



Inovace a zvýšení atraktivity studia optiky
reg. č.: CZ.1.07/2.2.00/07.0289

Optické přístroje 1

OPT/OP

Jan Ponec

Určeno pro studenty 2. ročníku bakalářského studia oboru
Přístrojová optika a 2. ročníku navazujícího studia oboru

Optika a optoelektronika

Olomouc 2011

Tento projekt je spolufinancován Evropským sociálním fondem a
státním rozpočtem České republiky

Na přednáškách a cvičeních předmětu Optické přístroje by se měli studenti seznámit se stavbou některých důležitých přístrojů, jejichž médiem nesoucím informaci je světlo, respektive záření, které světlo z obou stran blízce obklopuje, tj. UV záření a IČ záření.

V této učební pomůcce jsou přednášky rozděleny do jedenácti samostatných bloků.

1. Úvod do teorie optických přístrojů
2. Základní optické parametry optických přístrojů
3. Spektrální fotometry
4. Optická stavba mikroskopů
5. Vznik obrazu v mikroskopu a jeho ovlivňování
6. Optická stavba dalekohledů
7. Osvětlovací soustavy a kolimátory
8. Displeje
9. Prezentační technika
10. Snímací objektivy
11. Fotoaparáty

Při tvorbě tohoto učebního textu bylo využito řady skript, knižní literatury a informací z Internetu. Jednotlivé kapitoly jsou informační, texty je nutno doplnit studiem dalších pramenů. Kapitoly 4, 5 a 6 byly zpracovány dle skript:

Keprt, E.: Teorie optických přístrojů I., Teorie a konstrukce dalekohledů a zaměřovačů. SPN Praha 1965.

Keprt, E.: Teorie optických přístrojů II., Teorie a konstrukce mikroskopu. SPN Praha 1966.

Tato skripta, resp. jejich přepracovaná vydání od doc. J. Klabazni doporučuji pro další studium problematiky dalekohledů a mikroskopů.

Obsahové teze k jednotlivým blokům výuky

1. Úvod do teorie optických přístrojů

Stavba optického přístroje, zdroj záření, osvětlovací soustava, vlastní optický blok, detektor obrazu a vazba mezi nimi. Základní optické prvky z nichž se skládají optické přístroje.

2. Základní optické parametry optických přístrojů

Ohnisková vzdálenost, aperturní clona, vstupní a výstupní pupila, polní clona, velikost zorného pole, vinětační clony, měřítko zobrazení, zvětšení, rozlišovací mez, rozlišovací schopnost.

3. Spektrální fotometry

Popis spektrálních fotometrů, hranolový a mřížkový monochromátor, jednocestné a dvoucestné přístroje. Diodový spektrální fotometr. Kompaktní spektrální fotometr.

4. Optická stavba mikroskopů

Lupa, dvoustupňový a třístupňový mikroskop, dalekohledová lupa. Hlavní optické parametry mikroskopů. Objektivy a okuláry mikroskopů, další optické vybavení mikroskopů.

5. Mikroskopovací techniky

Vznik obrazu v mikroskopu. Metody pozorování: fázový kontrast, polarizační mikroskopie, interferenční mikroskopie, fluorescenční mikroskopie, konfokální mikroskopie.

6. Optická stavba dalekohledů

Základní typy dalekohledů, rozdíly. Hlavní optické parametry dalekohledů. Binokulární dalekohledy. Objektivy a okuláry dalekohledů, převracující soustavy.

7. Osvětlovací soustavy a kolimátory

Kondenzory, reflektory, projektory, Köhlerova osvětlovací soustava. Přehled osvětlovacích soustav v závislosti na měřítku zobrazení. Kolimátory a autokolimátory.

8. Displeje

Optoelektronické obrazové zobrazovače CRT, LCD, plazmové, OLED, LCOS, elektronický inkoust, případně další.

9. Prezentační technika

Optická stavba diaprojektoru a epiprojektoru. Dataprojektory typu TFT, 3x LCD, DLP, CRT, ILA a D-ILA, resp. další.

10. Snímací objektivy

Druhy snímacích objektivů v závislosti na poloze předmětů a měřítku zobrazení. Fotografické objektivy- normální, širokoúhlé, teleobjektivy a zoomy. Základní parametry snímacích objektivů- relativní apertura, clonové číslo, hloubka ostroty, rozlišovací schopnost, funkce přenosu modulace.

11. Fotoaparáty

Stavba různých typů fotoaparátů- kompakty, zrcadlovky, ateliérové přístroje, jejich specifiky. Objektivy fotoaparátů, hledáčky a jiné příslušenství. Zvláštnosti stavby digitálních fotoaparátů. Expozice a prvky zajišťující správnou expozici obrazu. Zaostřovací mechanismy fotopřístrojů. Metody stabilizace obrazu.

1. Úvod do teorie optických přístrojů

Stavbu každého optického přístroje můžeme rozložit na několik typických stavebních prvků, které se s malými obměnami, dle konkrétního provedení daného optického přístroje opakují. Jednoduché blokové schema optického přístroje by mohlo vypadat následovně:

Zdrojový blok → blok úpravy záření zdroje → vlastní pracovní blok → detektor záření → registrační blok.

Konkrétní optické přístroje se liší existencí a provedením jednotlivých bloků.

Např. dalekohled má pouze pracovní blok, spektrální fotometr má naopak všechny vyjmenované bloky.

Vždy je nutno pamatovat na to, že všechny části optického přístroje musí „spolupracovat“, to znamená, že zdroj záření musí generovat takový rozsah vlnových délek záření, který je potřeba pro správnou činnost pracovního bloku, spektrální citlivost detektoru musí být v této oblasti dostatečná a všechny optické prvky, které zpracovávají příslušné záření musí mít v tomto rozsahu spektra dobrou propustnost.

1.1. Zdrojový blok

Hlavní částí zdrojového bloku je vlastní *zdroj záření*. Můžeme jej charakterizovat mimo jiné těmito parametry:

- zářivý výkon

- monochromazie

- koherence.

Vždy volíme *zářivý výkon zdroje* takový, aby všechny ostatní bloky pracovaly v optimálním režimu, bez zbytečného zahřívání, ale pokud možno tak, aby byl dobrý odstup užitečného signálu od šumu.

Co se monochromazie týče používáme zdroje záření *monochromatické* a *polychromatické*. Mezi zdroje polychromatické můžeme počítat zdroje „bílého“ světla i zdroje „barevného“ světla, tedy zdroje bílého světla doplněné širokopásmovými barevnými filtry.

Pokud je to nutné, např. u interferometrů, vyžadujeme, aby zdroj záření měl vysoký *stupeň koherence*.

1.1.1. Monochromatické zdroje světla

Monochromatické zdroje světla obvykle charakterizujeme dominantní vlnovou délkou světla λ_{\max} a spektrální pološířkou $\Delta\lambda$. Možno udat i koherenční délku a stav polarizace.

Patří sem: - *nízkotlaké spektrální výbojky*

- *lasery*

- *kombinace žárovky a monochromatického interferenčního filtru.*

1.1.1.1. Nízkotlaké spektrální výbojky

Připomínám, že pro optickou praxi jsou důležité spektrální čáry d, C, F pro starší měření a nově čáry e, C', F'. Výbojky se obvykle používají v kombinaci s absorpčními filtry pro potlačení nežádoucích spektrálních čar, generovaných příslušnou výbojkou. V následující tabulce jsou vypsány nejdůležitější Fraunhoferovy spektrální čáry, jejich vlnové délky a prvky, jež tato záření emitují.

(Žlutá čára sodíku je ve skutečnosti dublet o vlnových délkách 589,0 a 589,6 nm, který ve spektrálních fotometrech o malém rozlišení splývá v jednu čáru.)

Nízkotlaké spektrální výbojky nevynikají světelným výkonem s čímž je nutno při konstrukci ostatních optických prvků a bloků počítat.

λ /nm/	symbol	prvek	spektr. oblast
312,6	u2	Hg	UV
334,1	u1	Hg	UV
365,0	i	Hg	UV
404,7	h	Hg	fialová
435,8	g	Hg	modrá
480,0	F'	Cd	modrá
486,1	F	H ₂	modrá
546,1	e	Hg	zelená
587,6	d	He	žlutá
589,3	D	Na	žlutá
643,8	C'	Cd	červená
656,3	C	H ₂	červená
768,2	A'	K	červená
852,1	11	Cs	IR
1013,9	12	Hg	IR
1128,6	13	Hg	IR
1395,1	14	Hg	IR
1529,6	15	Hg	IR
1813,1	16	Hg	IR
1970,1	17	Hg	IR
2249,3	18	Hg	IR
2325,4	19	Hg	IR

1.1.1.2. Lasery

Často, zvláště pokud požadujeme aby záření bylo koherentní se používají různé typy laserů. Tyto můžeme dělit podle různých kritérií, např. dle:

- *aktivního prostředí*
- *typu rezonátoru*
- *výkonu*
- *generované vlnové délky záření* (úzce souvisí s aktivním prostředím) aj.

Aktivní prostředí může být plynné nebo pevnolátkové

Typ rezonátoru má vliv na tvar vystupujícího svazku záření i na stav polarizace tohoto záření.

Výkonu záření laseru má vliv na jeho zařazení do bezpečnostní třídy a tím i na konstrukční požadavky s ohledem na bezpečnost provozu přístroje.

Zde je nutno připomenout, že *generované vlnové délky záření* laserů neodpovídají Fraunhoferovým spektrálním čarám.

Poznámka: Jelikož laserům jsou věnovány další přednášky, nebudeme se jimi zde dopodrobna zabývat .

1.1.1.3. Kombinace žárovky a monochromatického interferenčního filtru

Pokud nepožadujeme žádné zvláštní vlastnosti generovaného záření je výhodné využití kombinace žárovky, nejlépe halogenové a interferenčního monochromatického filtru. Je to levná varianta a konstrukčně výhodná.

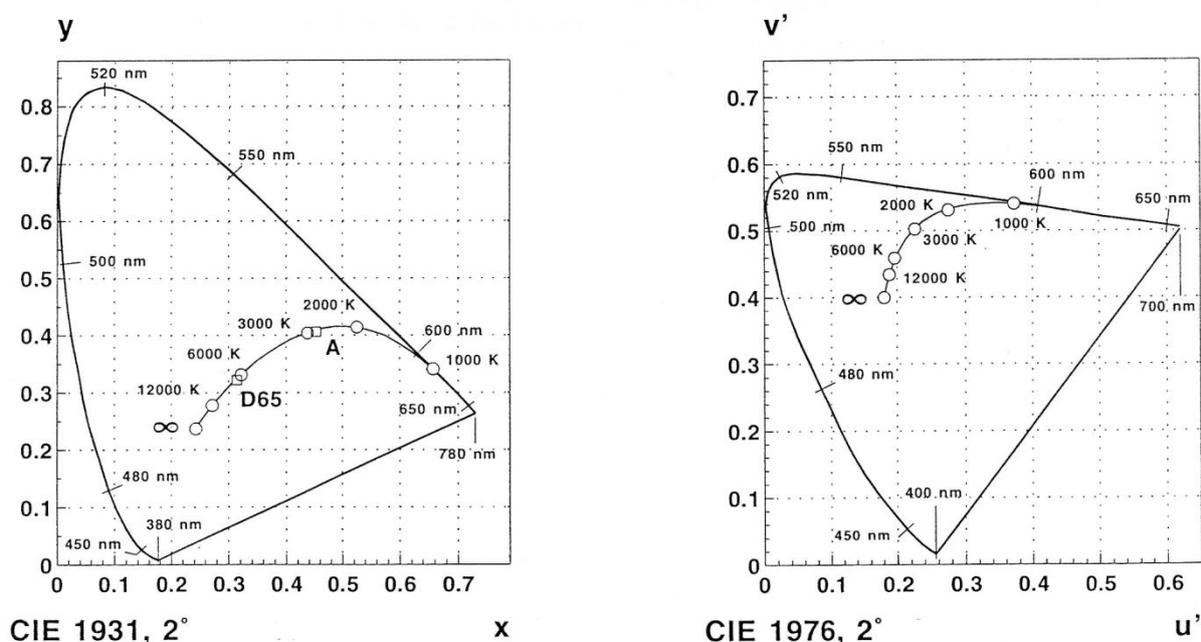
Dominantní vlnovou délku propustnosti interferenčního monochromatického filtru lze při návrhu nastavit na libovolnou hodnotu, což je výhoda oproti nízkotlakým výbojkám, kde jsme odkázáni na přesně daná záření jednotlivých

prvků. Rovněž propustnost dielektrických interferenčních filtrů je dostačující, aby výkon žárovky nemusel být extrémní.

1.1.2. Zdroje bílého světla

V laboratorní praxi přichází v úvahu převážně **halogenové žárovky**. Možno užívat i různé **vysokotlaké výbojky** s širokým spektrem vyzařování, někdy i svítící **obrazovky**, pokud požadujeme velkoplošné, relativně rovnoměrně zářící zdroje.

Tyto zdroje leží kolem křivky bílých světel v kolorimetrickém trojúhelníku, jak je vidět na obrázku 1.1.

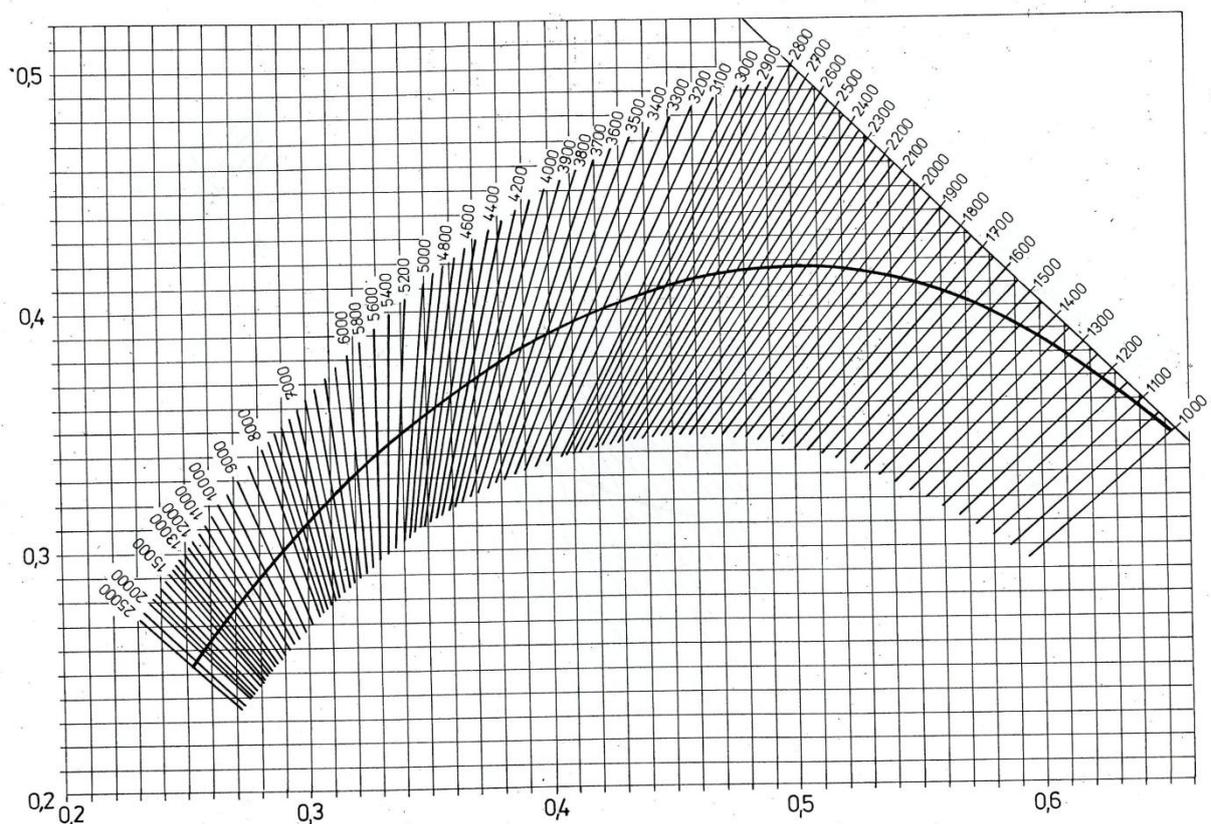


Obr. 1.1.

Pro číselný údaj chromatičnosti světla světelného zdroje (monochromatického i polychromatického) se užívají buď trichromatické složky X, Y, Z nebo trichromatické souřadnice x, y spolu s trichromatickou složkou Y; v tomto případě pak trichromatické souřadnice udávají polohu bodu barvy v kolorimetrickém trojúhelníku a složka Y je fotometrickou veličinou úměrnou jasů zdroje.

Barvu světla bílých zdrojů je možno vystihnout též pomocí *teploty chromatičnosti*. Jednotkou teploty chromatičnosti je K, kelvin. Někdy se udává teplota chromatičnosti formou převrácené hodnoty teploty chromatičnosti, daná výrazem $10^6 / T_i$ (kde T_i je vyjádřeno v kelvinech) a jednotkou je MK^{-1} . Tato hodnota nám udává jakou teplotu v Kelvinech by mělo absolutně černé těleso, vyzařující stejnou barvu co se polohy v kolorimetrickém trojúhelníku týče. Jelikož reálné zdroje bílého světla nejsou černými zářiči, je jejich spektrální složení vyzařování od černého tělesa odlišné. Proto, pro bližší určení o jaký zdroj jde používáme několik odlišných označení.

Pro přibližné určení teploty chromatičnosti ze znalosti trichromatických souřadnic slouží následující nomogram, obr.1.2.



Obr.1.2.

Teplotou chromatičnosti T_c označujeme zdroje, jež se svým spektrálním průběhem podobají černému (šedému) zářiči.

Pokud zdroj má spektrální průběh podobný jako Planckův zářič, leží poblíž křivky teplotních (Planckových) zářičů (viz obr.1) je možno jeho teplotu chromatičnosti popsat *ekvivalentní teplotou chromatičnosti T_{ce}* .

Pro zdroje, jejichž křivka spektrálního složení záření vykazuje náhlé změny hodnot se k vyjádření teploty chromatičnosti užívá pojmu *náhradní teplota chromatičnosti T_{cp}* .

Pro optická měření, při použití zdrojů bílého světla, by se měly přednostně používat *normalizované druhy světla*.

- *normalizovaný druh světla A*, odpovídající umělému žárovkovému osvětlení s teplotou chromatičnosti 2856 K (350,14 MK⁻¹),

- *normalizovaný druh světla B*, odpovídající střednímu dennímu světlu s převažující složkou přímého slunečního světla s ekvivalentní teplotou chromatičnosti asi 4874 K (205,17 MK⁻¹),

- *normalizovaný druh světla C*, odpovídající průměrnému dennímu světlu (bez přímého slunečního světla) s ekvivalentní teplotou chromatičnosti asi 6774 K (147,62 MK⁻¹),

- *normalizovaný druh světla D*, odpovídající svým spektrálním složením průměrnému dennímu světlu; jeho spektrální složení je vystiženo matematickými vztahy a je možno je definovat pro libovolnou ekvivalentní teplotu chromatičnosti v rozmezí 4000 až 25000 K (250 až 40 MK⁻¹). Přednostně se používá světlo D₆₅ s ekvivalentní teplotou chromatičnosti 6504 K (153,75 MK⁻¹),

- *normalizovaný druh světla E*, odpovídající chromatičností izoenergetickému spektru (fyzikálně realizovatelný),

- *normalizovaný druh světla I*, odpovídající spektrálním složením i chromatičností izoenergetickému spektru (fyzikálně nerealizovatelný). Tomuto světlu říkáme bílý bod (poloha je totožná s světlem E), mající souřadnice v barevném trojúhelníku $x=0,3333$, $y=0,3333$.

Tato stať o bílých světlech byla zpracována dle ČSN 01 17 18. Norma též uvádí, že v budoucnu by se měla přednostně používat pouze světla A a D₆₅.

1.1.3. Zvláštní zdroje záření

V poslední době se často jako zdroje záření v optických přístrojích využívají *polovodičové zdroje záření* – LED. Tyto mají co se týče spektrálních charakteristik velice širokou škálu provedení od „bílého“ světla po různá barevná provedení. Nelze je řadit mezi monochromatické zdroje záření, protože spektrální pološířka je oproti klasickým monochromatickým zdrojům dosti veliká, jsou to i desítky nm.

Již v úvodu této kapitoly bylo řečeno, že pokud požadujeme velkoplošný zdroj záření, relativně homogenní, lze použít *displeje*, buď CRT, LCD, plazmové, OLED či jiné. U nich je výhoda, že lze snadno regulovat jak intenzitu záření, tak i spektrální složení záření. Blíže o nich bude pojednáno v jedenácté kapitole.

Do skupiny zvláštních zdrojů záření by bylo možno zařadit i vysokotlaké výbojky, které jsou využívány v případech, kdy je požadován enormní zářivý výkon.

V dřívějších dobách byly často používány obloukové lampy, opět hlavně v případech, kdy byl požadován velký zářivý výkon. Dnes se již tyto lampy nepoužívají pro svoji konstrukční složitost a nestabilitu vyzařovacích charakteristik.

Poznámka

Ne vždy obsahují optické přístroje vlastní zdroj záření. Často využívají okolního světla, například slunečního záření. V tomto případě jsou kladeny zvláštní požadavky na detektor záření, protože jak intenzita, tak i spektrální složení tohoto záření se může během provozu měnit v širokém rozsahu.

1.2. Blok úpravy záření zdroje

Obvykle nelze využít v optických přístrojích záření zdroje bez úprav. Těmto soustavám, které mají za cíl upravit prostorovou vyzařovací charakteristiku zdroje říkáme *kondenzory*. Blíže o nich bude pojednáno v osmé kapitole. Do

této kategorie optických soustav upravujících prostorovou charakteristiku záření zdroje patří i *kolimátory*.

1.3. Pracovní blok

V pracovním bloku probíhají vlastní technologické činnosti, ke kterým je optický přístroj určen. Uplatňují se v něm obvykle klasické typy optických soustav, jako soustavy mikroskopové, dalekohledové, snímací objektivy a mnohé další. V následujících kapitolách bude o některých z nich samostatně pojednáno. V tomto kurzu není možno se zabývat všemi možnými optickými soustavami využívanými v různých technologických procesech. Jak již bylo dříve řečeno, každý složitý optický technologický blok lze rozložit na dílčí, jednodušší optické soustavy či prvky z nichž je pracovní blok složen.

