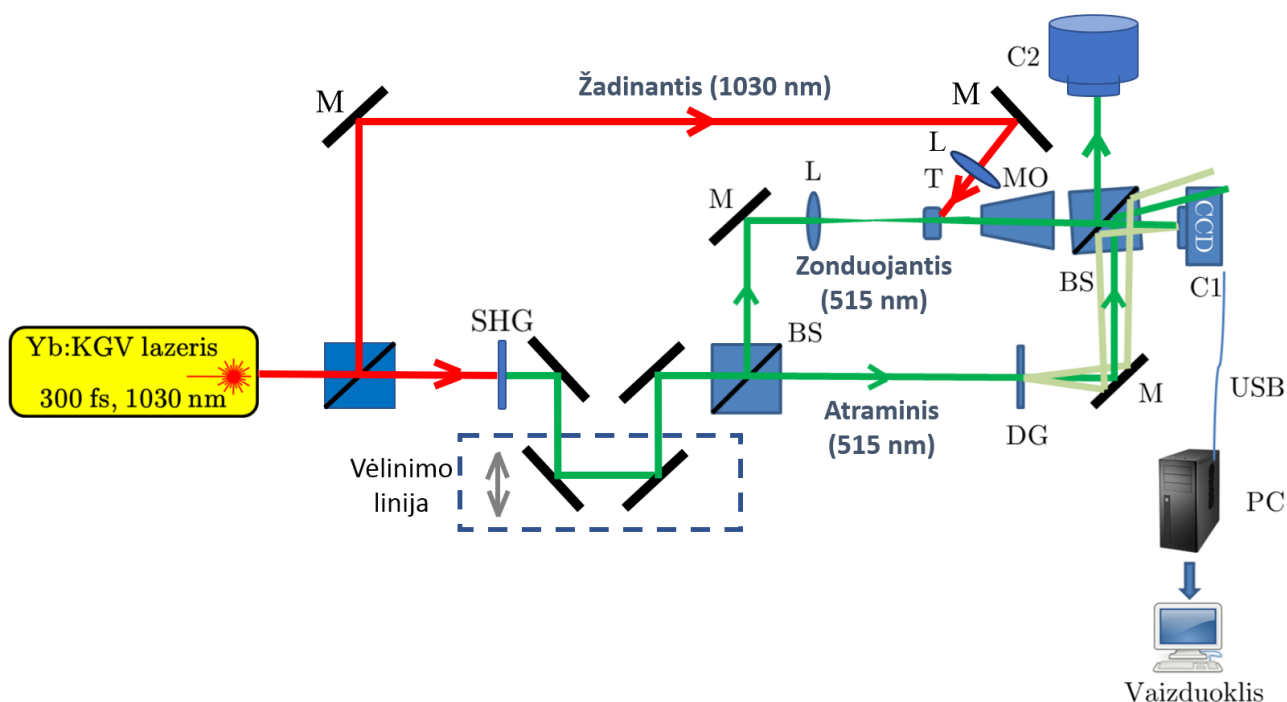


20 pav. Ultratrumpųjų impulsų interferencija. (a) Nepaverstų impulsų koherentiškumo zona yra sumažėjusi. (b) Paversti impulsai gali interferuoti visu pločiu [20].

2.3 Skaitmeninis žadinimo-zondavimo holografinis mikroskopas

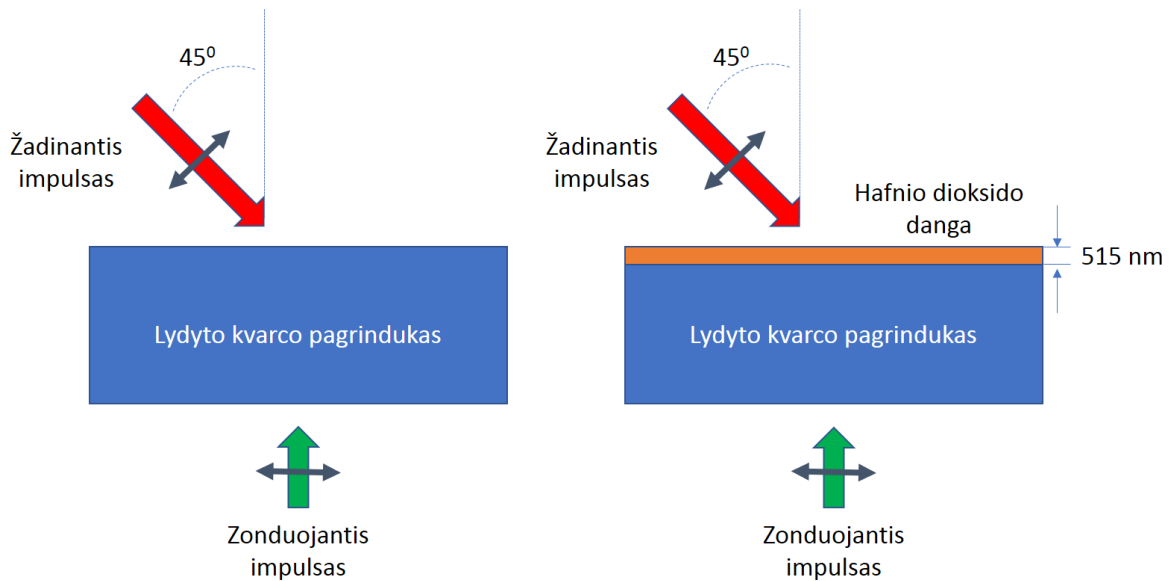
Atliekant laikinius eksperimentus (angl. *time-resolved*) skaitmeninio holografinio mikroskopo sistema (19 pav.) buvo papildyta žadinančio impulso ir vėlinimo linijomis. Optinė schema pateikta 21 pav. Skaitmeninis žadinimo-zondavimo holografinis mikroskopas yra klasikinio žadinimo-zondavimo (angl. *pump-probe*) [21] ir skaitmeninio holografinio mikroskopo (aprašyto 2.2 skyrelyje) metodikų derinys.

Tiriamasis bandinys 21 pav. schemoje pažymėtas „T“. Vėlinimo linija suteikė galimybę registruoti tiriamojo bandinio atsakus į žadinantį impulsą skirtingu laiku.



21 pav. Principinė skaitmeninio holografinio mikroskopo schema skirta laikiniams žadinimo-zondavimo eksperimentams.

Laikinės skyros eksperimente buvo tirti dinaminai šviesos dariniai dviejose medžiagose: lydymo kvarco pagrindu ir 515 nanometrų storio Hafnio dioksido dangoje, padengtoje ant lydymo kvarco pagrindu. Dėl patogesnio žadinančio pluošto įvedimo į plonasluksnę Hafnio dioksido dangą visiems eksperimentams buvo pasirinkta 45 laipsnių geometrija. Pluoštų geometrija pateikta 22 pav. Laikinės skyros eksperimentai buvo atlikti su horizontaliomis žadinančio ir zonduojančio impulsų poliarizacijomis.



22 pav. Laikinės skyros žadinimo ir zondavimo eksperimento geometrija. Tyrimo metu buvo atlikti eksperimentai su lydyto kvarco pagrinduku (kairėje) ir 515 nanometrų storio Hafnio dioksido danga, užgarinta ant lydyto kvarco pagrinduko (dešinėje).

2.4 Skaitmeninių holografinių vaizdų atkūrimas

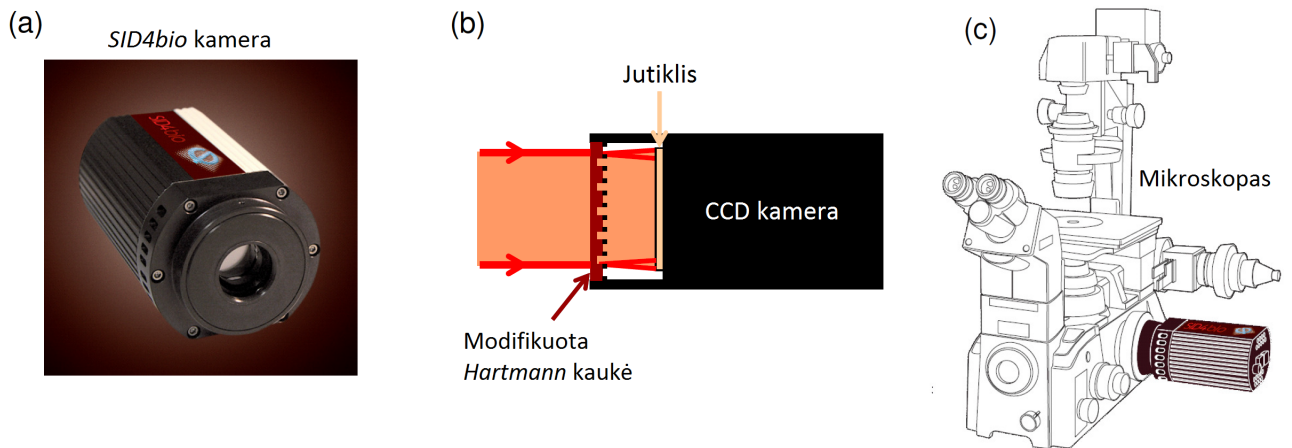
Skaitmeninių holografinių vaizdų atkūrimas buvo vykdomas skaičiuojant Frenelio-Kirkhofo integralą sąsūkos metodu, kuris dvigubą integralą leidžia skaičiuoti pasinaudojant Furjė transformacijų pagalba (1.3.2.2 skyrelis). Skaičiavimams naudota kompanijos „National Instruments“ sukurta grafinė programavimo kalba „LabVIEW“.

