

## 2 darbas

### OPTINIŲ SISTEMŲ YDOS

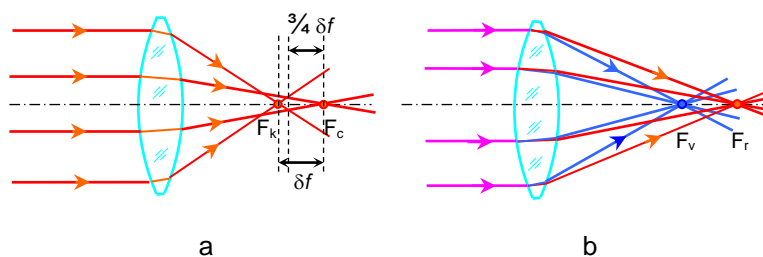
#### Užduotys

1. Nustatyti glaudžiamąjį lęšio ilginę sferinę ir chromatinę aberaciją.
2. Ištirti glaudžiamąjį lęšio astigmatizmą.
3. Ištirti įgaubtojo veidrodžio astigmatizmą.
4. Ištirti atvaizdo distorsiją.

#### Teorija

Paraksialinių spindulių (sklindančių arti optinės ašies) optinė sistema beveik ideali, t. y. tašką atvaizduoja tašku, tiesią liniją – tiese, plokštumą – plokštuma. Tačiau, kai šviesos pluoštelių plotis ir atstumas nuo optinės ašies yra baigtinis, pažeidžiamos paraksialiosios optikos taisyklės. Tada objekto kurio nors taško sklindžiami spinduliai, praėję pro optinę sistemą, kertasi ne viename atvaizdo plokštumos taške, o sukuria šviesią dėmelę, t. y. atvaizdas iškraipomas – pasireiškia ydos (aberacijos). Pagrindinės jų yra sferinė ir chromatinė aberacijos, astigmatizmas, atvaizdo paviršiaus iškraipymas, distorsija, koma.

Platesnio tarpusavyje lygiagrečių šviesos spindulių pluoštelių kraštiniai, labiau nutolę nuo optinės lęšio ašies spinduliai, perėję pro lęšį arčiau jo kraštų, kerta optinę ašį arčiau negu centriniai spinduliai (2.1 a pav., taškas  $F_k$ ), sklindantys arčiau optinės ašies (taškas  $F_c$ ). Šis reiškinys vadinamas *sferine aberacija*. Nuotolis  $\delta f$  tarp  $F_k$  ir  $F_c$  yra ilginės sferinės aberacijos charakteristika. Ekrane, pastatytame tarp  $F_k$  ir  $F_c$ ,



2.1 pav. Sferinė (a) ir chromatinė (b) aberacija

matomas šviesus skritulys, kurio spindulys proporcingas lęšio paviršiaus kreivumo spindulio kubui. Tai skersinė sferinė aberacija. Ji mažiausia (skritulio spindulys mažiausias) tada, kai ekrano atstumas nuo  $F_c$  lygus  $\frac{3}{4} \delta f$ . Tada ekrano plokštumoje, kuri vadinama *geriausio nustatymo plokštuma*, objekto atvaizdas yra ryškiausias.

Plonojo lęšio židinio nuotolį  $f$  su lęšio medžiagos lūžio rodikliu  $n$  sieja tokia lygtis:

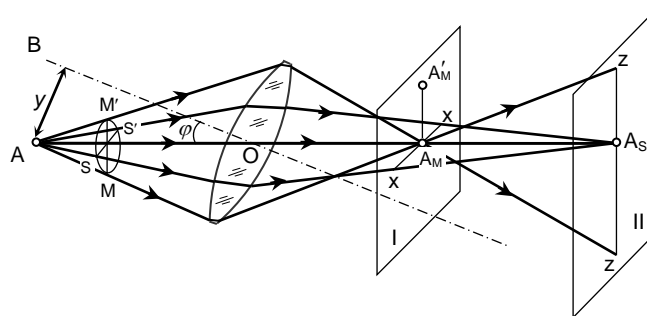
$$\frac{1}{f} = (n - 1) \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right);$$

čia  $r_1$  ir  $r_2$  – lęšį ribojančių sferinių paviršių spinduliai. Kadangi lūžio rodiklis  $n$  priklauso nuo šviesos bangos ilgio, t. y. pasireiškia šviesos dispersija, tai židinio nuotolis  $f$  taip pat yra bangos ilgio funkcija. Todėl lęšis be galo nutolusį nemonochromatinius spindulius skleidžiantį taškinį spindulų atvaizduoja ne tašku, o erdvėje nesutampančių skirtingų spalvų taškų rinkiniu, išsidėsčiusių tarp  $F_r$  ir  $F_v$  (2.1 b pav.). Objekto atvaizdas plokščiame ekrane iškraipytas, jo kraštai spalvoti. Ši lęšių yda vadinama *chromatine aberacija*.