1.4. Detektor záření

V nejobecnější rovině můžeme detektory záření rozdělit do dvou skupin podle toho, zda mají registrovat pouze intenzitu záření, vystupující z pracovního bloku, nebo i prostorové rozložení tohoto záření, čili obraz.

Jak již bylo dříve řečeno, detektor záření musí mít v pracovní oblasti vlnových délek použitého záření dostatečnou celkovou i spektrální citlivost, aby byl zajištěn dostatečný odstup signálu od šumu. Naopak, pokud je záření zdroje širokorozsahové (např. sluneční světlo), ale využívána je pouze úzká oblast tohoto záření, je žádoucí, pokud i detektor má spektrální citlivost v širokém rozsahu, toto záření nejlépe hned na vstupu filtrovat tak, aby byla využívána pouze pracovní oblast tohoto záření. Jako příklad může sloužit digitální fotoaparát, kde před detektorem, což je obvykle křemíkový CCD nebo CMOS prvek, je umístěn filtr, zadržující blízkou IČ oblast spektra, protože právě tam je křemíkový detektor nejcitlivější, ale pro tvorbu obrazu není tato spektrální oblast využívána, je dokonce rušivá.

1.4.1. Detektory intenzity záření

V nejobecnějším rozdělení se používají elektronické detektory využívající *vnější* a *vnitřní fotoefekt*. V současnosti detektory využívající vnější fotoefekt jsou pouze fotonásobiče, protože klasické fotonky byly již dávno nahrazeny polovodičovými detektory. Fotonásobiče jsou vhodné tam, kde je nutno měřit velice slabé optické signály. Všude jinde je výhodnější používat polovodičové prvky. Protože tyto detektory jsou podrobně probírány v jiných blocích výuky, nebudeme se jimi v tomto předmětu zabývat.

V některých speciálních přístrojích se používají i detektory pracující na jiném principu než je fotoefekt, např. bolometry, ale to je úzká problematika, vymykající se obsahu tohoto kurzu.

1.4.2. Obrazové detektory

Některé optické přístroje mají za cíl zaznamenat prostorové rozložení záření, obraz. Tato obrazová informace může být buď konečným produktem (např. fotografie), nebo slouží pro další zpracování (např. moderní interferometrie, kde interferogram je následně počítačově zpracováván).

Detektory obrazu lze rozdělit v nejhrubším dělení do tří skupin:

- *lidské oko*

- *fotocitlivá vrstva*

- *optoelektronický detektor.*

1.4.2.1. Lidské oko

Historicky nejstarším obrazovým detektorem je lidské oko. Je třeba si uvědomit, že každý subjektivní orgán je zatížen vlastnostmi daného subjektu, které mohou nevhodným způsobem výsledek zkreslit. Lidské vidění má špatnou paměť, takže i toto může mít nepříznivý vliv na práci a hlavně výsledek činnosti

optického přístroje, kde detekce obrazu je prováděna okem. Pro uchování obrazové informace získané okem je nutný následný záznam, kresba, což opět vnáší další možnou nejistotu o korektnosti výsledku.

Vidění je fotochemická reakce způsobená dopadem fotonů na sítnici oka a přechod na elektrický signál (chemicko-elektrická reakce) vedoucí vzruchy do mozkového centra vidění.

Oko reaguje na jistou část elektromagnetického záření v rozsahu vlnových délek asi 360 – 780 nm, kterou nazýváme *světlo*. Rozsah vnímaných jasů je obrovský, asi 1 : 10⁶.

Fotocitlivou vrstvou oka je *sítnice*. Fotocitlivé receptory jsou *tyčinky a čípky*.

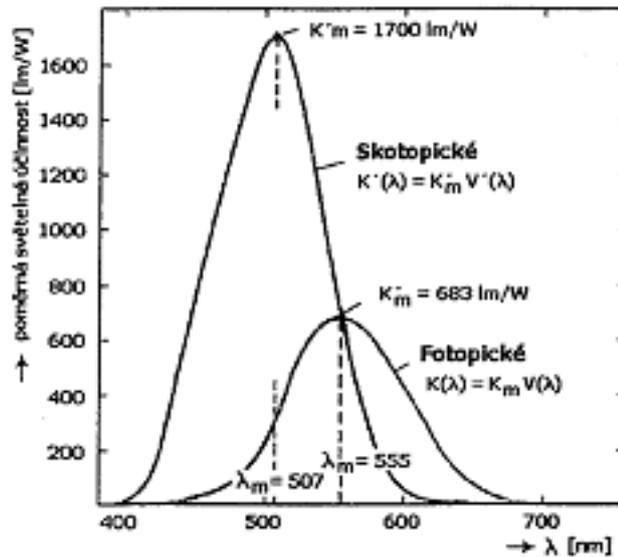
Denní- fotopické vidění obstarávají čípky, dochází k němu při jasech > 5 nt. V oku jich je asi 5 – 7 milionů. Účinná látka je jodopsin a tři druhy pigmentů (trichromazie). Velikost čípků je asi kolem 5 mikrometrů. Na sítnici nejsou rozloženy pravidelně, nejvíce jich je ve žluté skvrně (úhlově asi 1,5 stupně), žádné nejsou ve slepé skvrně, tj. místě, kudy vychází nervy do mozku. Barevné vidění je zajištěno třemi druhy čípků, citlivých pro červenou, zelenou a modrou oblast spektra.

Noční- skotopické vidění zajišťují tyčinky. Jedná se o nebarevné vidění při jasech < 0.01 nt. Účinná látka je rhodopsin. Tyčinek máme v oku asi 120 milionů. Rozloženy jsou převážně na periferii sítnice.

Přechodové vidění (za šera) – mezopické obstarávají čípky i tyčinky.

Maximální spektrální citlivost čípků je pro světlo o vlnové délce 555 nm, tyčinek pro 507 nm (viz obr.1.3.).

Poměrná světelná účinnost čípků $V(\lambda)$ a tyčinek $V'(\lambda)$



Obr.1.3.

1.4.2.2. Fotocitlivá vrstva

Až donedávna byla fotocitlivá vrstva jediným objektivním obrazovým záznamovým médiem.

Fotocitlivou vrstvu tvoří jemně rozptýlené halogenidy stříbra (nejčastěji bromid stříbrný) v želatině a tato suspenze je nanášena v tenké vrstvě na pevnou podložku kterou je buď sklo nebo filmová podložka, tvořená dříve celuloidem, později acetylcelulózou v současnosti stále častěji nahrazovanou polyesterem.

Fotocitlivé materiály dělíme na černobílé a barevné. Černobílé dělíme dále na negativní, pozitivní, inverzní a speciální (tyto jsou senzibilovány pro jinou oblast elektromagnetického záření než je světlo). Barevné materiály dělíme na negativní, pozitivní a inverzní. Speciální skupinu tvoří materiály pro okamžitou fotografii.

Adjustace fotografických materiálů: fotografické desky, listové (ploché) filmy, svitkové filmy neperforované a perforované. Nejpoužívanější je perforovaný

svitkový film šíře 35 mm, tzv. kinofilm. Zvláštní skupinou jsou filmy APS a některé filmy šíře 16 a dříve i 9,3 mm (Minox).

Vlastnosti fotografických materiálů:

Obecná citlivost jejíž měřitelná veličina je optická hustota, denzita. Vyjadřuje se charakteristickou křivkou materiálu, udávající závislost denzity (zčernání) na logaritmu expozice.

Spektrální citlivost udává relativní citlivost fotografické vrstvy k jednotlivým vlnovým délkám dopadajícího záření.

Rozlišovací schopnost fotografické vrstvy je ovlivněna mimo jiné *zrnitostí* fotografických vrstev která je způsobená částicovým charakterem světlocitlivé látky a rozptylem světla v citlivé vrstvě. Rozlišovací schopnost se udává v počtu čar na milimetr právě ještě rozlišené periodické struktury testu.

Dokonalejší hodnocení kvality fotografické vrstvy co se týče přenosových vlastností poskytuje **modulační přenosová funkce**, udávající závislost modulace (kontrastu) na prostorové frekvenci (1/mm).

1.4.2.3. Optoelektronický detektor

Místo filmu se v digitální technice používá fotoelektrický obrazový snímač.

Tyto jsou buď na bázi **CCD**, nebo **CMOS**.

Světlocitlivý obrazový elektronický snímač převádí dopadající světlo na elektrický náboj, ten je měřen a do digitální podoby převeden přes A/D převodník.

Tvary snímačů: - *lineární*

- *plošné* (čipy)

Jednotlivé fotocitlivé elementy z nichž je složena mozaika snímače nazýváme **pixely**. Pixel - nejmenší obrazový element.

Rozlišovací schopnost obrazových snímačů závisí na množství a velikosti pixelů. Současný běžný rozměr obrazové buňky je v jednotkách mikrometru.

Citlivost snímacích prvků je omezena, zdola šumem, shora nasycením (Blooming). Maximální hodnotu náboje A/D převodníkem rozdělujeme obvykle do 256 úrovní (8mi bitový záznam) *kvantizací*.

U kvalitnějších zařízení však lze pracovat i s 10ti, 12ti ba i 16ti bitovou *barevnou hloubkou* na jeden barevný kanál.

Konstrukční provedení **CCD snímacích prvků**:

- *prokládané*

zpracovávají obraz řádkově, jako v televizi po lichých a sudých řádcích

Výhody: jsou levné

Nevýhody : složitější konstrukce obrazu, je nutno jej skládat, nebo vypustit polovinu hodnot, vyžadují mechanickou závěrku

- *progresivní*

zpracovávají obraz najednou, nevyžadují závěrku

Snímače CMOS

vyráběné stejnými postupy jako běžné procesory, tedy levně, jsou ale zatím méně citlivé

dělí se na :

pasivní (PPS)

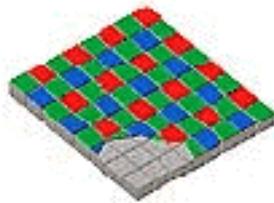
aktivní (APS) - buňky doplněny analytickým

obvodem, eliminujícím šum

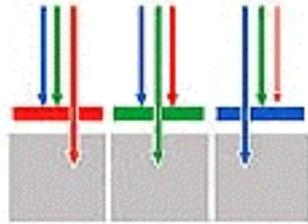
S novinkou přišla firma FOVEON, která představila snímací prvek CMOS **Foveon X3**, ve kterém jsou tři obrazové elementy pro snímání ve třech barvách umístěny nad sebou. Využívá se vlastnosti křemíku, do něhož proniká červené světlo nejhlouběji a modré nejméně. Tento prvek má i jiné užitečné vlastnosti (slučování pixelů, potlačení moire), mohl by to být převrat ve snímací technice, ale prozatím je tento prvek minimálně prakticky používán.

Obrazové optoelektronické snímače jsou buď černobílé nebo dnes již vesměs barevné. Pro snímání barevné informace se nejčastěji používá před vlastní fotocitlivou vrstvou barevná filtrová maska pracující na principu Bayerova schématu. Pro dosažení plnohodnotné barevné informace je nutno v tomto případě aplikovat při výpočtu konečného obrazu i barevnou interpolaci, která není nutná v případě třífázového snímání postupně s filtry R, G, B.

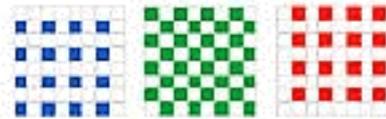
Klasická mozaika



Rozložení barevných filtrů na čipu

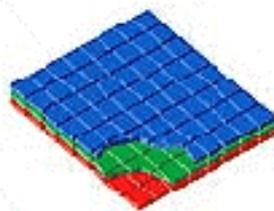


Světlo jednotlivých barev je zachyceno na prvcích vedle sebe



Ukázka počtu jednotlivých barevných filtrů na čipu

Fovron X3 technologie



Celkové uspořádání



Zachycení světla nesoušícího určitou barevnou informaci, se děje ve vrstvách umístěných nad sebou

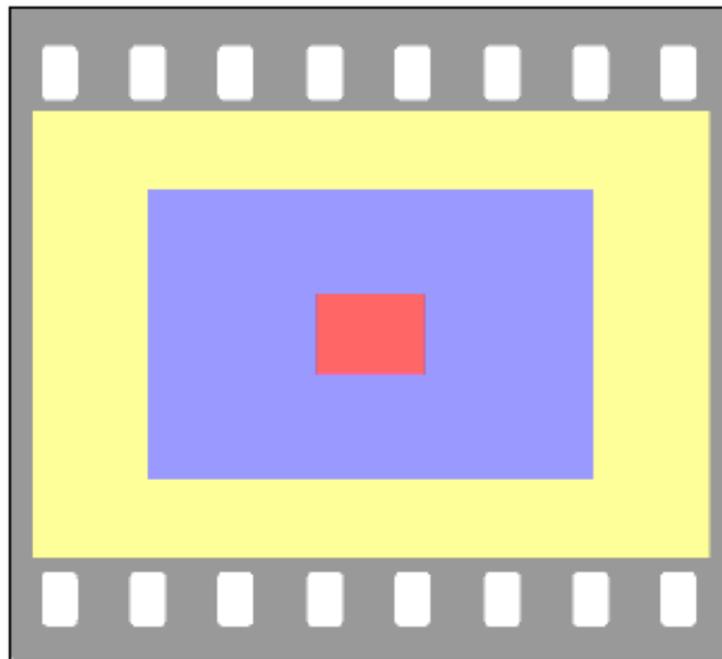


Počet prvků zachycujících jednotlivé barvy umístěných na čipu

Formáty CCD senzorů :

Velikost senzoru [“] Rozměr [mm] Úhlopříčka [mm] Plocha [mm²]

4/3	17,8 x 13,4	22,3	238,5
1	9,6 x 12,8	16	122,9
2/3	6,6 x 8,8	11	58
1/1,7	7,5 x 5,6	9,4	42
1/2	4,8 x 6,4	8	30,7
1/2,7	3,96 x 5,28	6,6	20,7
1/3	3,6 x 4,8	6	17,3
1/4	2,4 x 3,2	4	7,7
APS-C	22,7 x 15,1	27,3	342,8
LBCAST	23,7 x 15,6	28,4	369,7
Kinofilm	36 x 24	43,3	864



Typická velikost senzorů ve vztahu k velikosti kinofilmového políčka (žlutě). Modře je velikost senzorů většiny digitálních zrcadlovek a červeně nejběžnější velikost senzorů většiny kompaktních (1/2,5").

Obrazové rozlišení :

Formát	Rozměr v pixelech	Celkový počet pixelů
QVGA	320 x 240	76 800
VGA	640 x 480	307 200
SVGA	800 x 600	480 000
Mac	832 x 624	519 168
XGA	1024 x 768	786 432
SXGA	1280 x 1024	1 310 720

UXGA	1600 x 1200	2 048 000
QXGA	2048 x 1536	3 145 728
Video PAL	768 x 576	442 368
Video NTSC	720 x 480	345 600

1.5. Registrační blok

V praxi existuje velké množství metod registrace výsledku technologických postupů činnosti optických přístrojů.

V některých případech výsledek činnosti neregistrujeme. Mnohdy, zvláště při záznamu subjektivního pozorování prakticky registrujeme výsledek činnosti pouze v naší paměti, bez objektivního uchování informace.

V současné době je činnost většiny optických přístrojů buď přímo řízena výpočetní technikou, nebo tato je na konci řetězce jako registrační zařízení. V tom případě není problém provést registraci výsledku činnosti v grafické formě tiskárnou, nebo výsledek zaznamenat jako soubor na archivační medium (disk počítače, disketa, CD, DVD, flash paměť a podobně).

Pokud je potřeba výsledky činnosti zaznamenat a přístroj není vybaven výpočetní technikou, zcela jistě má nějaké vlastní registrační zařízení jako tiskárnu, zapisovač, obrazovku záznamového bloku a podobně.

2. Základní optické parametry optických přístrojů

V této kapitole si budeme definovat základní optické parametry optických přístrojů, určující jejich důležité vlastnosti.

2.1. Ohnisková vzdálenost

Nejprve je nutné si definovat základní body optické soustavy, ohniska a hlavní body.

Předmětové ohnisko F je předmětový osový bod, jemuž odpovídá obrazový bod na optické ose v nekonečnu.

Obrazové ohnisko F' je obrazový osový bod, jemuž odpovídá předmětový bod na optické ose v nekonečnu.

Hlavní body předmětový H a obrazový H' jsou takové body na optické ose pro něž platí, že mezi nimi je příčné měřítko zobrazení rovno 1.

Předmětová ohnisková vzdálenost f je vzdálenost od předmětového hlavního bodu k předmětovému ohnisku, tudíž úsečka HF .

Obrazová ohnisková vzdálenost f' je vzdálenost od obrazového hlavního bodu k obrazovému ohnisku, tudíž úsečka $H'F'$.

Za předpokladu, že indexy lomu v předmětovém i obrazovém prostoru jsou shodné, jsou shodné i velikosti předmětové a obrazové ohniskové vzdálenosti.

2.2. Clony v optické soustavě

Optická soustava každého přístroje se skládá z jednotlivých členů, které mají konečné příčné rozměry, v důsledku čehož se z celého světelného toku, vycházejícího z předmětového bodu využívá jen jeho část. Rovněž z předmětové roviny může být optickou soustavou zobrazena jen její část, proto můžeme říci:

- od každého zobrazovaného předmětového bodu vstupuje do optické soustavy omezený světelný tok, jehož velikost závisí na apertuře, tj. na optickém otvoru optické soustavy přístroje
- optická soustava přístroje zobrazí jen část předmětového prostoru. První podmínka určuje osvětlení obrazu vytvořeného optickou soustavou přístroje, druhá podmínka jeho zorné pole.

Pro další úvahy budeme předpokládat, že clony jsou tvořeny kruhovými otvory se středy na optické ose přístroje (k clonám musíme počítat i objímky všech prvků, clony osvětlovacích soustav, clonu oka atd). Použití clon bývá nezbytné i s ohledem na kvalitu zobrazení, protože clonami lze omezit, nebo odstranit ty části paprskových svazků, které způsobují velké aberace.

V optických soustavách přístrojů můžeme rozeznat tři druhy clon:

- *clony určující světelnost optické soustavy přístroje, tj. osvětlení obrazu*
- *clony určující velikost zorného pole optické soustavy přístroje*
- *clony zlepšující kvalitu obrazu.*

2.2.1. Aperturní clona

Aperturní clona určuje osvětlení v obraze. Chceme-li určit, která clona či objímka v optické soustavě tvoří aperturní clonu, zobrazíme všechny clony a objímky předcházejícími optickými členy do předmětového prostoru a který obraz clony či objímky je z osového bodu předmětové roviny viděn pod nejmenším úhlem, tvoří *vstupní pupilu* a objímka či clona která obraz vytvořila aperturní clonu. Průměr vstupní pupily značíme D , průměr výstupní pupily D' . *Výstupní pupila* je analogicky obrazem aperturní clony v obrazovém prostoru, zároveň i obrazem vstupní pupily.

(Může nastat situace, že z osového předmětového bodu je pod nejmenším úhlem vidět objímku prvního členu, potom tato tvoří jak vstupní pupilu, tak i aperturní clonu.)

Je patrné, že při různých polohách předmětové roviny může být aperturní clonou jiná objímka či clona v optické soustavě.

V obrazovém prostoru tato poučka platí analogicky. Vstupní a výstupní pupila jsou sdružené veličiny.

Číselná apertura A_n optické soustavy se určuje v předmětovém prostoru. Úhel σ , který svírá paprsek, vystupující z předmětového osového bodu a jdoucí okrajem vstupní pupily s optickou osou nazýváme aperturním úhlem. Potom platí, že :

$$A_n = n \cdot \sin \sigma .$$

V obrazovém prostoru platí pro A_n' analogicky :

$$A_n' = n' \cdot \sin \sigma' ,$$

kde σ' je aperturní úhel v obrazovém prostoru.

Pokud předmět leží ve velké vzdálenosti vzhledem k ohniskové vzdálenosti soustavy, ztrácí číselná apertura svůj smysl a určujícím se stává průměr vstupní pupily D . Zavádíme nový parametr a **to relativní aperturu** :

$$A_r = D / f' , \quad \text{resp.} \quad A_r' = D' / f' , \quad \text{pro soustavy}$$

zobrazující do nekonečna.

Velikost apertury je jedna z nejdůležitějších charakteristik optické soustavy, rozhoduje o její světelnosti, ale hlavně o teoreticky dosažitelné, jen ohybem omezené kvalitě zobrazení, jak bude ukázáno později.

Z obou těchto hledisek zavádíme nový parametr optické soustavy **clonové číslo** c .

Je-li konečné měřítko zobrazení, potom $c = \beta / 2 A_n ,$

V případě, že $\beta \rightarrow 0$, potom $c = 1 / A_r = f' / D$ a

V případě, že $\beta \rightarrow \infty$, potom $c = 1 / A_r' = f' / D' .$

(β je příčné měřítko zobrazení, viz dále.)

2.2.2. Polní clona

Zorným polem optické soustavy nazýváme tu část předmětového prostoru, jehož body mohou být soustavou zobrazeny do obrazové roviny. Zorné pole je vždy omezené a má konečnou velikost. Tohoto omezení dosahujeme buď speciální clonou, nazývanou *polní clona*, nebo *vinětační clonou* či clonami, resp. Objímkami jednotlivých prvků optické soustavy. Aby bylo zorné pole přístroje ostře ohraničeno, musí se polní clona nacházet v takové poloze, aby sama či její obraz byl v předmětové nebo v obrazové rovině, nebo v rovině meziobrazu, pokud tento při zobrazení vzniká.

Obraz polní clony v předmětové rovině se nazývá *vstupní pole*, obraz polní clony v obrazové rovině se nazývá *výstupní pole*.

Vstupní pole, polní clona a výstupní pole jsou sdružené veličiny.

2.2.3. Vinětační clony

Mimo aperturní a polní clonu obsahuje optická soustava i řadu clon dalších (objímky opt. členů), které se uplatňují obvykle při zobrazení šikmých svazků paprsků, *polních paprsků*. Některé z nich nazýváme *clony vinětační*. Jsou umístěny v obecných polohách mezi předmětem a obrazem a způsobují odclánění, vinětami, paprskových svazků. Důsledkem je, že mimoosové body předmětové roviny jsou zobrazovány stále užšími svazky paprsků v závislosti na jejich poloze od optické osy, osvětlení postupně ubývá až k nule.