Skaitmeninių holografinių vaizdų atkūrimui buvo pasirinktas kompiuteris su 24GB adresuojamos atminties (RAM), Intel(R) Core(TM) i5-4310U procesoriumi, kurio maksimalus taktinis dažnis 2,6 GHz, Windows 8.1 Pro 64 bitų operacine sistema.

2.5 Keturbangė šoninio poslinkio interferencinė kamera *SID4bio*

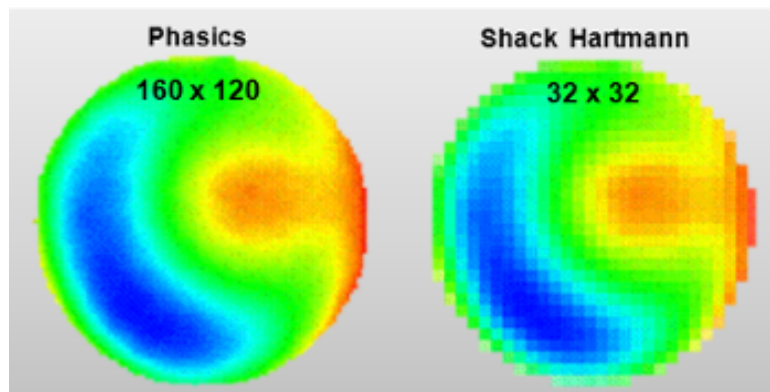
Eksperimento metu buvo naudota prancūzų kompanijos „Phasics“ fazinio vaizdinimo kamera *SID4bio*, veikianti keturbangės šoninio poslinkio interferometrijos (KŠPI) principu. Matuojant šiuo metodu 21 pav. pavaizduotas „Atraminis (515 nm)“ pluoštas buvo uždengiamas, CCD kamera „C1“ nenaudojama, o interferograma tiesiogiai užregistruojama fazinio vaizdinimo kamera „C2“, kurios veikimo principai aprašyti 1.5 skyrelyje.

Kameros „SID4bio” pavyzdys, blokinė diagrama ir galimybė panaudoti ją kartu su įprastu mikroskopu pateikta 23 pav.



23 pav. a) „Phasics” kompanijos komercinė fazinė kamera SID4bio. b) Kameros (a) ašinio pjūvio schema. c) Galimybė panaudoti šią kamerą kartu su invertuotu optiniu mikroskopu.

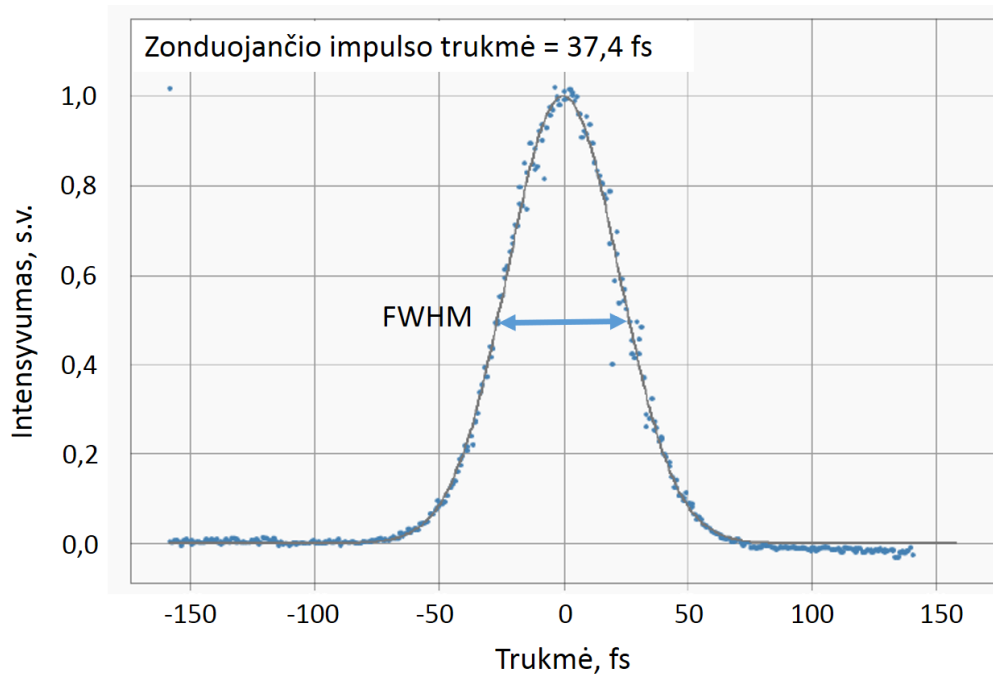
Ši kamera veikia bangų ruože nuo 350 iki 1100 nm, erdvinė skyra 29,6 μm . Palyginimui – skaitmeninės holografijos ji yra beveik 8 kartus geresnė, 3,75 μm . Nepaisant ganėtinai nedidelės erdvinės skyros ši kamera, veikianti KŠPI principu, lyginant su savo pirmtakais, pavyzdžiui mikrolėšiais paremta *Shack Hartmann* kamera, registruoja 18 kartų daugiau vaizdo taškų (24 pav.).



24 pav. Palyginimas dviejų technikų.

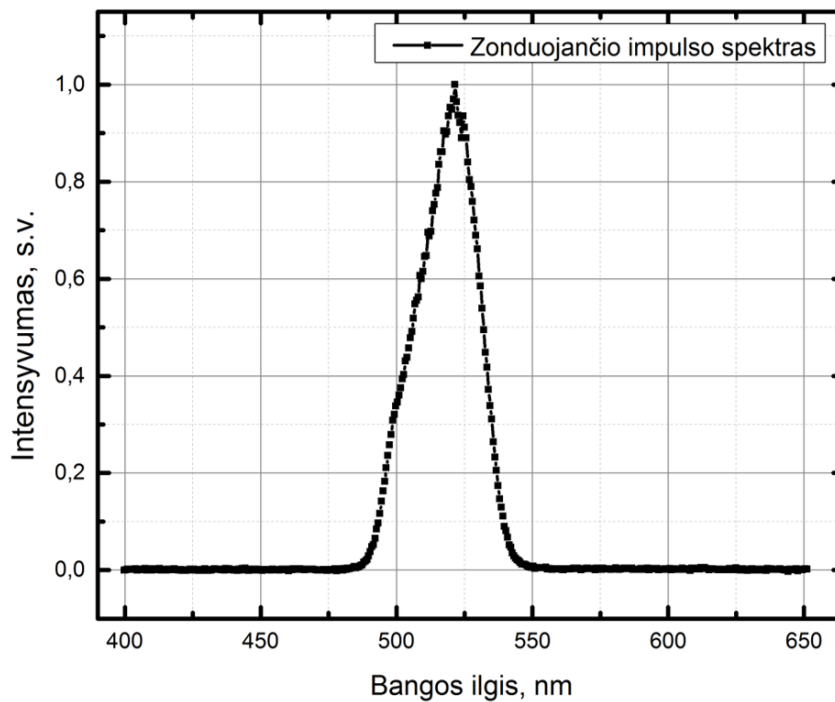
2.6 Eksperimentams naudotų lazerio pluoštų apibūdinimas

Prieš atliekant matavimus buvo charakterizuoti naudoti lazerio pluoštai. Zonduojančio impulso laikinis profilis pateiktas 25 pav. Iš šios kreivės įvertinta, kad zonduojančio impulso trukmė lygi 37,4 fs. Ši reikšmė įvertinta pagal gausinės kreivės plotį pusės maksimumo aukštyje (angl. *Full width at half maximum* – *FWHM*).



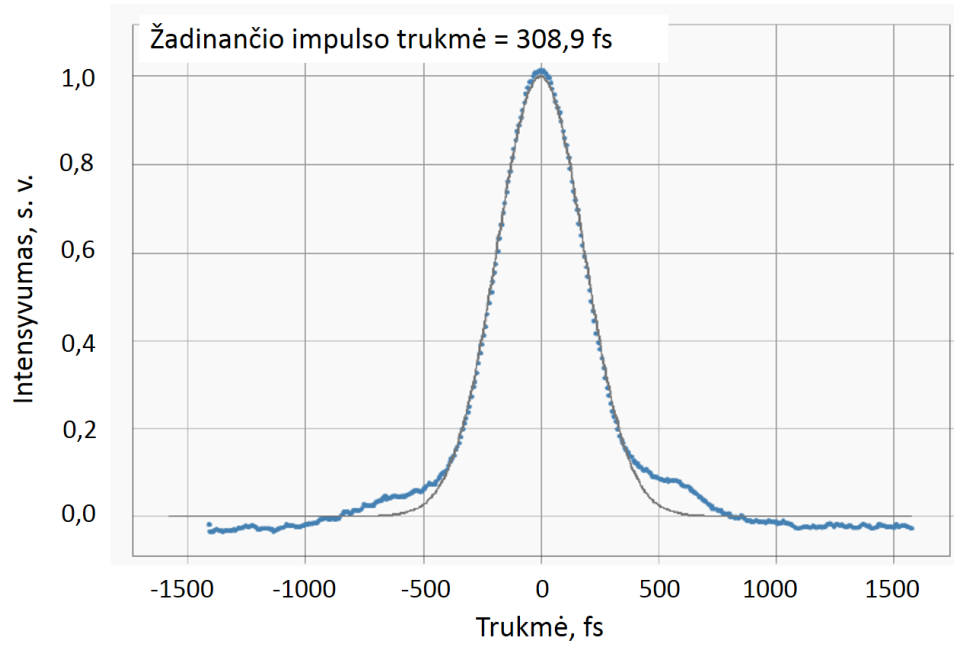
25 pav. Zonduojančio impulso autokoreliacinė funkcija.

