

Sisukord

2. Optilised instrumendid	2
2.0 Tutvumine mikroskoobiga	2
2.0.1 Sissejuhatus ja teoreetiline ülevaade	2
2.1 Pikksilma suurendus, vaateväli ja lahutusvõime	7
2.1.1 Tööülesanne	7
2.1.2 Töövahendid	7
2.1.3 Töö käik.....	7
2.2 Mikroskoobi suurendus, apertuurarv ja lahutusvõime	12
2.2.1 Tööülesanne	14
2.2.2 Töövahendid	14
2.2.3 Töö käik.....	14

2. Optilised instrumendid

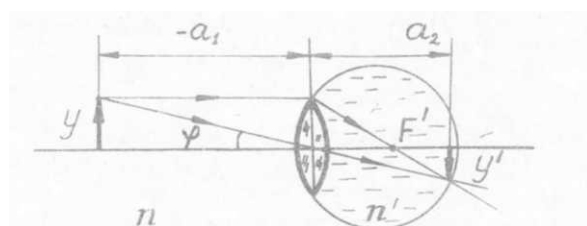
2.0 Tutvumine mikroskoobiga

2.0.1 Sissejuhatus ja teoreetiline ülevaade

2.0.1.1 Silma optilised omadused

Mikroskoopi kasutatakse väikeste lähedal asuvate objektide vaatlemiseks. Mikroskoobiga saadud objekti kujutist vaatleme silma abil ja seepärast peab mikroskoopide konstrueerimisel arvesse võtma ka inimese silma kui optilise süsteemi omadusi. Alljärgnevalt vaatleme silma kaht füsioloogilise ehituse eripära, mis on antud juhul olulised.

Silma põhiliseks läätses on silmaläätis, mis tekitab eseme y kujutise y' silma võrkkestal (vt. joonis 2.0.1).



Joon. 2.0.1. Kujutise tekkimine silma optilises süsteemis.

Silmaläätse taga asub klaaskeha, mille murdumisnäitaja ($n \ll 1,336$) erineb õhu murdumisnäitajast ($n \ll 1$). Kasutades silmaläätse jaoks õhukese läätses valemit, saame

$$\frac{n'}{a_2} - \frac{1}{a_1} = \frac{1}{f'} \quad (2.0.1)$$

kus f' on silmaläätse eesmine fookuse kaugus, a_1 - eseme kaugus silmani (kuni silmaläätse tsentrini), a_2 - kaugus silmaläätse keskpunktist võrkkestani. Silma puhul a_2 ja n' on konstandid. Selleks et silmast erinevatel kaugustel s asuvate esemete kujutised satuksid silma võrkkestale, peab vastavalt valemile (2.0.1) kauguse muutumisel muutuma ka silmaläätse fookuse kaugus f' . Selleks on silmal erilised lihased, mis muudavad silmaläätse kõverust (s.t. optilist tugevust) ja võimaldavad akommodeerida silma väga suurtes piirides. Silma optiline tugevus $1/f'$ on 60...70 dioptriat. Eseme lähendamisel täiskasvanud inimese silmale kuni 25 cm kaugusele toimub akommodeerumine raskusteta. Kaugust $L = 25$ cm nimetatakse parima nägemise kauguseks. Veelgi lähemal asuvate esemete vaatlemiseks peame juba silma pingutama.

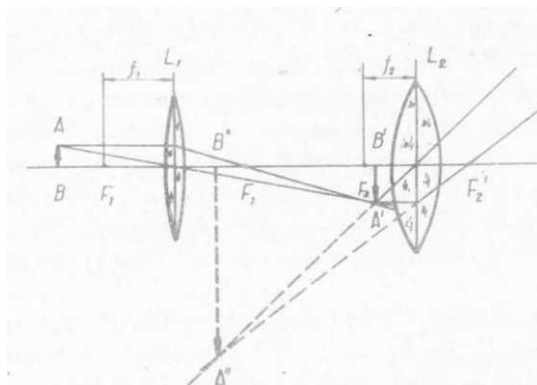
Vaatleme silma teist iseärasust. Valgus, mis satub silma võrkkestale, ärritab seal valgustundlikke retseptoreid. Need ärritused antakse edasi peaaugule, tekitades seal nägemistaju. Valgustundlikud retseptorid asuvad üksikest teatud väikesel kaugusel. Kui eseme kujutis on niivõrd väike, et ta katab ainult ühe valgustundliku retseptori, siis inimene näeb seda eset üksiku helendava punktina. Selleks et eseme äärmiste punktide kujutis satuks kõrvutiolevatele valgustundlikele retseptoritele, on vaja, et ese oleks nähtav teatud minimaalsest vaatenurgast φ_{min} suurema nurga all (vt. joon. 2.0.1). Nurk φ_{min} on ligikaudu $1'$ ja vastav eseme punktide vaheline kaugus on siis $70 \mu\text{m}$, kui ese asub parima nägemise kaugusel. Kujutise suurus on sel puhul $5 \mu\text{m}$. Vaatenurk määratakse valemist $tg \varphi = \frac{y}{a_1}$, s.t. vaatenurk sõltub nii eseme suurusel kui ka selle kaugusel silmani.

Niisiis võime teha järelduse: inimene ei näe liiga kaugete või liiga väikeste esemete detaile (näeb neid punktidenä).

2.0.1.2 Kujutise tekkimine mikroskoobis

Mikroskoobi optiline skeem on kujutatud joonisel 2.0.2. Lühikese fookuskaugusega lääts L_1 (suure suurenduse saavutamiseks) on objektiiviks, teine lühikese fookuskaugusega lääts L_2 - okulaariks.

Ese AB asub objektiivi ees objektiivi eesmisest fookuskaugusest veidi suuremal kaugusel. Seetõttu tekitab objektiiv esemest tõelise suurendatud kujutise $A'B'$.



Joon. 2.0.2. Kujutise tekkimine mikroskoobis.