2.3. Podíl sdružených veličin (zvětšení)

V optické soustavě rozeznáváme několik podílů sdružených veličin, jednak ležících kolmo k optické ose, ve směru optické osy, nebo podílů úhlů.

Je-li dy element předmětu (ležící v rovině kolmé k optické ose) a dy' jemu odpovídající element v obrazové rovině, potom podíl

$$dy' / dy = \beta \quad \text{nazýváme } \textit{příčné měřítko zobrazení},$$

je-li dz element ležící na optické ose v předmětovém prostoru a dz' jemu odpovídající element na ose v obrazovém prostoru, potom podíl

$$dz' / dz = \alpha \quad \text{nazýváme } \textit{podélné měřítko zobrazení}$$

a podíl

$$\sigma' / \sigma = \gamma \quad \text{nazýváme } \textit{poměr úhlů} .$$

Je-li n index lomu předmětového prostoru a n' index lomu v obrazovém prostoru, můžeme psát, že :

$$\alpha = (n' / n) \cdot \beta^2 \quad \text{a} \quad \gamma = (n / n') \cdot (1 / \beta) .$$

Poznámka: u subjektivních optických přístrojů hovoříme též o tzv. *subjektivním zvětšení*, častěji nazývaném pouze *zvětšení*, značeném Γ , které je prakticky shodné s poměrem úhlů a v tomto případě je velikost subjektivního obrazu porovnávána se situací, kdy na předmět hledíme bez dotyčného přístroje, prostým (neozbrojeným) okem.

Pro charakteristiku optické soustavy jsou kromě ohnisek důležité dvojice *sdružených bodů* (sdružené body jsou takové, že jeden je obrazem druhého) v nichž:

$$\beta = 1 , \quad \text{tyto nazýváme } \textit{body hlavní}, \text{ značíme je } H \text{ a } H'$$

odpovídající roviny, procházející těmito body kolmo k optické ose jsou hlavní roviny,

$\gamma = 1$, tyto nazýváme *body úzlové* , značíme je N a N'.

Z předchozího je patrné, že pokud $n = n'$, příslušné hlavní a úzlové body splývají.

2.4. Kvalitativní ukazatele optické soustavy

Kvalita optických soustav v optických přístrojích se nehodnotí pomocí vad (aberací) zobrazení, ale obecnějšími kriterii jako je rozlišovací mez, rozlišovací schopnost, případně objektivním kriteriem Optickou přenosovou funkcí.

Výkon kvalitních optických přístrojů je omezen ohybem světla na clonách omezujících průměr světelných svazků – aperturních clonách, dále aberacemi optické soustavy a nedokonalostí výroby.

2.4.1. Rozlišovací mez optických soustav

Pojem rozlišovací mez má v optice velmi důležitý význam. V případě zobrazovacích přístrojů nás informuje jednak o rozměrech nejmenších snímatelných předmětů, resp. detailů předmětů, jednak poskytuje kriterium kvality optické soustavy. Vzdálenost lineární y , resp. úhlová Ψ dvou předmětů, které optická soustava právě ještě zobrazí odděleně se nazývá *rozlišovací mez* optické soustavy.

Reciproká hodnota rozlišovací meze se nazývá *rozlišovací schopnost* a budeme ji značit μ_R .

Je patrné, že se dva body zobrazí odděleně při vzájemné vzdálenosti tím menší, čím je lépe realizovánigmatismus soustavy, nepřihlížíme-li k optickým vadám soustavy, pak důležitou roli mají ohybové jevy Fraunhoferovy.

Stejně je tomu v případě přístrojů spektrálních, kde rozdíl vlnových délek dvou spektrálních čar zobrazených přístrojem právě ještě odděleně se nazývá rovněž

rozlišovací mez přístroje. Označíme-li tento interval $\Delta\lambda$, pak veličinu $\lambda / \Delta\lambda$ nazýváme rozlišovací schopností spektrálního přístroje.

Je tady patrné, že vlnová povaha světla zapříčiňuje konečnou hodnotu výkonnosti optických soustav a určuje limitní hodnotu dosažitelné výkonnosti.

Z výsledků studia Fraunhoferova ohybu na kruhovém otvoru plyne, že i optickou soustavou bez aberací se nezobrazí bod v bod, ale plošku, obklopenou střídavě tmavými a světlými kroužky.

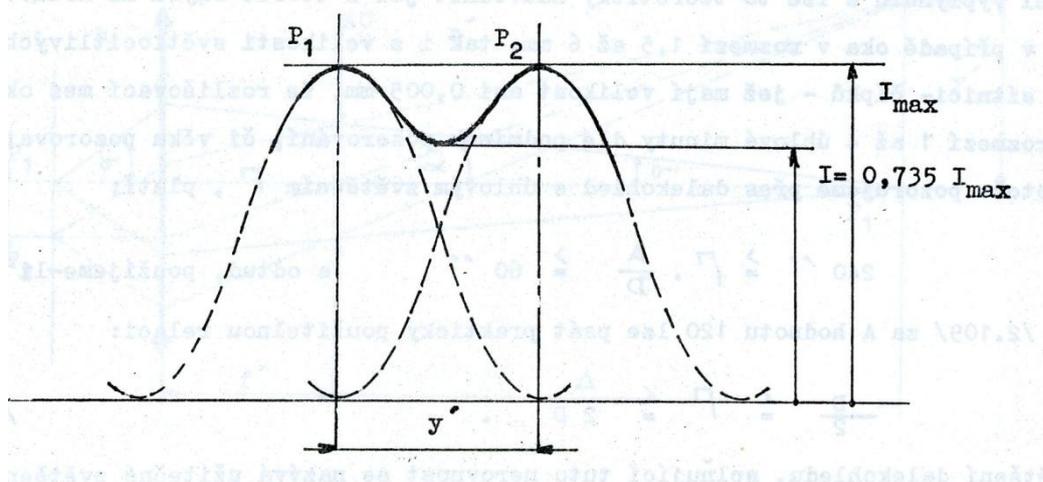
Rozdělení intenzity světla v ohybovém obrazu bodu můžeme popsat vztahem:

$$I = I_0 \cdot [B(\tau) / \tau]^2,$$

kde I_0 je intenzita světla ve směru dopadu a $B(\tau) / \tau$ je Besselova funkce prvního řádu.

Centrální plošku (po hodnotu prvního nulového minima, kde argument Besselovy funkce je 3,83) nazýváme **Airyho ploškou**, nebo **Airyho diskem**. V teorii rozlišení se omezujeme právě na tuto centrální plošku, ve které je v ideálním případě soustředěno asi 84% energie.

Podle Rayleighova kritéria připouštíme, že dva stejně jasné body vnímáme odděleně, pokud ohybové maximum bodu P_1 padne do prvního ohybového minima bodu P_2 a naopak.



Obr.2.1. Rayleighovo kritérium rozlišení

Když se vrátíme k Fraunhoferovu ohybu na kruhovém otvoru, protože vstupní pupily většiny optických přístrojů jsou kruhové, víme, že první nulové minimum nastává pro argument Besselovy funkce $\tau = 3,832$.

Jelikož $\tau = (2\pi / \lambda) \cdot (y' / f') \cdot (D / 2)$ a protože úhlová rozlišovací mez je v tomto případě $\psi = y' / f'$ můžeme po dosazení psát:

$$\psi = y' / f' = 1,22 \cdot \lambda \cdot D^{-1} \text{ [rad] .}$$

Poznámka: konkrétní vztahy pro výpočet rozlišovací meze a schopnosti optických přístrojů budou uvedeny při popisu jednotlivých přístrojů.

2.4.2. Optická přenosová funkce

Optická přenosová funkce $D(R)$ je funkcí komplexní s reálnou částí $T(R)$, což je *funkce přenosu modulace* (kontrastu) a imaginární částí $\theta(R)$, *funkcí přenosu fáze*:

$$D(R) = T(R) \cdot \exp[i\theta(R)] .$$

$$T(R) = e(R) / e(0) , \quad \text{kde}$$

$$e(R) = K'(R) / K(R) , \quad e(0) \text{ je obvykle normováno na hodnotu 1.}$$

$K'(R)$ je kontrast předmětové struktury o prostorové frekvenci R v obrazové rovině a $K(R)$ je kontrast téže struktury v předmětové rovině. Kontrast

(vizibilita) je definován následovně:

$$K = (L_{\max} - L_{\min}) / (L_{\max} + L_{\min}) , \quad \text{kde } L_{\max} \text{ a } L_{\min} \text{ je maximální a minimální jas v předmětu,}$$

$$K' = (E_{\max} - E_{\min}) / (E_{\max} + E_{\min}) , \quad \text{kde } E_{\max} \text{ a } E_{\min} \text{ je maximální a minimální osvětlení v obraze.}$$

Prostorová frekvence $R = 1/r$, kde r je perioda zobrazované (periodické) struktury.

Funkce přenosu modulace se graficky zobrazuje jako závislost $T(R)$ na R , kde R je obvykle v jednotkách $1/\text{mm}$, funkce $T(R)$ se pro $R = 0$ normuje na hodnotu 1.

Poznámka 1: Z uvedeného plyne, že rozlišovací schopnost optické soustavy je hodnota R_{max} , pro kterou funkce $T(R)$ klesne na hodnotu 0.

Poznámka 2: Ve fotografické praxi se při demonstraci kvality objektivů nepředkládá soubor grafů funkce $T(R)$, [pro každý bod předmětu by musela být dokladována jeho křivka funkce $T(R)$], ale soubor všech měření se zpracuje do grafu závislosti $T(R)$ na úhlu pole pro $R = 10$ a $30 [1/\text{mm}]$ a pro meridionální a sagitální směr čar testu. Toto vyjádření dostatečně dokumentuje kvalitu optické soustavy.

3. Spektrální fotometry

Spektrální fotometry jsou optické přístroje, sloužící k měření propustnosti či odrazivosti materiálů, nebo k měření spektrálních vlastností zdrojů a detektorů záření.

3.1. Popis spektrálních fotometrů

Spektrální fotometr se skládá z několika základních prvků:

- zdroje záření
- monochromátoru
- skříně pro vzorky
- detektoru záření
- vyhodnocovací jednotky.

3.1.1. Zdroj záření

musí vyzařovat v celém rozsahu hodnocených vlnových délek, pokud tuto podmínku nesplňuje, musí být zdrojů více a tyto se během měření vyměňují.

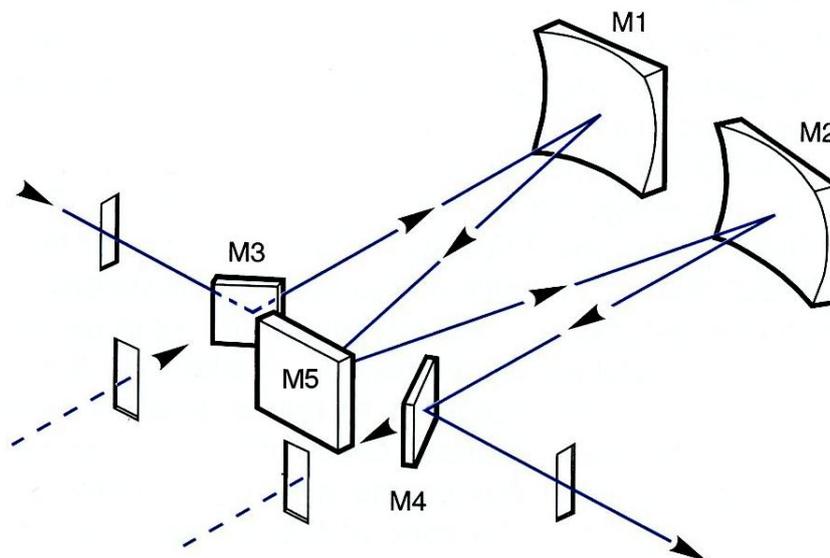
3.1.2. Monochromátor

Hlavní částí spektrálního fotometru je *monochromátor* (viz obr.3.1.), který rozkládá záření zdroje ve spektrum.

Prvky monochromátoru:

- vstupní štěrbina
- kolimační zrcadlo
- disperzní soustava
- dekolimační zrcadlo
- výstupní štěrbina.

Na obrázku 3.1. je M1 a M2 kolimační a dekolimační zrcadlo, M3 a M4 jsou pomocná zrcadla, M5 mřížka.



Obr.3.1. Princip mřížkového monochromátoru

Kvalita spektrálního fotometru je dána rozlišovací schopností jeho disperzní soustavy. Hlavní částí monochromátoru je *disperzní soustava*, která je buď *hranolová* nebo *mřížková*. V současné době převládají monochromátory mřížkové.

3.1.2.1. Hranolový monochromátor

Pracuje na principu rozkladu záření lomem. Rozlišovací schopnost hranolové disperzní soustavy je dána vztahy

$$\mu_R = \lambda / \Delta\lambda = B \cdot dn / d\lambda = D \cdot d\delta / d\lambda ,$$

kde B je rozměr základny disperzního hranolu, $dn/d\lambda$ je charakteristická disperze materiálu hranolu, D je šířka svazku záření procházejícího hranolem a $d\delta/d\lambda$ je úhlová disperze hranolu. Je samozřejmé, že materiál hranolu musí mít v pracovním rozsahu vlnových délek vhodnou disperzi a dobrou propustnost, z toho důvodu se disperzní soustavy vyměňují tak, aby rozlišení bylo vždy ideální pro danou spektrální oblast.

3.1.2.2. Mřížkový monochromátor

Pracuje na principu ohybu světla na mřížce. V současnosti se používají mřížky na odraz, ryté i holografické. Maximální hustota vrypů je až 2400 čar/mm. Rozlišovací schopnost mřížky je

$$\mu_R = \lambda / \Delta\lambda = k \cdot N ,$$

kde k je řád spektra ve kterém je mřížka použita a N je rovno celkovému počtu vrypů mřížky.

3.1.3. Detektor záření

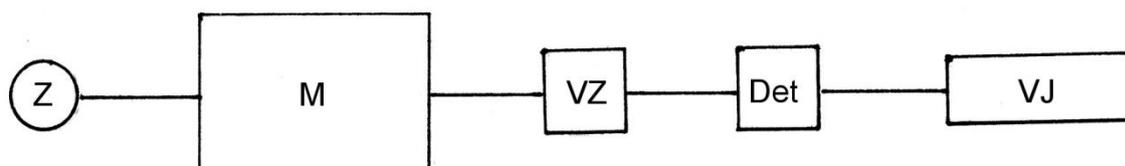
musí mít samozřejmě v celém pracovním rozsahu dostatečnou citlivost, pokud tomu tak není, je nutno detektory vyměňovat. Používají se jak detektory s vnitřním tak i vnějším fotoefektem (polovodičové detektory, fotonásobiče).

3.1.4. Vyhodnocovací jednotka

v současnosti se používá převážně PC vybavený speciálním softwarem pro běžné zpracování výsledků měření, doplněný tiskárnou.

3.2. Jednocestný spektrální fotometr

Tento typ je historicky nejstarší. Jeho nevýhodou je skutečnost, že činnost tohoto zařízení nelze jednoduše zautomatizovat.



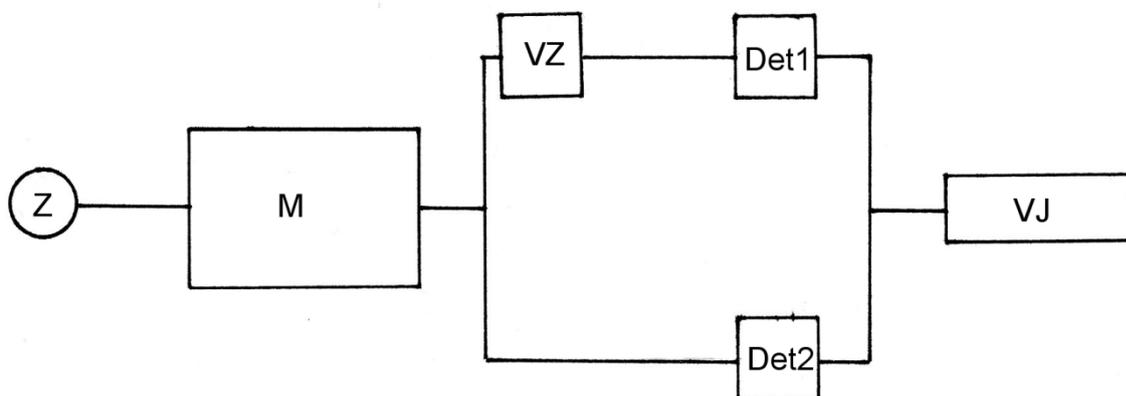
Obr.3.2. Schema jednocestného spektrálního fotometru

Na obrázku jsou Z zdroj záření, M monochromátor, Vz skříň pro vzorky, Det detektor a VJ vyhodnocovací jednotka.

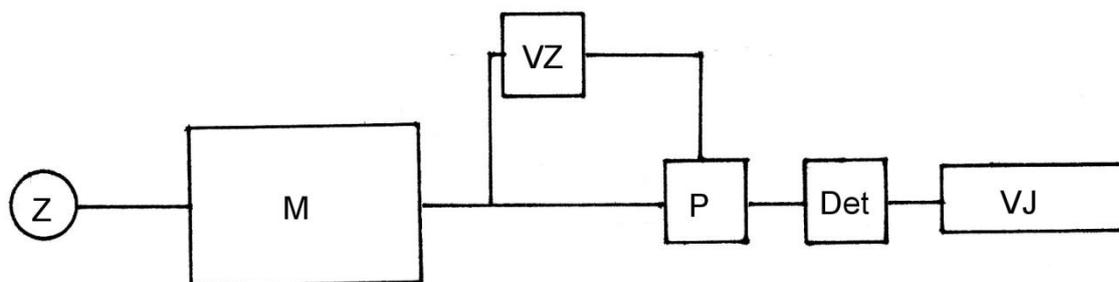
Tento typ spektrálního fotometru se v dnešní době nepoužívá pro rutinní měření, ale spíše se skládá z jednotlivých potřebných komponent pro speciální jednoúčelové úlohy.

3.3. Dvoucestný spektrální fotometr

Aby bylo možno měření zautomatizovat, byly vyvinuty dvoucestné přístroje, kde jedna větev je srovnávací a do druhé se vkládá vzorek. Mohou být buď s jedním detektorem, kde je měřený signál a signál srovnávací střídavě posílán na detektor a tyto jsou porovnávány, nebo jsou detektory dva, pro každou větev samostatný, potom je nutno zajistit, aby odezva obou detektorů na stejný signál byla stejná. U dvoucestných typů fotometrů je již možno režim práce zautomatizovat, měření je spojité, na rozdíl od práce jednocestného fotometru, kde je vždy nutno při přechodu na jinou vlnovou délku provést normování na úroveň signálu bez vzorku, takže měření je nespojité, po jednotlivých krocích, hodnota kroku se řídí předpokládanou složitostí měřené veličiny.



Obr.3.3. Funkční schéma dvoucestného spektrálního fotometru se dvěma detektory



Obr.3.4. Funkční schema dvoucestného spektrálního fotometru s jedním detektorem (P je přepínač signálů)

3.4. Diodový spektrální fotometr

V poslední době se rozšířily *diodové spektrální fotometry*. Nejsou tak univerzální jako klasické se samostatným monochromátorem, kde je signál pro využitý spektrální rozsah zaznamenávám postupně, ale výstupní spektrum je zaznamenáno na lineární CCD detektor současně. Rozlišovací schopnost těchto přístrojů je dána mimo disperzní vlastnosti mřížky hlavně velikostí jednotlivých buněk CCD detektoru a jejich počtem. Zaznamenávaný signál je načítán po různou dobu v závislosti na jeho intenzitě, nelze provádět absolutní měření velikosti různých signálů. Rovněž nelze provést kompenzaci na stejnou počáteční úroveň signálu naprázdno přes celé spektrum, takže hodnoty úrovně signálu pro různou polohu ve spektru jsou závislé na vyzařovací charakteristice zdroje a spektrální citlivosti diod senzoru (CCD). Zdroj v tomto případě není součástí přístroje, ale pracuje se pouze s externím zářením. Měřený signál je do přístroje veden obvykle světlovodem. Vyhodnocení se děje s pomocí PC nebo notebooku.

Na obrázku diodového spektrálního fotometru (Obr.3.5) jsou:

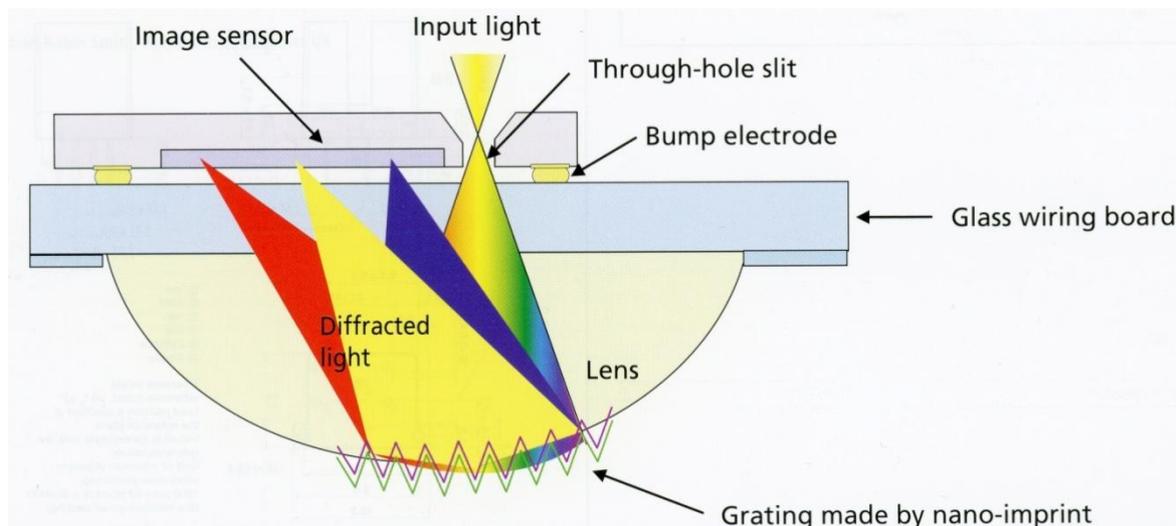
- 1- SMA905 připojovací konektor světlovou
- 2- pevná vstupní štěrba
- 3- dlouhovlnný absorpční filtr
- 4- kolimační zrcadlo
- 5- disperzní mřížka
- 6- fokusační zrcadlo
- 7- válcová čočka před detektorem
- 8,9,10- CCD lineární detektory pro UV, VIS a IČ oblast spektra



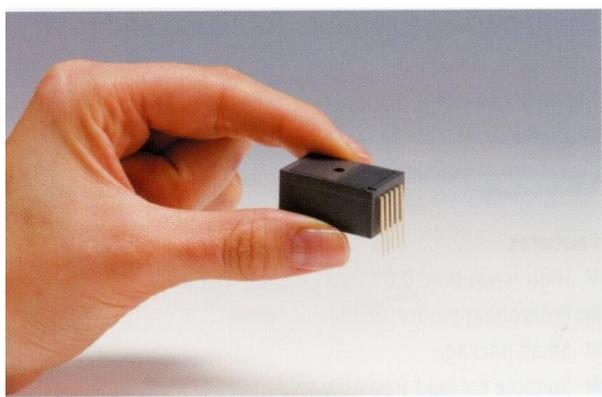
Obr.3.5. Diodový spektrální fotometr

3.5. Kompaktní spektrální fotometr Hamamatsu

Firma Hamamatsu předvedla svůj „ultra-kompaktní spektrometr“ na principu pokročilé MOEMS technologie (Micro-opto-electro-Mechanical Systém). Je použit CMOS senzor s integrovanou vstupní štěrbinou a mřížkou na ploše čočky takže odpadají kolimační a dekolimační zrcadla. Celé zařízení má rozměry 27,6 x 13 x 16,8 mm .