Sferinė ir chromatinė aberacijos gali būti šalinamos arba mažinamos optiniuose prietaisuose, naudojant sudėtingas sklaidomųjų ir glaudžiamųjų lęšių sistemas iš skirtingo lūžio rodiklio medžiagų su skirtinga dispersija. Sklaidomųjų ir glaudžiamųjų lęšių sferinės ir chromatinės aberacijos yra priešingo ženklo, todėl bendroje sistemoje jos viena kitą silpnina.

Iš kiekvieno objekto taško į optinę sistemą sklindantys spinduliai sudaro kūgio formos bendracentrij pluoštelį, t. y. turi vieną bendrą tašką. Jei šie spinduliai, atsispindėję arba perėję pro optinę sistemą, išlieka bendracentriais, tai atvaizdas vadinamas *stigmatiniu*, t. y. kiekvieną objekto tašką atitinka vienas atvaizdo taškas. Pluoštelio bendracentriškumas išlieka ir tada, kai visi pluoštelį sudarantys spinduliai tarpusavyje sudaro labai mažą kampą ir optinė sistema kūgio aukštinės OA atžvilgiu (2.2 pav.) yra simetrinė.

Jei spindulių pluoštelis krinta į optinę sistemą dideliu kampu  $\varphi$ , tai antroji sąlyga netenkinama, ir perėjęs pro sistemą pluoštelis praranda bendracentriškumą. Švytinčiojo taško atvaizdas tampa *astigmatinis*. Astigmatizmas yra viena iš optinės sistemos geometrinių aberacijų. Jį lemia nevienodas optinio paviršiaus kreivumas įvairiose krintančio į tą paviršių šviesos pluoštelio skerspjūvio plokštumose.



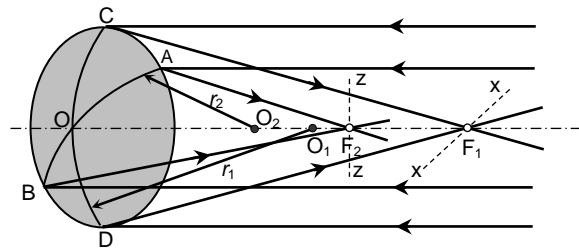
2.2 pav Lęšio astigmatizmas

Astigmatizmas reiškiasi tuo, kad bangos frontas deformuojasi bangai sklindant pro optinę sistemą, ir šviesos pluošteliu židinyse įvairiuose pjūviuose yra skirtingose vietose. Sklaidos figūra yra vienodai apšviestų elipsių šeima.

Plokštuma, einanti per sistemos pagrindinę optinę ašį BO ir spindulių pluošteliu simetrijos ašį AO, vadinama *meridianine* (joje yra atkarpa MM'), o jai statmena plokštuma, einanti per AO (joje yra atkarpa SS'), – *sagitaline*. Meridianinėje plokštumoje esantys spinduliai surenkami I plokštumos taške  $A_M$ , o spinduliai, sklindantys iš A ir esantys plokštumose, lygiagrečiuose su atkarpa MM', I plokštumoje sukuria atkarpą xx, statmeną brėžinio plokštumai. Sagitalinėje plokštumoje esantys spinduliai surenkami II plokštumos taške  $A_S$ , o visas spindulių pluoštas sudaro brėžinio plokštumoje šviesią atkarpą zz. Kai ekranas yra tarp  $A_M$  ir  $A_S$ , matoma elipsės formos šviesi dėmė, kurios pusašiai proporcingi  $ry^2$ ; čia y yra taško A nuotolis nuo optinės ašies OB, o r – lęšio spindulys. Tai įstrižinių pluoštelių astigmatizmas.

Lęšių ir veidrodžių astigmatizmas pasireiškia ir tada, kai nėra ašinės simetrijos. Jei veidrodžio paviršius nėra tiksliai sferinis, tai kiekvieną paviršiaus tašką O atitinka du kreivumo spinduliai (2.3 pav.). Vienas jų ( $r_1$ ) atitinka lanką COD, kitas ( $r_2$ ) – lanką AOB.