Zonduojančio impulso spektras pavaizduotas 26 pav. Šmailė pasiekia maksimalią vertę ties 522 nanometrais. Ši vertė buvo naudojama atkuriant skaitmeninius vaizdus.



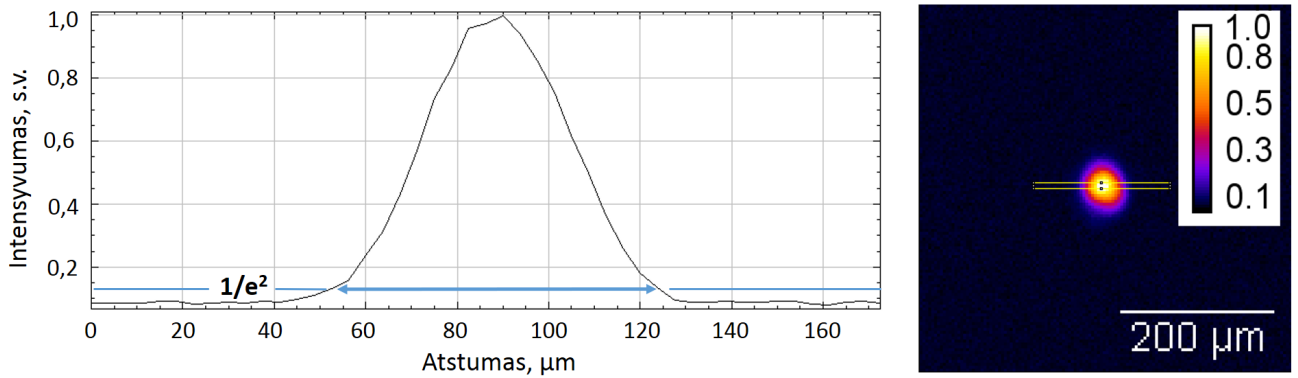
26 pav. Zonduojančio impulso spektras.

Žadinančio impulso laikinis profilis pateiktas 27 pav.



27 pav. Žadinančio impulso autokoreliacinė funkcija.

Žadinančio impulso pluoštas pavaizduotas 28 pav. Suvidurkinus 98 žadinančio impulso skerspjūvių nuotraukas nustatyta, jog žadinančiojo impulso pluošto diametras $1/e^2$ lygyje buvo $(62,0 \pm 0,7) \mu\text{m}$.

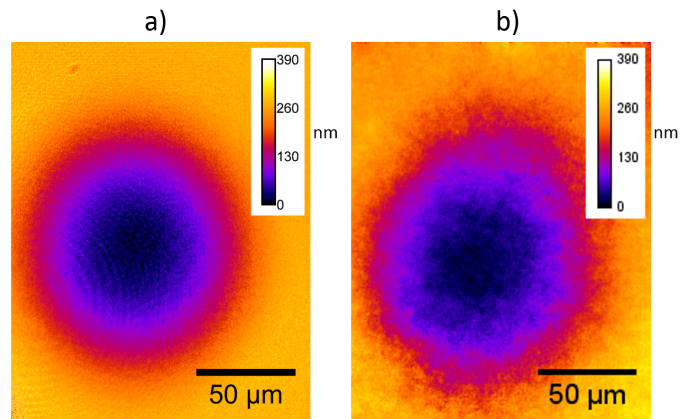


28 pav. Žadinančio impulso pluošto diametras.

3 Rezultatai ir jų aptarimas

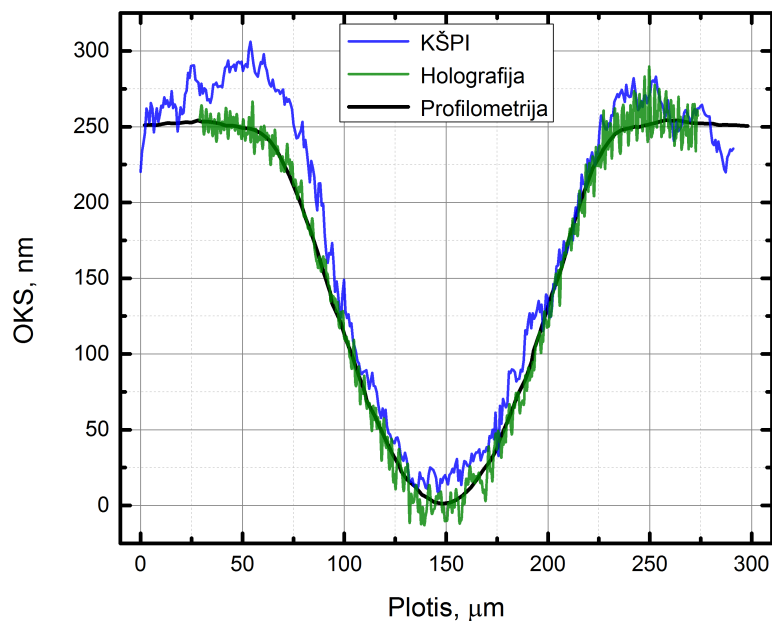
3.1 Fazinio objekto atvejo studija

Siekiant ištirti fazinio vaizdinimo galimybes skaitmeninės holografijos ir keturbangės šoninio poslinkio interferometrijos (KŠPI) metodais buvo atlikta 6-ojo kraterio (aprašyto 2.1 skyrelyje) studija. Visi rezultatai pateikti optinio kelių skirtumo (*OXS*) pavidalu, aprašytu 1.5.1. Atkurtos etaloninio kraterio nuotraukos skirtingomis metodikomis pavaizduotos 29 pav.



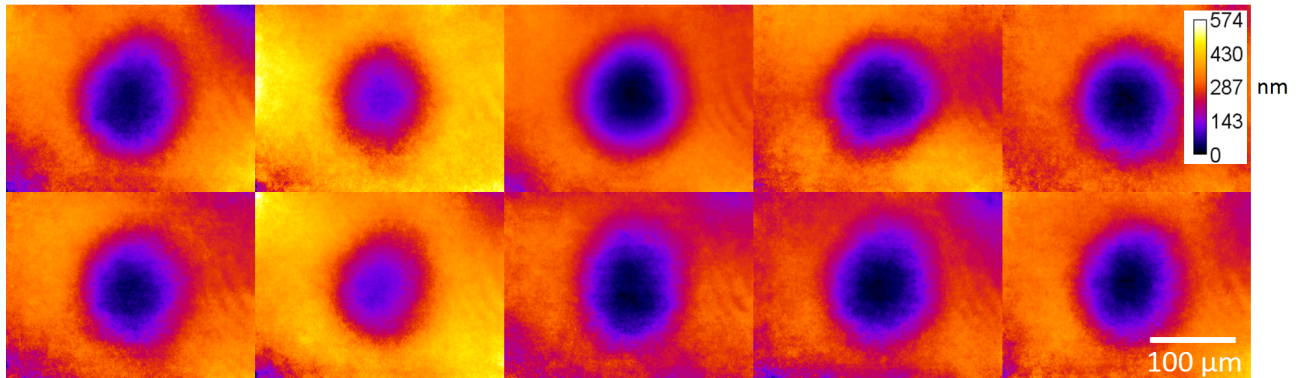
29 pav. 6 kraterio *OXS*: a) skaitmeninė holografijos, b) KŠPI metodais.

Atkurtų vaizdų palyginimui buvo atliktas *OXS* skersinis pjūvis, kuris pateiktas 30 pav. Paveikslėlio matyti, kad skaitmeninės holografijos metodu atkurtas krateris yra simetriškesnis ir ne toks triukšmingas.



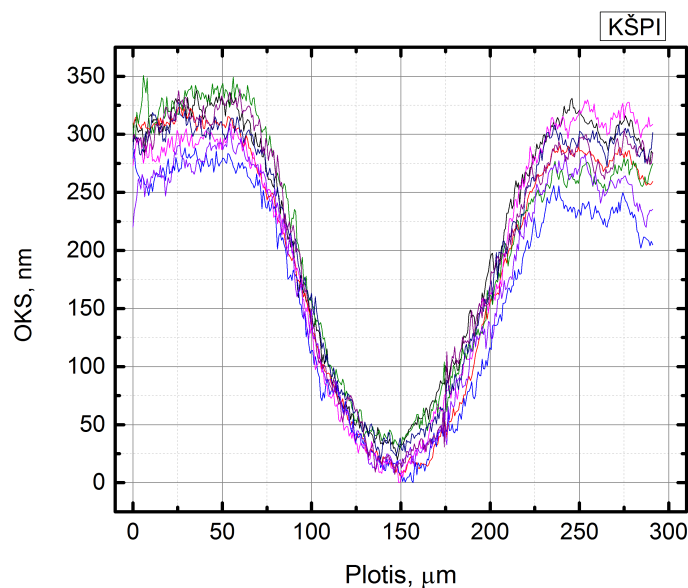
30 pav. Vienašūvio 6-ojo kraterio *OXS* įvertinimas kartu su profilometrijos rezultatais.