Obr.3.6. Schema spektrálního fotometru Hamamatsu



Obr.3.7. Ukázka velikosti bloku spektrálního fotometru Hamamatsu

4. Optická stavba mikroskopů

Mikroskop je subjektivní optický přístroj, sloužící pro pozorování jemných detailů na blízkých předmětech pod větším zorným úhlem, než by tomu bylo při pozorování prostým okem z konvenční zrakové vzdálenosti.

Konvenční zraková vzdálenost je 250 mm.

Oko nerozliší na pozorovaném předmětu detaily menší, než ty které se jeví ze středu vstupní pupily oka pod úhlem větším, než je mezný úhel, daný rozlišovací mezí oka. Při dobře osvětleném předmětu a dostatečném kontrastu pozorované struktury je tento úhel asi 1 úhlová minuta. Při horších pozorovacích podmínkách klesá tato hodnota na 2 až 4 minuty. Je zřejmé, že úhel pozorování detailů předmětu závisí na pozorovací vzdálenosti.

Z fyziologické optiky je známo, že předmět můžeme nejvíce přiblížit k oku na vzdálenost blízkého bodu oka, která je proměnná a roste s věkem pozorovatele. Aby bylo možno hodnotit pozorování prostým okem a okem tzv. ozbrojeným (lupou, mikroskopem), předpokládáme, že předmět vkládáme do konvenční zrakové vzdálenosti.

Poznámka: v sekcích o mikroskopech budeme předpokládat tzv. badatelské mikroskopy, tj. mikroskopy se stativem, kompletně vybavené zdrojem světla, kondenzorem a vlastním mikroskopem. Podotýkám, že mikroskop je každý optický přístroj, splňující shora uvedenou definici.

4.1. Lupa

Definici mikroskopu splňuje i *lupa*, jakožto jeden z nejjednodušších optických přístrojů. Lupa je tvořena jednoduchou čočkou, může ale být i složitější optické konstrukce.

4.1.1. Zvětšení lupy

Lupa vytváří zvětšené a převrácené obrazy pozorovaných předmětů tak, aby jejich úhlová velikost byla větší než mezní hodnota rozlišení oka. Pokud pozorovaný předmět vložíme do předmětové ohniskové roviny lupy a lupu přiložíme co nejbližší k oku, můžeme pro vizuální zvětšení lupy Γ psát, že :

$$\Gamma = 250 / f',$$

kde f' je ohnisková vzdálenost lupy.

Poznámka: pokud bychom předmět nevložíme do ohniskové roviny, ale do takové vzdálenosti, aby obraz vzniknul ve vzdálenosti pohodlného pozorování, což je obvykle konvenční zraková vzdálenost, teoreticky by zvětšení vzrostlo o jedničku, ale protože lupu nepřikládáme těsně k oku, tak prakticky vztah pro zvětšení uvedený výše platí i v tomto případě.

4.1.2. Omezení paprskových svazků u lupy

I v tomto případě musíme uvažovat tandem lupa + oko. Obecně lze vyvodit, že platí následující:

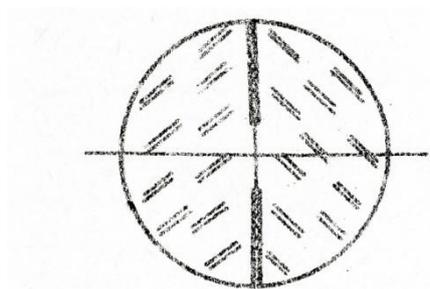
Oční pupila tvoří výstupní pupilu i aperturní clonu a objímka lupy clonu zorného pole.

4.1.3. Některé typy lup

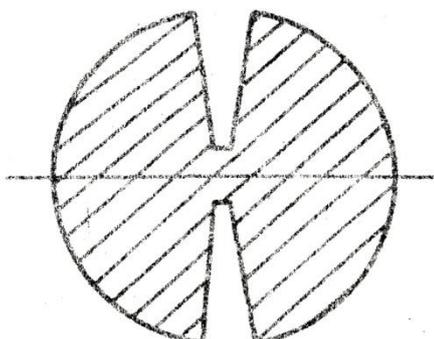
Jak již bylo řečeno, lupa může být pro malá zvětšení a malá zorná pole tvořena jednoduchou čočkou, pro větší zvětšení a větší zorné pole je konstrukce složitější, tato lupy se konstruují jako vícečlenné, viz obrázky.

Lupy se navrhují pro zvětšení maximálně asi 12x.

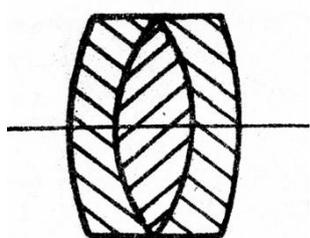
Obr.4.1. Některé typy lup



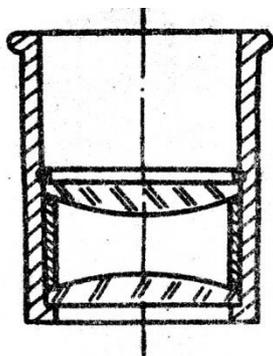
Wollastonova lupa



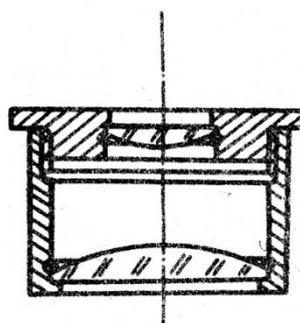
Brewsterova lupa



Steinheilova lupa



Fraunhoferova lupa



Wilsonova lupa

4.2. Dalekohledová lupa

Nedostatkem většiny lup je jejich poměrně malé zvětšení a malá pracovní vzdálenost. Tento problém lze řešit konstrukcí *dalekohledových lup*.

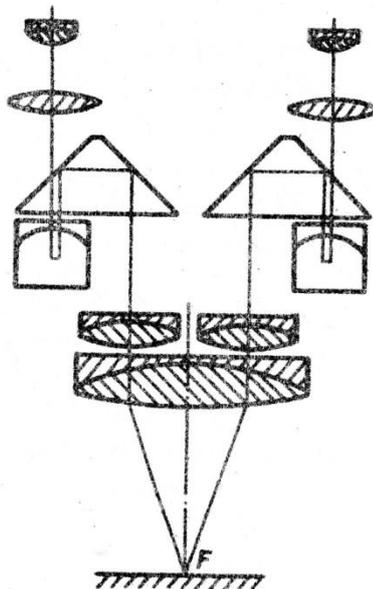
Lupa obvykle pracuje tak, že předmět se vkládá do její předmětové ohniskové roviny, tudíž svazek paprsků vystupující z lupy je zobrazován do nekonečna. Za

lupu tudíž lze umístit klasický, obvykle Keplerův, dalekohled. Z něj opět vystupující svazky jsou zobrazovány do nekonečna a tyto vstupují do neakomodujícího oka. Pokud označíme Γ_1 zvětšení lupy a Γ_2 zvětšení dalekohledu (viz kap. 5.), potom celkové zvětšení Γ_c je rovno součinu :

$$\Gamma_c = \Gamma_1 \cdot \Gamma_2$$

Z uvedeného je patrné, že pracovní vzdálenost určuje ohnisková vzdálenost lupy a celkové zvětšení potom lze ovlivnit zvětšením dalekohledu.

Této konstrukce se často využívá u binokulárních dalekohledových lup, často nesprávně nazývaných stereomikroskopem.



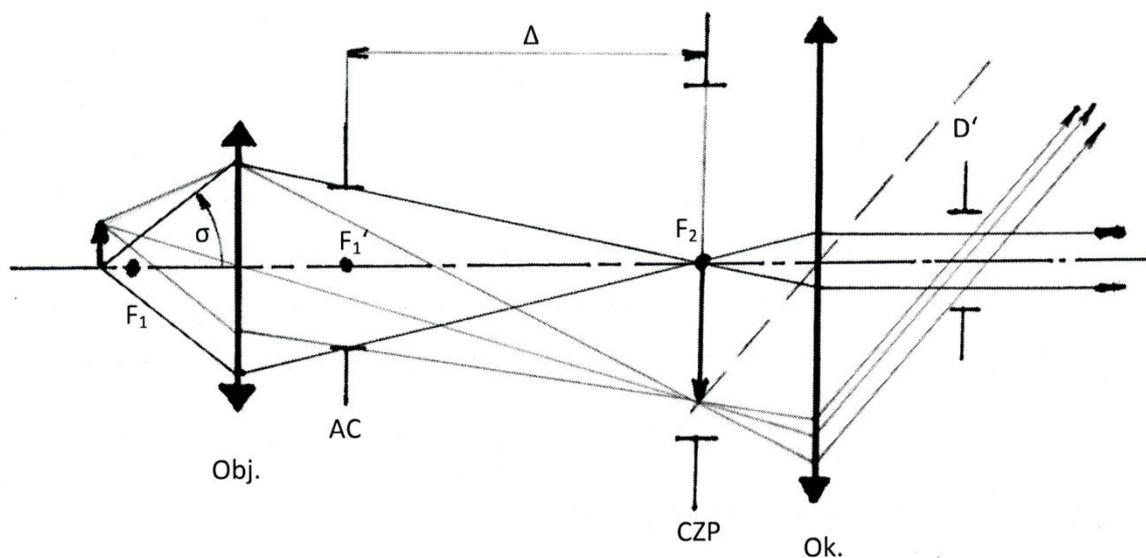
Obr.4.2. Binokulární dalekohledová lupa

Poznámka: Jiná konstrukce binokulárních – stereoskopických mikroskopů je řešena tím způsobem, že dva nezávislé mikroskopy jsou mechanicky svázány tak, že jejich optické osy svírají konvergentní uhel očí při pozorování blízkých předmětů.

Binokulární stereoskopické lupy (mikroskopy) nedosahují velkých zvětšení, obvykle je maximum asi 250x.

4.3. Dvoustupňový mikroskop

Dvoustupňový, klasický, *mikroskop* pracuje tak, že objektiv o ohniskové vzdálenosti f_1' vytvoří zvětšený, převrácený obraz předmětu a tento se pak prohlíží okulem o ohniskové vzdálenosti f_2' jako lupou. Obraz vytvořený mikroskopem je neskutečný a převrácený.



Obr.4.3. Dvoustupňový mikroskop

Na obrázku 4.3. je :

AC aperturní clona objektivu

CZP clona zorného pole

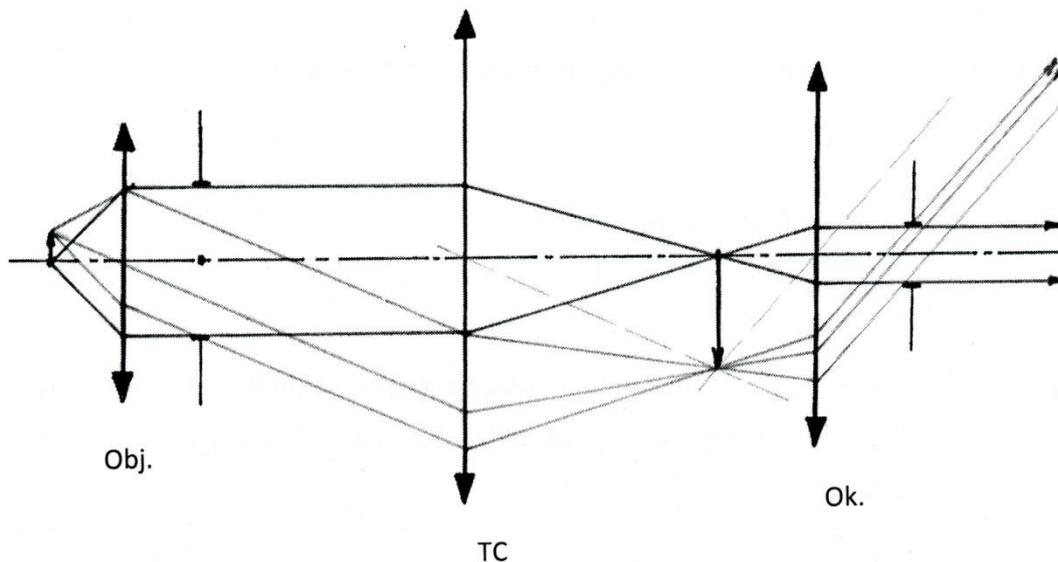
σ aperturní úhel objektivu

Δ optický interval (vzdálenost $F_1' F_2$)

D' výstupní pupila dalekohledu.

4.4. Vícestupňový mikroskop

Jakmile se začaly konstruovat mikroskopy vybavené dalšími optickými elementy pro různé pozorovací metody (viz další kapitola), přestala konečná velikost optického intervalu být optimální a přešlo se k jinému zobrazení. Předmětová rovina objektivu se ztotožnila s předmětovou ohniskovou rovinou objektivu, za objektivem bylo zobrazení paralelními svazky do nekonečna a mikroskop byl doplněn tzv. tubusovou čočkou TC (pozor je to dokonale korigovaná optická soustava!), která teprve vytváří převrácený, zvětšený obraz, který je pozorován okulárem jako lupou. (Optická stavba připomíná dalekohledovou lupu, ale vzdálenost objektiv-TC je značně větší, než je u dalekohledové lupy vzdálenost lupa-dalekohled, kde lupa tvoří v podstatě předsádku dalekohledu).



Obr.4.4. Vícestupňový mikroskop

4.5. Další optické vybavení mikroskopů

Dále může být mikroskop vybaven pankreatickou soustavou pro plynulou změnu zvětšení (rozlišení se ale nemění !), hranolovým systémem binokulární hlavice (může měnit zvětšení), dalšími hranolovými či zrcadlovými systémy pro dělení svazku světla (např. pro objektivní záznam obrazu), vybavením pro různé pozorovací techniky jako je např. pozorování v polarizovaném světle,

v temném poli, ve fázovém či interferenčním kontrastu, fluorescencí a podobně.

4.6. Hlavní optické parametry mikroskopů

4.6.1. Zvětšení mikroskopu

Budeme uvažovat mikroskop jako optickou soustavu o celkové ohniskové vzdálenosti f' . Pro ohniskovou vzdálenost dvoučlenné optické soustavy platí :

$$f' = - (f_1' \cdot f_2') / \Delta .$$

Budeme-li mikroskop uvažovat jako lupu o ohniskové vzdálenosti f' , můžeme po dosazení pro zvětšení mikroskopu psát :

$$\Gamma = 250 / f' = - (\Delta / f_1') \cdot (250 / f_2') .$$

První faktor $- (\Delta / f_1')$ představuje potom příčné měřítko zobrazení objektivu a faktor $(250 / f_2')$ zvětšení okuláru.

Z uvedeného vyplývá, že **měnit zvětšení mikroskopu** můžeme trojím způsobem a to :

- *výměnou objektivu*
- *výměnou okuláru*
- *změnou optického intervalu .*

Protože objektivy mikroskopů jsou korigovány pro konkrétní měřítko zobrazení a korekční stav závisí na poloze předmětu, nelze doporučit měnit zvětšení mikroskopu změnou optického intervalu.

Poznámka: u víceúhňových mikroskopů je označování objektivů řešeno tak, že opět stačí vynásobit měřítko zobrazení objektivu zvětšením okuláru a získáme údaj o zvětšení mikroskopu. Z toho je patrné, že nelze kombinovat objektivy zobrazující do nekonečna se stavbou klasických dvoustupňových mikroskopů!

4.6.2. Omezení paprskových svazků v mikroskopu

4.6.2.1. Aperturní clona, vstupní a výstupní pupila

Objektivy o malém zvětšení jsou tvořeny tmelenou dvoučlennou soustavou, proto objímka objektivu tvoří současně *aperturní clonu* a *vstupní pupilu*.

Objektivy o větším zvětšení než asi 5x jsou složitější soustavy. Jsou tvořeny dvěma nebo více členy oddělenými vzduchovými mezerami. U těchto soustav tvoří aperturní clonu objímka některého zadního členu nebo zvláštní clona umístěná v blízkosti obrazového ohniska mikroskopu, nebo přímo v obrazové ohniskové rovině. Vstupní pupila potom leží v $-\infty$.

Výstupní pupila mikroskopu leží vždy v blízkosti obrazové ohniskové roviny mikroskopu jako celku. Pro její průměr lze odvodit vztah :

$$D' = 2 f' \cdot A_n,$$

kde f' je ohnisková vzdálenost mikroskopu jako celku a $A_n = n \cdot \sin \sigma$ je *číselná apertura* objektivu mikroskopu (viz kap. 2).

4.6.2.2. Zorné pole mikroskopu

Lineárním zorným polem mikroskopu nazýváme průměr kruhu v rovině předmětu, jehož obraz vyplňuje clonu zorného pole okuláru. Clona zorného pole se obecně nachází v předmětové ohniskové rovině okuláru.

Při volbě lineárního zorného pole okuláru se vychází ze zdánlivého zorného pole mikroskopu, které se volí pro starší provedení mikroskopů s průměrem tubusu 23,3 mm asi 160 mm, u novějších provedení s průměrem tubusu 30 mm 200 mm. Pro lineární zorné pole mikroskopu potom plyne v prvním případě:

$$2y = 160 / \Gamma \text{ [mm]}, \text{ ve druhém případě } 2y = 200 / \Gamma \text{ [mm]}.$$

Poznámka:

V tabulkách okulárů, dodávaných výrobcem mikroskopů je uvedeno tzv. *číslo zorného pole*, které když vydělíme příčným měřítkem zobrazení objektivu, obdržíme lineární velikost zorného pole mikroskopu vybaveného daným objektivem a okulárem.

4.6.2.3. Hloubka ostrosti

Hloubka ostrosti je fenomén závislý na konečné rozlišovací mezi oka pozorovatele. Předměty pozorované mikroskopem mají ve většině případů

konečnou tloušťku. Je-li mikroskop zaostřen na určitou předmětovou rovinu, vnímáme jako „ostré“ i detaily, nacházející se mezi rovinami, ležícími jak pod zaostřenou rovinou, tak i nad ní. Vzdálenost těchto rovin určuje *hloubku pole*, jinak též v optice obvyklou *hloubku ostrosti*. Tato veličina je závislá přímo úměrně na tolerované neostrosti a nepřímo úměrně na celkovém zvětšení mikroskopu a číselné apertuře objektivu mikroskopu. Tato hodnota je velice malá a pohybuje se od setin milimetrů pro malá zvětšení až po desítitisíciny milimetru pro maximální zvětšení. Ve skutečnosti však oko pozorovatele při pozorování obrazu v mikroskopu akomoduje a může tedy vidět zřetelně obraz předmětu vytvořený mikroskopem tehdy, padne-li do prostoru mezi vzdálený a blízký bod oka. Tím se hodnota hloubky pole zvětší. Podotýkám ale, že poloha blízkého a vzdáleného bodu oka pozorovatele je závislá na stáří pozorovatele, a tím se i hloubka pole mění v závislosti na věku pozorovatele.

4.6.2.4. Rozlišovací mez mikroskopu

Rozlišovací mez mikroskopu je závislá na rozlišovací mezi jeho objektivu. Při zkoumání rozlišovací meze u mikroskopů musíme rozlišovat případy, kdy předmět vysílá vlastní světlo a případy předmětů prosvětlených nebo osvětlených. Budeme předpokládat nekoherentní osvětlení nebo prosvětlení.

4.6.2.4.1. Rozlišovací mez při pozorování předmětů, vysílajících vlastní světlo

Vztah pro úhlovou rozlišovací mez byl odvozen ve druhé kapitole. V případě mikroskopu však nejde o úhlové rozlišení, ale o lineární vzdálenost y dvou stejných bodů v předmětové rovině mikroskopu právě ještě mikroskopem rozlišených. Za těchto předpokladů lze odvodit vztah:

$$y = 0,61 \cdot (\lambda / A_n).$$

4.6.2.4.2. Rozlišovací mez při pozorování osvětlených nebo prosvětlených předmětů

V mikroskopické praxi častěji přichází v úvahu případy, kdy je předmět osvětlen nebo prosvětlen vnějším zdrojem světla. Při zkoumání těchto případů musíme brát v potaz průchod světla mikroskopem. Tento případ bude řešen v následující

kapitole týkající se vzniku obrazu v mikroskopu. Zde budou pouze uvedeny výsledky.

V případě bodového zdroje (v tomto případě se jedná o velikost aperturní clony kondenzoru) dospějeme k závěru, že :

$$y = \lambda / A_n .$$

Z výsledku je patrné, že rozlišovací mez je téměř dvojnásobná oproti minulému případu. Situace ale v praxi není tak nepříznivá, protože není možné realizovat bodový zdroj o dostatečné svítivosti, takže prakticky se vždy jedná o plošný zdroj, což je z hlediska rozlišitelnosti jemných detailů předmětu výhodnější. Pokud je aperturní clona kondenzoru otevřena tak, že její obraz promítnutý do aperturní clony objektivu tuto právě vyplní , dospějeme ke vztahu, že :

$$y = \lambda / 2 A_n = 0,5 \cdot (\lambda / A_n) ,$$

což je hodnota prakticky shodná s předchozím případem.