Objektiivi poolt tekitatud suurendus avaldub valemiga

$$K_{obj.} = \frac{a_2}{a_1} \approx \frac{\Delta}{f_1},$$

kus f_1 on objektiivi eesmine fookuskaugus, a_1 - kaugus esemest objektiivini, a_2 - kaugus objektiivist kujutiseni, mis on praktiliselt võrdne kaugusega Δ objektiivi tagumisest fookusest okulaari eesmise fookuseni. (Mikroskoobi objektiivi fookuskaugus on tavaliselt väga väike.) Suurust Δ nimetatakse mikroskoobi optiliseks pikkuseks. Okulaar toimib luubina. Kujutis $A'B'$, mida võib vaadelda esemena läätse L_2 suhtes, asub läätse L_2 eesmise fokaaltasandi ja läätse vahel (praktiliselt fokaaltasandis). Okulaar tekitab suurendatud näiva kujutise $A''B''$ parima nägemise kaugusel L . Okulaari suurendus on

$$K_{ok.} = \frac{A''B''}{A'B'} \approx \frac{L}{f_2},$$

kus f_2 on okulaari eesmine fookuskaugus. Mikroskoobi kogusuurendus

$$K = \frac{A''B''}{AB} = \frac{\Delta L}{f_1 f_2} \quad (2.0.2)$$

ehk

$$K = K_{obj.} \cdot K_{ok.} \quad (2.0.3)$$

2.0.1.3 Lahutusvõime, apertuurarv ja mikroskoobi kasulik suurendus

Kahe punkti vahelist vähimat kaugust, mida mikroskoobiga võib eristada, nimetatakse mikroskoobi piirlahutuseks. Näiteks bioloogiliste preparaatide korral saame eristada ainult selliseid struktuuridetaile, mis on suuremad kui piirlahutus.

Lahutusvõimeks nimetatakse piirlahutuse pöördväärtust. Kogu mikroskoobi lahutusvõime oleneb objektiivi lahutusvõimest. Okulaar ei too esile mingeid preparaadi struktuuri täiendavaid detaile, ta vaid suurendab vaatenurka.

Optilise riista lõplik lahutusvõime on tingitud valguse lainelisest omadusest. Kui vaatleme objekte, millede mõõtmed on valguse lainepikkusega samas suurusjärgus, siis terava kujutise saamist takistab valguse kõrvalekaldumine sirgjoonelisest levimissuunast - valguse difraktsioon. Isegi ideaalse optilise süsteemiga (s.t. sellisega, kus on kõrvaldatud kõik aberratsioonid) ei saa liialt väikestest objektidest teravat kujutist, sest tekivad nn. difraktsioonirõngad, mis kattuvad ja objekti üksikosi ei ole võimalik eristada.

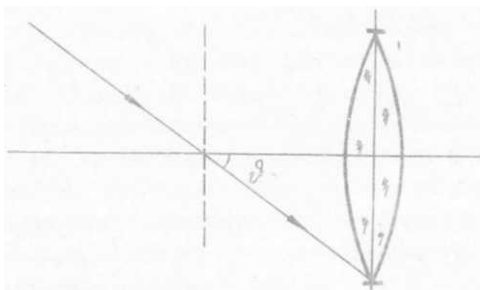
Vastavalt Rayleigh kriteeriumile loetakse lahutatavuse piiriks kahe punkti niisugust vahekaugust, mille puhul ühe punkti difraktsioonipildi tsepter langeb teise punkti difraktsioonipildi esimesele tumedale rõngale. Arvutus näitab, et mikroskoobis veel eristatavate punktide vahemaa d avaldub valemiga

$$d = \frac{0,61\lambda_0}{n \cdot \sin V}. \quad (2.0.4)$$

Selles valemis on λ_0 kasutatava valguse lainepikkus vaakumis. Suurust $A = n \cdot \sin V$ nimetatakse mikroskoobi apertuurarvuks, n on objektiivi ja objekti vahel oleva keskkonna murdumisnäitaja, V - nurk optilise telje ja vaadeldava objekti tsestrist objektiivi äärela tulevate kiirte vahel (joon. 2.0.3), $2V$ on mikroskoobi apertuurnurk. Valemi (2.0.4) tuletamisel on eeldatud, et kõige enam piirab mikroskoopi tulevat valguskiirte kimpu objektiivi raamistus.

Kui preparaati valgustada kondensoriga tekitatud koonduva kiirtekimbuga, siis lahutusvõime suureneb kuni 2 korda (s.t. võime eristada 2 korda väiksemaid detaile); sel juhul

$$d_0 = \frac{0,61\lambda_0}{2n \sin V}. \quad (2.0.5)$$



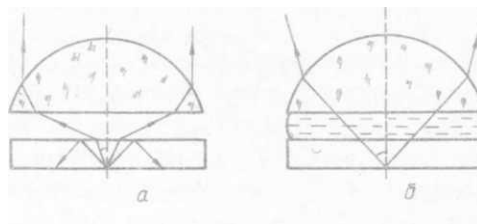
Joon. 2.0.3

Lahutusvõime suurendamiseks võib kasutada väiksema lainepikkusega valgust, näiteks ultravioletvalgust.

Mikroskoobi optilised detailid valmistatakse sel juhul kvartsist, mis ei neela ultraviolettkiiri. Ultraviolettmikroskoobiga saadud kujutis kas fotografeeritakse või siis seda vaadeldakse okulaari tegeliku kujutise tasandisse paigutatud luminesseeruva ekraanil.

Teine võimalus lahutusvõime suurendamiseks on suurendada apertuurarvu. Selleks kasutatakse immersioonobjektive. Need on sellised objektiivid, millede kasutamisel preparaadi katteklaasi ja objektiivi esimese lääts vaheline keskkond täidetakse vedelikuga (glütseriin, $n = 1,45$; monobroomnaftaliin, $n = 1,65$; seedripuuõli, $n = 1,515$; vesi, $n = 1,33$ jt.), mille murdumisnäitaja on lähedane klaasi murdumisnäitajale. Kiirte käik kuiva ja immersioonobjektivi puhul on toodud joonisel 2.0.4.

