

VI SKYRIUS

OPTINĖ HOLOGRAFIJA

Holografija vadinamas šviesos bangų struktūros užrašymo ir atgaminimo metodas, grindžiamas koherentinių šviesos pluoštelių difrakcija ir interferencija. Kaip ir fotografijoje, ji užtikrina stebimųjų objektų atvaizdų užrašymą, saugojimą ir atgaminimą. Tačiau įprastoji fotografija pateikia tik plokščią tūrinio objekto atvaizdą, kuris matomas tik iš tam tikros vietos. Apžiūrint fotonuotrauką negalima pažiūrėti už daiktų, esančių priekiniame plane. Holografija užregistruoja ir atgamina ne dvimatį apšvietos skirstinį nuotraukos plokštumoje, o objekto išsklaidytas šviesos bangas su visomis jų charakteristikomis – sklidimo linkme, amplitude, faze, bangos ilgiu, poliariacija. Atgamtos holograma šviesos bangos sukuria pilnutinę realiai stebimo daikto iliuziją. Matomas erdvinis daikto atvaizdas. Artimi ir tolimi daiktai matomi vienodai ryškiai. Keičiant stebėjimo vietą, galima matyti įvairias detales.

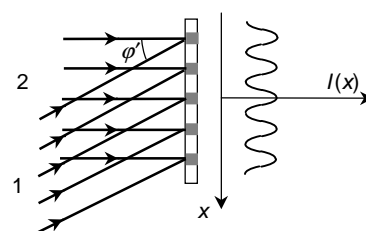
Hologramoje registruojama ne optinis objekto atvaizdas, bet interferencinis vaizdas, susidaręs persidengus objektu išsklaidytajai šviesos bangai su jai koherentine atramine banga. Šis interferencinis vaizdas fiksuoja informaciją apie daikto bangos amplitudės ir fazės skirstinį. Hologramos apšvietimas atgaminančiąja banga, kuri identiška atraminei registravimo metu, sukuria difrakcines bangas, viena iš kurių yra daugiau ar mažiau tiksliai daikto išsklaidytos bangos kopija. Patekusi į stebėtojo akį, ši banga iššaukia tokius pat pojūčius, kaip ir žiūrint į daiktą tiesiogiai.

Holografijos idėjų įgyvendinimo reali pradžia 1947 ÷ 1948 m (Gaboras). Norint praktiškai realizuoti holografiją, reikia turėti didelio erdvinio ir laikinio koherentiškumo spinduolius, todėl plačiai ji išsivystė sukūrus lazerius (1963 m.). Storasluoksnių fotoemulsijų metodu vaizdai atgaminami baltojoje šviesoje.

6.1. HOLOGRAFIJOS PRINCIPAS. PLOKŠČIOJI HOLOGRAMA

Holografijos principus aiškinti lengviau, nagrinėjant paprasčiausius objektus. Paprasčiausias yra **plokščiosios bangos** holografinis užrašymas ir atgaminimas.

Tarkim, kad sklindanti iš daikto plokščioji banga 1 krinta į fotoplokštelę kampu φ' (6.1.1 pav.). Momentinis šviesos virpesių fazių pasiskirstymas plokštelės paviršiuje priklauso nuo bangos krypties, bet šviesai jautrus sluoksnis registruoja tik vidutinį apšvietos skirstinį eksponavimo metu ir plokštelė bus vienodai pajuodavusi. Iš pajuodavimo laipsnio sprendžiama apie šviesos virpesių amplitudes, bet informacijos apie jų fazes nėra. Tokiu būdu nusakyti plokštelę veikiančiosios bangos 1 kryptį negalima.



6.1.1 pav. Plokščiosios bangos hologramos sukūrimas

Tarkim, kad tuo pačiu metu į fotoplokštelę kartu su „daikto“ banga 1 krinta jai koherentinė plokščioji „atraminė“ banga 2. Abi bangos interferuoja ir fotoplokštelės paviršiuje susidaro stacionarios tarpusavyje lygiagrečios interferencinės juostelės, orientuotos statmenai brėžinio plokštumai. Intensyvumo pasiskirstymas išilgai x ašies išreiškiamas taip:

$$I(x) = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos [k \Delta(x)] ; \quad (6.1.1)$$

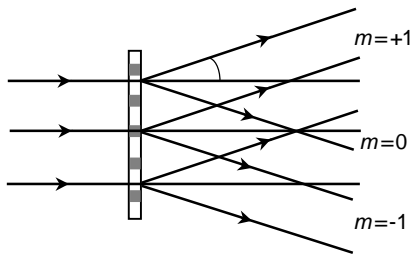
čia $k = 2\pi/\lambda$ – bangų skaičius, $\Delta(x) = x \sin\varphi'$ – jų eigos skirtumas.

Atstumas tarp gretimųjų juostelių yra lygus:

$$d = \frac{2\pi}{k \sin\varphi'} = \frac{\lambda}{\sin\varphi'} .$$

Taigi hologramoje susidaro savotiška difrakcinė gardelė, kurios praleidimas išreiškiamas sinuso funkcija. Užregistruotų hologramoje interferencinių juostelių struktūroje yra informacija apie daikto bangos fazių pasiskirstymą.

Nesunku suprasti, kaip tokia holograma galima atgaminti užrašytą joje daikto bangą. Į hologramą nukreipiama atgaminančioji banga (6.1.2 pav.), identiška atraminei 2, kuri buvo naudota užrašymo metu. Jai difragavus sinusinio praleidimo gardelėje, susidaro trys plokščiosios bangos. Viena iš jų



6.1.2 pav. Plokščiosios bangos atkūrimas holograma

atitinka pagrindinį $m = 0$ eilės maksimumą ir sklinda krintančiosios bangos kryptimi. Kitų dviejų bangų pagrindinių maksimumų eilė $m = \pm 1$. Holografijoje svarbiausia yra $m = 1$ eilės banga, kurios kryptis φ nusakoma tokia sąlyga:

$$d \sin \varphi = \lambda .$$

Kadangi $d = \lambda / \sin \varphi'$, tai $\varphi = \varphi'$,

t. y. šios bangos kryptis bei kitos cha-

rakteristikos yra tokios pat, kaip ir daikto bangos 1, užrašant hologramą. Apžiūrint hologramą, patekusi į akį difragavusi atgaminančioji banga iššaukia tokį pat pojūtį, kaip ir tiesiogiai žiūrint į daiktą.