Předchozí úvahy o rozlišovací mezi můžeme tedy shrnout takto:

Rozlišovací mez mikroskopu je dána vztahem

$$y = \lambda / 2 A_n$$

nezávisle na tom, zda je předmět sám zdrojem světla, nebo zda je jiným zdrojem prosvětlen nebo osvětlen.

Má-li být plně využito rozlišovací meze objektivu mikroskopu, je nutné volit zvětšení okuláru tak, aby detaily obrazu byly rozlišeny i pozorovatelovým okem, to znamená, aby se jevíly pod úhlem alespoň $1' - 4'$, tudíž :

$$\text{arc } 1' < (0,5 \cdot \lambda \cdot \Delta) / (A_n \cdot f_1' \cdot f_2') < \text{arc } 4' , \text{ a po úpravě :}$$

$$A_n / 6,7 \lambda < \Gamma < A_n / 1,7 \lambda ,$$

a pro $\lambda = 5 \cdot 10^{-4}$ lze přibližně psát :

$$300 A_n < \Gamma < 1176 A_n .$$

Volíme-li např. $\Gamma > 1200 A_n$, hovoříme o tzv. *prázdném zvětšení*, které již nepřispívá k dalším informacím o struktuře předmětu. Doporučuje se volit

$$\Gamma = 500 A_n .$$

Poznámka: Pokud budeme uvažovat mez rozlišení $y = 0,61\lambda / A_n$, obdržíme pro výše uvedenou nerovnost vztah: $250 A_n < \Gamma < 1000 A_n$, což je vztah častěji uváděný v literatuře.

4.6.2.4.3. Ovlivnění rozlišovací meze

Ze vztahu pro rozlišovací mez mikroskopu je patrné, že její zvýšení je možné jedinečně zmenšením vlnové délky světla použitého k pozorování, nebo zvýšením číselné apertury použitého objektivu.

První možnost je dosti problematická, protože rozsah použitelných vlnových délek je omezený. Na tom principu byla založena mikroskopie v ultrafialovém světle, ale po objevu elektronové mikroskopie se tato metoda nepoužívá. Druhá možnost je realizovatelná dvěma způsoby. Buď zvětšením aperturního úhlu σ , nebo zvětšením indexu lomu předmětového prostředí. Aperturní úhel může teoreticky nabývat hodnoty $\sigma = 90^\circ$, prakticky ovšem pouze asi $67 - 75^\circ$.

Pro zvýšení indexu lomu předmětového prostředí se používá voda ($n = 1,33$), cedrový olej ($n = 1,52$), monobromnaftalén ($n = 1,66$) a podobně. Tyto kapaliny umožňují zvýšení číselné apertury prakticky až na hodnotu 1,4, což vede k rozlišovací mezi přibližně $0,2 \mu\text{m}$.

V následující kapitole si ukážeme ještě další možnost zvýšení rozlišovací meze a to použitím *pozorování v šikmém osvětlení*.

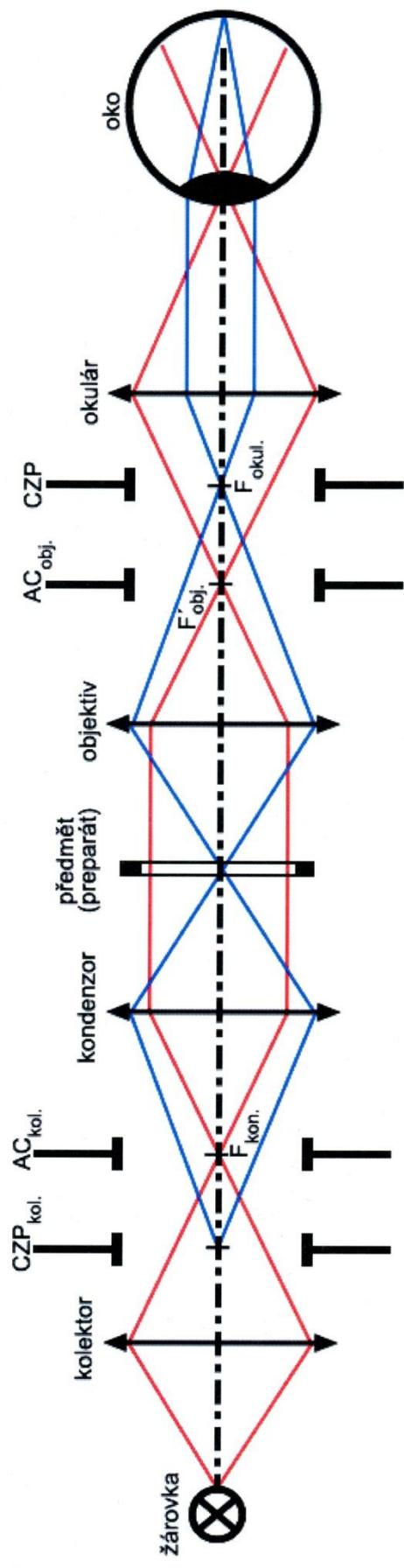
4.7. Průchod svazku paprsků mikroskopem

Vlákno žárovky je kolektorem zobrazeno do aperturní clony kondenzoru AC_{kon} , mikroskopovým preparátem (předmětem) prochází paralelní svazky paprsků a objektivem je vlákno žárovky zobrazeno do aperturní clony objektivu AC_{obj} (viz červený svazek paprsků na obrázku). Okulár potom zobrazí vlákno žárovky, tudíž aperturní clony kondenzoru a objektivu do oční čočky a tato zajistí osvětlení celé sítnice oka.

Clona zorného pole kondenzoru CZP_{kon} je kondenzorem zobrazena do roviny preparátu (předmětu) a objektivem potom do clony zorného pole okuláru, za

okulárem pokračuje paralelní chod paprsků do oční čočky a tato zobrazí clony zorného pole kondenzoru, okuláru (a tím i rovinu preparátu-předmětu) na sítnici oka (viz modrý svazek paprsků na obrázku).

Aby byla zajištěna správná velikost clon, které se promítají jedna na druhou (jak aperturní clony kondenzoru a objektivu, tak i clony zorného pole kondenzoru a okuláru) jsou kondenzorové clony AC_{kon} a CZP_{kon} irisové, tzn. s proměnnou velikostí, aby bylo možné jejich nastavení podle volby objektivu a okuláru. Na následující straně je na obr.4.5. znázorněn průchod svazků paprsků mikroskopem. Červené svazky jsou osvětlovací, modré obrazotvorné.



Obr.4.5.

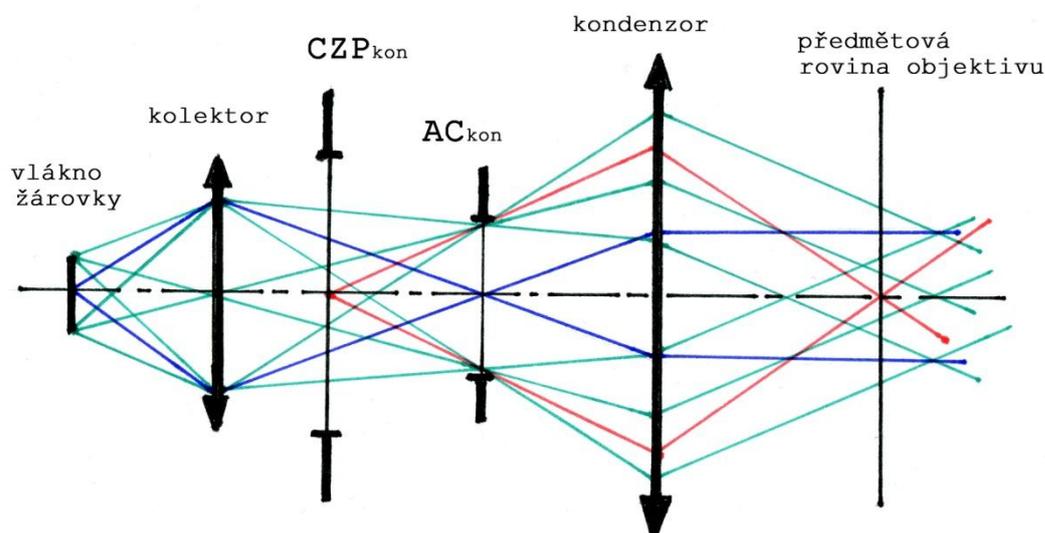
4.8. Osvětlovací soustavy mikroskopů

V praktické mikroskopii přichází nejčastěji do úvahy pozorování předmětů nevysílajících vlastní světlo, musí proto být osvětlovány nebo prosvětlovány podle toho, jsou-li průhledné nebo neprůhledné. Aby bylo plně využito rozlišovací meze mikroskopového objektivu je nutné, aby osvětlovací svazek světla plně vyplnil aperturní úhel objektivu. Za tím účelem jsou konstruovány různě složité složité optické osvětlovací soustavy mikroskopů, z nichž nejznámější je osvětlovací soustava Köhlerova.

4.8.1. Köhlerova osvětlovací soustava

Köhlerova osvětlovací soustava umožňuje měnit jak aperturní úhel osvětlovacího svazku, tak i velikost osvětleného pole v předmětové rovině mikroskopu. Schematicky je nakreslena na obrázku 4.6. Popis chodu paprsků tímto osvětlovačem a celým mikroskopem je podrobně popsán v kapitole 4.7.

Obr.4.6. Chod paprsků v Köhlerově osvětlovací soustavě



Na obrázku modrý svazek značí osový osvětlovací svazek, zelené svazky značí mimoosové osvětlovací svazky a červený svazek znázorňuje zobrazení polní kondenzorové clony do roviny předmětu.

V případě objektivů o malém měřítku zobrazení je do soustavy mezi kolektor a kondenzor vložena další pomocná čočka, která zajistí prosvětlení většího zorného pole mikroskopu.

4.8.2. Pankratický kondenzor

Jak bylo popsáno v minulé kapitole, je nutno při výměně objektivů a okulárů měnit i průměry kondenzorových clon. Pro usnadnění této činnosti byl zkonstruován na principu Köhlerova osvětlovače *pankratický kondenzor*, tj. kondenzor s proměnným měřítkem zobrazení. Před aperturní clonu kondenzoru byla vsunuta pomocná čočka, která pomáhá zobrazit clonu zorného pole do roviny předmětu. Před kondenzor byla vložena pankratická soustava, která zobrazuje aperturní clonu kondenzoru do předmětového ohniska kondenzoru s proměnnou velikostí, jak je požadováno. To znamená, že při přechodu od jedné krajní polohy pankratické soustavy do druhé se bude obraz aperturní clony zmenšovat, zatím co obraz polní clony zvětšovat, jak to vyžadují podmínky pro správné pozorování.

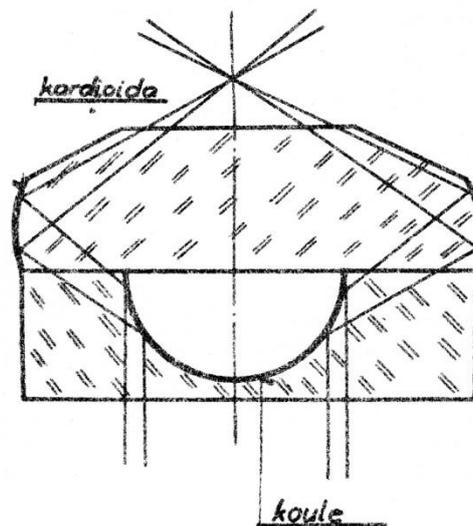
4.8.3. Osvětlovací soustavy pro pozorování v temném poli

Zasáhneme-li do ohybového obrazce světelného zdroje (viz další kapitola) tak, že ze zobrazování vyloučíme nulté ohybové maximum, bude se jevit zorné pole mikroskopu tmavé a na tmavém pozadí se objeví světlé obrazy detailů předmětu. Principiálně toho můžeme dosáhnout několika odlišnými metodami.

- a) Uvažujme kondenzor, jehož apertura je větší než apertura objektivu mikroskopu a dále lze aperturní clonu kondenzoru stranově vysunout tak, že nulté maximum (přímé světlo) probíhá mimo objektiv mikroskopu. (Tato metody souvisí s metodou šikmého osvětlení, jak bude popsáno v příští kapitole). Paprsky světla lomené, rozptýlené nebo odchýlené ohybem světla na struktuře předmětu mohou vstupovat do objektivu a vytvářet obraz pozorovaného předmětu.
- b) Další možností je použití speciálních kondenzorů určených pro pozorování metodou temného pole. Tyto kondenzory mají tu vlastnost, že svazek paprsků z něj vystupuje pouze pod větším aperturním úhlem, než je aperturní úhel objektivu mikroskopu a tudíž přímé světlo, osvětlující zorné pole nevstoupí do objektivu. Opět pouze paprsky světelného svazku odkloněné na struktuře preparátu jsou schopny vytvořit obraz

v mikroskopu. Tyto kondenzory jsou konstrukčně známi jako *paraboloidní, kardioidní* a podobně.

- c) Předchozí metody pracovaly s úpravou svazku světla vstupujícího do objektivu mikroskopu kondenzorem. Když se zamyslíme nad vznikem obrazu v mikroskopu, jak je popsáno v následující kapitole, existuje další elegantní možnost, jak dosáhnout temného zorného pole. V obrazové ohniskové rovině objektivu mikroskopu (tudíž v rovině aperturní clony objektivu) vznikají ohybová maxima od difrakce na struktuře předmětu. Pokud do polohy nultého ohybového maxima umístíme clonku, která svazek světla tohoto maxima zadrží, dostaneme další metodu, jak realizovat pozorování v temném poli. Maxima vyšších řádů vytvoří interferenční obraz pozorovaného předmětu na temném zorném poli, jak je žádoucí. Tato metoda je ovšem realizovatelná u mikroskopů se složitějším chodem svazku paprsků, je nutné mezizobrazení aperturní clony objektivu (rovina v níž vzniká ohybový obraz zdroje), aby bylo kde příslušnou clonku umístit.



Obr.4.7. Kardioidní kondenzor

4.8.4. Osvětlovací soustavy pro pozorování v odraženém světle

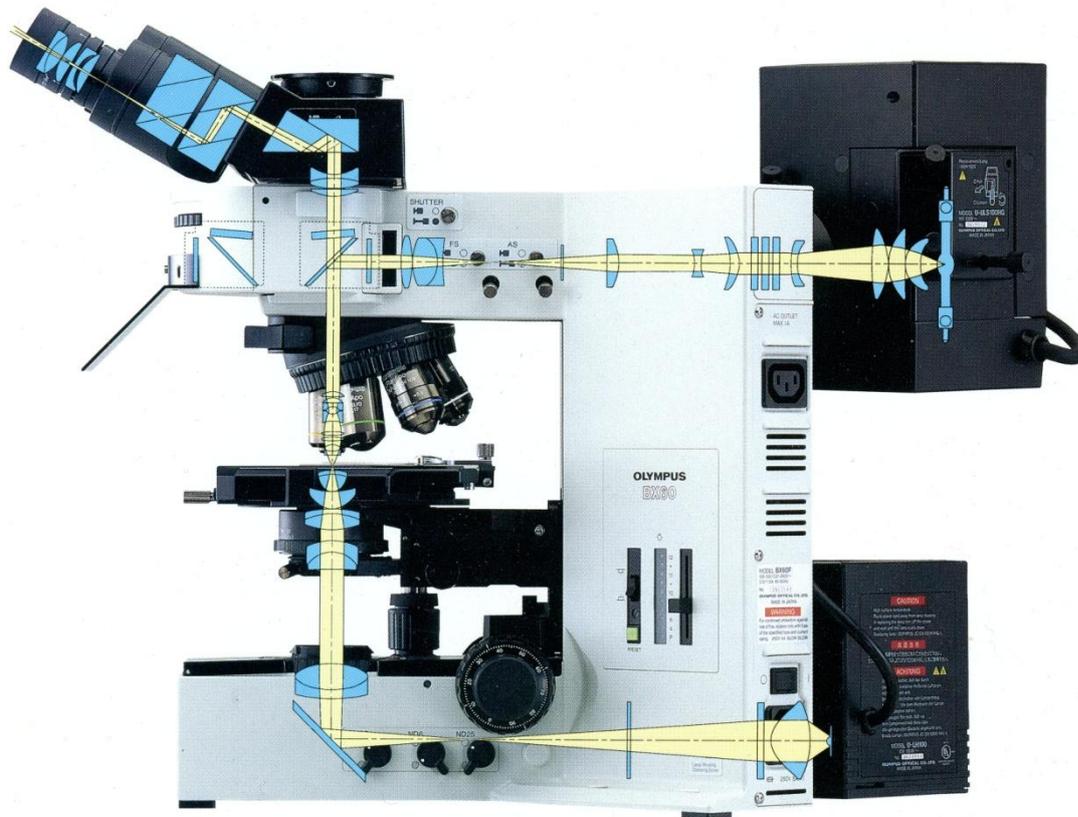
Historicky prošly osvětlovače pro neprůhledné preparáty dlouhým vývojem od osvětlovačů vnějších, kdy je osvětlovací svazek světla veden mimo tubus

mikroskopu, až po osvětlovače na principu Köhlerova systému, kdy je svazek veden vnitřkem tubusu mikroskopu a pro konečné osvětlení je užit objektiv mikroskopu. Tyto soustavy se nazývají *vertikální osvětlovače*. Jeden příklad je na obrázku 4.8. Nové moderní mikroskopy jsou vesměs vybaveny jak optickou soustavou pro prosvětlení preparátu, tak i výkonnější soustavou pro osvětlení neprůhledných preparátů a přechod od jednoho způsobu osvětlení ke druhému je značně zjednodušen. Řez takovým mikroskopem je na obrázku 4.9.



Obr. 4.8. Vertikální osvětlovač s nasazeným objektivem

Poznámka: V poslední době se stále častěji v osvětlovacích soustavách mikroskopů používají místo klasických žárovek LED. Mají delší životnost, stabilnější fotometrické vlastnosti a jsou konstrukčně výhodnější.



Obr. 4.9. Řez moderním mikroskopem – průchod světla

4.9. Objektiv mikroskopu

Mikroskopové objektivy jsou co do kvality zobrazení (korekčního stavu) jedny z nejdokonalejších optických zobrazovacích soustav. Až do roku asi 1800 tvořila objektiv mikroskopu jednoduchá čočka. Asi od roku 1811 byl objektiv tvořen achromatickým dubletem. V první polovině 19. Století nejvíce přispěl ke zkvalitnění konstrukce mikroskopových objektivů italský optik G.B. Amici. Nejvíce přispěl k rozvoji konstrukce objektivů mikroskopů Ernst Abbe.

Mikroskopové objektivy můžeme dle stupně korekce rozdělit do několika základních skupin:

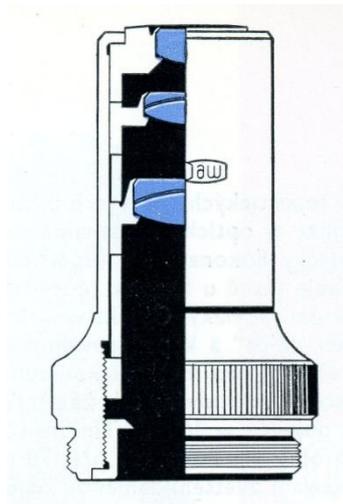
- *achromatické objektivy*
- *planachromatické objektivy*
- *apochromatické objektivy*
- *planapochromatické objektivy*

- *objektivy pro dopadající světlo*
- *speciální objektivy* (např. s velkou pracovní vzdáleností aj.)

Dále mikroskopové objektivy dělíme dle jejich měřítka zobrazení (a tím i číselné apertury). Řada zvětšení u běžných mikroskopových objektivů začíná obvykle u měřítka zobrazení 4x a končí u imerzních objektivů, které mají měřítko zobrazení 100x. Mimo tuto řadu se vyrábějí speciální objektivy s měřítkem zobrazení 0,5x pro dosažení velkého zorného pole a celá řada dalších.

4.9.1. Achromatické objektivy

Optická soustava *achromatických objektivů* má být aplanatická, tj. má odstraněnu otvorovou vadu a splněnu sinovou podmínku a dále má mít odstraněnu barevnou vadu polohy. Jsou korigovány pro žlutozelenou oblast spektra s těžištěm mezi 550 – 590 nm, pro kterou je oko nejcitlivější. Pro měřítko zobrazení $< 5x$ jsou tvořeny dubletem, pro větší hodnoty β je optická soustava těchto objektivů složitější.

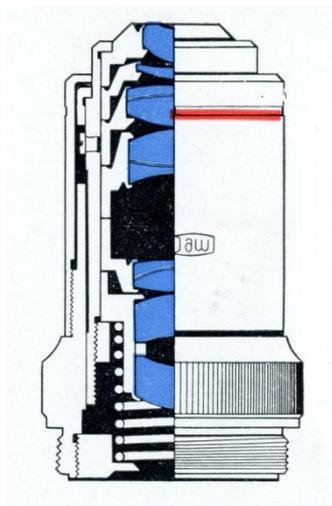


Obr. 4.10. Achromatický objektiv

Poznámka: U lépe korigovaných optických soustav mikroskopových objektivů je nutno mimo osové vady korigovat i vady mimoosové, tj. komu, astigmatismus a zklenutí pole.

4.9.2. Planachromatické objektivy

Planachromatické objektivy jsou korigovány podobně jako objektivy achromatické, na rozdíl od nich mají však úplně vyrovnané zorné pole, mají korigováno zklenutí. Jsou vhodné pro mikrofotografii.



Obr. 4.11. Planachromatický objektiv

4.9.3. Achromatické objektivy

Achromatické objektivy jsou složitější a technicky náročnější než objektivy achromatické a to jak počtem optických členů, tak i výběrem optického materiálu. Kromě optického skla je k výrobě některých čoček použito přírodního nebo umělého křivce (fluoridu vápenatého CaF_2). Tento materiál dává možnost odstranit sekundární spektrum. Achromatické objektivy jsou korigovány pro tři spektrální barvy. Touto dokonalou korekcí jsou apochromatické objektivy korigovány prakticky pro celé viditelné spektrum. Je však u nich ještě barevná vada velikosti, kterou je možno kompenzovat nezbytným použitím kompenzačních okulárů, které mají barevnou vadu zvětšení opačnou než objektivy. Achromatické objektivy mají při stejném měřítku zobrazení větší numerickou aperturu než objektivy achromatické, tím mají lepší rozlišovací mez i světelnost.