Kui preparaadi katteklaasi ja objektiivi vahel on õhk



Joon 2.0.4 Kiirte käik kuivas ja immersioonobjektiivis

(joon. 2.0.4,a), siis need kondensorist lahkuvad kiired, mis langevad katteklaasi ja õhu piirpinnale täieliku sisepeegelduse piirnurgast suurema nurga all, peegelduvad tagasi katteklaasi ja ei satu objektiivile. Peegeldumine toimub ka objektiivile läätse eesmiselt piimalt, kui kiirte langemisnurk objektiivile on küllalt suur.

Immersioonvedeliku puhul (joon. 2.0.4,b) levib valgus preparaadist objektiivini optiliselt peaaegu homogeenses keskkonnas, mistõttu on võimalik töötada suurema valguskoonusega. Mikroskoobi lahutusvõime ja ka kujutuse heledus suurenevad tunduvalt.

Kaasaegsete kuiva objektiiviga mikroskoopide apertuurarv on kuni 0,95. Immersioonobjektiivide puhul ($n = 1,5$) apertuurarv on $\approx 1,4$.

Visuaalsel vaatlemisel on oluline ka mikroskoobi kasuliku suurenduse mõiste. Mikroskoobi suurenduse valemist (2.0.2) näeme, et vähendades f_1 ja f_2 suureneb mikroskoobi suurendus. Praktikas kasutatakse harva suuremaid suurendusi kui 1500 - 2000. Alljärgnevalt vaatleme, miks see nii on.

Olgu eseme mõõt võrdne piirlahutusega d_0 . Kui parima nägemise kaugusel kujutise suurus on d' , siis suurendus on

$$K = \frac{d'}{d_0}.$$

Valemist (2.0.5) saame, et

$$K \approx \frac{Ad'}{\lambda_0}. \quad (2.0.5)$$

Nagu eespool mainitud, eristame normaalse silmaga piirjuhul objekti kaht sellist punkti, millede vaheline nurkkaugus on $1'$.

Selleks, et mikroskoobiga oleks mugav töötada, peab kujutise vaatenurk asuma vahemikus $2'$ kuni $4'$. Parima nägemise kauguselt vaatlemisel vastab see d' väärtustele 140 - 280 μm . Asendades need d' ja lainepikkuse $\lambda_0 = 0,555 \text{ m}$ väärtused valemisse (2.0.6), saame kasutamiseks sobiva suurenduste vahemiku

$$500 A < K < 1000 A.$$

Need suurendused, mis rahuldavad seda tingimust, on kasulikud, sest nende suurenduste puhul võime silmaga näha kõiki struktuuri üksikasju, mida mikroskoop kui optiline süsteem eristab. Asendades siia apertuurarvu väärtuse, mis kaasaegsetes immersioonobjektiiviga mikroskoopides on kuni 1,4, saame suurenduse jaoks tingimuse

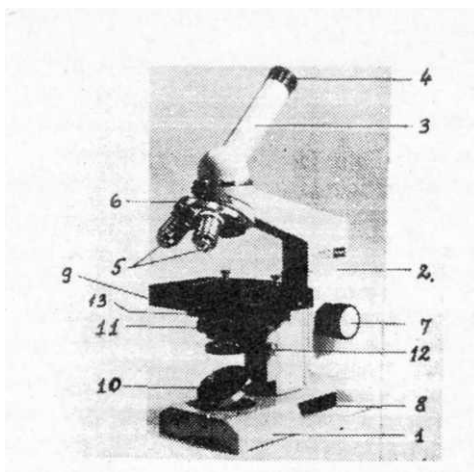
$$700 < K < 1400.$$

Suuremaid suurendusi nimetatakse kasututeks. Kasutu suurendus ei ole otstarbekas, sest sellega kaasneb aberratsioonide suurenemine ja väheneb vaatevälja valgustatus.

2.0.1.4 Mikroskoobi kirjeldus

Tööstus toodab vastavalt praktika vajadustele väga mitmesuguseid mikroskoobe. Käesolevas praktikumis tutvume lihtsa, väikese suurendusega mikroskoobiga ja bioloogilise mikroskoobiga "Biolam-C11" (mõõtemikroskoop maksimaalse suurendusega 1500).

Iga mikroskoobi konstruktsioonis saab eristada mehaanilist ja optilist osa. Mikroskoobi mehaaniline osa koosneb statiivist, tuubusest, esemelauast ja valgustussüsteemi hoidjast (joon. 2.0.5). Statiiv toetub massiivsele alusele 1, mis tagab mikroskoobi püsivuse. Statiivi sammast 2 on kas liikumatult kinnitatud või on kallutatav, et sellega oleks mugavam töötada.



Joon. 2.0.5. Mikroskoop „Biolam-C11“

Lihtsa mikroskoobi korral paigutame tuubuse 3 ühte otsa okulaari 4, teise otsa kruvitakse objektiiv 5. Keerulisematel mikroskoopidel on tuubuse külge kinnitatud objektiivide revolver 6, mis sisaldab endas 2-4 objektiivi ja mille abil saab objektiive kiiresti vahetada. Selleks et iga objektiivi telg alati ühtiks mikroskoobi optilise teljega, on revolvril seadeldis, mis fikseerib ta vastavates asendites. Tuubus tervikuna on hammaslati abil seotud sambaga. Tuubuse nihutamiseks on olemas nii jämeda kui ka peene fokuseerimise mehhanismid (nupud 7, 8). Esemelauale 9 asetatakse preparaati. Kaks lehtvedru suruvad preparaadi vastu esemelauda, selleks et vältida tema nihkumist vaatluste ajal.

Mikroskoobi optiline osa algab peeglist 10 (üks pool on tasane, teine nõgus), mis suunab valguse preparaadile. Keerulisematel mikroskoopidel on ka eriline läätsede süsteem - kondensoor 11, mis suunab peeglist tuleva valguse tugevalt koonduva kiirtekimbuna objektile.