Sudėtingo objekto holograma sukuriama jį apšvietus koherentiniu lazerio pluoštelio. Išsklaidytą objektu bangų lauką, pagal Furje teoremą, galima suprasti kaip plokščiųjų bangų visumą. Kiekviena iš jų, interferuodama su atramine lazerio pluoštelio banga, sukuria foto plokštelėje savą interferencinių juostelių sistemą su jai būdinga orientacija ir periodu. Išryškinius hologramoje susidaro difrakcinių gardelių visuma. Atgaminimo metu kiekviena iš jų formuoja jai atitinkančią pradinę elementarią plokščiąją bangą ir sukuria pagrindinį difrakcinį maksimumą $m = 1$. Visos atgamintos elementariosios bangos turi tokį pat amplitudžių ir fazių santykį, kaip ir užrašant hologramą. Jų visuma sudaro pilnutinį objekto išsklaidytą šviesos lauką, t. y. ten, kur anksčiau buvo daiktas, sukuriamas jo menamasis atvaizdas.

Be difrakcijos gardelių visumos, kurios gaunamos interferuojant elementariosioms daikto bangoms su atramine, hologramoje susidaro papildoma struktūra, atsirandanti dėl elementariųjų daikto bangų tarpusavio interferencijos. Tačiau atraminė banga gerokai intensyvesnė už daikto, todėl ši papildoma struktūra yra silpnai išreikšta. Atgaminimo metu ji sudaro papildomas difrakcines bangas, susitelkiančias šalia atraminės bangos krypties. Jos netrukdo stebėtojui, jei atraminės bangos kritimo kampas pakankamai skiriasi nuo daikto bangos kritimo kampo.

Holografijos principą galima paaiškinti nagrinėjant atskirų objekto taškų išsklaidytų **sferinių bangų** užrašymą ir atkūrimą. Iš daikto taško S (6.1.3 a pav.) plintančios sferinės ir jai koherentinės plokščiosios atraminės bangų interferencija sudaro stacionarų bendracentrinių žiedų vaizdą. Intensyvumo pasiskirstymas interferenciniame vaizde irgi nusakomas (6.1.1) formule, bet eigos skirtumas tarp plokščiosios atraminės ir sferinės daikto bangos priklauso nuo atstumo x :

$$\Delta(x) = \sqrt{R^2 + x^2} - R \approx \frac{x^2}{2R} .$$

m -ojo šviesaus žiedo spindulys x_m apskaičiuojamas naudojant sąlygą $\Delta(x_m) = m\lambda$. Tada

$$x_m = \sqrt{2Rm\lambda} .$$

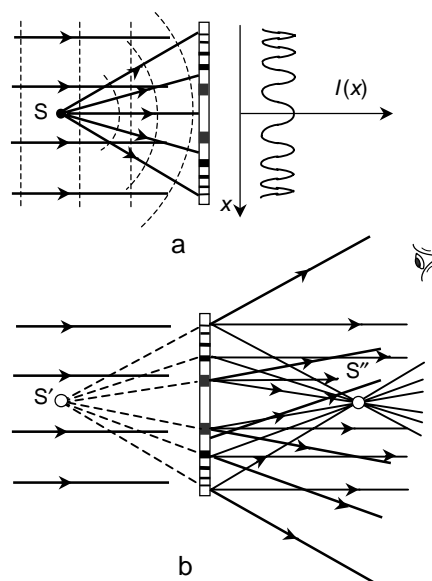
Kaip tik toks turi būti žiedo spindulys zoninėje Frenelio plokštelėje, kurios židinio nuotolis $f = 2R$. Taškinio spinduolio holograma skiriasi nuo zoninės plokštelės tuo, kad perėjimas nuo šviesių žiedų prie tamsių yra tolygus pagal kosinuso dėsnį (6.1.1).

Gautoji holograma atkūrimo metu apšviečiama plokščiąja banga, identiška atraminei (6.1.3 b pav.). Kaip ir zoninėje plokštelėje dėl difrakcijos susidaro ne tik tiesiai pereinančioji banga, bet dar ir susiglaudžiančioji ir prasiskleidžiančioji sferinė banga. Perėjimas nuo šviesių žiedų prie tamsių yra tolygus ir susidaro (panašiai kaip difrakcinėje gardelėje su sinusiniu praleidimu) tik trys pagrindiniai maksimumai $m = 0, \pm 1$.

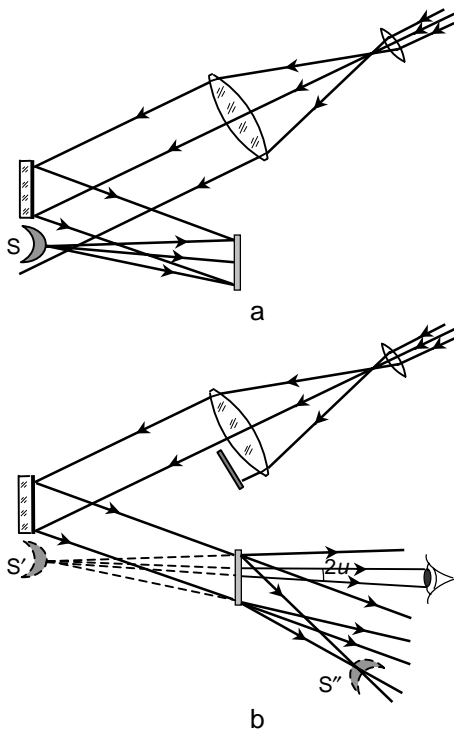
Prasiskleidžiančių difragavusių spindulių centras S' yra toje pat vietoje, kur buvo taškinis spinduolis S užrašant hologramą. Iš tikrųjų, kai difragavusiųjų spindulių tęsiniai kertasi taške S' , eigos skirtumas tarp spindulių, sklindančių iš gretimųjų šviesių hologramos žiedų, lygus bangos ilgiui λ . Tokius spindulius akis priima kaip išeinančiuosius iš taško S' . Jie sudaro menamąjį spinduolio atvaizdą. Stebėtojas pro hologramą mato spinduolį taške S' , nors jo tenai nėra.