Kadangi KŠPI metodika pateikė skirtingus rezultatus (mėlyna kreivė) nei skaitmeninė holografija ir profilometrinis matavimas, buvo nuspręsta atlikti daugiau pavienių matavimų KŠPI metodu. Užregistruotos nuotraukos pateiktos 31 pav.



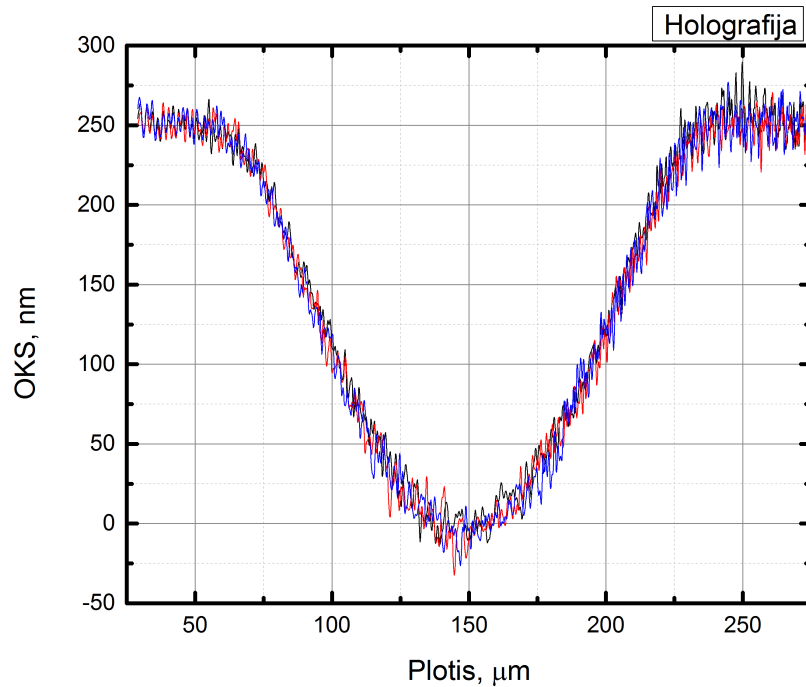
31 pav. Vienašūviu KŠPI režimu užregistruotos 6-ojo kraterio nuotraukos.

31 paveikslėlyje pavaizduotų vienašūvių nuotraukų profiliai pateikti 32 pav. Šiame paveikslėlyje matyti, kad nors kreivių forma išlieka pastovi, tačiau užregistruotas fono lygio svyravimas siekė 100 nm. Kadangi tiek fazė, tiek OKS yra reliatyvus dydis, bendrą fono lygio poslinkį galima eliminuoti matematinių skaičiavimų pagalba.



32 pav. KŠPI metodu išmatuotų šeštojo kraterio, pavaizduotų 31 paveikslėlyje, nevidurkinti OKS profiliai.

Siekiant palyginti atsikartojamumą skaitmeninės holografijos metodu, buvo užregistruotos 3 hologramos. Atkurtų hologramų profilių kreivės pateiktos 33 pav., užfiksuotas vaizdų atsikartojamumas.



33 pav. Skaitmeninės holografijos metodu išmatuotų šeštojo kraterio nevidurkinti OKS profiliai.

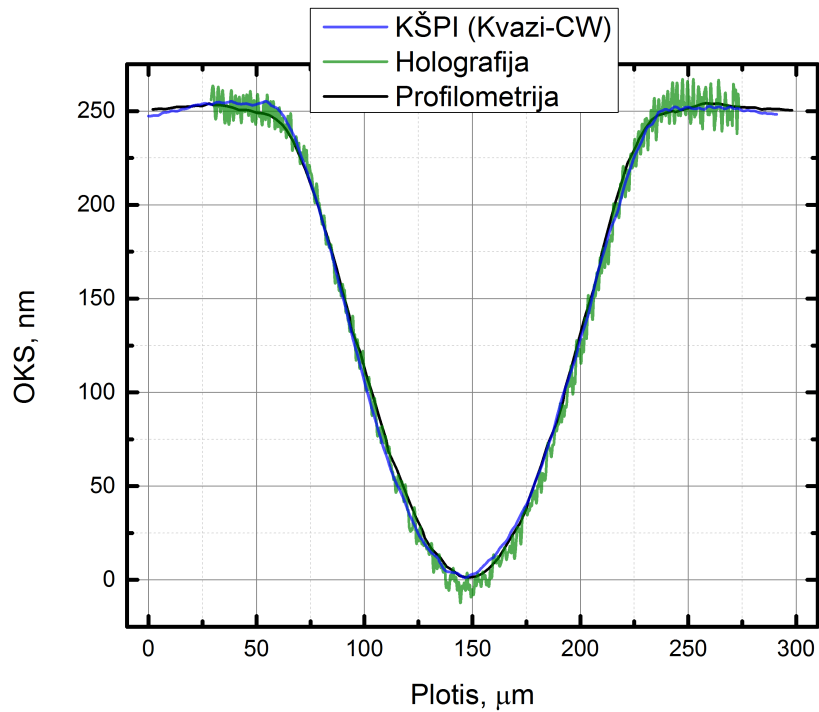
KŠPI metodu veikiančia kamera 6-asis krateris buvo išmatuotas registruojant kvazi-CW režimu, kurio metu suvidurkintos daugiau nei tūkstantis kraterio nuotraukų. Dėl vienašūvių nuotraukų vidurkinimo fazinė skyra (triukšmo lygis) buvo pagerinta daugiau nei 8 kartus. Dėl ilgesnės holografinių vaizdų atkūrimo trukmės skaitmeninės holografijos atveju buvo suvidurkintos 3 fazinio objekto nuotraukos. Suvidurkinti kraterio optinio kelio skirtumo rezultatai holografijos ir profilometrijos metodikoms pateikti 34 pav.

Skaitmeninės holografijos ir KŠPI metodikų rezultatai buvo palyginti su profilometrinio matavimo verte. Nuokrypiai nuo profilometrijos metodu išmatuoto kraterio gylio kartu su standartiniais nuokrypiais pateikti 35 pav. Skaitmeninės holografijos metodu apskaičiuoto kraterio gylio vertė buvo 1,27 % didesnė nei profilometrijos, standartinis nuokrypis – 3,52 %. Keturbangės šoninės interferometrijos metodika kvazi-CW režimu nuo profilometro vertės nukrypo tik 0,18 %, standartinis nuokrypis siekė 0,7 %.

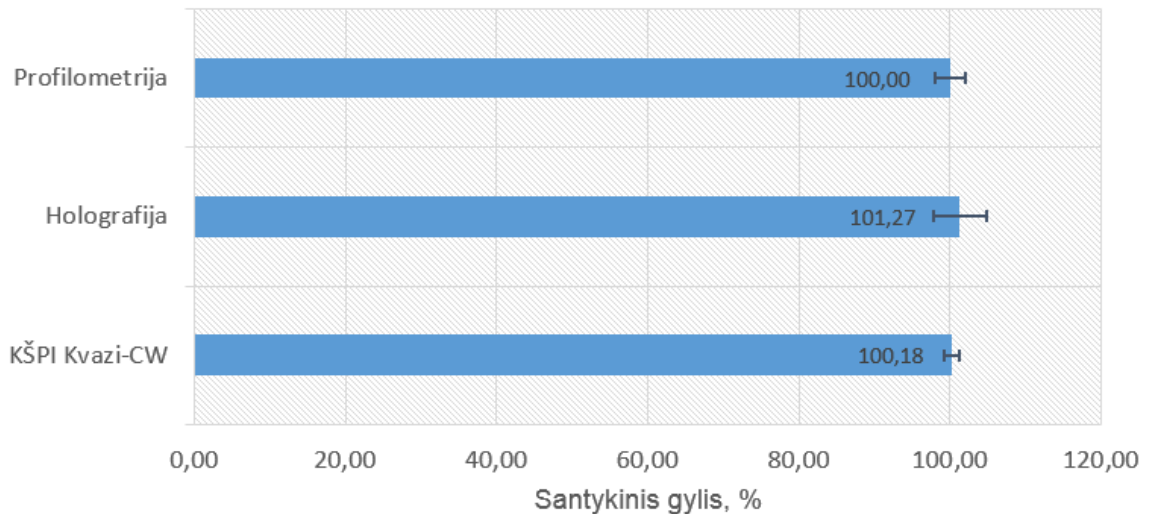
Atvejo analizė parodė, jog skirtingomis metodikomis buvo rastos labai panašios kraterio optinio kelio skirtumo (OKS) vertės.

Skaitmeninės holografijos metodika registruojant fazinius objektus vienašūviu režimu parodė geresnę atsikartojamumą nei keturbangės šoninio poslinkio interferometrijos atveju. Tai yra labai svarbu, kadangi dideli duomenų kiekiai reikalauja vidurkinti mažiau vienodų nuotraukų norint surasti tą patį rezultatą.