Kondensoor (mikroskoobis C-11 kasutatakse kondensoorit KOH-3) on liigutatav üles-alla nupu 12 abil.

Objektiiv - mikroskoobi tähtsaim osa - kujutab endast läätsede süsteemi ühtses raamis. Eesmine, nn. frontaalne e. pealääts määrab ära suurenduse, teiste läätsede ülesanne on kujutiste vigade vähendamine. Objektiivile on peale kirjutatud apertuurarv ja temaga saadav suurendus. Mikroskoobi C-11 kolme objektiivi suurendused ja apertuurarvud on vastavalt 8 x 0,20; 40 x 0,65 ja 90 x 1,25 (õli-immersiooniga).

Okulaar koosneb harilikult kahest läätsesest: ülemisest silmapoolsest ja alumisest, mida nimetatakse kollektiiviks. Silmapoolne lääts ja kollektiiv asuvad teineteisest kaugusel, mis võrdub nende läätsede fookuskauguste summa poolvärtusega. Mõlemad läätsed asuvad lühikeses silindrilises torus, mis paigutatakse tuubuse ülemisse avasse.

Bioloogilise mikroskoobi kondensoor KOH-3 on varustatud iirisdiaphragmaga 13 ja kõrvalepööratava läätsel, millist kasutatakse töötamisel väikese suurendusega (3,5X või 8X) objektiividega. Komplektis olevat mattklaasi või valgusfiltrit saab asetada kõrvalepööratavasse raami. Kondensoor on vertikaalsuunas nihutatav spetsiaalse kruvi abil. Kondensoori apertuur on maksimaalne äärmises ülemises asendis.

2.1 Pikksilma suurendus, vaateväli ja lahutusvõime

2.1.1 Tööülesanne

Pikksilma ehitusega tutvumine. Pikksilma suurenduse, vaatevälja ja lahutusvõime määramine.

2.1.2 Töövahendid

Pikksilm statiivil, mõõtskaala, testtabel, mõõdulint või optiline kaugusemõõtja, nihik.

2.1.3 Töö käik

Töö edukaks sooritamiseks on eelnevalt vaja omandada geomeetrilise optika põhimõisted, tunda kiirte käiku pikksilmas ja optiliste süsteemide põhiosi.

2.1.3.1 Teoreetilised alused

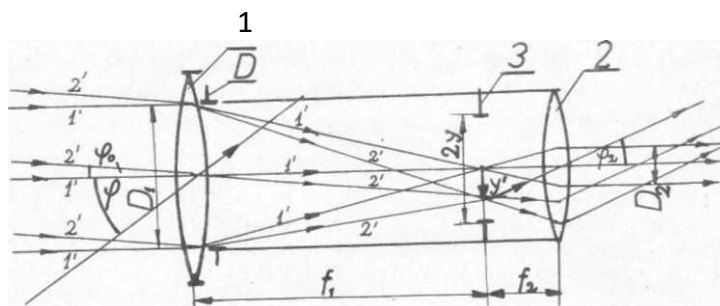
Kepleri pikksilm

Pikksilm on objektiivist ja okulaarist koosnev optiline süsteem, mis on mõeldud kaugete esemete vaatlemiseks. Kaugetelt esemetelt tulevaid kiiri võime lugeda paralleelseteks. Kuna inimese silm on pingutamata olekus teravustatud lõpmatusse ja pikksilmaga vaatlemine toimub silma abil, on pikksilm ehitatud nii, et ka sellest väljuvad kiired oleksid paralleelsed. Siit näeme, et pikksilmal tervikuna puuduvad fookused, s.t. et paralleelsed kiired jäävad ka pärast pikksilma läbimist omavahel paralleelseteks.

Selliseid optilisi süsteeme, millel puuduvad fookused, nimetatakse afokaalseteks.

Vaatleme lähemalt nn. Kepleri pikksilma, mis lihtsaimal juhul koosneb kahest positiivsest läätest (joon. 2.1.1). Pikafookuseline objektiiv annab vaadeldavast esemest oma tagumisse fokaaltasandisse tõelise ümberpööratud kujutise. Positiivne, lühikese fookuskaugusega okulaar on mõeldud objektiivi abil saadud kujutise vaatlemiseks. Okulaari abil näeme objektiivi poolt tekitatud eseme kujutist suurendatult ja samapidiselt nagu selle andis objektiiv. Objektiivi fokaaltasandisse, kus asub vaadeldava eseme tõeline kujutis, saame vajaduse korral paigutada skaala.

Et vältida mitmesuguseid aberratsioone, ei kasutata pikksilma objektiivi ja okulaarina kunagi lihtläätsi, vaid keerulisi läätsede kombinatsioone. Esemete õigetpidi vaatlemiseks tuleb Kepleri pikksilmas kasutada kujutist ümberpööravaid optilisi süsteeme, näiteks täiendavat positiivset läätsi või mitmesuguseid prismade kombinatsioone.



Joon. 2.1.1. Kepleri pikksilm.

1 - objektiiv, 2 - okulaar, 3 - vaatevälja diafragma. 5.3.1.2. Diafragmad pikksilmas.

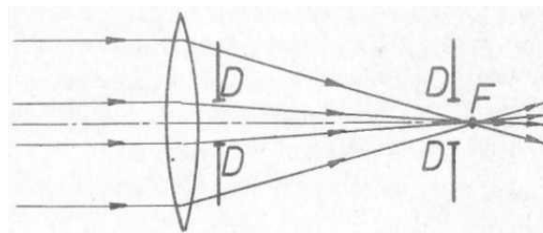
Nagu igas teiseski optilises süsteemis, on ka pikksilmas kiirtekimbud piiratud tänu läätsede lõplikule diameetrile, lisaks neile võib pikksilmas esineda täiendavaid kiirtekimpe piiravaid avasid. Kiirtekimbud võivad olla piiratud ka kõigi nende avade kujutiste poolt.