Susiglaudžiančioji difrakcinė sferinė banga sukuria tokį pat regimąjį atvaizdą, kaip ir plintančioji daikto banga. Taške S'' susikuria tikrasis atvaizdas. Norint jį pamatyti, reikia čia padėti ekranėlį. Šis atvaizdas susikuria be papildomų lęšių arba veidrodžių.

Norint pamatyti menamąjį atvaizdą S' , stebėtojo akis turi būti virš arba žemiau hologramos. Kitaip tiesiai perėjusioji arba susiglaudžiančioji banga gerokai trukdo. Todėl naudojamas kampinis perėjusios ir difragavusios bangų išskyrimas, nukreipiant atraminę bangą kampu.



6.1.3 pav. Taškinio spinduolio hologramos užrašymas (a) ir atgaminimas (b)



6.1.4 pav. Hologramos sukūrimo (a) ir vaizdo atkūrimo (b) schema

Viena iš hologramos užrašymo ir vaizdo atkūrimo schemų pavaizduota 6.1.4 pav. Lygiagrečiųjų spindulių lazerio pluoštelis, papildomai išplėstas paprasta optine sistema, nukreipiamas į objektą ir į greta esantį veidrodį. Atsispindėjusioji nuo veidrodžio banga yra koherentinė su daikto išsklaidytomis bangomis ir naudojama kaip atraminė. Atkūrimo metu tiesiai perėjusioji banga ir difragavusios bangos, sukuriančios menamąjį S' ir tikrąjį S'' atvaizdą, yra gerai išskirtos erdvėje, ir be trukdymų galima pamatyti menamąjį atvaizdą.

Sudėtingas objektas, sklaidantis koherentinę lazerio šviesą, gali būti suprantamas kaip taškinių spindulių, sklaidžiančių sferines bangas, visuma. Dėl jų interferencijos su atramine banga hologramoje susidaro sudėtinga persiden-

giančių zoninių gardelių visuma. Objekto atvaizdo atkūrimo metu difraguojant atraminei bangai kiekviena tokia gardelė formuoja bangą, prasiskleidžiančią iš centro, kur buvo atitinkamas sklaidantysis šviesą daikto taškas hologramos užrašymo metu. Šių bangų visuma, sukurianti viso objekto menamąjį atvaizdą, nesiskiria nuo objekto išsklaidytų bangų užrašymo metu, kadangi nusakoma tokiu pat amplitudžių ir fazių pasiskirstymu. Todėl holograma pilnutinai atkuria jo tūrinę struktūrą ir perteikia ne tik matomą erdvinį daiktų išsidėstymą, bet ir sukuria paralakso reiškinį, t. y. šio išsidėstymo kitimą, keičiant žiūrėjimo vietą.

Susiglaudžiančiųjų bangų visuma, susidariusi difraguojant atgaminančiajai bangai hologramoje, be jokių lęšių sukuria tikrąjį daikto atvaizdą. Jį galima pamatyti tik iš tam tikros vietos, kai atvaizdas yra tarp hologramos ir akies. Tada daikto atvaizdas yra invertuotas, iškilios daikto vietos atrodo įdubusiomis, o įdubusios – iškilomis, t. y. atvaizdas lyg išverstas (pseudoskopinis).

Svarbi hologramos savybė yra ta, kad daikto bangą galima atkurti ir nedideliu hologramos plotu. Jei dalis difrakcinės gardelės uždengiama, difragavusių spindulių kryptis nepakinta, tik sumažėja jų intensyvumas ir šiek tiek išplinta pagrindiniai maksimumai. Ši išvada teisinga ir zoninei plokštei, nedidelę dalį kurios galima nagrinėti kaip difrakcinę gardelę su išlinkusiais režiais ir palaipsniui besikeičiančiu periodu. Bet kokia zoninės plokštelės dalis atkuria vienos ir tos pačios sferinės bangos dalį.

Kiekvienoje hologramos dalyje yra užkoduota informacija apie visus daikto taškus. Mažėjant hologramos matmenims, sumažėja skiriamoji geba ir siaurėja regėjimo laukas.

Menamojo atvaizdo stebėjimas faktiškai yra ekvivalentus pačio daikto stebėjimui pro angą, sutampančią su darbine hologramos dalimi. Kai akies padėtis yra fiksuota, naudojama tik dalis difragavusios spinduliuotės, kurią riboja veikiantysis patenkančių į akį spindulių kūgis. Aišku, kad stebint tam tikrą daikto tašką, šiame kūgyje sklinda šviesa, patyrusi difrakciją nedidelėje hologramos dalyje (6.1.4 b pav.). Jei akies vieta pakinta, to paties taško atvaizdas atkuriamas kita hologramos dalimi.

Holograma, kaip ir bet kokia kita optine sistema, sukurtas atvaizdas (menamasis arba tikrasis) yra difrakcinė dėmelė, kurios matmenys ir forma nusakoma difragavusios hologramoje šviesos, formuojančios taško atvaizdą, kampine apertūra. Mažiausias atstumas l_{\min} tarp artimų daikto taškų, išskiriamų atvaizde, nusakomas (kaip ir mikroskope) išraiška:

$$l_{\min} = \frac{\lambda}{\sin u} \quad \text{arba} \quad l_{\min} = \frac{\lambda}{2 \sin u},$$

kai atraminė banga krinta kampu. Čia $2u$ – kampas, kuriuo iš daikto matoma veikiančioji hologramos dalis. Vizualiai stebint menamąjį atvaizdą, akis priima tik dalį atkurtosios holograma bangos. Veikiančiąją hologramos dalį (ir apertūrą $2u$) riboja ne hologramos matmenys, o patenkančių į akį difragavusių spindulių kūgis. Šiuo atveju ribinę skyrą lemia akis, t. y. neišnaudojama pilnutinė hologramos skiriamoji geba.

Holografijoje naudojamos fotografinės emulsijos turi būti aukštos kokybės, grūdelių matmenys neturi riboti hologramos skiriamosios gebos. Tam naudojamos specialios emulsijos, registruojančios keletą tūkstančių linijų viename milimetre.

