

9. ERDVINIS FILTRAVIMAS IR ATVAIZDŲ SUSIDARYMO TYRIMAS

Užduotys

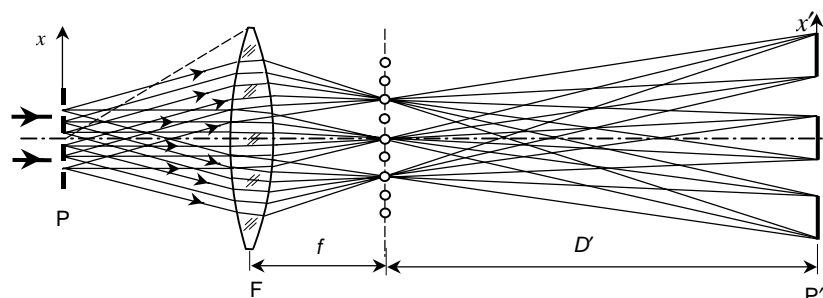
1. Sukurti dviejų periodinių struktūrų erdvinis spektrus.
2. Panaudojant erdvinį filtravimą sukurti įvairius dvimatės gardelės atvaizdus.
3. Pakartoti Abės (*Abbe*) bandymą.

Teorija

Lęšiai ir sudėtingesnės optinės sistemos (objektyvai) naudojamos objektų atvaizdams sukurti. Objekto atvaizdas yra optinės sistemos perteiktas šviesos, sklindančios nuo objekto, intensyvumo pasiskirstymas. Lęšiai yra baigtinių matmenų, be to, optinėse sistemose dažnai naudojamos įvairios diafragmos, todėl pro optinę sistemą sklindanti šviesos banga difraguoja. Difrakcija turi esminio poveikio sukurtam atvaizdų kokybei.

Dažniausiai naudojamas koherentinis arba nekoherentinis daiktų apšvietimo būdas. Kai apšviečiama koherentinėmis bangomis, iš įvairių objekto taškų sklindančios šviesos bangos yra koherentinės ir tarpusavyje interferuoja. Antruoju atveju objekto taškai skleidžia nekoherentines bangas, kurių intensyvumai atvaizdo plokštumoje adityvūs.

Panagrinėsime koherentinį apšvietimą. Abės teorija įrodo, kad atvaizdai susidaro dėl bangų interferencijos. Pagal šią teoriją, objektas yra sudėtinga difrakcinė gardelė. Tarkime, kad statmenai į gardelės pavidalo objektą P krinta plokščioji banga (9.1 pav.). Už objekto dėl difrak-



9.1 pav. Optinio atvaizdo susidarymo schema

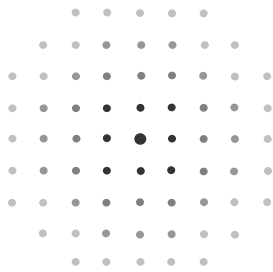
cijos susidaro daug difragavusių pluoštelių, sklindančių įvairiomis kryptimis. Interferencijos maksimumų kryptis nusako ši sąlyga:

$$d \sin \varphi = m \lambda;$$

čia d – gardelės periodas, φ – difrakcijos kampas, m – interferencijos eilė, λ – bangos ilgis (dydis $d \sin \varphi$ yra gretimų pluoštelių bangų eigos skirtumas).

Difragavusios bangos erdvėje susiskaido į erdvines harmonikas, besiskiriančias *erdviniais dažniais* (erdvinis dažnis – dydis, atvirkščias struktūros erdviniam periodui), ir objektyvo židi-

nio plokštumoje F susidaro Fraunhoferio (*Fraunhofer*) difrakcinis vaizdas iš nuosekliai išsidėsčiusių įvairių eilių maksimumų (9.2 pav.). Jis vadinamas difrakcinės gardelės *Furjė* (*Fourier*) *spektru* (arba *erdviniu spektru*).



9.2 pav. Erdvinio spektro vaizdas lęšio židinio plokštumoje

Kiekvienas lęšio židinio plokštumos taškas yra antrinių koherentinių bangų šaltinis. Iš jų sklindančios bangos tarpusavyje interferuoja ir sukuria objekto atvaizdą atvaizdo plokštumoje P'. Į kiekvieną atvaizdo tašką ateina spinduliai, kiekvienas iš kurių perėjo atitinkamą erdvinio spektro maksimumą. Neiškraipytas gardelės atvaizdas su visomis detalėmis susidaro tada, kai šviesos pasiskirstymas plokštumoje P' nusakomas visomis Furjė spektro dedamosiomis. Norint sukurti tikslų objekto atvaizdą, reikia erdvinio spektro visų dažnių harmonikų. Tačiau tai neįmanoma, nes objektyvo anga ribota. Praktiniams tikslams pakanka angos, praleidžiančios didesnės energijos erdvines harmonikas. Be to, konkrečiam bangos ilgiui λ ir gardelės periodui d pagrindiniai maksimumai yra ne didesnės kaip

$m_{\max} = d/\lambda$ eilės. Juose yra informacija apie Furjė dedamąsias, kurių erdvinis periodas ne mažesnis kaip

$$l_{\min} = \frac{d}{m_{\max}} = \lambda.$$

Struktūros detalės, kurių gardelės periodas mažesnis, neturi reikšmės difrakciniam vaizdui.