Vaatleme juhtu, kus pikksilma siseneb paralleelne kiirtekimp. Tavaliselt on selle teel esimeseks tõkkeks objektiivi servad. Kui kiirtekimp ei kohta oma edasisel teel uusi diafragmasid, mis veelgi piiraksid tema teed, osutub objektiiv selleks avaks, mis määrab ära pikksilma läbinud valgusvoo.

Diafragma ava või selle kujutist, mis piirab kõige enam pikksilma sisenevat kiirtekimpu, nimetatakse sisenemisavaks.

Tõelist diafragma, mille kujutis määrab sisenemisava, nimetatakse apertuuridiafragmaks. Paljudes teleskoopilistes süsteemides, nagu eespool vaadeldud juhulgi, on apertuuridiafragmaks objektiivi äär. Kui asetada objektiivi taha täiendav diafragma, siis valgushulk, mis läbib pikksilma, ei sõltu mitte ainult diafragma suurusest, vaid ka tema asukohast optilisel teljel. Näiteks joonisel 2.1.2, kus vahetult objektiivi taga asuv diafragma DD peab kinni suure osa objektiivile langenud valgusest, kuid paigutatuna objektiivi fokaaltasandi lähedusse, laseb läbi kogu objektiivi läbinud valgusvoo.

Sisenemisava kujutist, mille annab kogu pikksilma optiline süsteem, nimetatakse väljumisavaks. Tavaliselt valitakse väljumisava suurus võrdseks silmaavaga. Kui silmaava diameeter on väiksem kui pikksilma väljumisava (näiteks tugeva valgustuse korral, kui silmaava reflektorselt väheneb), piiratakse pikksilmast väljunud kiiri kõige enam silmaavaga. Sellisel juhul osutub pikksilma sisenemisavaks silmaava kujutis läbi pikksilma.



Joon. 2.1.2

Apertuuridiafragma koos sisenemis- ja väljumisavaga määrab pikksilma läbivate kiirtekimpude ristlõike. Kuid mitte igast kaugest esemepunktist väljunud paralleelsete kiirte kimp, mis läbib sisenemisava, ei läbi pikksilma tervikuna ja järelikult me temast kujutist ei saa. Näiteks joonisel 2.1.1 nurga φ all pikksilma objektiivi läbinud kiired ei anna kujutist, öeldakse, et optilise süsteemi vaateväli on piiratud. Vaateväljaks nimetatakse seda esemeruumi osa, mida me näeme läbi pikksilma. Kui objektiivi ja okulaari vahel puuduvad täiendavad tõkked, pole ka vaateväljal teravaid piire. Kujutise heledus väheneb vaatevälja servade suunas järk-järgult nullini. Tsentraalsest tunduvalt pimedam vaatevälja osa ei oma praktilist tähtsust ja pikksilmas kõrvaldatakse see tavaliselt nn. vaatevälja diafragma abil.

Ava, mis on sisenemisava keskpunktist nähtav väikseima nurga all, nimetatakse luugiks. Tõeline diafragma, mille kujutis on luuk, ongi vaatevälja diafragma. Vaatevälja teravaks piiramiseks on vaja, et luuk ühtiks objekti tasandiga. Järelikult vaatevälja diafragma peab pikksilmas asuma objektiivi fokaaltasandis, sest selle kaastasand asub lõpmatuses. Vaateväli on määratud selle diafragma läbimõõduga $2y$ ja objektiivi fookuskaugusega f_1 . Vaatevälja nurk δ optilise telje suhtes on leitav valemist

$$\tan \delta = \frac{y}{f_1}, \quad (2.1.1)$$

kus 2δ on kogu vaatevälja nurk.

Vaatevälja suurus võib olla antud kas nurgamõõdus või joonmõõdus, arvestatuna mingi kindla vahemaa peale (tavaliselt 1000 m).

Pikksilma suurendus

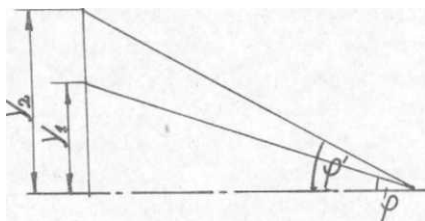
Nurk, mille all me näeme eset, kui vaatame teda kindlalt kauguselt, on seda suurem, mida suuremad on eseme joonmõõtmed (joon. 2.1.3). Joonmõõtmete ja vaatenurga vaheline sõltuvus pole lineaarne:

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{\tan \varphi'}{\tan \varphi}, \quad (2.1.2)$$

Kuna seos (5.2) kehtib ka igasuguse teleskoopilise süsteemi jaoks, võib pikksilma nurksuurenduseks lugeda suhet

$$\gamma = \frac{\tan \varphi_2}{\tan \varphi_1}, \quad (2.1.3)$$

kus γ - pikksilma nurksuurendus φ_2 - nurk, mille all näeme eset läbi pikksilma; φ_1 - nurk, mille all ese on nähtav palja silmaga.



Joonis 2.1.3

Olgu pikksilma optiline telg suunatud vaadeldava kaugel eseme ühte otsa. Kiired, mis tulevad eseme teisest otsast, moodustavad optilise teljega nurga (joon. 2.1.1). Objektiivi fokaaltasandisse tekib vaadeldava eseme kujutis y' , mis asub samaaegselt ka okulaari fokaaltasandis. Vaatleme kiirt, mis lähtub kujutise y_1 tipust ja suundub okulaari optilisse tsentrisse. Selle läbimisel ta suunda ei muuda - moodustab optilise teljega nurga φ_2 . Ülejäänud kiired kulgevad pärast okulaari läbimist paralleelselt vaadeldud kiirega. Kuna eseme kaugus võrreldes pikksilma pikkusega on väga suur, võime lugeda nurgad, mille all kiired jõuavad eseme tipust pikksilma objektiivi ja silma, võrdseiks $\varphi_1 = \varphi_2$. Jooniselt

2.1.1 näeme, et

$$\tan \varphi_1 = \frac{y'}{f_1}, \quad (2.1.4)$$

$$\tan \varphi_2 = \frac{y'}{f_2} \quad (2.1.5)$$

ja

$$\frac{f_1}{f_2} = \frac{D_1}{D_2}, \quad (2.1.6)$$

kus D_1 ja D_2 on vastavalt pikksilma sisenemis- ja väljumisavad.