Vaizdo atkūrimui vienodai tinka kaip hologramos pozityvas, taip ir negatyvas. Zoninėje plokštelėje tai labai akivaizdu – jos poveikis vienodas, esant lyginiam arba nelyginiam atvirų Frenelio zonų skaičiui.

Hologramos užrašymo metu atraminė banga turi būti koherentinė su visų objekto taškų išsklaidytąja šviesa. Norint sukurti didelių objektų hologramas, reikia naudoti didelio laikinio ir erdvinio koherentiškumo spinduliotę. Koherentiškumo ilgis turi viršyti maksimalų eigos skirtumą tarp atraminės ir daikto bangų, kuris trimačiui objektui praktiškai sutampa su jo matmenimis. Erdvinio koherentiškumo srities matmenys turi būti didesni už hologramos matmenis. Šias sąlygas galima tenkinti tik naudojant lazerinę spinduliotę. Norint gauti ryškų interferencinį vaizdą užrašant hologramą, reikia, kad eksponavimo metu visi elementai nejudėtų (bangos ilgio dalių tikslumu).

Jei atkūrimo metu šviesos pluoštelis identiškas atraminiam užrašymo metu, tai menamasis atvaizdas bus toje pat vietoje, kur buvo daiktas ir visiškai jam panašus. Tačiau atkūrimo metu galima naudoti ir kitokios sklidimo krypties šviesą. Tada menamasis S' ir tikrasis S'' atvaizdas pasislenka atitinkamu kampu.

Atkūrimo metu galima naudoti ir kitokio negu užrašant bangos ilgio monochromatinę šviesą. Tada atkurto atvaizdo tiesiniai matmenys skiriasi nuo daikto matmenų ir jis bus kitokiu atstumu nuo hologramos. Be to atraminė ir atkuriančioji bangos gali būti ne tik plokščiosios, bet ir sferinės.

Visada, kai atkuriančioji banga ne identiška atraminei, difragavusių hologramoje spindulių pluošteliai, formuojantys atskirų daikto taškų atvaizdus, praranda bendracentriškumą. Atkurtasis atvaizdas daugiau arba mažiau pasižymi sferine aberacija, chromatizmu, koma, astigmatizmu ir distorsija, panašiai kaip ir optinėse sistemose.

6.2. TŪRINĖ HOLOGRAMA

Anksčiau nagrinėta, kai šviesai jautraus sluoksnio storis gerokai mažesnis už registruojamojo interferencinio vaizdo erdvinį periodą. Tokios hologramos vadinamos *plokščiosiomis* (dvimatėmis). Jei sluoksnio storis gerokai viršija šį periodą (atstumą tarp interferencinių juostelių), kalbama apie *tūrines* (trimates, storasluoksnės) hologramas.

Norint suprasti storasluoksnų hologramų ypatumus, panagrinėsime paprasčiausią plokščiųjų atraminės ir daikto bangų interferenciją.

Erdvės taške, kurio vieta nusakoma radius-vektoriumi \mathbf{r} , užsiklojus dviem plokščiosioms monochromatinėms ω dažnio bangoms

$$E_1 = a_1 \cos(\mathbf{k}_1 \mathbf{r} - \omega t + \delta_1) ;$$

$$E_2 = a_2 \cos(\mathbf{k}_2 \mathbf{r} - \omega t + \delta_2) ,$$

kurių bangų vektoriai \mathbf{k}_2 ir \mathbf{k}_1 , pradinės fazės δ_1 ir δ_2 , atstojamosios to paties dažnio bangos amplitudės kvadratas išreiškiamas taip:

$$a^2 = a_1^2 + a_2^2 + 2a_1 a_2 \cos(\mathbf{K} \mathbf{r} + \delta_2 - \delta_1);$$

čia $\mathbf{K} = \mathbf{k}_2 - \mathbf{k}_1$.

Atstojamasis intensyvumas

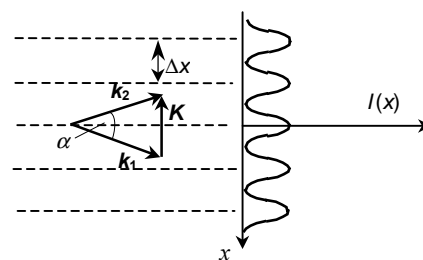
$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\mathbf{K} \mathbf{r} + \delta_2 - \delta_1) \quad (6.2.1)$$

priklauso nuo registruojamo taško vietos. Vienodo intensyvumo paviršiai nusakomi lygtimi $\mathbf{K} \mathbf{r} = \text{const}$. Tai bus plokštumos, statmenos vektoriui $\mathbf{K} = \mathbf{k}_2 - \mathbf{k}_1$ (6.2.1 pav.). Intensyvumas didžiausias tada, kai kosinusas (6.2.1) išraiškoje lygus +1. Atstumas Δx tarp gretimųjų maksimalaus intensyvumo plokštumų nusakomas sąlyga: $K \Delta x = 2\pi$. Bangų vektorių \mathbf{k}_1 ir \mathbf{k}_2 moduliai yra vienodi ir lygūs $k = 2\pi/\lambda$. Tada $K = 2k \sin(\alpha/2)$; čia α – kampas tarp k_1 ir k_2 , t. y. tarp interferuojančiųjų bangų kryptių.

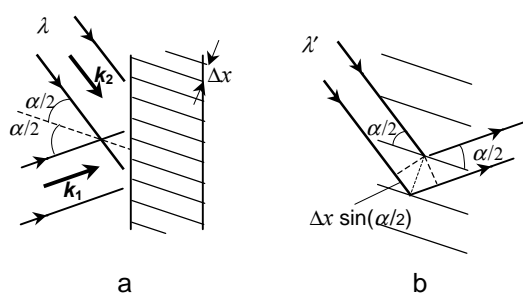
Tada

$$\Delta x = \frac{2\pi}{K} = \frac{\pi}{k \sin(\alpha/2)} = \frac{\lambda}{2 \sin(\alpha/2)} \approx \frac{\lambda}{\alpha} \quad (6.2.2)$$