Taip pat buvo užregistruotas ir gilesnis fazinio etalono krateris. Skaitmeniškai atkurto tokio fazinio objekto vaizdas pateiktas 36 pav. Šiame paveikslėlyje matyti, jog optinių kelių skirtumas yra „sulaužytas“. To priežastis yra ta, kad skaitmeniškai atkuriant vaizdus yra skaičiuojamas



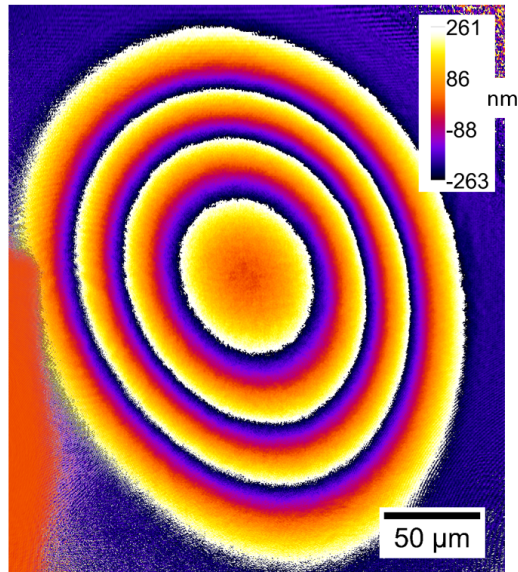
34 pav. Vidurkintų eksperimentinių rezultatų palyginimas kartu su profilometro duomenimis.



35 pav. Holografijos ir KŠPI metodikomis išmatuoti 6-ojo kraterio gyliai profilometrijos atžvilgiu.

kompleksinis laukas, kurio fazė kas 2π persiverčia. Taigi atliekant gilesnių fazinių objektų tyrimą reikalingas papildomas fazinis „išlankstymas”, nuo kurio taip pat priklauso optinio kelio skirtumo rezultatai.

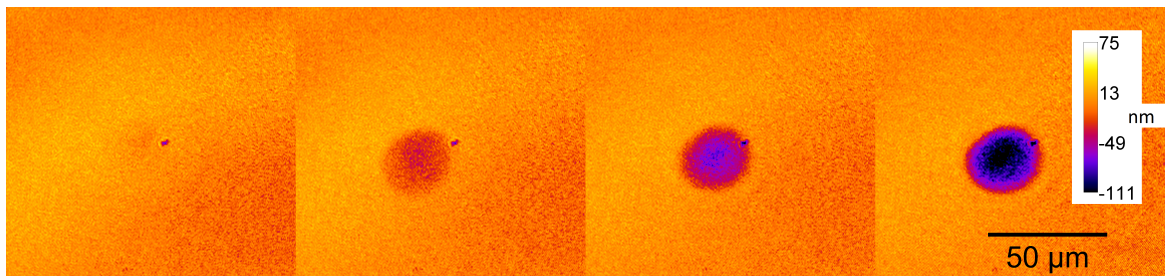
Taip pat iš 36 paveikslėlio buvo nustatytas maksimalus holografinio mikroskopo atkuriamas stebėjimo laukas. Centrinis maksimumas, esantis kairiame apatiniame vaizdo kampe, persidengė su atkurtu vaizdu taip įnešdamas papildomus artefaktus, iškraipančius fazinį lauką. Be iškraipymų pavyko stebėti objektus siauresnius nei $250 \mu\text{m}$.



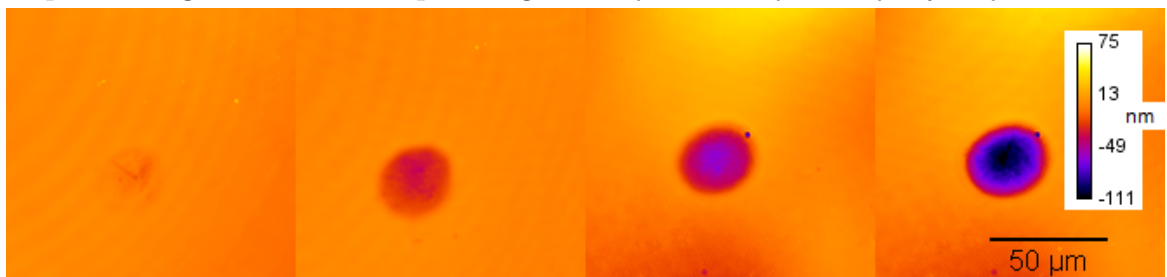
36 pav. Skaitmeninės holografijos metodu atkurtas gilesnis fazinio etalono krateris su sulaužyta faze reikalauja fazinio „išlankstymo“.

3.2 Kraterių morfologijos tyrimas

Atlikus atvejo analizę ir nustatčius metodikų sutapimą, buvo pasirinktas kitas nežinomas fazinis objektas su 10 skirtingų fazinių objektų ir atlikta jame suformuotų kraterių analizė. Holografiniu mikroskopu užregistruotų pirmų 4 fazinių objektų nuotraukos pateiktos 37 pav., analogiškai KŠPI metodu pateiktos 38 pav.



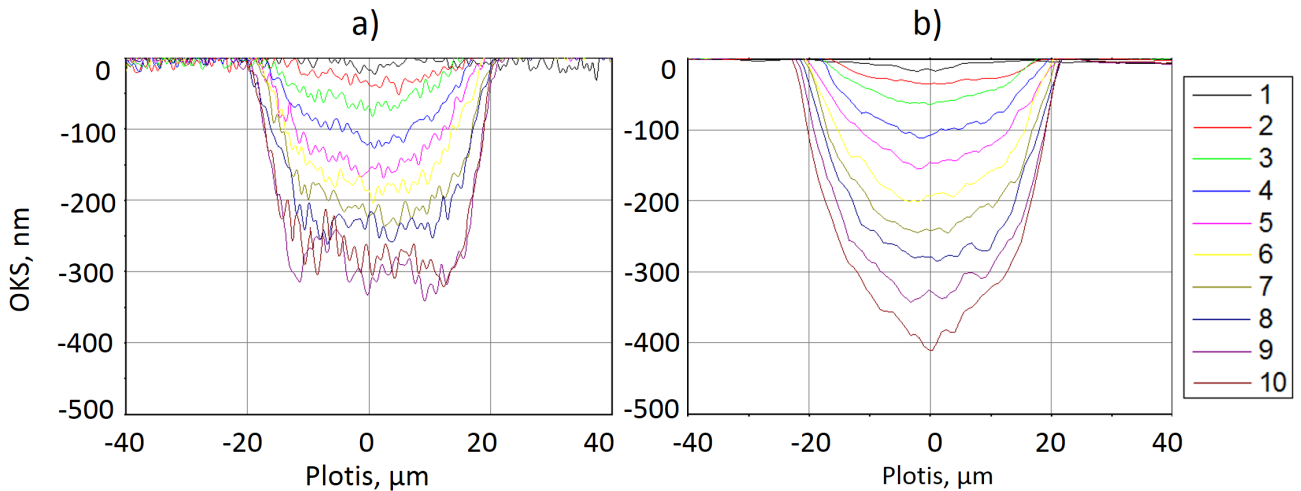
37 pav. Holografiniu mikroskopu užregistruotų nežinomų fazinių objektų nuotraukos.



38 pav. Modifikuota *Shack-Hartmann* kamera užregistruotų nežinomų fazinių objektų nuotraukos.

Skaitmeninės holografijos ir KŠPI metodikomis išmatuotų 10 nežinomų kraterių profiliai

pavaizduoti 39 pav. Pastebėta, jog krateriuose su mažesniu OKS (nuo 1-o iki 6-o fazinio objekto) abi metodikos pateikė labai panašius rezultatus tiek kraterių formos, tiek OKS atžvilgiu. Nuo 7 iki 10 fazinių objektų rezultatai išsiskyrė. Pagal KŠPI 10-ojo kraterio išmatuotas OKS buvo 24,5 % didesnis nei skaitmeninės holografijos metodu.



39 pav. Kraterių OKS: a) Skaitmeninė holografija, b) KŠPI metodika.

Atvejo analizė skaitmeninės holografijos ir keturbangės šoninio poslinkio interferometrijos metodais pateikė sistemingus rezultatus. Kraterių optinių kelių skirtumas ir forma (iki 250 nm gylio krateriuose) atitiko. Gilesniuose krateriuose šios technikos atskleidė kiek skirtingus rezultatus. Šis nesutapimas atsiranda dėl fazinio sulankstymo, t.y. algoritmo, kurio pagalba yra išlankstoma fazė ir apskaičiuojamas optinių kelių skirtumas. Jeigu fazinis pokytis yra staigesnis nei 2π , tuomet vienareikšmiškai atsakyti į šį klausimą negalime.