Obr. 4.12. Apochromatické objektivy (obj. K Apo 25:1 a K Apo 40:1 jsou kompenzační)

4.9.4. Planapochromatické objektivy

Obdobně jako achromatické objektivy mají i apochromatické objektivy zklenuté zorné pole. Toto zklenutí je u *planapochromatických objektivů* odstraněno velmi složitými optickými soustavami.

4.9.5. Objektivy pro dopadající světlo

Je to skupina objektivů, jež jsou vždy korigovány pro obrazovou pracovní vzdálenost ∞ , pracují ve spojení s vertikálním osvětlovačem ve kterém je zabudována tubusová čočka. Jsou kontrolovány na pnutí, často pracují v polarizačních mikroskopech. Není u nich dodržena předmětová pracovní vzdálenost od dosedací plochy objektivu, jak je to kvůli snadné výměně předepsáno u ostatních typů objektivů.

4.10. Okulár mikroskopu

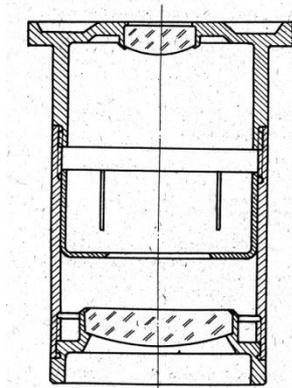
Okulárem mikroskopu pozorujeme skutečný obraz předmětu vytvořený objektivem jako lupou. U okulárů je nutno, vzhledem ke tvaru souhrnného svazku paprsků jím procházejícího, korigovat především barevnou vadu velikosti a astigmatismus, rovněž zklenutí pole a zkreslení nemá být velké. Naopak vzhledem k malému aperturnímu úhlu svazku okulárem procházejícímu (asi 3 – 4 °) není nutné si všimnout otvorové vady, barevné vady polohy a komy. V mikroskopech používáme několik typů okulárových konstrukcí. Jsou to především :

- *Huygensův okulár*
- *Ramsdenův okulár*
- *Kellnerův okulár*
- *kompensační okulár*
- *ortoskopický okulár*
- *širokoúhlý okulár*
- *rozptylné okuláry*

4.10.1. Huygensův okulár

Tento typ okuláru je snad nejběžněji používaným typem okuláru v mikroskopu. Je tvořen dvěma plankonvexními čočkami, rovinnými plochami přivrácenými k oku. Přední čočka, kolektiv, má menší lámavost než zadní, oční, čočka. Mezi oběma čočkami je umístěna kruhová clona, tvořící clonu zorného pole mikroskopu. I přes jednoduchou konstrukci má tento okulár poměrně dobře

korigovány optické vady zobrazení. Používá se do zvětšení asi 10x. Zorné pole nepřevyšuje asi 30°.



Obr. 4.13. Huygensův okulár

4.10.2. Ramsdenův okulár

Tento okulár je tvořen dvěma plankonvexními čočkami stejné lámavosti, vypuklé plochy jsou přivráceny k sobě. V mikroskopové praxi není často používán. Jeho zorné pole je asi 30°.

4.10.3. Kellnerův, periplanatický, okulár

Je to v principu zlepšený Ramsdenův okulár. Jeho oční čočka je tvořena dubletem. Je u něj dobře korigována barevná vada i zkreslení. Jeho zorné pole dosahuje až 52°.

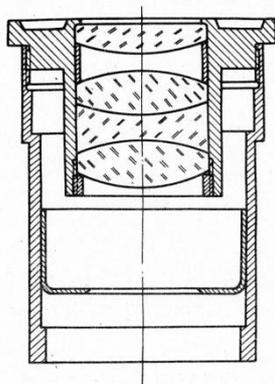
4.10.4. Kompenzační okulár

U apochromatických objektivů mikroskopu není odstraněna barevná vada velikosti, takže zvětšení pro krátkovlnnou část spektra je větší než pro dlouhovlnnou, proto obrysy těles mají barevné zbarvení. Tato vada se kompenzuje vhodně navrženými okuláry, které mají barevnou vadu velikosti nedokorigovanou opačně, větší zvětšení je pro dlouhovlnnou část spektra a tím je barevná vada apochromatických objektivů vykompenzována. Po optické stránce jsou to všeobecně vícečlenné optické soustavy. Používají se i s planachromatickými či silnými achromatickými objektivy.

4.10.5. Ortoskopický okulár

Tento okulár je někdy znám pod názvem Abbeův okulár. Je složen ze dvou členů, prvního třídílného, který je tvořen flintovou rozptylkou ohraničenou dvěma korunovými spojkami a druhého, tvořeného plankonvexní spojkou. Jeho

zorné pole přesahuje 40° . Další jeho předností je velká předmětová pracovní vzdálenost a velká vzdálenost výstupní pupily od poslední optické plochy. Je proto velmi vhodný pro velká zvětšení, kdy se ohnisková vzdálenost tohoto okuláru pohybuje i kolem 3 – 5 mm.



Obr. 4.14. Ortoskopický okulár

4.10.6. Širokouhlý okulár

Tento okulár je někdy nazýván Erfleuß okulár. Je složen ze tří členů, z nichž krajní dva jsou tmelené dublety, rozptylnými členy otočeny vně a mezi nimi je jednoduchá symetrická bikonvexní čočka. Tyto okuláry dosahují velikosti zorného pole až 70° .

4.10.7. Rozptylné okuláry

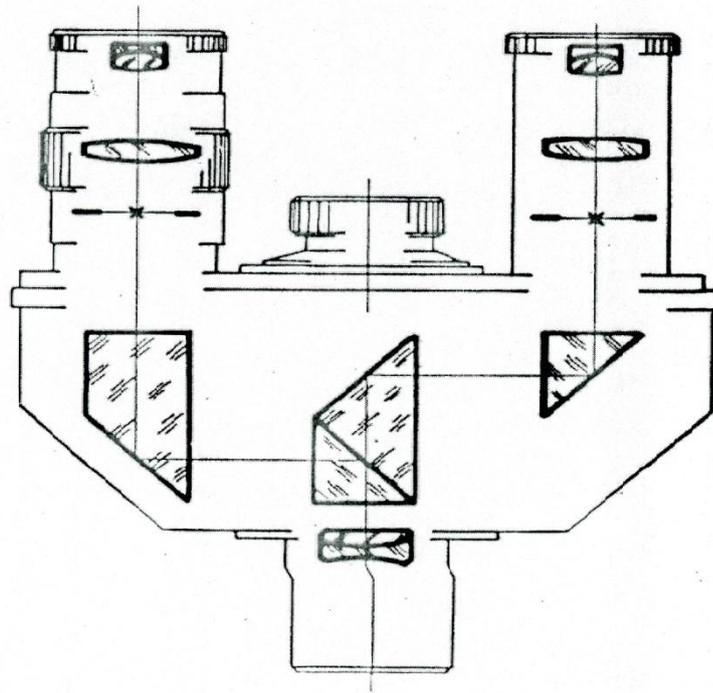
Tyto okuláry se též nazývají homály. Používají se pro potlačení zklenutí pole a barevné vady velikosti apochromatických objektivů. Tyto okuláry se používají převážně v mikrofotografii.

4.11. Binokulární hlavice

Pozorování obrazu v mikroskopu pouze jedním okem je velmi únavné pro oko pozorovatele. Proto se mikroskopy vybavují *binokulárními hlavicemi* různého provedení, aby bylo možno pozorovat obraz oběma očima. Toto pozorování není prostorové, obraz vytvořený pouze jedním objektivem je následně hranolovou soustavou rozdělen do dvou svazků, ale obě oči pozorovatele vidí naprosto stejný obraz.

Řada moderních mikroskopů již je vybavena pouze binokulárními hlavicemi, ale starší provedení mají možnost používat jak monokulární, tak binokulární hlavice.

Některé Bi-hlavice mají faktor zvětšení 1, ale některé zavádějí přídatné zvětšení, na což je třeba pamatovat.



Obr. 4.15. Binokulární hlavice

Poznámka: byly činěny pokusy, jak v binokulární hlavici upravit svazky paprsků, abychom obdrželi prostorový vjem předmětu. Provádí se to asymetrickými clonkami ve výstupních pupilách v každé větvi Bi hlavice, aby každé oko pozorovatele obdrželo poněkud jiný obraz. Tato metoda se ale pro poněkud nepohodlné pozorování neujala.

4.12. Mikroskopy pro prostorová pozorování

Převážná většina mikroskopických preparátů je plošná, takže pro jejich pozorování stačí klasický jednoobjektivový mikroskop. Pro pozorování prostorových preparátů jsou vhodné *stereoskopické mikroskopy*. Tyto se z principu konstruují pouze pro relativně malá zvětšení, horní hranice je kolem 250x. Konstruktivně se užívají dvě rozdílná provedení.

- a) První provedení stereoskopického mikroskopu je konstrukčně řešeno dvěma nezávislými mikroskopy vzájemně svázanými tak, že jejich optické osy spolu svírají konvergenční úhel očí, pozorujících předmět

v konvenční zrakové vzdálenosti, což je asi $14^\circ - 16^\circ$. Okuláry jsou uloženy v excentrických objímkách, aby bylo možno měnit oční rozestup. Tyto stereomikroskopy se někdy nazývají Greenoughovy, podle jejich objevitele.

- b) Druhý stereomikroskop, častěji používaný, pracuje na principu dalekohledové lupy, kde dva nezávislé dalekohledy s paralelními optickými osami mají společnou velkou spojnou čočku tvořící lupu. Vzdálenost optických os dalekohledů má podstatný vliv na výsledný prostorový vjem. Je blízká očnímu rozestupu. Konstrukčně je opět zajištěna změna očního rozestupu okulárů. Obvykle tři nejčastěji Galileovy dalekohledy různých zvětšení v mikroskopu jsou uloženy na karuselu a jejich natáčením lze skokově měnit celkové zvětšení stereomikroskopu.



Obr. 4.16. Stereomikroskop

4.13. Inverzní mikroskopy

Pro mnohá pozorování např. v mineralogii, lékařství biologii a podobně je výhodné, když má klasický badatelský mikroskop opačnou optickou stavbu, tzn. osvětlovací soustava s kondenzorem prosvětluje preparát shora a mikroskopovým objektivem pozorujeme zdola. U metalografických inverzních mikroskopů samozřejmě osvětlovač osvětluje preparát zdola přes objektiv.



Obr. 4.17. Velký inverzní mikroskop

4.14. Digitální mikroskopy

Pro nepřiliš náročnou práci se v posledních létech začaly vyrábět tzv. *digitální mikroskopy* vybavené napevno digitální kamerou. Tyto přístroje mnohdy nemají vlastní okulár a obraz je objektivem promítán přímo na CCD obrazový snímač. Proto tyto mikroskopy pracují ve spojení s PC nebo notebookem, kde na displeji pozorujeme obraz vytvořený mikroskopem. K mikroskopům je dodáván SW pro jednoduchou úpravu obrazu a jeho následnou archivaci.



Obr. 4.18. Digitální mikroskop s okuláry



Obr. 4.19. Digitální mikroskop s obrazovkou



Obr. 4.20. Digitální mikroskop bez optické pozorovací větve

4.15. Principy mikrofotografie

Častým požadavkem bylo a je zadokumentovat obraz pozorovaný v mikroskopu. Jsou dvě možnosti. Buď si to co pozorují nakreslit, což ovšem v sobě skýtá nebezpečí subjektivního pohledu na objektivní realitu, nebo obraz zaznamenat objektivně, vyfotografovat jej.

Během vývoje mikroskopové techniky vznikaly i různé pomůcky pro snazší překreslování toho co pozorují. Obvykle za okulár se umísťovala zrcadlová či jiná překreslovací zařízení, která sloužila buď k promítnutí obrazu na desku stolu, nebo umožňovala zároveň pozorovat obraz v mikroskopu i plochu na kterou bylo kresleno.

Dokonalejší možností je *mikrofotografie*. Používá se několik různých technik fotografického záznamu obrazu z mikroskopu:

- Na tubus mikroskopu bez okuláru se umístí fotokomora a zaznamená se obraz vytvořený pouze mikroskopovým objektivem
- Mikroskop se vybaví zvláštním fotookulárem a obraz se zaznamená komorou bez vlastního objektivu
- Využije se kompletního mikroskopu a obraz se zaznamená fotokomorou vybavenou vlastním objektivem (obraz z mikroskopu za okulárem je zobrazován do nekonečna) fokusovaným na nekonečno.

Pro usnadnění fotodokumentace se mikroskopy vybavují speciálními nástavci, které umožňují zároveň pozorovat obraz v mikroskopu a fotografovat.

K novějším mikroskopům lze zakoupit okulárovou trinokulární hlavici, která má mimo tubusy pro okuláry další pro videokameru nebo fotoaparát, resp. pro oba přístroje. Z nástupem digitální fotografie se k mikroskopům dodávají speciální digitální komory, které mohou zároveň obraz zaznamenávat a zobrazovat na monitoru.



Obr. 4.21. Univerzální fotonástavec

Poznámka: v současnosti je trendem nepozorovat obraz pouze okulárem, ale snímat jej digitální kamerou a zobrazovat na monitoru počítače vybaveného speciálním softwarem pro zpracování obrazu. Tak je možná dokonalejší analýza obrazu, proměřování detailů, počítání jednotlivých elementů v obraze a podobně.



Obr. 4.22. Digitalizované mikroskopovací pracoviště

5. Vznik obrazu v mikroskopu a jeho ovlivňování

Při popisu vzniku obrazu v mikroskopu nevystačíme s paprskovou optikou, ale musíme se zaměřit na popis z hlediska vlnové optiky. Existuje více vlnových teorií, které popisují vznik obrazu v mikroskopu. Názornou teorii vzniku obrazu v mikroskopu vyslovil Ernst Abbe.

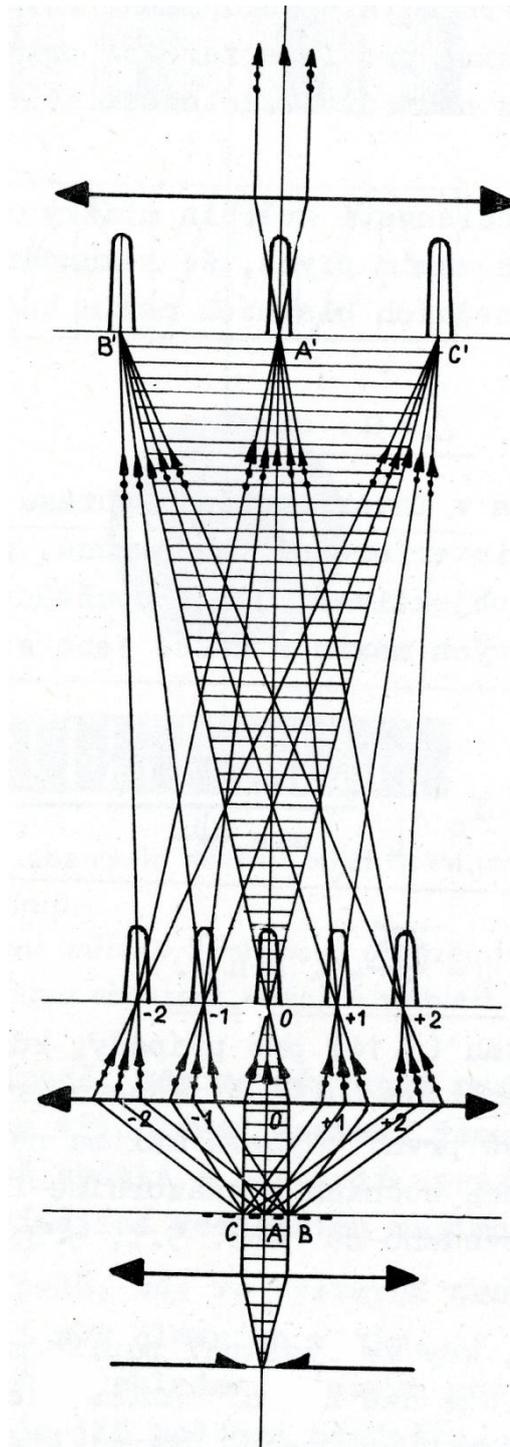
Abbe vysvětluje vznik obrazu v mikroskopu pomocí jevů ohybu světla na mřížce, kterou tvoří struktura předmětu a jež ovlivňuje obraz světelného zdroje vytvořený objektivem. Předpokládejme, že zdrojem světla je malá dírka v předmětové ohniskové rovině kondenzoru, tudíž do objektivu vstupuje paralelní svazek paprsků a v jeho obrazové rovině je vytvořen obraz zdroje. To by platilo, pokud by nebyl v chodu světla předmět. Na jeho struktuře dochází k ohybu a tím je ovlivněn obraz zdroje. Předmět si pro jednoduchost můžeme představit jako mřížku o jisté frekvenci. Platí zde klasická mřížková rovnice:

$$a. \sin \alpha_i = k_i \cdot \lambda ,$$

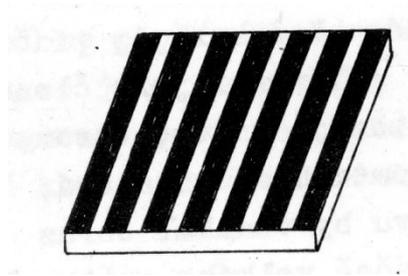
která byla již dříve uvedena, (a je mřížková konstanta, k_i řád spektra a α_i uhly, do nichž jsou jednotlivé řády ohybem zobrazeny) což značí, že v závislosti na mřížkové konstantě a budou do objektivu vstupovat paralelní svazky paprsků pod úhly α_i a ty budou po průchodu objektivem vytvářet v jeho obrazové ohniskové rovině řadu ohybem vzniklých obrazů zdroje. Jejich počet bude omezen velikostí výstupní pupily objektivu, která se nachází rovněž v jeho obrazové ohniskové rovině. Tyto sekundární zdroje světla vytvoří potom vzájemnou interferencí obraz předmětu (v tomto případě mřížky) o obrazové rovině objektivu.

Z tohoto popisu je zřejmé, že bude záležet na struktuře předmětu. Pro jednoduchost matematického zpracování jsme předpokládali předmět ve formě mřížky o konstantní frekvenci, i když skutečné předměty jsou mnohem složitější.

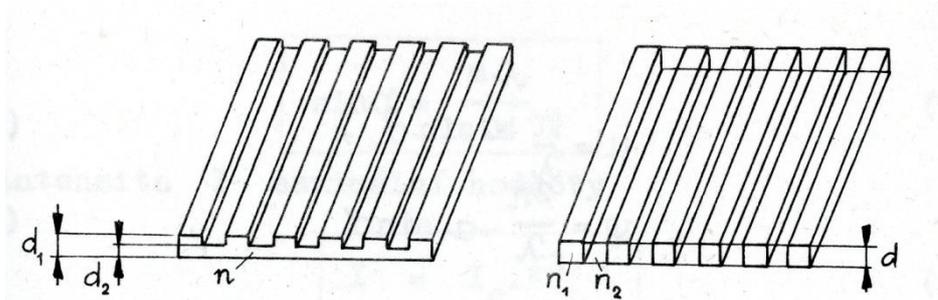
Mřížky si můžeme rozdělit na *absorpční* a *fázové*. Absorpční mřížky jsou takové, které hlavně ovlivňují amplitudu světelné vlny která mřížkou prochází, mřížky fázové naopak ovlivňují hlavně fázi světelné vlny. Každý tento případ je nutno řešit samostatně. Pro jednoduchost řešení budeme předpokládat osvětlení monochromatickým světlem.



Obr. 5.1. Ke vzniku obrazu v mikroskopu



Obr. 5.2. Absorpční mřížka



Obr. 5.3. Fázové mřížky

5.1. Absorpční mřížka s nekonečně úzkými štěrbinami

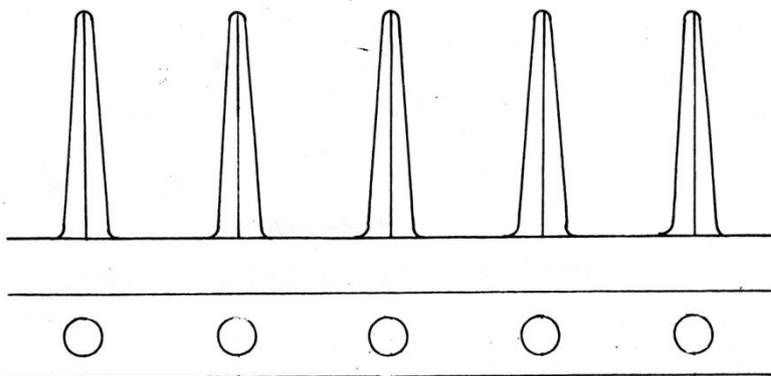
V tomto případě vznikne v obrazové ohniskové rovině objektivu ohybový obraz zdroje (dírková clonka v předmětové ohniskové rovině kondenzoru), kde rozdělení světla je dáno teorií ohybu světla na mřížce vztahem :

$$I = I_0 \cdot [\sin \mu / \mu]^2 \cdot [(\sin N v / 2) / (\sin v / 2)]^2 ,$$

kde $\mu = (\pi b \cdot \sin \alpha) / \lambda$, $v = (2\pi a \cdot \sin \alpha) / \lambda$, N je celkový počet štěrbin, b je šířka štěrbin mřížky.

Protože v našem případě je b malé je $\sin \mu / \mu = 1$ a pro malé hodnoty v platí $(\sin N v / 2) / (\sin v / 2) = N$, nabývá intenzita jednotlivých maxim hodnot

$I = I_0 \cdot N^2$. V obrazové ohniskové rovině objektivu vzniká proto mnoho ohybových maxim o stejné intenzitě, ve stejných vzdálenostech. Vedlejší ohybová maxima můžeme vzhledem k jejich malé intenzitě zanedbat.