Nurksuurendus avaldub seega

$$\gamma = \frac{\tan \varphi_2}{\tan \varphi_1} = \frac{f_1}{f_2} \quad (2.1.7)$$

ehk seosest (2.1.6)

$$\gamma = \frac{D_1}{D_2}. \quad (2.1.8)$$

Saab näidata, et teleskoopiliste süsteemide joon- ja nurksuurenduste vahel kehtib seos

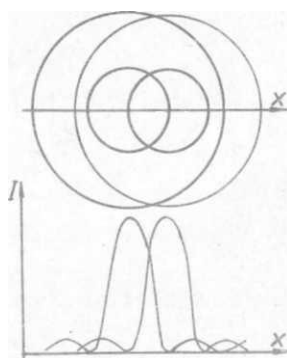
$$\gamma \cdot \beta = 1, \quad (2.1.9)$$

Kus β on süsteemi joonsuurendus.

Pikksilma lahutusvõime

Kujutist andvate optiliste süsteemide lahutusvõime iseloomustab nende võimet anda eseme kahest lähestikku asetsevast punktist kaks eraldatavat punktikujulist kujutist.

Lähtugu kiired lõpmata kaugelt punktallikalt. Kui eeldada, et pikksilma objektiiv on aberratsioonivaba, peaks ta oma fookusesse andma punktikujulist kujutist. Difraktsiooni tõttu objektiivi avalt saame objektiivi fokaaltasandisse difraktsioonipildi - heleda tsentraalse maksimumiga ja seda ümbritsevate tumedate ja heledate rõngastega. Kui valguskiired pärinevad kahelt lõpmata kaugelt punktvalgusallikalt - siis Rayleigh' järgi loetakse nende eraldatavuse piiriks sellist asendit, mille puhul difraktsioonipildi tsentraalne maksimum ühelt punktilt langeb ühte esimese miinimumiga teiselt punktilt (joon. 2.1.4). Sellisel juhul tsentraalsete maksimumide vahele jääva ala intensiivsus on ligikaudu 75 % maksimumide intensiivsusest. Sellist intensiivsuste erinevust suudab normaalne silm vabalt eristada.



Joon. 2.1.4. Valguse difraktsioonipilt objektiivi fokaaltasandis kahe punktvalgusallika korral.

Väikseim vahemaa veel eraldatavate punktide kujutiste vahel võrdub järelikut esimese difraktsioonirõnga raadiusega r_1 , mille suurus objektiivi fokaaltasandis on määratud valemiga

$$r_1 = 1,22\lambda \frac{f_1}{D_1}, \quad (2.1.10)$$

kus D_1 -sisenemisava läbimõõt, λ - valguse lainepikkus.

Piirnurkkaugus φ objektiivi poolt eraldatavate punktide vahel on määratud järgmise suhtega:

$$\varphi = \frac{r_1}{f_1} = 1,22 \frac{\lambda}{D_1} \text{ (rad)}. \quad (2.1.11)$$

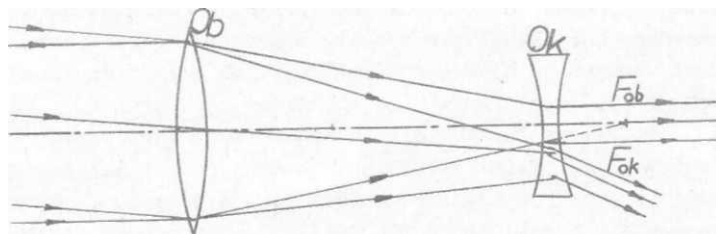
Selle piirnurga pöördväärtust nimetatakse objektiivi lahutusvõimeks A :

$$A = \frac{1}{\varphi} = \frac{1}{1,22} \frac{D_1}{\lambda}. \quad (2.1.12)$$

Okulaar pikksilma lahutusvõimet ei mõjusta. (Miks?)

Galilei pikksilm

Peale Kepleri pikksilma kasutatakse praktikas ka nn. Galilei pikksilma, mille optiline skeem on joonisel 2.1.5. Siin on objektiiviks samuti pikafookuseline positiivne lääts, kuid okulaariks on negatiivne lääts. Objektiivi tagumine ja okulaari esimene fookus langevad kokku. Galilei pikksilmaga näeme kujutist samapidiselt esemega. Kõik eespool toodu on rakendatav ka Galilei pikksilma korral.



Joon. 2.1.5 Galilei pikksilm.

2.1.3.2 Eksperiment

Suurenduse määramiseks suuname pikksilma seinal asuvale skaalale ja teravustame ta sellele. Vaatame skaalat ühe silmaga läbi pikksilma ja teisega samaaegselt pikksilma kõrvalt, nii et pikksilmas nähtav skaala kujutis ja otse silmaga nähtav skaala kujutis satuksid kohakuti (joon. 2.1.6). Seejärel määrame, mitu otseselt nähtavat skaalajaotist vastab ühele (või mitmele) pikksilmas nähtavale skaalajaotisele. Kõige mugavam on leida palja silmaga nähtavale tervele skaalale vastav skaalajaotiste arv. Ühele läbi pikksilma nähtavale skaalajaotisele vastav otseselt nähtav skaalajaotiste arv ongi pikksilma suurendus, sest väikeste nurkade korral võime nende nurkade tangensid asendada vastavate nurkade kaarte pikkusega (vt. valem (2.1.3)).