Po išryškinimo emulsijoje didžiausių intensyvumų vietose susidaro savotiška pusskaidrių veidrodinių paviršių sistema. Paviršiai išsidėsto palei pusiau kampinę tarp daikto ir atraminės bangos kryptių (6.2.2 a pav.). Atspindint monochromatinei šviesai nuo dviejų ir daugiau pajuodavimo paviršių, sudarančių tūrinę hologramą, vyksta šviesos difrakcija ir interferencija. Vieni spinduliai sumuojasi stiprėdami, kiti – silpnėdami. Stiprinama tada, kai spindulių eigos skirtumas lygus sveikajam bangos ilgių skaičiui. Visi spinduliai, kuriems ši sąlyga



6.2.1 pav. Vienodų intensyvumų plokštumos ir intensyvumo skirstinys interferuojant plokščiosioms bangoms



6.2.2 pav. Tūrinį hologramą savybių aiškinimas

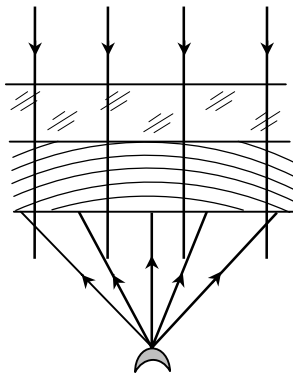
(Vulfo ir Bregų sąlyga) netenkinama, atsispindėję nuo pajuodavimo plokštumų, silpnėja. Šviesos lūžio emulsijoje neišskaitysime. Atstumas tarp plokštumų yra Δx . Tarkim, kad į hologramą krinta λ' bangos ilgio plokščioji banga, kurios kryptis kaip ir atraminės su veidrodiniu paviršiumi sudaro kampą $\alpha/2$ (6.2.2 b pav.). Eigų skirtumas tarp bangų, atspindėtų gretimomis plokštumomis tuo pačiu kampu $\alpha/2$, yra lygus

$$\Delta = 2 \Delta x \sin \frac{\alpha}{2} .$$

Įrašius (6.2.2) išraišką matyti, kad eigų skirtumas $\Delta = \lambda$, t. y. lygus bangos ilgiui bangos, kuri buvo naudota užrašant hologramą. Šios bangos daugiaspindulinėje interferencijoje stiprina viena kitą, jei tenkinama sąlyga $\lambda' = \lambda$. Jei $\lambda' \neq \lambda$, tai įvairių plokštumų atspindėtos bangos turi įvairius fazių skirtumus ir nesudaro konstruktyvios interferencijos.

Apšvietus hologramą baltosios šviesos pluošteliu, atgaminime dalyvaus tik tos bangos, kurių $\lambda' = \lambda$. Tai reiškia, kad atgaminimo procese storasluoksnė holograma veikia kaip interferencinis filtras, išskiriantis iš krantinčiosios šviesos spinduliuotę tokio bangos ilgio, kuris buvo naudotas užrašymo metu. Kuo daugiau atspindinčiųjų paviršių tūrinėje hologramoje, tuo atkurtasis pluoštelis bus monochromatiškesnis.

Jei atgaminama monochromatine šviesa tokio pat bangos ilgio kaip ir užrašant, tai atspindėtos veidrodiniais sluoksniais bangų fazių skirtumas pastovus ir interferuojant stiprina viena kitą tik tada, kai atgaminančiojo pluoštelių kryptis tokia pati kaip atraminio. Holograma veikia kaip *optinis kolimatorius*. Atspindėtos bangos yra tos pačios krypties kaip ir daikto bangos (6.2.2 b pav.). Todėl tūrinė holograma atkuria tik vieną daikto atvaizdą – menamąjį arba tikrąjį, priklausomai nuo to, iš kokios pusės ją apšviečia koherentinis šviesos pluoštelis atkūrimo metu.



6.2.3 pav. Tūrinės hologramos gavimo schema

Tūrinės hologramos kaip interferencinio filtro ypatumai labiausiai išryškėja tada, kai atspindintys paviršiai išsidėstę beveik lygiagrečiai su emulsijos paviršiumi, t. y. kai atraminė ir daikto bangos sklinda beveik priešpriešiais (6.2.3 pav.).

Tarkim, kad plokščioji atraminė lazerio banga krinta į foto plokštelę iš stiklo pusės ir perėjusi ($15 \div 20$) μm foto sluoksnį apšviečia daiktą, kuris ją

išsklaido ir sklinda beveik priešpriešiais atraminei bangai. Bangos interferuoja ir emulsijoje susikuria sistema iš kelių dešimčių tarpusavyje lygiagrečių pusskaidrių atspindinčių sluoksnių. Apšvietus tokią hologramą baltąja šviesa, ji atkuria tik vieną atvaizdą. Pakeitus atkuriančiojo pluoštelio kryptį, vaizdo atspalvis pakinta.

Natūraliųjų spalvų atvaizdą galima gauti tada, kai vienoje tūrinėje hologramoje užregistruojami interferenciniai vaizdai, apšviečiant daiktą bangomis, turinčiomis savo spektre tris pagrindines monochromatines dedamasias (raudoną, žalią ir mėlyną), kurios kartu sukuria baltosios šviesos pojūtį. Atkūrimo metu naudojant baltosios šviesos spinduolį, susidaro trys sutapdinti daikto atvaizdai trimis spektro spalvomis ir akis priima kaip vieną tūrinį atvaizdą, perteikiantį natūralųjį daikto nuspalvinimą.

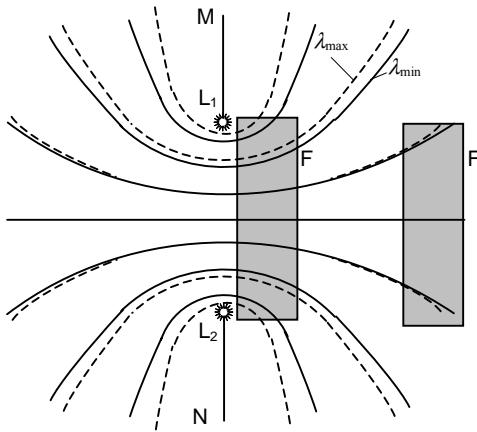
6.3. LAIKINIS IR ERDVINIS KOHERENTIŠKUMAS

Interferencinio vaizdo erdvėje stacionarumą, be kitų sąlygų, nusako šviesos koherentiškumas, t. y. sugebėjimas sudaryti nejudantį didelio kontrasto interferencinį vaizdą.