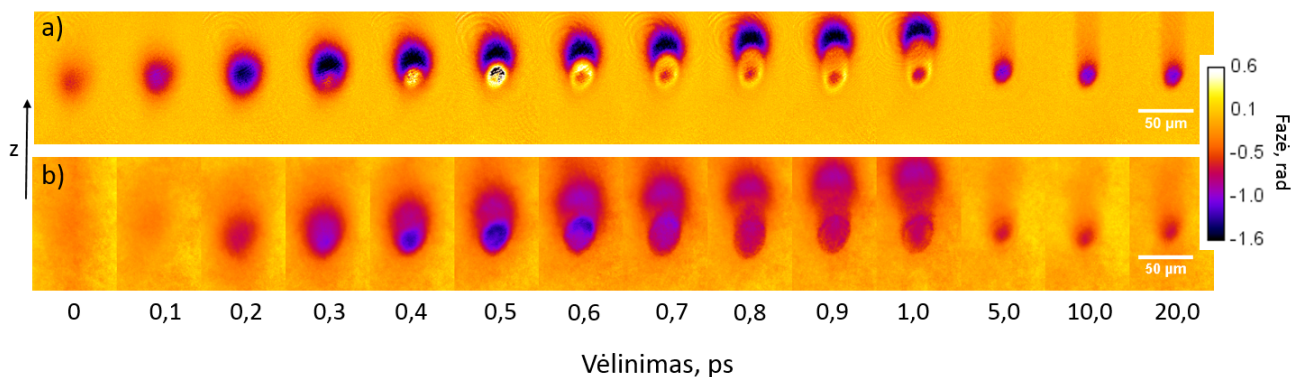
3.3 Dinaminių fazinių objektų tyrimas

Ištyrus statinius fazinius objektus, buvo atlikti itin intensyvia lazerio šviesa inicijuotų dinaminių fazinių objektų eksperimentai lydytame kvarce ir Hafnio dioksido dangoje pagal 2.3 skyrelyje aprašytą metodiką. Siekiant palyginti fazinius ir pralaidumo vaizdus abiejomis metodikomis, atkurti faziniai ir pralaidumo duomenys pavaizduoti vienodose spalvinėse skalėse.

3.3.1 Lydytame kvarce

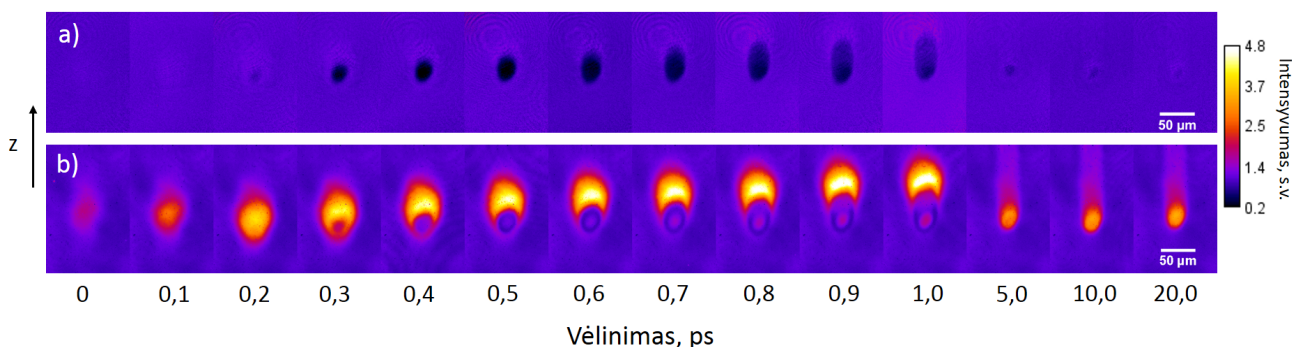
Užregistruotas fazinis pokytis žadinančiajam šviesos pluoštui sklindant lydyto kvarco paviršiuje pateiktas 40 pav. Labai įdomūs rezultatai stebėti nuo 0,4 ps vėlinimo, kur holografijos atveju fazės ženklas apsisvertė. Tai gali būti susiję su plazmos susidarymu, tuo tarpu KŠPI metodikoje fazė išliko neigiama.

Analogiški intensyvumo skirstiniai abiejomis metodikomis užregistruoti lydyto kvarco pagrindu pavaizduoti 41 pav. Skirtingai nei faziniai, amplitudiniai duomenys pateikė labai skir-



40 pav. Pluošto, sklindančio lydytame kvarce z kryptimi, fazės kitimas laike: a) skaitmeninė holografija, b) keturbangė šoninio poslinkio interferometrija.

tingus rezultatus. Skaitmeninės holografijos atveju buvo stebėtas pralaidumo funkcijos sumažėjimas (a), tuo tarpu KŠPI metodu užregistruotas aiškus amplitudės padidėjimas, sklindantis išilgai sklidimo ašies z (b).

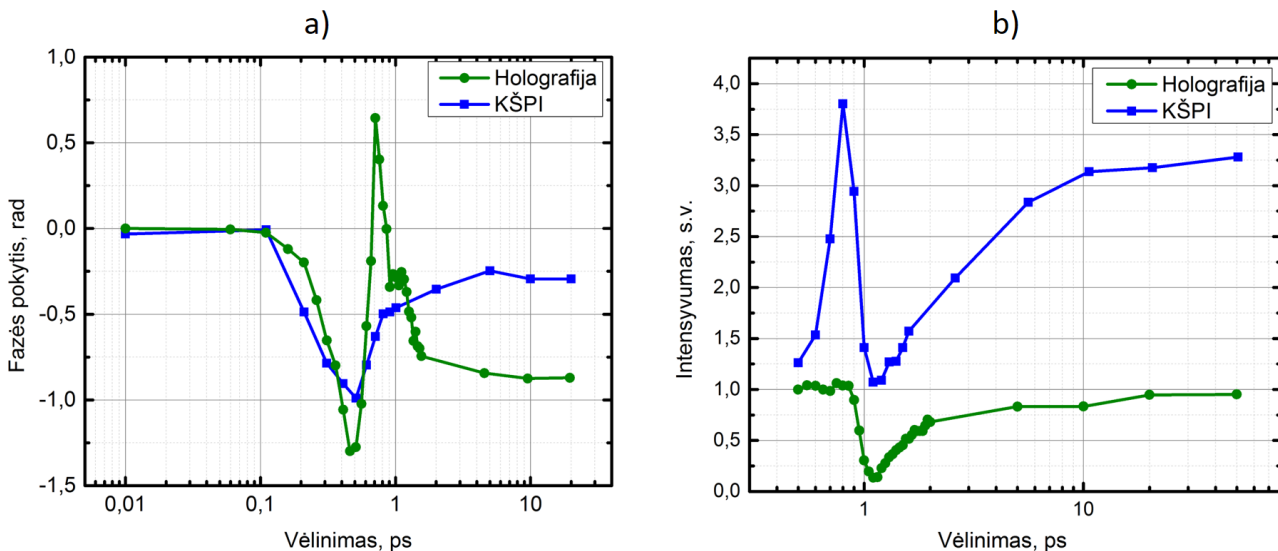


41 pav. Pluošto, sklindančio lydytame kvarce z kryptimi, normuoto intensyvumo (pralaidumo) kitimas laike: a) skaitmeninė holografija, b) keturbangė šoninio poslinkio interferometrija.

Siekiant kiekybiškai palyginti rezultatus iš 40 ir 41 pav. buvo pasirinkta centrinė sritis, kurioje atsiranda signalas, ir išmatuota, kaip laike kinta fazė ir pralaidumas. Įvertinta fazės pokyčio laikinė priklausomybė pateikta 42 pav. (a). Žadinant lydytą kvarcą dėl Kero efekto centrinėje dalyje lūžio rodiklis padidėja, todėl šviesa pradeda vėluoti, t.y. fazė sumažėja ir pasiekia minimalią vertę ties 0,5 ps. Pasiekus kritinę intensyvumo vertę holografijos atveju (žalia kreivė) stebėtas staigus fazės pokytis iš neigiamo į teigiamą, kuris gali būti paaiškintas laisvųjų elektronų sugeneravimu. Susidaro plazma, kuri staigiai sumažina lūžio rodiklio vertę, todėl turime teigiamą fazės pokytį. Zonduojant žadinantį impulsą prie didesnių vėlinimų holografijos atveju buvo stebėta relaksacija ties 0,85 radianais, kuri galėjo atsirasti dėl susiformavusių eksitonų arba šiluminių reiškinių. Priežastis kol kas dar nėra vienareikšmiškai nustatyta. Tuo tarpu KŠPI atveju (mėlyna kreivė) fazės apsisvertimas po Kero efekto nebuvo užregistruotas.

Pralaidumo funkcija, apskaičiuota abiem metodais, taip pat išsiskyrė, pavaizduota 42 pav. (b). Skaitmeninės holografijos atveju (žalia kreivė), prieš sužadinant medžiagą buvo stebėtas

santykinis intensyvumas (pralaidumas) lygus 1. Tuomet sugeneravus plazmą, užregistruotas intensyvumo sumažėjimas, ir stebėta relaksacija į pradinį vienetinį santykinį pralaidumą. Tuo tarpu KŠPI metodika (mėlyna kreivė) pateikė skirtingus rezultatus. Vykstant Kero efektui santykinis intensyvumas ženkliai padidėjo iki 3,8 ir grįžo į vieneta, po kurio buvo stebėtas intensyvumo augimas, kurio priežastis nėra aiški.



42 pav. Lydytame kvarce užregistruotos laikinės skyros eksperimento rezultatai: a) maksimalus fazės pokytis paviršiuje (atitinkantis apšvitą, kur didžiausias smailinis intensyvumas), b) maksimalus intensyvumo pokytis paviršiuje.