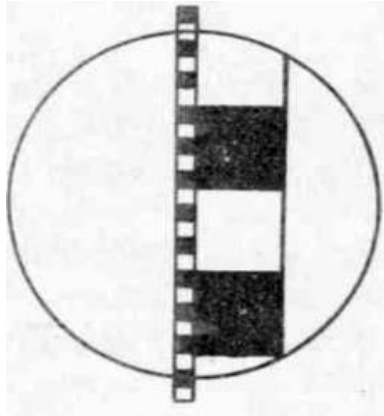
Teine meetod pikksilma suurenduse määramiseks on järgmine. Teravustame pikksilma lõpmatusse. Seejärel suuname ta ühtlaselt ja heledalt valgustatud objektile, kusjuures tuleb jälgida, et objektiivi ava oleks täielikult valgustatud, Pikksilma okulaari taha tuleb asetada paberileht, millel näeme valguslaiku. Liigutades paberilehte, saame sellele terava väljumisava kujutise, mille diameetri mõõdame nihikuga. Mõõtnud ära ka sisenemisavaks oleva objektiivi läbimõõdu, arvutame valemist (2.1.8) pikksilma suurenduse.

Vaatevälja määramiseks leiame skaala maksimaalse pikkuse a , mida on võimalik läbi pikksilma näha ja mõõdame kauguse b pikksilma objektiivi ja skaala vahel. Suhe a/b ongi vaatevälja suurus radiaanides. Kui korrutada saadud suhe 57,3, saame vaatevälja kraadides.

Pikksilma lahutusvõime määramiseks teravustame ta testtabelile. Joonis testtabelist ja seda iseloomustavad parameetrid on käesoleva töö Lisas 1. Testtabeli ruudustikes asuvate joonte omavahelised kaugused saab leida Lisa 1 Tabelist 1, kus on antud iga ruudukese kohta joonte arv ühes millimeetris.

Lahutusvõime määrame seosest $A = \frac{1}{\varphi}$. Piirnurga φ leiame suhtest x/d , kus x on kõige väiksem veel eraldatav joontevaheline kaugus ja d on pikksilma objektiivi kaugus testtabelist. Mõõtmisi sooritame iga testtabeli joonte laiuse juures vähemalt kahel korral. Ava suurust reguleerime objektiivi ees asuva diafragma abil. Diafragma läbimõõdu millimeetrites loeme tema servalt. Tulemuste põhjal joonestame sõltuvuse $A = f(D)$ graafiku (D - sisenemisava läbimõõt), võrdleme saadud tulemusi valemi (2.1.12) abil arvutatutega.

Kõikide tehtud mõõtmiste korral hindame vea suurust. NB! Väikseim eraldatav joontevaheline kaugus x ei võrdu joonte laiusega, vaid joonte keskpunktide vahelise kaugusega, s.o. kahekordse joone laiusega.



Joonis 2.1.6 Pikksilma suurenduse määramine

Küsimused

1. Võrrelge silma ja pikksilma lahutusvõimet.
2. Kui palju erineks pikksilma lahutusvõime, kui kasutada valget valgust?
3. Kas pikksilma lahutusvõime sõltub suurendusest?
4. Kuidas sõltub pikksilma vaateväli tema suurendusest?
5. Kas Galilei pikksilmas saab kasutada okulaarskaalat?
6. Näidata, miks pikksilma vaateväli on servadelt tunduvalt tumedam kui keskelt, kui puudub vaatevälja diafragma.
7. Joonistage mingisugune kujutist ümberpöörav optiline süsteem. Kui suur on selle suurendus?

Lisa 1

Testtabel pikksilma lahutusvõime määramisel

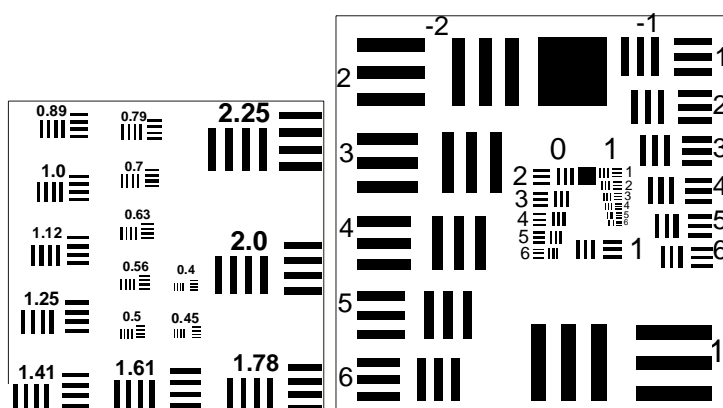
Testtabel koosneb joonte gruppidest, millel on erinev joontevaheline kaugus. Üks joontegrupp moodustub vertikaalselt ja horisontaalselt paiknevatest võrdse laiusega tumedatest ja heledatest ribadest. Gruppides paiknevate joonte tihedus on valitud nii, et igas järgmises grupis erineb see eelmisest $\sqrt[6]{2}$ korda. Joonisel 1(a) kujutatud testtabelis on antud heledast ja tumedast joonest koosnevate joonelementide laiused x millimeetrites. Seega näiteks elemendi 2.0 nii musta, kui ka heleda joone laiuse on 1.0 mm. Testtabel joonise 1 (b) vastab USAF 1951 lahutusvõime tabeli ülesehitusele. Siin on tabel jagatud gruppideks, igas grupis on 6 erineva joontevahelise kaugusega elementi. Grupid on tähistatud numbritega -2 , -1 , 0 ja 1 . Joontevaheliste kauguste erinevus naaberelementides vastab eespooltoodule – iga järgmise elemendi joone tihedus erineb eelmisest $\sqrt[6]{2}$ korda. Samuti erineb järgmise grupi esimese elemendi joontevaheline tihedus eelmise grupi viimase elemendi omast sama arv kordi. Paarisarvuliste gruppide -2 ja 0 esimesed elemendid on all paremal nurgas, muud elemendid vasakul vertikaalses tulbas,

paarituurvulistel gruppidel –1 ja 1 on kõik elemendid parempoolses tulbas. Elementide joonte tihedus joont/mm on esitatud tabelis 1, kusjuures joone all mõistetakse heleda ja tumeda joone komplekti nagu esimese testtabeli korral.