Objekto atvaizde gali atsirasti iškreiptų detalių, jei pašalinamos kai kurios erdvinės harmonikos.

Periodinė struktūra, susidedanti iš N vienodų s pločio plyšių, tarp kurių yra neskaidrūs tarpeliai, sudaro vienmatę gardelę su periodu d . Lęšio židinio plokštumoje F, kurioje susidaro ryškūs Furjė spektro maksimumai, pastatyta stačiakampė diafragma, kurios šoninės kraštinės lygiagrečios su plyšiais. Matematiškai nusakant atvaizdo šviesos intensyvumo skirstinį gaunama, kad santykinis intensyvumas atvaizdų plokštumoje P' reiškiamas taip:

$$\frac{I(x')}{I_0} = 1 + 2 \sum_{1 \leq m \leq k} \frac{\sin(m \pi s / d)}{m \pi s / d} \cos(2 \pi m x' / d'); \quad (9.1)$$

čia x' – atvaizdo, kurio periodas d' , taško koordinatė; I_0 – nuo skaičiaus m nepriklausanti konstanta; $k = ad/\lambda f$ (čia a – diafragmos ilgis); $d' = -D'd/f$ (čia D' – atstumas nuo objektyvo židinio plokštumos iki atvaizdo plokštumos).

Pirmasis (9.1) išraiškos narys nusako santykinį intensyvumą, kai $m = 0$. Jei diafragma labai ilga, tai sumuojant, $k = \infty$ ir tada atvaizdas visiškai panašus į objektą.

Jei diafragmos ilgis a toks mažas, kad atvaizdui sukurti naudojamas tik nulinės eilės spektras (jei k yra taisyklingoji trupmena, tai $I(x') = \text{const}$), tai atvaizdo plokštuma bus tolygiai apšviesta.

Jei per diafragmą pereina nulinė ir dvi pirmosios harmonikos ($m = 0, \pm 1$), t. y. jei k šiek tiek didesnis už vieneta, tai

$$\frac{I(x')}{I_0} = 1 + 2 \frac{\sin(\pi s / d)}{\pi s / d} \cos(2 \pi x' / d').$$

Tada į kiekvieną atvaizdo tašką ateina ne mažiau kaip du spinduliai iš atitinkamų daikto taškų. Atvaizdo periodas d' taisyklingas ir šviesos intensyvumas pasiskirsto taip, kad tolygiai pereinama nuo šviesių ruožų prie tamsių. Ši sąlyga tenkinama tada, kai pirmos eilės difrakcijos kampas yra ne didesnis už objektyvo apertūros kampą u (kampas tarp optinės ašies ir spindulio, nubrėžto iš daikto centro į objektyvo kraštą).

Didžiausia erdvinės harmonikos eilė m_{\max} , kuri turi įtakos atvaizdo kokybei, reiškiamą taip:

$$\sin \alpha = m_{\max} \frac{\lambda}{d} \leq \sin u.$$

Iš čia

$$m_{\max} \leq \frac{d}{\lambda} \sin u,$$

o mažiausias išskiriamų detalių matmuo lygus jos periodui:

$$l_{\min} = \frac{d}{m_{\max}} = \frac{\lambda}{\sin u}.$$

Jei tarp gardelės ir objektyvo yra lūžio rodiklio n imersinė terpė, tai

$$l_{\min} = \frac{\lambda}{n \sin u}.$$

Jei apšviečiama įstrižai, tai

$$l_{\min} = \frac{0,5 \lambda}{n \sin u}; \quad (9.3)$$

čia $n \sin u$ – objektyvo skaitinė apertūra. (9.3) išraiška nusako objektyvo ribinę skyrą. Kuo l_{\min} vertė mažesnė, tuo optinės sistemos skiriamoji geba didesnė.

Į objektą nepanašus atvaizdas susidaro tada, kai jo sukūrimui naudojamos aukštesnių eilių erdvinio spektro harmonikos. Jei, pavyzdžiui, pašalinamos visos, išskyrus pirmosios eilės, harmonikos, tai atvaizdo periodas lygus $d'/2$, todėl tokia atvaizde yra dvigubai daugiau „linijų“ negu objekte. Analogiškas atvaizdas sukuriamas ir tada, kai pašalinamos visos nelyginės harmonikos ($\pm 1, \pm 3, \dots$), o paliekamos lyginės ($\pm 0, \pm 2, \pm 4, \dots$), kurios lemia dvigubai mažesnio periodo gardelės difrakcinį atvaizdą. Šie du gardelės atvaizdai vienas kito atžvilgiu yra atvirkštiniai, t. y. vietoje šviesių juostų susidaro tamsios ir atvirkščiai. Tam turi būti tenkinama sąlyga: $0,5 \leq s/d \leq 1$.