Obr. 5.4. Rozdělení intenzity světla v ohybovém obraze absorpční mřížky s nekonečně úzkými štěrbinami při monochromatickém osvětlení

Nyní se vrátíme k druhé fázi tvorby obrazu a to je vzniku vlastního obrazu předmětu v obrazové rovině objektivu. Tento obraz je výsledkem vzájemného spolupůsobení, interference, všech elementárních vlnění od jednotlivých bodů v jeho výstupní pupile. Jelikož je počet těchto sekundárních zdrojů vlnění omezen pupilou, zúčastní se tvorby obrazu jen ta ohybová maxima, která vznikají v takových směrech α , která jsou objektivem ještě propuštěna. Jsou to směry, jejichž úhly splňují podmínku :

$$\alpha_i \leq \sigma, \quad \text{kde } \sigma \text{ je aperturní úhel objektivu.}$$

Lze vyslovit myšlenku, že podobnost obrazu s předmětem roste s počtem maxim ohybového obrazu světelného zdroje, která se zúčastní na vytváření obrazu v mikroskopu, tj. s počtem maxim, která jsou propuštěna objektivem.

Poznámka: obraz vytvořený objektivem by byl naprosto podobný předmětu, pokud by se jeho vytváření zúčastnilo nekonečně mnoho maxim.

Z toho co bylo doposud řečeno lze odvodit i teorii rozlišení v mikroskopu:

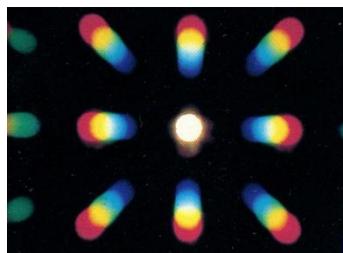
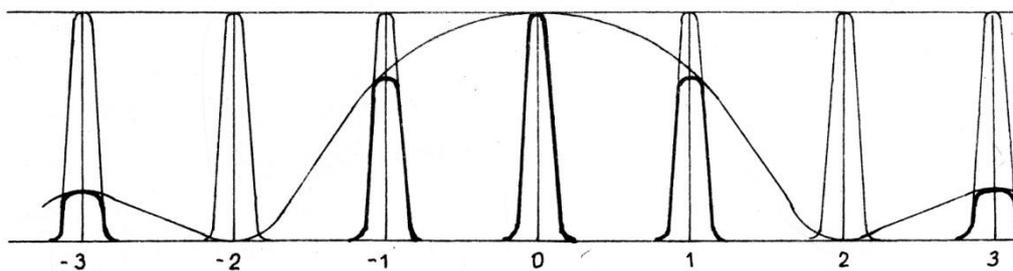
Pro případ, kdy jsou objektivem propuštěna pouze první ohybová maxima, platí mřížková rovnice : $a \cdot \sin \alpha = \lambda$, a pro $\sin \alpha = A_n$ vychází pro a a tím i pro rozlišení y : $y = a = \lambda / A_n$

a pro šikmé osvětlení, kdy se tvorby obrazu zúčastní pouze maxima nultého a jednoho prvního řádu : $y = \lambda / 2 A_n$, což je ve shodě s výsledky z minulé kapitoly.

Poznámka: Pokud zajistíme šikmým osvětlením tím, že do objektivu budou vstupovat pouze ohybová maxima kladná nebo záporná mimo maximum nultého řádu, získáme dále *zobrazení v temném poli*.

5.2. Absorpční mřížka se štěrbinami konečné šířky

V tomto případě je intenzita světla v ohybovém obraze dána opět vztahem uvedeným minule s tím rozdílem, že nyní $(\sin \mu / \mu) \neq 1$ a proto ohybový obrazec jednotlivých maxim je modulován ohybovým členem, jak ukazuje obrázek 5.5.a.,b.



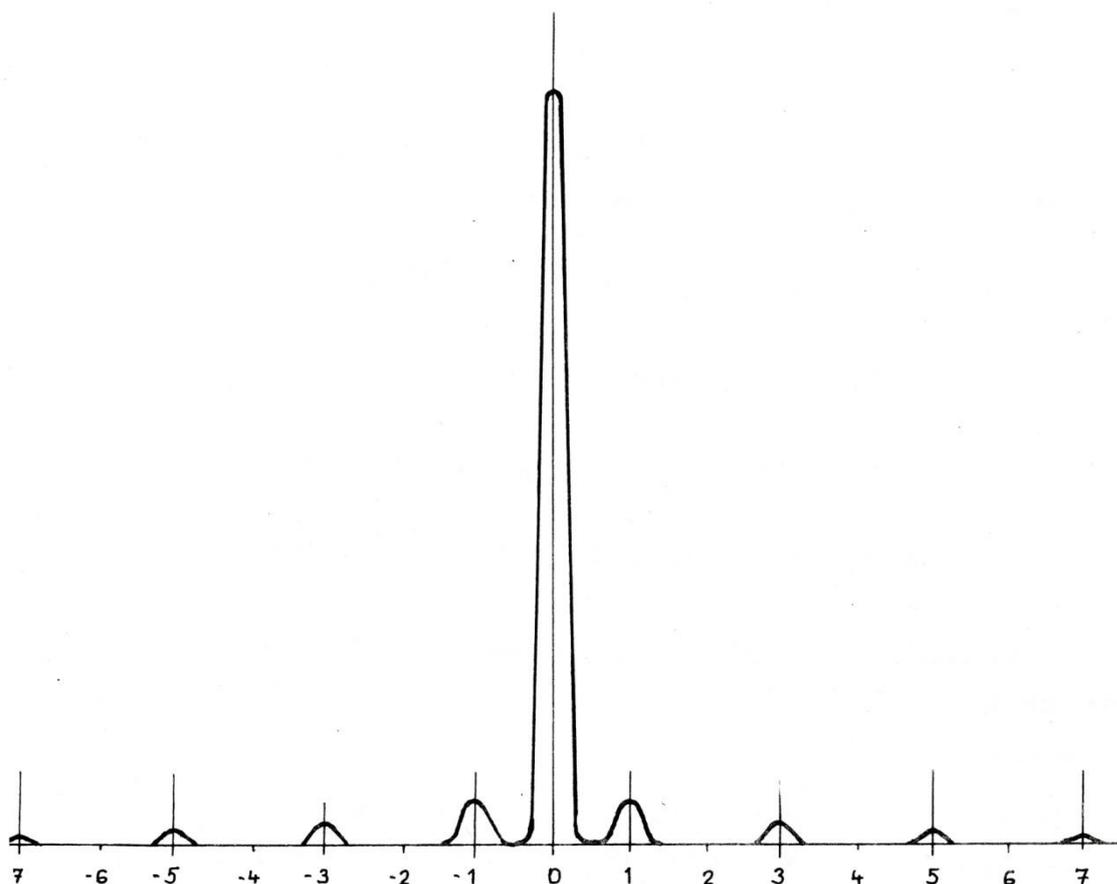
Obr. 5.5.a.,b. Rozdělení intenzity světla v ohybovém obraze mřížky se štěrbinami konečné šířky. Na obr.5.5.a. je zobrazení v monochromatickém světle. Na obr.5.5.b. je skutečný obraz v bílém světle od pravoúhlé mřížky

Počet maxim, která se účastní na vytváření obrazu nebude záviset pouze na číselné apertuře objektivu, ale i na ohybovém členu $(\sin \mu / \mu)^2$.

5.3. Fázová mřížka

V případě fázové mřížky je výpočet intenzity ohybového obrazu bodu v ohniskové obrazové rovině objektivu složitější. Fázové mřížky jsou dvojího druhu. V prvním případě je konstantní index lomu a mění se tloušťka, ve druhém je stejná tloušťka předmětu na němž dochází k ohybu a mění se index lomu. Obě tyto fázové mřížky jsou na obrázku 5.3.

Při výpočtu rozdělení intenzity světla v ohybovém obraze bodu v obrazové ohniskové rovině objektivu je nutno počítat příspěvky od obou vrstev, protože jsou obě části mřížky propustné, ovlivňují pouze fázi procházejícího záření. Výsledné rozdělení intenzity světla je ukázáno na obrázku 5.6.



Obr. 5.6. Rozdělení intenzity světla v ohybovém obraze fázové mřížky

Z obrázku je patrné, že vzniknou pouze lichá maxima, intenzita sudých maxim je nulová. Intenzita maxima nultého řádu je mnohonásobně větší, než ostatních lichých řádů a mimo to je oproti nim fázově posunuta o hodnotu $\pi/2$. Z uvedeného je patrné, že pokud se na tvorbě obrazu v případě fázových předmětů budou podílet všechna interferenční maxima z pupily objektivu, převáží osvětlení obrazové roviny nultým řádem, který nenese informaci o struktuře předmětu, tudíž struktura obrazu není mikroskopem rozlišena.

Jistou možnost pozorování fázových předmětů skýtá takové provedení, kdy clonkou zadržíme maximum nultého řádu a interference (tvorby obrazu) se zúčastní pouze lichá maxima. Pokud se na tvorbě obrazu budou podílet pouze maxima z jedné strany, bude se předmět vyznačovat jistou plastičností. V podstatě jde o pozorování v šikmém osvětlení. V obou těchto případech navíc jde o pozorování v temném poli.

Kvalitnější pozorování fázových předmětů umožňuje buď *pozorování v interferenčním mikroskopu*, nebo při použití *metody fázového kontrastu*. O obou metodách bude pojednáno v následujícím textu.

5.4. Ovlivňování obrazu v mikroskopu zásahem do primárního ohybového obrazu zdroje

V předchozím jsme si ukázali, že světlo zdroje podléhá při průchodu předmětem ohybu na jeho struktuře, čili lze konstatovat, že toto světlo nese informaci o struktuře předmětu. V obrazové ohniskové rovině objektivu vzniká ohybový obraz zdroje, který je charakterizován určitým počtem ohybových maxim. Jejich počet je závislý na jemnosti předmětové struktury a číselné apertuře objektivu. Obraz předmětu dosáhne alespoň minimální podobnosti s předmětem tehdy, zúčastní-li se sekundární interference primárních ohybových zdrojů alespoň dvě maxima. Klesne-li počet objektivem propuštěných maxim pod tuto mezní hodnotu, obraz předmětu v mikroskopu nevznikne.

Toto nám dává návod, jak lze zásahem do ohybového obrazce zdroje ovlivňovat vznik obrazu v mikroskopu.

a) Předpokládejme amplitudový předmět:

- Zajistíme, aby se na jeho zobrazení podílela pouze nulté maximum a všechna maxima ležící po jeho jedné straně. Jak již bylo dříve ukázáno, docílíme toho vysunutím aperturní kondenzorové clony do

strany tak, že na předmět dopadá osvětlovací svazek zešikma. Této pozorovací metodě říkáme *pozorování v šikmém světle*.

- V předchozí metodě upravíme nastavení tak, aby ze zobrazování byl vyloučen i nultý ohybový obraz zdroje. Toto je mikroskopování metodou *šikmého osvětlení v temném poli*.
- Pokud ponecháme osvětlovací zdroj (střed aperturní kondenzorové clony) na optické ose, ale zajistíme, aby se jeho ohybový obraz nepodílel na sekundární interferenci (buď pomocí speciálního kondenzoru, nebo clonkou v obrazové ohniskové rovině objektivu), aplikujeme metodu *pozorování v temném poli*.

b) Nyní předpokládejme **fázový předmět**:

- V tomto případě ovlivníme amplitudu i fázi nultého maxima tak, aby jeho intenzita i fáze byly v relaci s ostatními lichými ohybovými maximy zdroje, mohou tedy vzájemně interferovat a v obrazové rovině mikroskopu vznikne kontrastní pozorovatelný obraz předmětu. Této pozorovací metodě říkáme *metoda fázového kontrastu*.

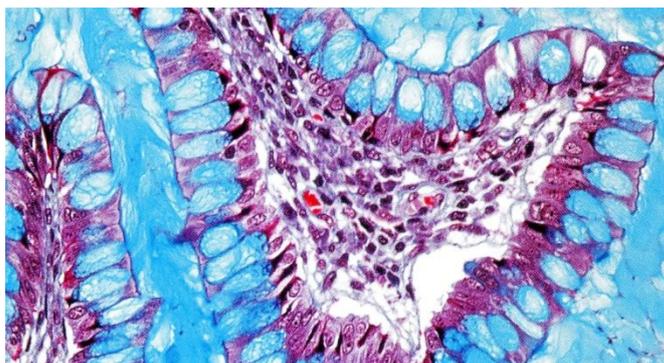
Poznámka: dalšími metodami zviditelnění fázového předmětu je *metoda interferenčního kontrastu* nebo *Hoffmanův modulační kontrast*, o těchto metodách se zmíníme následovně.

5.5. Mikroskopovací techniky

Mnohá odvětví vědy a techniky si vypracovala různé mikroskopovací techniky, které jsou odvozené od dříve uvedených metod pozorování obrazu v mikroskopu. V následujícím si popíšeme jednotlivé metody pozorování jak amplitudových, fázových i smíšených předmětů klasickými optickými mikroskopy. Mnohé metody se budou opakovat, byly již popsány v minulém textu, ale pro ucelený výklad zde budou ve zkratce znovu popsány. Nebudeme se zabývat technickou stránkou provedení těchto mikroskopů a jejich doplňků, o tom jsme se zmínili v předešlé lekci a budou probírány ve cvičeních.

5.5.1. Klasické pozorování v procházejícím světle

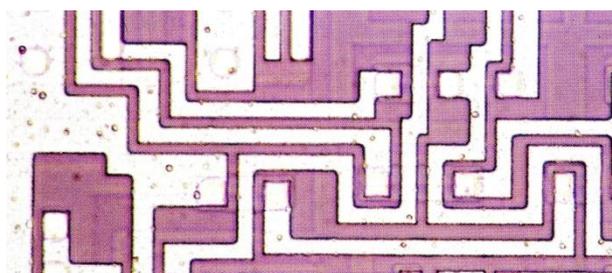
Pokud má předmět dobré absorpční vlastnosti, není nutno aplikovat některé zvláštní pozorovací techniky. Pouze je třeba zajistit jeho tvarovou stálost po dobu pozorování. Někdy je proto žádoucí předmět fixovat v látce, která nezmění jeho strukturu, ale zajistí mechanickou stálost během pozorování.



Obr. 5.7. Procházející světlo

5.5.2. Pozorování v odraženém světle

Neprůhledné preparáty pozorujeme v odraženém světle. Osvětlovací svazek světla dopadá na předmět obvykle přes objektiv, mikroskop je vybaven tzv. vertikálním osvětlovačem. U stereoskopických mikroskopů používáme osvětlení vnějším zdrojem světla, často je využívána vlaková optika.



Obr. 5.8. Odražené světlo

5.5.3. Barvení preparátů

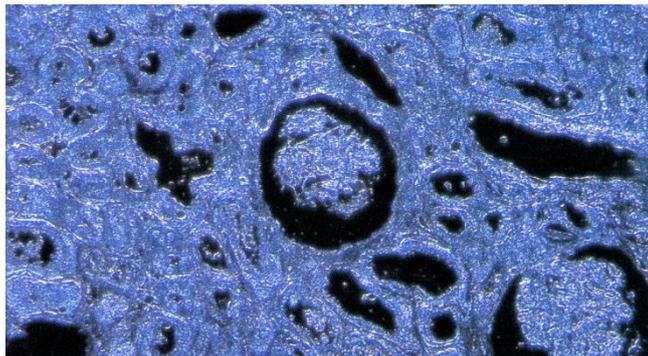
Jednou z prvních metod úpravy pozorovaného předmětu tak, aby se zvýšil kontrast obrazu tohoto předmětu, bylo barvení preparátů vhodnými barvivy. Barvení preparátu způsobilo ovlivnění amplitudy světla prošlého preparátem v důsledku čehož se zvýraznila jeho struktura a jednotlivé detaily byly i barevně rozlišeny.

5.5.4. Metoda temného pole

Metoda využívá toho, že na vzniku obrazu se nepodílí přímé světlo. Dosahuje se toho buď použitím speciálního kondenzoru (kardioidního nebo paraboloidního), který zajistí, že číselná apertura svazku světla vystupujícího z kondenzoru je větší než číselná apertura objektivu mikroskopu použitého pro pozorování. Na

tvorbě obrazu se tedy podílí pouze světlo rozptýlené preparátem. Předmět se pak jeví jako svítící na temném pozadí.

Druhou možností je odstínění nultého maxima v ohybovém obraze zdroje při přímém osvětlení clonkou, umístěnou v rovině primárního ohybového obrazu zdroje. Tato metoda je obvykle aplikována u mikroskopů, u nichž je tato rovina mezizobrazována do polohy za vlastní objektiv mikroskopu kvůli aplikaci dalších pozorovacích metod, aniž by bylo nutno používat speciální objektivy (např. pro metodu fázového kontrastu).



Obr. 5.9. Temné pole

5.5.5. Metoda vícebarevného osvětlení

Metoda je obdobou metody pozorování v temném poli. Do předmětové ohniskové roviny kondenzoru na místo kondenzorové aperturní clony umístíme clonku ve tvaru mezikruží, kde její střední část tvoří např. zelený filtr o takové velikosti, aby odpovídal překrytí nultého ohybového maxima zdroje a okrajovou část tvoří třeba červený filtr. Vznikne potom červený obraz na zeleném pozadí.

5.5.6. Metoda šikmého osvětlení

Spočívá ve stranovém vysunutí aperturní kondenzorové clony tak, aby se na zobrazení podílela pouze maxima z jedné strany nultého řádu. Přitom pokud se na zobrazení podílí i nulté maximum, jde o pozorování ve světlém poli, pokud je odstíněno i nulté maximum, jde o pozorování v šikmém osvětlení spolu s temným polem.

5.5.7. Metoda fázového kontrastu

Rovněž dříve popsaná metoda používaná pro zviditelnění převážně fázových předmětů, čili takových, které mají nepatrné absorpční schopnosti byla zavedena

do mikroskopie roku 1934 Zernikem. Metoda spočívá v ovlivnění nultého ohybového maxima zdroje co do fáze i amplitudy. Tím dosáhneme kvalitnější interference ohybových maxim zdroje a fázový předmět bude možno pozorovat v dostatečném kontrastu. Technické provedení metody má mnoho aplikací, vždy je nutno se s jednotlivými konkrétními provedeními u jednotlivých výrobců blíže obeznámit.



Obr. 5.10. Fázový kontrast

5.5.8. Metoda reliéfního fázového kontrastu

Metoda je kombinací metody fázového kontrastu s metodou šikmého osvětlení. Již bylo řečeno, že při použití metody šikmého osvětlení získá obraz reliéfní podobu, jakoby získal na plastičnosti. Aplikujeme-li současně metodu fázového kontrastu, lze takový vjem získat i u fázových předmětů.

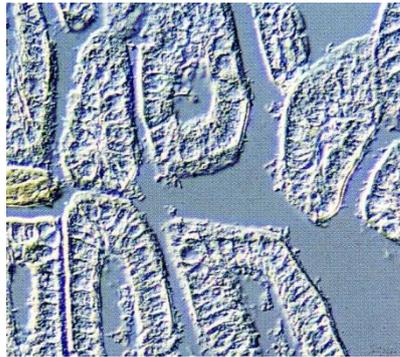
5.5.9. Metoda Hoffmanova modulačního kontrastu

Metoda pozorování umožňuje získat lepší kontrast pozorovaného obrazu málo kontrastního předmětu. Do předmětové ohniskové roviny kondenzoru se umístí mimoosově speciální clonka, obvykle štěrbinu, a do jejího obrazu v obrazové ohniskové rovině objektivu zvláštní amplitudový filtr omezující propustnost asi na 15% a po jehož jedné straně je dokonale absorbující plocha. Výsledný vjem je podobný předchozímu případu, ale kvalitnější. Je dosti podobný jako DIC, popsany dále.

5.5.10. Metody interferenčního kontrastu

Metody interferenčního kontrastu lze aplikovat jak na amplitudové, tak i fázové předměty. Princip metody spočívá v tom, že spolu necháme interferovat dvě

nebo více vlnových polí. V praxi se používají různé metody, nejznámější je metoda diferenciálního interferenčního kontrastu Nomarského – DIC Nomarski. Tato metoda pracuje v polarizovaném světle. V podstatě jde o polarizační stříhový interferometr s velice malým stříhem řádné a mimořádné vlny. Jinou metodu používá firma Zeiss, která pracuje se stříhovým Mach-Zehnderovým interferometrem.



Obr. 5.11. DIC Nomarski

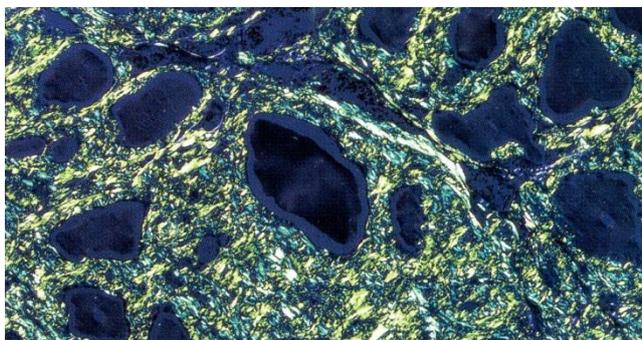
5.5.11. Metody polarizační mikroskopie

Metody umožňují snadnější pozorování málo kontrastních předmětů. Mají velký význam v mineralogii, ale používají se i v biologii a jinde. Mikroskop je v osvětlovači vybaven polarizátorem, který lineárně polarizuje světlo osvětlující nebo prosvětlující pozorovaný předmět a analyzátozem, ten slouží k určení změn polarizace vyvolaných předmětem. Dále se polarizační mikroskopy doplňují různými typy kompenzátorů umožňujících i kvantitativní měření.

Používají se dvě odlišné pozorovací metody:

- Pozorování v *ortoskopickém chodu paprsků*, zde se používá osvětlení s malou aperturou aby paprsky procházely prakticky celým předmětem kolmo na jeho rovinu a okulárem pozorujeme obraz předmětu vytvořený objektivem jako při klasickém pozorování v přirozeném světle
- Pozorování v *konoskopickém chodu paprsků*, zde je předmět osvětlen silně sbíhavými paprskovými svazky o velké apertuře. Ve výstupní pupile objektivu dochází k interferenci paprsků, které charakterizuje pozorovaný předmět. Využívá se tohoto pozorování v mineralogii k určování optických os krystalů a podobně. Interferenční obraz se pozoruje Bertrandovou čočkou, která spolu s okulárem tvoří vizér,

fokusem na rovinu výstupní pupily objektivu, čili jeho obrazovou ohniskovou rovinu.