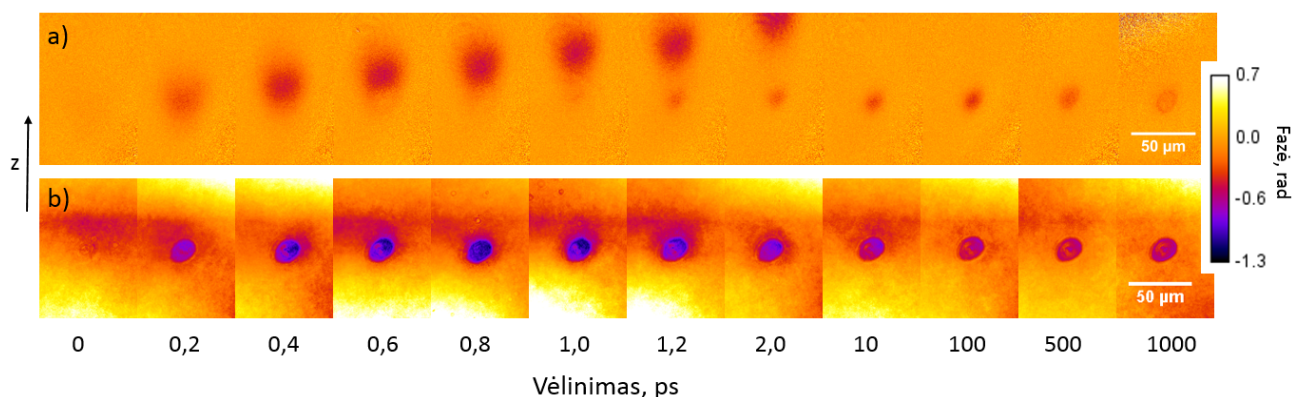
Iš 42 pav. grafikų matyti, jog KŠPI ir skaitmeninės holografijos metodikomis užregistruotas fazės kitimas laike pateikė skirtingus rezultatus.

Registruojant skaitmeniniu holografiniu mikroskopu plazmos įtaka yra eliminuojama, kadangi krūvio sąsajos įrenginyje interferuoja tiksliai zonduojantis ir atraminis šviesos signalai, kurių bangos ilgiai yra vienodi (522 nm). Tuo tarpu fazinė kamera *SID4bio* integruoja visą į ją patenkančią šviesą. Taigi atvaizduojančiu objektyvu buvo surinkti visi signalo išdarymai tiek dėl sklaidos, tiek dėl plazmos, tiek dėl nekoherentinio šiluminio sužadintos medžiagos švytėjimo, kurių indėlis holografijoje yra eliminuojamas.

3.3.2 Hafnio dioksido dangoje

Tuomet buvo atliktas analogiškas žadinančio dinaminio šviesos darinio tyrimas Hafnio dioksido dangoje. Fazinis pokytis žadinančiajam šviesos pluoštui sklindant Hafnio dioksido danga pateiktas 43 pav. Šiame paveikslėlyje matyti, jog skaitmeninės holografijos metodu atkurtų vaizdų fonas yra tolygesnis nei KŠPI metodika išmatuotų vaizdų.

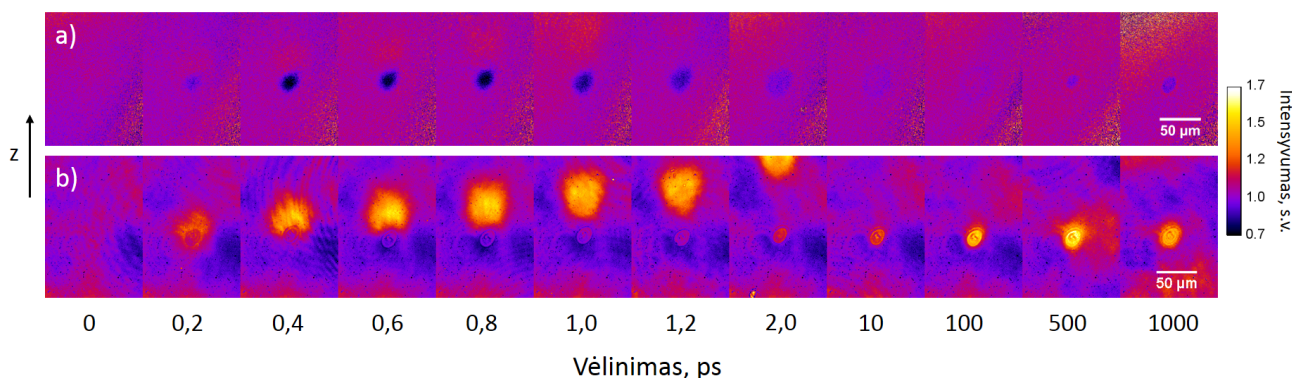
Abiejomis metodikomis išmatuoti fazės pokyčiai skyrėsi tiek forma, tiek absoliutine fazės pokyčio verte. Taip pat skaitmeninės holografijos atveju 43 pav. (a) buvo stebėtas Kero



43 pav. Pluošto, sklindančio Hafnio dioksido dangoje z kryptimi, fazės kitimas laike: a) skaitmeninė holografija, b) keturbangė šoninio poslinkio interferometrija.

efektas, sklindantis išilgai z ašies, tuo tarpu KŠPI faziniuose vaizduose Kero efektas beveik nebuvo matomas (b).

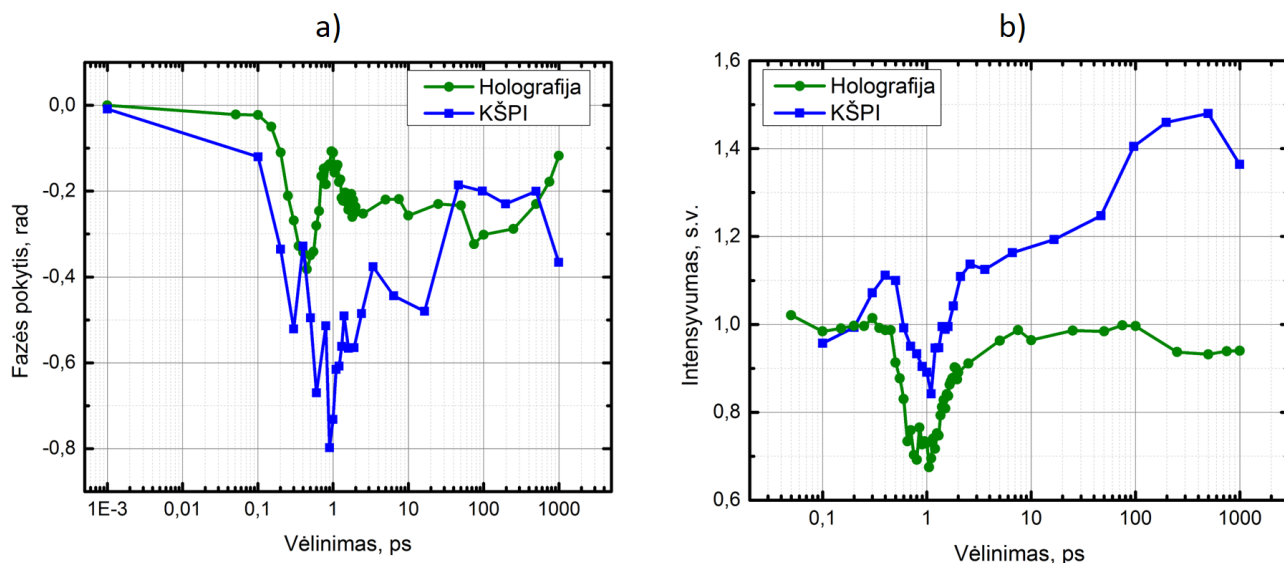
Intensyvumo skirstiniai užregistruoti Hafnio dioksido dangoje pavaizduoti 44 pav.



44 pav. Pluošto, sklindančio Hafnio dioksido dangoje z kryptimi, normuoto intensyvumo (pralaidumo) kitimas laike: a) skaitmeninė holografija, b) keturbangė šoninio poslinkio interferometrija.

Tiek faziniai, tiek amplitudiniai duomenys pateikė labai skirtingus rezultatus. 44 pav. skaitmeninės holografijos atveju buvo stebėtas pralaidumo funkcijos sumažėjimas (a), tuo tarpu KŠPI metodu užregistruotas ir intensyvumo padidėjimas ir sumažėjimas (b).

Pluoštui sklindant Hafnio dioksido danga buvo užregistruotas fazės kitimas (a) ir intensyvumo kitimas (b) laike, kuris pateiktas 45 pav.



45 pav. Hafnio dioksido dangoje užregistruoti laikinės skyros eksperimento rezultatai: a) maksimalus fazės pokytis paviršiuje (atitinkantis apšvitą, kur didžiausias smailinis intensyvumas), b) maksimalus intensyvumo pokytis paviršiuje.

Minimali fazės pokyčio vertė skaitmeninės holografijos ir KŠPI metodikomis skyrėsi 2 kartus. Skaitmeninės holografijos atveju minimali vertė $-0,4$ rad, KŠPI $-0,8$ rad. Galime konstatuoti faktą, jog signalai skiriasi, tačiau kol kas priežastis nėra vienareikšmiškai nustatyta, reikalingi tolesni tyrimai.

Analogiškai kaip ir lydyto kvarco pagrindu eksperimente registruojant skaitmeniniu holografiniu mikroskopu plazmos įtaka yra eliminuojama dėl atraminio ir zonduojančio pluoštų interferencijos, tuo tarpu KŠPI principu veikianti kamera integruoja visą į ją patenkančią šviesą. Taigi atvaizduojančiu objektyvu buvo surinkti visi signalo išdarymai tiek dėl nekoherentinės sklaidos, tiek dėl plazmos, tiek dėl galimo nekoherentinio šiluminio sužadintos medžiagos švytėjimo, kurių indėlis holografijoje yra eliminuojamas.