Nagrinėjant šviesos savybes dažnai manoma, kad šviesa visiškai koherentinė, kad spinduolis yra taškinis ir skleidžia be galo ilgą monochromatinę sferinių arba plokščiųjų bangų vorą. Iš tikrųjų visuomet realiųjų spindulių spinduliuotės koherentiškumas yra baigtinis. Ši spinduliuotė charakterizuojama *laikiniu ir erdviniu koherentiškumu*.

Laikinis koherentiškumas. Bet kokio spinduolio spinduliuotė charakterizuojama monochromatiškumu $\lambda_{\text{vid}}/\Delta\lambda$; čia $\Delta\lambda = \lambda_{\text{max}} - \lambda_{\text{min}}$ yra skirtumas tarp didžiausios ir mažiausios bangos ilgių verčių spinduliuotės spektre; $\lambda_{\text{vid}} = 1/2 (\lambda_{\text{max}} + \lambda_{\text{min}})$ – vidutinis spinduliuotės bangos ilgis. Šviesos monochromatiškumas, susijęs su elektromagnetinių virpesių dažnio kitimu ir tuo pačiu su bangos voros ilgiu, vadinamas *laikiniu* (arba *chromatinu koherentiškumu*). Laikinį koherentiškumą galima įvertinti nagrinėjant arba spektro plotį, arba bangų voros ilgį.

Tarkim, kad spinduolis skleidžia šviesą, kurios bangos ilgis kinta taip, kad spektro plotis menkas palyginus su bangos ilgiu. Kiekviena spektro dedamoji sukuria savąjį interferencinį vaizdą. Registravimo (eksponavimo) trukmėje, vidurkinant pagal laiką ir skirtingas spinduolio vietas, interferencinio vaizdo atskirų dedamųjų apšvieta susividurkina. Tai susilpnina kontrastą. Norint įvertinti šviesos monochromatiškumo įtaką interferencinio



6.3.1 pav. Interferencinių vaizdų persidengimas naudojant du taškinis spindulius, sklaidžiančius dviejų bangos ilgių šviesą

paviršiai atsiranda arba išnyksta, pereinant nuo vieno bangos ilgio prie kito, arti tiesių L_1M ir L_2N , ir todėl kaip tik čia labiausiai deformuojasi interferenciniai paviršiai. Tolstant nuo šių tiesių, deformacija silpnėja ir visiškai išnyksta prie ekvatorinės plokštumos, kur bet kokio bangos ilgio šviesa interferuojant stiprinama.

Užregistruotųjų paviršių skaičius šviesai jautriame storame sluoksnyje F priklauso nuo jo matmenų ir išsidėstymo vietos taškų L_1 ir L_2 atžvilgiu. Kai šviesai jautrus sluoksnis yra prie pat L_1 ir L_2 , didžiausio intensyvumo paviršiai apimami beveik pilnutinai. Tada interferencinis vaizdas registruojamas geriausiai. Kintant bangos ilgiui interferencinis vaizdas išplinta ir tuo labiau, kuo toliau nuo ekvatorinės plokštumos yra paviršiai. Kontrasto silpimas palaipsniui mažėja, artėjant prie ekvatorinės plokštumos.

Atomų spinduliuotės spektro plotį lemia bangos voros ilgis. Kadangi vora yra baigtinio ilgio, atomas per stebėjimo trukmę išspinduliuoja ne vieną kokį nors dažnį, o dažnių spektrą, kurio plotis tuo didesnis, kuo mažesnis voros ilgis. Lėtai gęstanti vora artima sinusoidai ir tuo pačiu monochromatinei bangai. Šiuo atveju, kaip žinoma, juostelės gerai išskiriamos netgi esant dideliame eigos skirtumui (kai spindulio matmenys pakankamai maži). Greitai gęstanti vora atitinka neharmoninius virpesius, t. y. nemonochromatinę spinduliuotę, ir juostelių skyra mažėja didėjant eigos skirtumui.

Anksčiau (žr. § 4.2) buvo naudotos sąvokos: koherentiškumo laikas τ_{koh} , nusakantis voros trukmę; ir koherentiškumo ilgis $L_{\text{koh}} = c \tau_{\text{koh}}$, nusa-

vaizdo kontrastui, panagrinėsimė du taškinis tarpusavyje koherentinius spindulius.

Tarkim, kad spindulius sklaidžia šviesą, kurios bangos ilgis netvarkingai kinta registravimo metu nuo λ_{min} iki λ_{max} (6.3.1 pav.). Susidariusių didžiausio intensyvumo hiperbolių skaičius N lygus sveikajam skaičiui pusbangių, telpančių atkarpoje L_1L_2 . Kintant bangos ilgiui kinta N ir didžiausio intensyvumo paviršių išsidėstymo erdvėje vaizdas deformuojasi. Didžiausio intensyvumo

kantis voros ilgi. Tarp koherentiškumo laiko τ_{koh} ir spinduliuotės spektro pločio $\Delta\nu$ (spektro linijos pločio) yra paprastas sąryšis:

$$\tau_{\text{koh}} = 1/\Delta\nu.$$

Tada koherentiškumo ilgis yra lygus:

$$L_{\text{koh}} = c\tau_{\text{koh}} = \frac{c}{\Delta\nu} = \frac{\lambda_{\text{vid}}^2}{\Delta\lambda}; \quad (6.3.1)$$

čia λ_{vid} – vidutinis bangos ilgis, atitinkantis vidutiniam spinduliuotės dažniui ν_0 ; $\Delta\lambda$ – spinduliuotės spektro plotis bangos ilgių skalėje.

Kai spinduolis taškinis, interferencinės juostelės matomos tik tada, kai eigos skirtumas Δ neviršija tam tikros vertės. Tarkim, kad spinduolis sklaidžia nedidelio spektrinio ruožo $\Delta\lambda$ bangas. Norint gauti kontrastines interferencines juosteles, reikia, kad interferencijos eilės $m = \Delta/\lambda$ pokytis, susijęs su bangos ilgio pokyčiu, būtų gerokai mažesnis už vienetą, t. y. turi būti tenkinama tokia nelygybė:

$$\Delta m = \Delta \frac{\Delta\lambda}{\lambda_{\text{vid}}^2} \ll 1.$$

Iš čia eigos skirtumas tarp dviejų interferuojančiųjų bangų

$$\Delta \ll \frac{\lambda_{\text{vid}}^2}{\Delta\lambda}. \quad (6.3.2)$$

Iš (6.3.1) ir (6.3.2) išraiškų išplaukia, kad:

$$\Delta \ll L_{\text{koh}} = c\tau_{\text{koh}},$$

t. y. norint gauti didelio kontrasto juosteles, reikia, kad eigos skirtumas būtų mažas palyginus su koherentiškumo ilgiu.