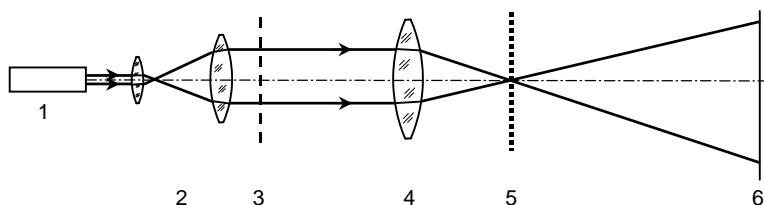
Jei objektas dvimatė difrakcinė gardelė ir lęšio židinio plokštumoje yra plyšys, kuris praleidžia visas vertikalios išsidėsčiusias harmonikas, tai atvaizdo plokštumoje susidaręs atvaizdas yra horizontaliųjų gardelės rėžių sistemos pavidalo.

Optinės sistemos židinio plokštumoje dedant specialias diafragmas (erdvinius filtrus), galima keisti Furjė dedamųjų santykinės amplitudės bei fazės ir kartu atvaizdo pobūdį. Toks metodas vadinamas *erdvinių harmonikų filtravimu* ir plačiai taikomas optinėse sistemose informacijai doroti.

Tyrimas

Pirmiausia gerai suderinama lazerio 1 spindulių pluošto skėsties sistema (9.3 pav.). Spindulių pluoštas turi kuo vienodžiau apšviesti ekraną 6. Dirbant reikia stengtis, kad visos naudojamos detalės būtų pastatytos išlaikant vieną bendrą sistemos optinę ašį. Stebint atvaizdus pro okuliarą, būtina susilpninti lazerio spindulių pluošto intensyvumą.

Tiriant **mažesnio periodo gardelę** 3, ekranas statomas lęšio 4 židinio plokštumoje 5 ir



9.3 pav. Optinė tyrimo schema

gaunamas ryškus erdvinis (Furjė) spektras. Išmatuojami atstumai x_m ir y_m tarp nulinio ir aukštesnių eilių maksimumų, išsidėsčiusių horizontalia ir vertikalia kryptimi, ir apskaičiuojami erdviniai dažniai:

$$\xi_1 = 1/x_1, \quad \xi_2 = 1/x_2, \dots$$

$$\eta_1 = 1/y_1, \quad \eta_2 = 1/y_2, \dots$$

Šios vertės palyginamos su erdvinių dažnių teorinėmis vertėmis, kurios apskaičiuojamos pagal šias formules:

$$\xi_m = \frac{dx}{m f \lambda}, \quad \eta_m = \frac{dy}{m f y};$$

čia f – lęšio židinio nuotolis, dx ir dy – gardelės konstantos, t. y. periodai x ir y kryptimis; jie nustatomi atskiru bandymu.

Atliekant tyrimus, kurių tikslas yra nustatyti, kokią įtaką atvaizdo kokybei ir formai daro erdvinių harmonikų skaičius, naudojami erdviniai filtrai. Erdvinis filtras gali būti neskaidrus ekranas, kuriame yra angos, praleidžiančios norimas harmonikas. Jie statomi lęšio židinio plokštumoje 5 ir atvaizdo plokštumoje 6 susidaro vienoks arba kitoks atvaizdas, priklausantis nuo naudotų harmonikų.

Kadangi gardelės periodas mažas, atvaizdo struktūra smulki. Todėl atvaizdas stebimas pro okuliarą, kuris padidina regėjimo kampą. Darbo metu reikia sukurti gardelės atvaizdus, kurių periodai d' , $d'/2$, $d'/3$, $d'/4$, atvirkštinį atvaizdą ir tolygią ekrano apšvietą, nufiltravus atitinkamas erdvinės harmonikas. Gautieji atvaizdai nusakomi kokybiškai nurodant, kokios erdvinės harmonikos buvo naudotos jų sukūrimui.

Tiriant **didesnio periodo gardelę** ekranas yra 6 padėtyje. Jame matomas gardelės atvaizdas. Furje spektro susidarymo plokštumoje 5 statoma diafragma su vertikaliu (arba horizontaliu) keičiamo pločio plyšiu. Keičiant plyšio plotį ir jo padėtį optinėje ašyje stebima, kaip keičiasi gardelės atvaizdas ekrane. Tuo momentu, kai nufiltruojamos visos ξ harmonikos (maksimumai x kryptimi), ekrane matomi tik horizontaliųjų gardelės režių atvaizdai, o nufiltravus visas η harmonikas – tik vertikalųjų. (Gautąjį atvaizdą parodyti dėstytojui). Šį bandymą pirmą kartą atliko Abė.