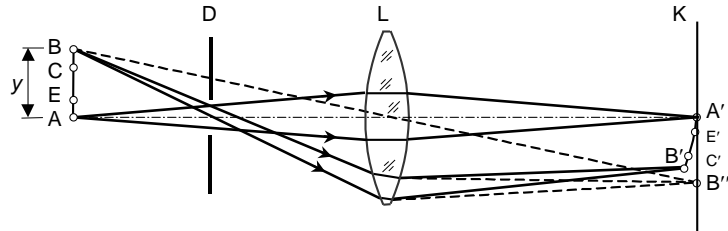
Plokštumos, kuriose yra tie lankai, statmenos viena kitai. Kadangi  $r_1 \neq r_2$ , toks paviršius spindulius, sklindančius iš begalybės, lygiagrečius su optine ašimi ir esančius plokštumoje  $O_1COD$ , surenka taške  $F_1$ , o esančius plokštumoje  $O_2AOB$  – taške  $F_2$ . Nuo



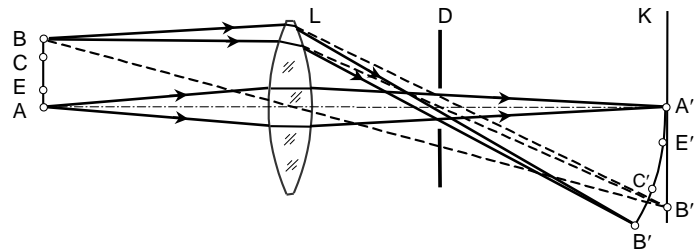
2.3 pav. Įgaubtojo veidrodžio astigmatizmas

veidrodžio atsispindėjęs spindulių pluošteliu atvaizdų erdvėje sudaro dvi viena kitai statmenas atkarpas xx ir zz (pastaroji yra brėžinio plokštumoje). Jei į veidrodį krintantys spinduliai sklinda iš taško, nesančio pagrindinėje optinėje ašyje, tai pasireiškia dar ir įstrižinių pluoštelių astigmatizmas (kaip lęšiuose).

*Distorsija* – viena iš optinės sistemos ydų – sukurtas atvaizdas iškraipomas dėl nevienodo įvairių atvaizdo dalių ilginio didinimo. Distorsinis atvaizdo iškraipymas geriau matomas, kai tarp objekto AB ir lęšio L (2.4 pav.) arba tarp lęšio L ir atvaizdo A'B' (2.5 pav.) yra skylinė diafragma D. Objekto ir lęšio matmenys turi būti dideli, lyginant su skylės skersmeniu. Pirmuoju atveju susidaro „statinės“ formos atvaizdas (2.6 b pav.). Iš tiesų, jei taškas A' yra paraksialinių spindulių sukurtas taško A atvaizdas (2.4 pav.), analogiškai taško B atvaizdas turėtų būti B''. Tačiau iš taško B sklindančių spindulių reali eiga yra kitokia. Šie spinduliai, pereinantys lęšį arčiau



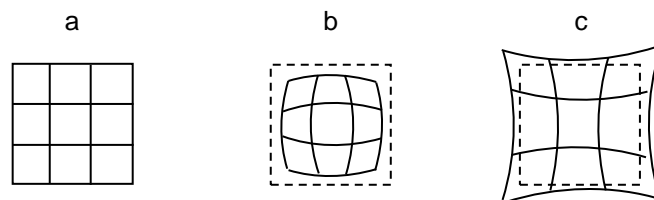
2.4 pav. Distorsinio „statinės“ formos atvaizdo susidarymas



2.5 pav. Distorsinio „pagalvės“ formos atvaizdo susidarymas

kraštų, lūžę susikerta arčiau lęšio negu spinduliai, pereinantys arčiau lęšio centro. Dėl to atvaizdas susikuria taške  $B'$ , t. y. arčiau lęšio ir optinės ašies negu  $B''$ . Šis efektas tuo stipresnis, ku objekto taškas yra toliau nuo optinės ašies. Taškui  $B$  poslinkis yra didžiausias,  $C$  – mažesnis, o  $E$  – dar mažesnis. Todėl vienodo ilgio atkarpų  $AE$  ir  $CB$  atvaizdų  $A'E'$  ir  $C'B'$  projekcijos ekrane  $K$  yra nevienodos. Projekcija  $A'E'$  yra didesnė negu  $C'B'$ . Centrinųjų objekto dalių atvaizdas padidintas labiau negu kraštinių.