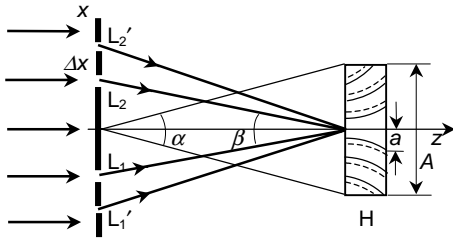
Holografijoje koherentiškumo ilgis apsprendžia leidžiamą eigos skirtumą tarp atraminio ir daikto pluoštelių. Tai riboja daikto gylį.

Erdvinis koherentiškumas. Dviejų šviesos pluoštelių kontrastingo interferencinio vaizdo sukūrimui nepakanka vien tik šviesos monochromatiškumo. Antroji svarbi sąlyga yra griežtas sklindančiųjų iš spinduolio šviesos spindulių kryptingumas, arba *erdvinis koherentiškumas*, kurį lemia realiųjų spindulių matmenys.

Erdvinis koherentiškumas nusako spinduliuotės koherentiškumą šviesos sklidimui statmena kryptimi. Realios spinduliuotės amplitudė ir fazė kinta ne tik bangos sklidimo kryptimi, bet ir plokštumoje statmenoje šiai

krypčiai. Atstumas skersai spindulio, kuriame virpesių fazė pakinta 180° , apibūdina erdvinio koherentiškumo didumą.

Kiekvieną taškinį spinduolį pakeiskime į du artimus spinduolius (6.3.2 pav.). Interferencinis vaizdas, sukurtas spinduolių L_1 ir L_2 šviesa,



6.3.2 pav. Interferencinių vaizdų užsiklojimas tūrinėje hologramoje naudojant dviejų taškinio spinduolių poras, skleidžiančias vieno bangos ilgio šviesą

hologramoje H pavaizduotas išsinišėmis linijomis, o sukurtas spinduo-
liais L'_1 ir L'_2 – punktyrinėmis. At-
stumas tarp interferencinio vaizdo
paviršių $a \approx \lambda/\beta$; čia β – kampas,
kuriuo matoma spinduolių L_1 ir L_2
pora. Kadangi didžiausias paviršių
poslinkis hologramos kraštuose turi
būti gerokai mažesnis už atstumą
tarp jų, interferencinio vaizdo kon-
trastas nesulpnėja, jei spinduolio

matmenys x linkme tenkina tokią sąlygą:

$$L_1 L'_1 = L_2 L'_2 = \Delta x \ll a \approx \frac{\lambda}{\beta}.$$

Kai hologramos matmuo A lygus atkarpos $L_1 L_2$ ilgiui, kampas $\beta \approx \alpha$.

Taigi kuo toliau nuo spinduolio yra holograma, t. y. kuo mažesnis kampas β , tuo galimi didesni spinduolio matmenys Δx .

Analogiškai įvertinama ir kitomis kryptimis: $\Delta y \ll \lambda/\beta$ ir $\Delta z \ll \lambda/\beta$. Iš to išplaukia, kad, norint gauti didelį interferencijos kontrastą, reikia arba turėti labai mažų matmenų monochromatinius spinduolius, arba nutolinti juos pakankamai dideliu atstumu. Abiem atvejais spinduolis turi tilpti erdvinio koherentiškumo tūryje, kuris nusakomas dydžiais Δx , Δy , Δz . Be to kuo geriau tenkinamos nelygybės, tuo didesnis erdvinis koherentiškumas. Taškinio spinduolio ($\Delta x = \Delta y = \Delta z = 0$) erdvinis koherentiškumas didžiausias ir lygus vienetui.

6.4. HOLOGRAFIJOS TAIKYMAS

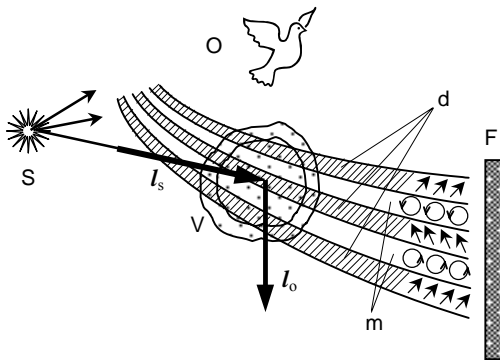
Praktinė holografijos pusė labai plati. Ji išiskverbė į visas tradicines taikomosios optikos sritis. Holografijos principai leido iš naujo nagrinėti kai kurias sritis infraraudonojoje bei labai aukštų dažnių technikoje, rentgeno ir elektroninėje mikroskopijoje, akustikoje, t. y. tas sritis, kuriose pagrindinį vaidmenį vaidina bangų interferencija. Holografija naudojama matuojant įvairių kūnų deformacijas, tiriant dujų srautų struktūrą aerodinamikoje, šalinant trūkumus optinėse sistemose, difrakcinių gardelių gamyboje, optinių atvaizdų kūrime, atpažinant simbolius skaičiavimo technikoje, saugant informaciją, radiolokacijoje ir t. t.

Vaizduojamoji holografija. Tai mokslinių tyrimų visuma ir hologramų paruošimo technika, skirta demonstravimui parodose, muziejaus eksponatu, reklamoje, mokomajame procese. Holografijos naudojimas tokiems tikslams svarbus, nes nėra kitų priemonių, atkuriančių originalą tokiu dideliu tikslumu ir plačia menine galimybe.

Priklausomai nuo hologramos paskirties ir objekto pobūdžio vaizduojamojoje holografijoje gali būti naudojamos įvairios užrašymo ir atkūrimo schemas, o taip pat įvairios registruojančios medžiagos. Pavyzdžiui, didelių tūrinių objektų demonstravimui sukurta eilė holografinių įrenginių, kuriuose objekto apžiūros kampas siekia 360° . Atraminis pluoštas sukuriamas išgautu kūginiu (arba sferiniu) veidrodžiu. Po hologravavimo objektas šalinamas, o jo vietoje stebėtojas pro plėvelę mato atkurtą atvaizdą, kurį galima matyti bet koku kampu.