4 Pagrindiniai rezultatai ir išvados

1. Šiame tyrime pirmą kartą buvo tiesiogiai palygintos skaitmeninės holografijos (SH) ir keturbangės šoninio poslinkio interferometrijos (KŠPI) metodikos. Kadangi šiomis metodikomis išmatuotas fazinio kraterio gylis nuo etaloninės vertės nukrypo mažiau nei 1,5 %, todėl galima teigti, kad abi metodikos yra tinkamos statinių fazinių objektų apibūdinimui.
2. Nustatyta, jog erdvinė skyra SH ir KŠPI metodikomis yra aukštesnė nei 2 μm (mažiausias turimas erdvinės skyros etalonas). Dėl vienašūvių nuotraukų vidurkinimo fazinė skyra KŠPI metodu buvo pagerinta daugiau nei 8 kartus.
3. Naudojant 20 kartų didinantį objektyvą, dėl neašinės (angl. *off-axis*) SH difrakcinių nulinės ir pirmosios eilės maksimumų persiklojimo erdvėje, maksimalus atkurtų vaizdų stebėjimo laukas riboja platesnių nei 250 μm fazinių objektų tyrimą, tuo tarpu KŠPI metodikoje atkurtą objektą riboja tik gardelės ir jutiklio dydis.
4. Dinaminių fazinių objektų tyrimas skaitmeninės holografijos ir keturbangės šoninio poslinkio metodikomis pateikė skirtingus rezultatus. Galimos nesutapimo priežastys yra fazinio signalo išdarymas dėl sklaidos, plazmos ir nekoherentinio šiluminio sužadintos medžiagos švytėjimo KŠPI atveju, kurių indėlis holografijoje eliminuojamas, nes atvaizduojama tik atraminei koherentinė spinduliuotė. Siekiant nustatyti tikrąsias nesutapimų priežastis reikalingi tolimesni tyrimai.

Literatūros sąrašas

- [1] Y. Shechtman, Y. C. Eldar, O. Cohen, H. N. Chapman, J. Miao, M. Segev, Phase Retrieval with Application to Optical Imaging: A contemporary overview, *IEEE Signal Processing Magazine* **32**(3), 87–109 (2015).
- [2] D. P. Kelly, Resolution limits in practical digital holographic systems, *Optical Engineering* **48**(9), 095801 (2009).
- [3] H. D. Young, R. A. Freedman, A. L. Ford, *Sears and Zemansky's university physics: with modern physics; 13th ed.* (Addison-Wesley, Boston, MA, 2012).
- [4] B. E. A. Saleh, M. C. Teich, *Fundamentals of Photonics* (Wiley, New York, NY, 1991).
- [5] T. Young, The Bakerian Lecture: Experiments and Calculations Relative to Physical Optics, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* **94**, 1–16 (1804).
- [6] <http://www.mysearch.org.uk/website1/html/546.Double-Slit.html> (žiūrėta 2017-02-05) .
- [7] U. Schnars, W. Jueptner, *Digital Holography: Digital Hologram Recording, Numerical Reconstruction, and Related Techniques* (Springer Berlin Heidelberg, 2005).
- [8] M. V. Klein, T. E. Furtak, *Optics* (Wiley, 1986), 2 edition.
- [9] U. Schnars, Direct phase determination in hologram interferometry with use of digitally recorded holograms, *Journal of the Optical Society of America A* **11**(7), 2011 (1994).
- [10] D. Gabor, A New Microscopic Principle, *Nature* **161**(4098), 777–778 (1948).
- [11] U. Schnars, W. Jüptner, Direct recording of holograms by a CCD target and numerical reconstruction., *Applied Optics* **33**(2), 179–181 (1994).
- [12] O. K. Ersoy, *Diffraction, Fourier Optics and Imaging* (Wiley, 2007).
- [13] T. H. Demetrakopoulos, R. Mittra, Digital and optical reconstruction of images from suboptical diffraction patterns, *Applied Optics* **13**(3), 665–670 (1974).
- [14] J. Primot, N. Guérineau, Extended hartmann test based on the pseudoguiding property of a hartmann mask completed by a phase chessboard, *Applied optics* **39**(31), 5715–5720 (2000).
- [15] S. Velghe, J. Primot, N. Gurinea, R. Haidar, S. Demoustier, M. Cohen, B. Wattellier, Advanced wave-front sensing by quadri-wave lateral shearing interferometry, *Interferometry XIII: Techniques and Analysis* **6292**, 62920E1–62920E13 (2006).

- [16] <http://www.phasicscorp.com/technology.html> (žiūrėta 2017-01-17).
- [17] P. Bon, G. Maucort, B. Wattellier, S. Monneret, Quadriwave lateral shearing interferometry for quantitative phase microscopy of living cells, *Optics Express* **17**(15), 13080 (2009).
- [18] E. CuChe, P. Marquet, C. Depeursinge, Simultaneous amplitude-contrast and quantitative phase-contrast microscopy by numerical reconstruction of Fresnel off-axis holograms, *Applied Optics* **38**(34), 6994 (1999).
- [19] A. A. Maznev, T. F. Crimmins, K. A. Nelson, How to make femtosecond pulses overlap., *Optics Letters* **23**(17), 1378–1380 (1998).
- [20] A. Melninkaitis, A. Vanagas, V. Sirutkaitis, Tilted-pulse time-resolved off-axis digital holography, *Optics Letters* **34**(18), 2715–2717 (2009).
- [21] T. Balciunas, A. Melninkaitis, G. Tamosauskas, V. Sirutkaitis, Time-resolved off-axis digital holography for characterization of ultrafast phenomena in water **33**(1), 58–60 (2008).

STATINIŲ IR DINAMINIŲ FAZINIŲ OBJEKTŲ TYRIMAS PANAUDOJANT
SKAITMENINĖS HOLOGRAFIJOS IR MODIFIKUOTĄ *SHACK-HARTMANN* METODUS

Santrauka

Vienos iš naujausių ir perspektyviausių fazinio vaizdinimo technologijų yra skaitmeninė holografija (angl. *Digital Holography*) ir keturbangė šoninio poslinkio interferometrija (angl. *Quadri-Wave Lateral Shearing Interferometry*). Pagrindinis šio darbo tikslas buvo ištirti statinius ir dinامينius fazinius objektus skaitmeninės holografijos (SH) ir keturbangės šoninio poslinkio interferometrijos (KŠPI) vaizdinimo metodikomis.

Šiame darbe pirmą kartą tiesiogiai palygintos SH ir KŠPI metodikos. Išmatuotas fazinio kraterio gylis nuo etaloninės vertės nukrypo mažiau nei 1,5 %, todėl galima teigti, kad abi metodikos yra tinkamos statinių fazinių objektų apibūdinimui. Nustatyta, jog erdvinė skyra SH ir KŠPI metodikomis yra aukštesnė nei 2 μm .

Naudojant 20 kartų didinantį objektyvą, dėl neašinės skaitmeninės holografijos difrakcinių nulinės ir pirmosios eilės maksimumų persiklojimų erdvėje, maksimalus atkurtų vaizdų stebėjimo laukas riboja platesnių nei 250 μm fazinių objektų tyrimą. Tuo tarpu KŠPI metodikoje atkurtą objektą riboja tik gardelės ir jutiklio dydis.

Taip pat buvo atlikti laikinės skyros žadinimo-zondavimo (angl. *time-resolved pump-probe*) eksperimentai su lydyto kvarco pagrinduku; ant lydyto kvarco pagrinduko užgarinta plonasluoksne Hafnio dioksido danga. Dinaminių fazinių objektų tyrimas pateikė skirtingus rezultatus. Galimos nesutapimo priežastys yra fazinio signalo išdarymas dėl sklaidos, plazmos ir nekoherentinio šiluminio sužadintos medžiagos švytėjimo KŠPI atveju, kurių indėlis holografijoje eliminuojamas. Siekiant nustatyti tikrąsias nesutapimų priežastis reikalingi tolimesni tyrimai.

RESEARCH OF STATIC AND DYNAMIC PHASE OBJECTS USING DIGITAL
HOLOGRAPHY AND MODIFIED SHACK-HARTMANN METHODS

Summary

The most promising new phase imaging techniques are digital holography (DH) and quadri-wave lateral shearing interferometry (QWLSI) allowing both amplitude and phase to be simultaneously observed. The main purpose of this research project was to compare DH and QWLSI methods for both static and dynamic phase objects.

This work is the first research study directly comparing DH and QWLSI. The thickness of the etalon crater was measured using both methods and gave very similar results. In either case, the measurement was less than 1,5 % away from the universally recognized profilometer value. Thus, it can be stated that both methods are appropriate for measuring static phase objects. Moreover, we measured that the spatial resolution is higher than 2 μm for both the DH and QWLSI methods.

It was identified that in DH using 20 times enlarging microscope objective, the maximum field of view is 250 μm . The reasons are the zero and first order diffraction maximums that appear in off-axis digital holography. Meanwhile, QWLSI is only limited by the size of diffractive grating and sensor.

Time-resolved pump-probe experiments were performed on fused silica and hafnium dioxide coating. The measurement results of the two methods diverged for dynamic phase objects. A possible explanation for different results is the signal distortion in QWLSI due to scattering, plasma, and radiance of noncoherent thermal excited material. These distortion factors in DH case are eliminated. In order to find the actual reasons for the different results, further studies are needed.