Kai diafragma yra tarp lęšio ir atvaizdo (2.5 pav.), dėl ankščiau minėtų priežasčių taško  $B$  atvaizdas yra arčiau lęšio, bet toliau nuo optinės ašies negu  $B''$ . Dėl to kraštinių objekto dalių atvaizdas yra labiau padidintas negu centrinųjų ir atvaizdas yra „pagalvės“ formos (2.6 c pav.).



2.6 pav. Atvaizdai esant distorsijai  
( $a$  – objektas,  $b$  – „statinės“ forma,  $c$  – „pagalvės“ forma)

Kai pasireiškia distorsija, atvaizdas sukuriamas ne plokštumoje, o paraboliniame paviršiuje.  $A'$ ,  $E'$ ,  $C'$ ,  $B'$  yra parabolės taškai. Išryškėja dar viena lęšio yda – sukurto atvaizdo *paviršiaus iškraipymas*.

## Tyrimas

### 2.1. Sferinės ir chromatinės aberacijos nustatymas

Lęšio ilginės sferinės aberacijos tyrimui naudojamos dvi diafragmos. Vienos jų centre yra apskrita skylė, pro kurią sklinda siauras spindulių pluoštelis, o antroje – didelio skersmens žiedinė skylė. Abiem atvejais, nustačius ryškiausius objekto atvaizdus, išmatuojami atstumai nuo lęšio iki objekto  $a$  ir iki atvaizdo  $b$ . Pagal formulę

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{a} + \frac{1}{b} \quad (2.1)$$

skaičiuojami židinio nuotoliai  $f_k$  (kai naudojama žiedinė diafragma) ir  $f_c$  (kai skylinė) bei ilginė sferinė aberacija  $\delta f_{ab} = f_c - f_k$ .

Chromatinė aberacija gali būti tiriama naudojant raudoną ir violetinį šviesos filtrą bei vieną kurią nors diafragmą. Objekto atvaizdas kuriamas naudojant kiekvieną filtrą atskirai. Pagal (2.1) formulę apskaičiuojama židinio nuotolis  $f_r$  raudoniesiems ir  $f_v$  violetiniams spinduliams. Chromatinė aberacija įvertinama dydžiu  $\delta f_{chr} = f_r - f_v$ .

Ar pastebėsime chromatinę aberaciją ir ar nustatysime jos vertę, labai priklauso nuo lęšio skersmens santykio su atstumu nuo lęšio iki spinduolio. Be to, jei naudojama nedidelio skersmens skylinė diafragma, aberacija gali būti tokia menka, kad sunku ją pamatyti. Jei naudojama žiedinė diafragma, atvaizdai būna pakankamai ryškūs tik tada, kai šviesos filtrų spektrinis skaidris yra siauras.

Chromatinę aberaciją galima nustatyti ir kitu būdu. Tarp lęšio ir ryškaus nedidelių matmenų šviečiančio objekto parinkus tokį atstumą, kad objekto atvaizdas būtų padidintas, chromatinė aberacija patikimai nustatoma be diafragmų ir šviesos filtrų.

Kadangi „laužiamasis kampas“ lęšio kraštuose yra didžiausias, tai kraštinių spindulių kampinė dispersija yra didesnė negu centrinių, todėl pastačius ekraną  $K$  kuriame nors taške  $C$  (2.7 pav.) bus matomas objekto melsvo atspalvio atvaizdas (tegu ir neryškus) apsuptas raudonos aureolės. Išmatuojamas aureolės skersmuo  $R_1R_2$ , lęšio skersmuo  $AB$ , atstumas  $OC$  nuo lęšio iki ekrano bei atstumas  $OS$  nuo objekto iki lęšio. Iš trikampių  $ABS_r$  ir  $R_1R_2S_r$  panašumo gaunama lygybė:

$$\frac{R_1R_2}{OS_r - OC} = \frac{AB}{OS_r} .$$

Iš čia atstumas nuo lęšio iki optinėje ašyje esančio taško  $S_r$ , kuriame susikerta kraštiniai raudonieji spinduliai, yra lygus