Naudojamos taip pat hologramos, kurios atkuria atvaizdus lazerio šviesoje (monochromatinis atvaizdas). Tačiau vaizduojamojoje holografijoje privalumu pasižymi hologramos, atkuriamos baltąja šviesa. Labiausiai paplitusios yra atspindinčios tūrinės hologramos, sukuriamos priešpriešniais pluošteliais.

Greitai vykstančių procesų tyrimas. Į hologramą galima užrašyti judančiųjų objektų išsklaidytos spinduliuotės bangų laukus. Atspindžiu pasižymi ne tik stovinčios, bet ir bėgančios bangos, susikuriantios interferuojant įvairių dažnių bangų laukams. Tokios bangos susikuria, pvz., registruojant judančio objekto O hologramą, kai objektas išsklaido nejudančio koherentinio spindulio S spinduliuotę (6.4.1 pav.). Išsklaidytoji spinduliuotė, kurios dažnis krintančiosios atžvilgiu yra pakitęs dėl Doplerio reiškimo, sumuojasi su krintančiąja sukurdamą bėgančių bangų sistemą. Visa ši



6.4.1 pav. Judančio objekto holograma
(d – didžiausio, m – mažiausio intensyvumo
sluoksniai)

sistema slenka objekto judėjimo kryptimi. Jei supanti objektą erdvė (tūris V) užpildyta netiesine terpe, kurioje dielektrinė skvarba proporcinga šviesos intensyvumui, tai dėl netiesinės lauko sąveikos su terpe tūryje V susikuria bėgančiųjų veidrodinių paviršių sistema su frenelinio atspindžiu. Veidrodinių paviršių forma identiška izofazinių bangų sluoksnių paviršiams. Tokiai

judančiajai sistemai būdingos visos pagrindinės holografijos savybės. Spindulio S banga, atsispindėjusi nuo judančiųjų veidrodžių paviršių, tampa objekto banga, t. y. spindulio vektorius l_s tampa spindulio vektoriumi l_o . Atstumas tarp veidrodžių užtikrina tokią atspindėtų bangų sudėtį, kad stiprinama tik to bangos ilgio spinduliuotė, kuri eksponavo hologramą. Taigi holograma atkuria užregistruotos spinduliuotės spektrinę sudėtį. Be to skirtingai nuo įprastinės hologramos šiuo atveju judantieji veidrodžiai atkuria ne tik objekto bangos fazijų ir amplitudžių pasiskirstymą, bet ir objekto bangos dažnio pokytį dėl objekto judėjimo.

Holografinė interferometrija. Šiuo metodu galima stebėti užregistruotų skirtingais laiko momentais bangų interferenciją. Naudojant vieną ir tą patį atraminį pluoštelį vienoje foto plokštelėje galima du kartus paeiliui užregistruoti išsklaidytas daikto bangas. Jei tarp eksponavimų kokios nors daikto dalys pasislinko arba deformavosi, tai atgaminimo metu tarp dviejų vienu metu susikūrusių koherentinių daikto bangų bus tam tikras eigos skirtumas ir daikto atvaizdo paviršius bus padengtas interferencinėmis juostelėmis, analogiškomis įprastinėms vienodo storio juostelėms. Pagal šių juostelių išsidėstymą galima nusakyti pokyčius daikte, įvykusius tarp eksponavimų. Be to tiriamasis objektas gali šviesą atspindėti difuziškai, turėti sudėtingą reljefą ir šiurkštų paviršių, nes visi šie veiksniai vienodai veikia abi atstatomąsias daikto bangas. Nežiūrint to, kad bangų paviršių forma yra labai sudėtinga, šios bangos visiškai panašios ir sukuria paprastas ir lengvai stebimas interferencines juosteles.

Dvejopo eksponavimo metodu galima tirti ir pokyčius, vykstančius skaidriuose (faziniuose) objektuose. Objektą prašviečiamo pluoštelio kelyje statomas skaidrus sklaidantysis ekranas (matinis stiklas). Tada šviesa iš kiekvieno objekto taško patenka į visą hologramos paviršių. Kadangi šis ekranas ir objektas nejuda ir eksponuojama du kartus, jų optiniai nevienalytiškumai, kokie jie bebūtų, neįtakoja interferencinių juostelių išsidėstymui. Šios juostelės nusako lokalinius objekto optinio storio pokyčius tarp dviejų eksponavimų.

Holografijos naudojimas **mikroskopijoje** leidžia įveikti rimtą mikroskopo trūkumą kai yra didelis didinimas – labai mažą atvaizdo ryškumo gyli. Vietoje to, kad registruoti atvaizdą, galima stebėti daikto detales, esančias įvairiose plokštumose, stumdant tik optinę stebėjimo sistemą.

Naudojant ultragarso bangas galima sukurti **akustinę hologramą**. Garsas prasiskverbia į optiškai neskaidrius objektus, todėl akustine holograma galima sukurti trimatį vidinių objekto dalių atvaizdą, pvz., žmogaus kūno organų, vandenyno gelmių, todėl yra plačios galimybės panaudoti medicinoje, povandeniniuose tyrimuose, archeologijoje ir kt.

Specialiai pagamintos hologramos gali būti naudojamos kaip tam tikri optiniai elementai. **Holograma-zoninė plokštelė** gali atlikti kai kurias lęšio funkcijas, **holograma-difrakcinė gardelė** – dispersinis elementas spektriniuose prietaisuose, storasluoksnė holograma su lygiagrečiais atspindinčiais sluoksniais – **interferencinis filtras**.

Vienoje hologramoje galima užrašyti ir atkurti labai didelį informacijos kiekį. Labai svarbu, kad šios didžiulės informacijos dekodavimas atgaminimo metu vyksta paprastai ir labai greitai. Tai perspektyvu kompiuterių atminties sistemoms.

Naudojant programinę įrangą, galima sukurti įvairiausias hologramas ir gauti atvaizdus neegzistuojančių objektų.