Tabel 1

Joonte arv millimeetris					
Testtabeli element	Grupi number				
		-2	-1	0	1
	1	0.25	0.50	1.00	2.00
	2	0.28	0.561	1.12	2.24
	3	0.315	0.630	1.26	2.52
	4	0.353	0.707	1.41	2.83
	5	0.397	0.793	1.59	3.17
6	0.445	0.891	1.78	3.56	

Optilise riista lahutusvõime on tema võime eristada objektide detaile. Testtabeli abil on lahutusvõime määratud selle elementide grupiga, milles on heledad ja tumedad jooned veel eristatavad ja mis eelneb grupile, kus ribad on omavahel kokku sulanud. Arvestades veel eristatavate joonte tihedust, arvutatakse lahutusvõime. Selline lahutusvõime määramine on loomulikult mõnevõrra subjektiivne ja sõltub sellest, mil määral peavad jooned töö tegija jaoks olema kokku sulanud.



Joonis 1. Lahutusvõime määramise testtabelid

Pikksilma sisenemisava muudame objektiivis ees asetseva diafragma, mille läbimõõtu määrame diafragma serval oleva skaala abil. Diafragma läbimõõt millimeetrites D võrdub skaala näit $S+2$ mm ($D = S+2$ mm). Diafragma avanemise ebasümmeetrilisusest ja ebatäpsuse tingituna ning sulgemise avanemise esineva loksutõttu tuleb selle näidu määramatuseks võtta vähemalt 1 mm.

1.2 Mikroskoobi suurendus, apertuurarv ja lahutusvõime

1.2.1 Tööülesanne

Määrata mikroskoobi suurendus ja apertuurarv, piirlahutus ja lahutusvõime.

1.2.2 Töövahendid

Mikroskoop, vertikaalne võrdluskala, poolläbipaistev peegel, 0,1 mm jaotistega skaala, väikese avaga plaadike, tükike skaalat 1 mm jaotistega, joonlaud.

1.2.3 Töö käik

1.2.3.1 Mikroskoobi suurenduse määramine

Suurenduse määramiseks kasutame lihtsat meetodit, mis annab häid tulemusi ainult väikeste suurenduste puhul. Seetõttu kasutame katses lihtsa konstruktsiooniga mikroskoopi. Paigutame mikroskoobi tuubuse ülemisse otsa okulaari, tuubuse alumisse otsa kruvime objektiivi. Asetame esemelauale objekti - klaasplaadi, millele on kantud skaala 0,1 mm jaotistega. Peeglita suuname valduse skaalale. Valgustamiseks kasutame kas loomulikku valgust või spetsiaalset valgustit. Nihutame tuubust fokuseerimise käepideme abil kuni skaala kriipsud on mikroskoobis teravalt nähtavad. Asetame mikroskoobi kõrvale parima nägemise kaugusele (25 cm) mikroskoobi teljest vertikaalse võrdluskala (skaala jaotised on 1 mm). Mikroskoobi okulaari peale paneme mikroskoobi teljega 45°-se nurga all oleva poolläbipaistva peegli. Peegel võimaldab üheaegselt vaadelda aluslaual asetsevat skaalat ja kõrval asetsevat vertikaalset skaalat. Aluslaual asetsevat skaalat tuleb nihutada, kuni mõlemate skaalade kujutised kattuvad. Mõlemad skaalad peavad olema enam-vähem ühesuguse valgustatusega, vajaduse korral muudame peegli kallet.

Loendame, mitu võrdluskala jaotist n_1 vastab mikroskoobis nähtava skaala jaotiste arvule n_2 . Kuna võrdluskala jaotis on aluslaual oleva skaala jaotistest 10 korda suurem, siis võime kirjutada

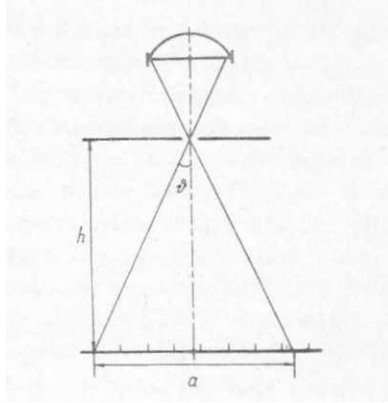
$$K = \frac{n_1}{n_2} 10 .$$

1.2.3.2 Apertuurarvu ja lahutusvõime määramine

Apertuurarvu määramiseks kasutame ka lihtsat meetodit, mis on sobiv ainult väikeste suurendustega mikroskoopide puhul.

Kõigepealt määrame apertuurnurga (vt. joon.2.2.6). Asetame aluslaual väikese avaga plaadikese ja teravustame mikroskoobi avale (vajaduse korral nihutame plaadikest, nii et ava kujutis oleks vaatevälja keskel).

Pöörame valgustava peegli horisontaalseks ja asetame tema peale plastmassist skaala hästi teravate skaala joontega (skaala jaotised on 1 mm). Valgustame skaalat tugevasti. Ettevaatlikult, et mitte rikkuda kujutise teravust, eemaldame okulaari. Vaadates palja silmaga tuubusesse, püüame näha skaala teravat kujutist. Loetleme nähtud jaotiste arvu ja arvutame kogu nähtud skaala lõigu pikkuse a (vaata joon. 2.2.6). Joonlaua abil määrame kauguse h peeglit asuvalt skaalalt kuni avaga plaadini. Leiame $tg \vartheta = \frac{0,5a}{h}$, ϑ ja $\sin \vartheta$.



Joon. 2.2.6. Apertuurnurga määramine.

Kuiva objektiivi puhul $n = 1$ ja mikroskoobi apertuurarv võrdub $A = \sin\theta$.

Arvutame mikroskoobi piirlahutuse d . Kui preparaati valgustatakse koonduva kiirtekimbuga (kondensor), siis leiame d_0 valemi (2.2.5) abil, kui valgustatakse paralleelse kiirtekimbuga, siis kasutame valemit (2.2.4). Võtame $\lambda_0 = 0,55\mu\text{m}$.

Leiame ka lahutusvõime $1/d_0$.

Kõik mõõtmistulemused ja arvutused kanname protokollis.