$$OS_r = \frac{AB \cdot OC}{AB - R_1 R_2} .$$

Pagal lęšio formulę minėtiems spinduliams skaičiuojamas židinio nuotolis

$$f_r = \frac{OS_r \cdot OS}{OS_r + OS} .$$

Ekranas statomas kuriame nors taške D taip, kad objekto atvaizdas būtų apsuptas violetinės aureolės. Išmatuojamas aureolės skersmuo  $V_1 V_2$  ir atstumas  $OD$ . Iš trikampių  $ABS_v$  ir  $V_1 V_2 S_v$  gaunama išraiška:

$$OS_v = \frac{AB \cdot OD}{AB + V_1 V_2} .$$

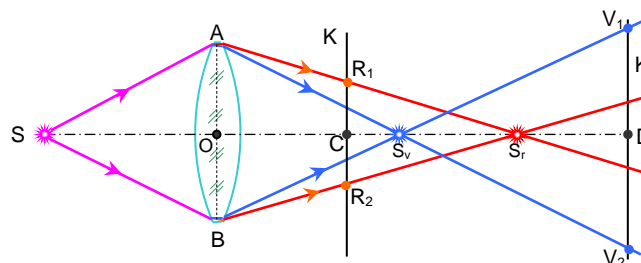
Pagal šią išraišką gautą  $OS_v$  vertę įrašę į lęšio formulę, skaičiuojamas židinio nuotolis violetiniams spinduliams:

$$f_v = \frac{OS_v \cdot OS}{OS_v + OS} .$$

Tada lęšio ilginė chromatinė aberacija  $\delta f_{chr} = f_r - f_v$  .

## 2.2. Astigmatizmo tyrimas

Šviestuvo anga uždengiama matiniu stiklu, kuriame nubraižytos vertikalios ir horizontalios linijos. Tarp šviestuvo ir ekrano statomas lęšis, kurį galima sukti apie



2.7 pav. Chromatinės aberacijos tyrimo schema

vertikalią ašį. Stumdant ekraną nustatomos tokios jo vietos, kad ekrane būtų ryškiausiai matomos horizontaliosios arba vertikaliosios linijos. Abiem atvejais išmatavus atstumus  $a$  ir  $b$  pagal (2.1) formulę skaičiuojami židinio nuotoliai  $f_M$  meridianiniams ir  $f_S$  sagitaliniams spinduliams. Jų skirtumas  $\Delta f = f_M - f_S$ , įvertinantis lęšio astigmatizmą, priklauso nuo lęšio posūkio kampo. Šią priklausomybę reikia ištirti ir atvaizduoti grafiškai. Atliekant šią užduotį, tarp spinduolio ir lęšio (arčiau lęšio) patariama pastatyti skylinę diafragmą, kuri mažina atvaizdo iškraipymus dėl komos.

Panašiai tiriamas ir veidrodžio astigmatizmas. Stumdant veidrodį išilgai optinės ašies horizontaliųjų ir vertikalųjų linijų atvaizdus patogiausia stebėti šalia šviestuvo pastatyttame ekrane. Pagal formulę

$$\frac{2}{r} = \frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}$$

skaičiuojami veidrodžio židinio nuotoliai esant ryškioms horizontalioms ir vertikaloms linijoms.

Įsitikinimui, kad astigmatizmą lemia veidrodžio paviršiaus kreivumo spindulių skirtumas, o ne šiek tiek įstrižai kritę spinduliai, reikia jį pasukti apie optinę ašį  $90^\circ$  kampu. Jeigu ekrane buvo ryškesnės vertikaliosios linijos, tai pasukus veidrodį turi išryškėti horizontaliosios, ir atvirkščiai.

### 3. Distorsijos tyrimas

Šviestuvus, lęšis ir ekranas statomi ant optinio suolo ir randamas padidintas objekto (ant šviestuvo gaubto uždėto kvadratinio tinklelio) atvaizdas. Distorsijos didumas priklauso nuo diafragmos atstumo iki lęšio bei nuo jos skersmens. Todėl stumdant diafragmą tarp lęšio ir šviestuvo randama tokia jos vieta ir skersmuo, kad būtų aiškiai matomas „statinės“ formos atvaizdas. Išmatavus centrinių ir kraštinių atvaizdo dalių ilgius bei nustačius atitinkamų objekto dalių ilgius skaičiuojama centrinių ir kraštinių objekto dalių didinimai.

Diafragma perkeliama tarp lęšio ir ekrano. Keičiant diafragmos vietą, sukuriamas „pagalvės“ formos atvaizdas ir vėl skaičiuojamas objekto dalių didinimas.