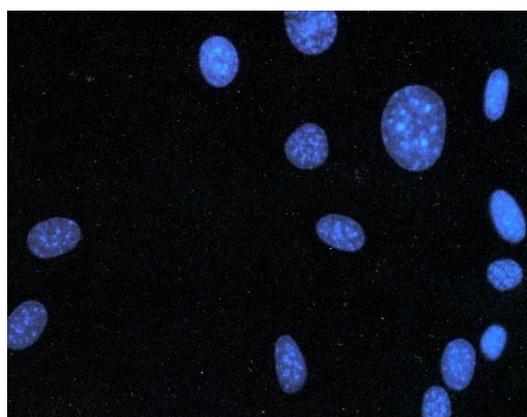
Obr. 5.12. Polarizované světlo

5.5.12. Metody fluorescenční mikroskopie

Pozorovací metody fluorescenční mikroskopie využívají jevu fluorescence. Některé látky po ozáření světlem určité vlnové délky vyzařují světlo jiné vlnové délky, samozřejmě je vlnová délka emitovaného světla delší, než světla ozařovacího. Pozorované detaily preparátu jsou napuštěny fluoreskující látkou a po ozáření aktivujícím zářením tyto detaily předmětu emitují fluoreskující záření, které pozorujeme, přitom barierovým filtrem zachytíme budící záření.

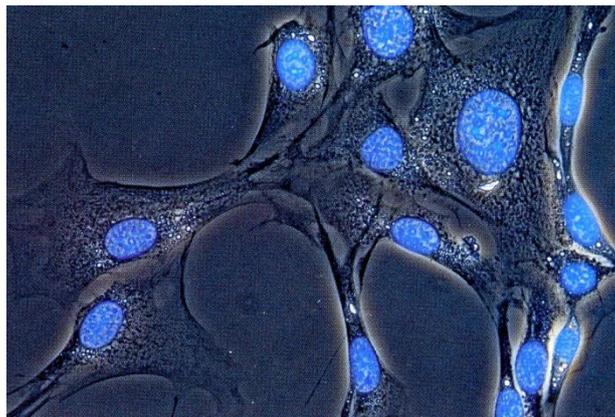


Obr. 5.13a. Fluorescence
(dvojitá emise)



Obr. 5.13b. Fluorescence

Je mnoho aplikací pozorovacích metod fluorescenční mikroskopie a tyto se často kombinují s dalšími pozorovacími metodami, např. s fázovým kontrastem apod.



Obr. 5.14. Fázový kontrast a fluorescence

6. Optická stavba dalekohledů

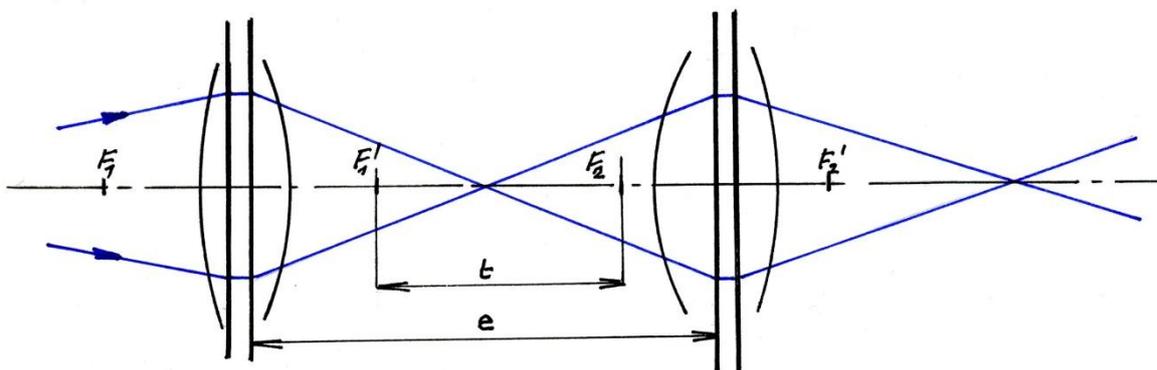
Dalekohled je subjektivní optický přístroj, sloužící pro pozorování vzdálených předmětů pod větším zorným úhlem a využít přitom více světelné energie, než prostým okem.

Dalekohledy jsou obecně afokální (teleskopické) optické soustavy.

Objev dalekohledu je datován rokem 1608 kdy se holandský výrobce čoček Hans Lippershey náhodou podíval přes dvojici jednoduchých čoček a zjistil, že při určitém uspořádání dochází ke zvětšení pozorovaných předmětů. Známým se stal dalekohled díky italskému vědci Galileo Galileovi. Již v roce 1609 sestrojil dalekohled zvětšující 20x. Johannes Kepler roku 1611 navrhl dalekohled se dvěma spojnými čočkami, který sice vytvářel převrácený obraz, zato mnohem kvalitnější. Vyrobil jej dle Keplerových nákresů Christopher Scheiner. Další kvalitativní posun je datován rokem 1672, kdy Isaac Newton, jež objevil rozklad světla, pochopil, že barevná vada čoček kazí kresbu a proto jako první navrhnul zrcadlový objektiv, dnes užívaný v astronomii.

6.1. Afokální optická soustava

Budeme vycházet z obecné dvoučlenné optické soustavy, znázorněné na obr.6.1.



Obr. 6.1.

První člen je charakterizován ohniskovou vzdáleností f_1' , druhý člen f_2' , vzdálenost mezi obrazovým hlavním bodem prvního členu a předměťovým hlavním bodem druhého členu je e , resp. vzdálenost mezi obrazovým ohniskem prvního členu F_1' a předměťovým ohniskem druhého členu F_2 je t . Potom pro celkovou ohniskovou vzdálenost dvoučlenné soustavy f' platí :

$$f' = (f_1' \cdot f_2') / (f_1' + f_2' - e), \quad \text{resp.}$$

$$f' = (f_1' \cdot f_2') / t .$$

Pokud nyní přiblížíme oba členy k sobě na takovou vzdálenost, že obrazové ohnisko prvního členu splyne s předměťovým ohniskem druhého členu, tzn. že, $t = 0$, resp. $e = f_1' + f_2'$ obdržíme v obou případech, že $f' = \infty$.

Ohniska takové optické dvoučlenné soustavy leží v nekonečnu a tuto soustavu nazýváme *afokální*, nebo *teleskopickou*.

Pro podíl sdružených veličin (zvětšení) platí pro obecnou dvoučlennou soustavu následující:

příčné měřítko zobrazení $\beta = \beta_1 \cdot \beta_2 ,$

podélné měřítko zobrazení $\alpha = (n' / n) \cdot \beta^2 ,$

poměr úhlů $\gamma = (n / n') \cdot (1 / \beta) .$

V případě afokální optické soustavy ve vzduchu ($n = n'$) platí nezávisle na poloze předmětu :

$$\beta = - (f_2' / f_1') , \quad \alpha = (f_2' / f_1')^2 = \beta^2 \quad \text{a} \quad \gamma = - (f_1' / f_2') = 1 / \beta .$$

6.2. Dalekohledy

Jak již bylo řečeno na úvod této kapitoly v definici dalekohledu, má dalekohled dvě funkce. Jednak nám umožňuje pozorovat vzdálené předměty pod větším zorným úhlem než prostým okem, jednak díky většímu průměru objektivu dalekohledu (vstupní pupile) nám do oka vstupuje větší množství světelné energie a tím lze pozorovat i méně světelné předměty.

Pozorujeme-li vzdálené předměty, nemůžeme se k nim přiblížit tak, abychom vhodně zvětšily úhly, pod kterými se nám jeví jednotlivé detaily. Normální lidské oko rozezná detaily na předmětu tehdy, jsou-li úhlově vzdáleny 1 – 2 úhlové minuty. Na pomoc si můžeme vzít optickou soustavu. Vzdálený předmět si objektivem zobrazíme do konečné vzdálenosti a pomocí okuláru (lupy) je

pozorujeme. Uspořádání obou optických soustav, objektivu a okuláru, tvoří princip dalekohledu. Ten nám umožňuje pozorovat detaily na vzdálených předmětech, které nejsou viditelné neozbrojeným okem. Princip dalekohledu je tedy následující: *obraz velmi vzdáleného předmětu vytvořený objektivem pozorujeme okulárem jako lupou.*

Z rozdílných úloh objektivu a okuláru plynou i požadavky na jejich kvalitativní vlastnosti. Objektiv pracuje s poměrně malým zorným polem na rozdíl od okuláru. Proto u objektivu korigujeme hlavně otvorovou vadu, barevnou vadu polohy a komu, tj. odchylku od sinové podmínky. U okuláru naopak korigujeme barevnou vadu velikosti, astigmatismus, zklenutí pole a pokud možno i zkreslení.

6.2.1. Rozdělení dalekohledů

Dalekohledy můžeme dělit podle několika hledisek.

- a) Objektiv je vždy tvořen spojnou optickou soustavou a to buď:
 - čočkovou - refraktory
 - zrcadlovou – reflektory
 - zrcadlo-čočkovou

- b) Okulár může být tvořen :
 - spojnou soustavou - Keplerovy (hvězdářské) dalekohledy
 - rozptylnou soustavou – Galileovy (holandské) dalekohledy

- c) podle účelu použití, resp. konstrukce na mnoho dalších skupin, například:
 - astronomické
 - pozemské pozorovací
 - měřické
 - zaměřovací aj.
 -

Pozemské pozorovací dalekohledy dělíme na : - monokulární
-binokulární

Tato skupina dalekohledů se mimo dalekohledy holandské vyznačuje tím, že má převraccující soustavu buď hranolovou, nebo čočkovou. Je to proto, že Keplerovy dalekohledy vytváří převrácený obraz.

Měřické a zaměřovací dalekohledy jsou vždy vybaveny záměrným obrazcem různého provedení, resp. měřicím okulárem. Tyto dalekohledy nemohou být tvořeny Galileovou konstrukcí, protože by nebylo možno do nich umístit záměrný obrazec.

Pro porovnání vlastností čočkových a zrcadlových objektivů si můžeme uvést následující:

Přednosti čočkových objektivů:

- kvalita objektivu se nemění s časem
- centrování čočkových objektivů je stálější
- deformace čočkového objektivu vyvolaná vlastní vahou je nepatrná a méně nebezpečná než u zrcadel velkých průměrů
- u soustav s čočkovým objektivem není mezi ním a okulárem (pokud není v soustavě převraccující soustava) umístěna žádná další optická plocha, jak je tomu u zrcadlových soustav, u nichž bývá např. hyperboloidická nebo elipsoidická zrcadlová odrazná plocha, jejíž objímka vyvolává změny ohybového obrazce, které mají často vliv na jakost obrazu
- dalekohled s čočkovým objektivem je možno konstruovat jako zcela uzavřený přístroj

Nevýhody čočkových objektivů:

- barevná vada
- větší nestejnoroďost optického skla vedoucí ke snížení kvality obrazu
- větší absorpce světla procházejícího objektivem, další ztráty jsou vyvolány odrazem na jednotlivých plochách čoček
- větší stavební délka

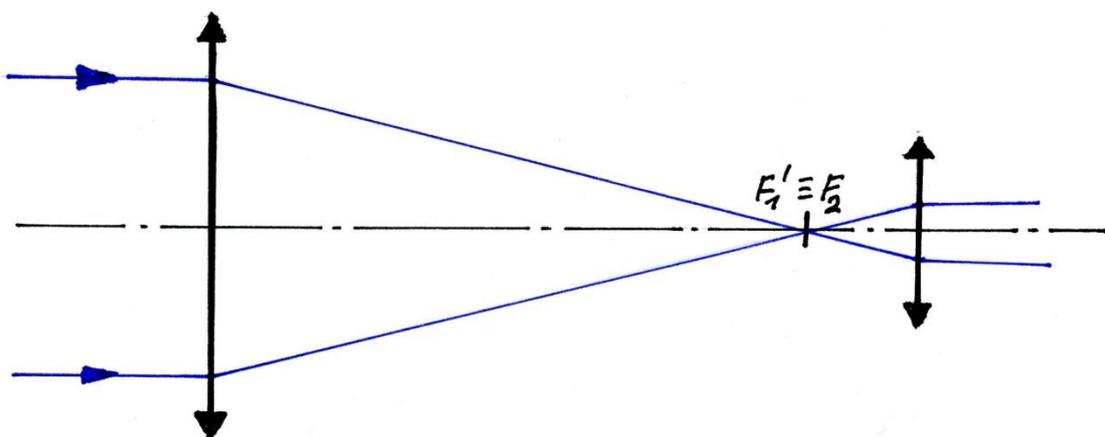
Přednosti zrcadlových objektivů:

- neexistence barevné vady
- dosažení větší světelnosti
- i při velkých relativních otvorech a zvětšeníh poměrně krátká stavební délka
- na materiál objektivu nejsou kladeny žádné požadavky na optické vlastnosti, pouze na vlastnosti mechanické
- zvětšení průměru objektivu nevede k růstu ztrát světla
- lze pracovat i v UV oblasti spektra

Nevýhody zrcadlových objektivů:

- není vhodný pro přesná měření
- velké nároky na kvalitu odrazné plochy
- velká citlivost na mechanické a tepelné deformace
- slepnutí odrazné vrstvy
- pomocná zrcadla zvyšují ztráty světla a ovlivňují kvalitu obrazu
- obvykle menší zorné pole

6.2.2. Keplerův (hvězdářský) dalekohled

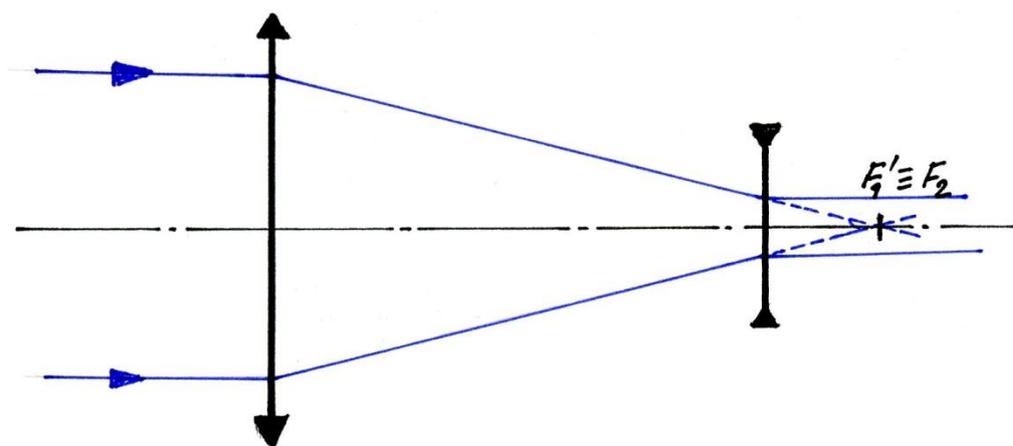


Obr. 6.2.

U Keplerova dalekohledu je objektiv i okulár tvořen spojnou optickou soustavou. Na obrázku 6.2. je vidět, že obrazové ohnisko objektivu F_1' splývá s předmětovým ohniskem okuláru F_2 . Objektiv vytváří ve své obrazové ohniskové rovině skutečný, převrácený obraz předmětu a je tedy možno do této roviny umístit záměrnou ploténku. Důležitým parametrem dalekohledu je jeho vstupní a výstupní pupila. Vstupní pupilu Keplerova dalekohledu obvykle tvoří objímka objektivu a její obraz vytvořený okulárem (pokud v soustavě není převracející soustava) je výstupní pupila. Pokud chceme přehlédnout celé zorné pole, je nutné aby pupila oka splynula s výstupní pupilou dalekohledu. Je-li ale zorné pole okuláru větší než je zorné pole klidného oka, tj. větší než asi 70° , je potom k přehlédnutí celého zorného pole okem otáčet a v těchto případech je výhodné umístit oko tak, aby jeho střed otáčení splynul se středem výstupní pupilu dalekohledu.

Pokud nepřihlížíme k tloušťkám objektivu a okuláru (při neexistenci převracející soustavy), je celková délka Keplerova dalekohledu rovna součtu ohniskových vzdáleností objektivu a okuláru.

6.2.3. Galileův (holandský) dalekohled



Obr. 6. 3.

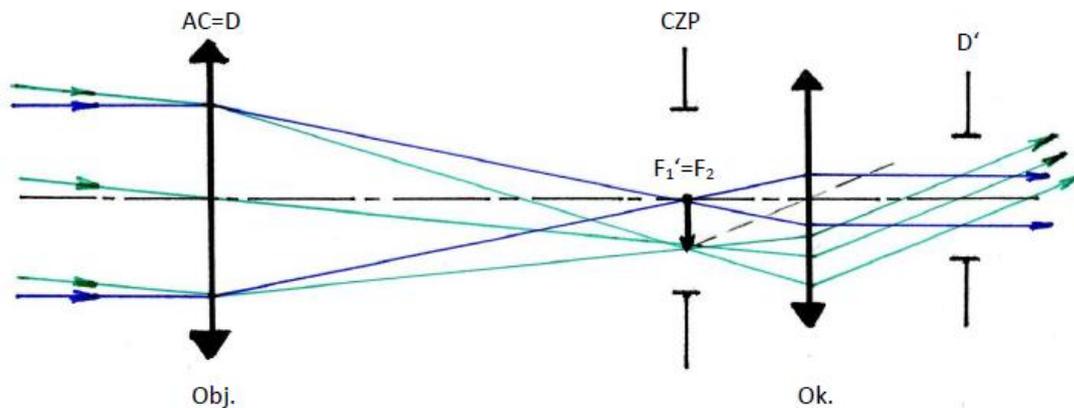
Galileův dalekohled má samozřejmě spojný objektiv, okulár ale tvoří rozptylná soustava. Opět splývá obrazové ohnisko objektivu s předmětovým ohniskem okuláru, jak je vidno z obrázku 6.3., ale z obrázku je patrné, že stavební délka dalekohledu je rovna, když pomineme tloušťky čoček, rozdílu ohniskových vzdálenosti objektivu a okuláru. V Galileově dalekohledu vzniká vzpřímený obraz, což je jeho snad jediná výhoda oproti dalekohledu Keplerovu. Do tohoto dalekohledu není možné vložit záměrnou ploténku, čímž je značně omezena jeho použitelnost. Vstupní pupilu dalekohledu tvoří opět objímka objektivu, výstupní pupila je neskutečná, leží uvnitř dalekohledu. Paprskové svazky vystupující z dalekohledu jsou omezovány pupilou oka, která tvoří výstupní pupilu dalekohledu jako celku. Obraz pupily oka vytvořený dalekohledem jako celkem je neskutečný a tvoří vstupní pupilu dalekohledu ve spojení s okem.

6.3. Hlavní optické parametry dalekohledů

Mezi základní optické parametry dalekohledů řadíme:

- *zvětšení*
- *omezení paprskových svazků (aperturní clona, clona zorného pole)*
- *rozlišovací mez*
- *světelnost*
- *praktické nekonečno*
- *paralaxa*
- *nastavení okuláru*

Poznámka: v této kapitole budeme popisovat parametry Keplerova dalekohledu bez převracející soustavy.(viz obr.6.4.)



Obr. 6.4. Keplerův dalekohled

6.3.1. Zvětšení dalekohledu

U dalekohledů rozeznáváme mimo příčné β a podélné α měřítko zobrazení a poměr úhlů γ i (*vizuální*) *zvětšení* Γ . Je dáno poměrem tangente úhlů τ' a τ , pod kterými vidíme obraz předmětu pozorovaný dalekohledem a sám předmět, pozorovaný neozbrojeným okem. V důsledku velké vzdálenosti předmětu je

$$\Gamma \sim \gamma.$$

Pro zvětšení Γ platí :

$$\Gamma = \text{tg } \tau' / \text{tg } \tau = - (f_1 / f_2) = - (D / D') ,$$

kde f_1 , f_2 jsou ohniskové vzdálenosti objektivu a okuláru

D , D' jsou průměry vstupní a výstupní pupily dalekohledu.

6.3.2. Omezení paprskových svazků u dalekohledu

U dalekohledu je ve většině případů objímka objektivu *aperturní clonou* (AC) a tudíž i *vstupní pupilou* (D). *Výstupní pupila* (D') je jejím obrazem, vytvořeným okulárem a leží v blízkosti obrazové ohniskové roviny okuláru. O pupilách dalekohledů jsme se bavili při obecném popisu dalekohledů v minulé kapitole.

Clona zorného pole (CZP) je obvykle zvláštní objímka, ležící v předmětové ohniskové rovině okuláru, tudíž i v rovině meziobrazu, vytvořeného objektivem. *Zorným polem dalekohledu* rozumíme úhel 2ω , jehož vrchol leží ve středu vstupní pupily a jehož základnu tvoří kružnice v předmětové rovině která omezuje tu část předmětové roviny, kterou dalekohledem přehlédneme. Prostor vymezený tímto kuželem tvoří tzv. *skutečné zorné pole*, na rozdíl od *zdánlivého zorného pole*, které je tvořeno vrcholovým úhlem $2\omega'$ kužele, jehož vrchol leží ve středu okuláru a základna je tvořena okrajem clony zorného pole. Velikosti obou těchto zorných polí jsou spolu vázány zvětšením Γ . Přibližně platí, že

$$\omega' = \Gamma \cdot \omega \quad .$$

6.3.3. Rozlišovací mez

Rozlišovací mez ψ_m dalekohledu je nejmenší úhlová vzdálenost dvou stejně jasných předmětových bodů, jejichž obrazy, vytvořené objektivem, jsou okem právě rozlišený. Z teorie Fraunhoferova ohybu na kruhovém otvoru při použití

Rayleighova kriteria plyne, že objektiv zobrazí odděleně dva blízké body, leží-li tyto v úhlové vzdálenosti alespoň

$$\psi_m = 1,22 \lambda \cdot D^{-1} \text{ [rad] } .$$

Pozn: vyjádříme-li D v mm, pak pro $\lambda = 550 \text{ nm}$ při určení ψ v úhlových vteřinách lze pro mezní rozlišení vyčíslit praktický vztah

$$\Psi_m = 140 \cdot D^{-1} \text{ ["] } .$$

Poznámka: jak již bylo řečeno, platí konstanta $A = 140$ přibližně pro $\lambda = 550 \text{ nm}$. Pro jiné dominantní vlnové délky můžeme tuto konstantu nahradit hodnotami z příložené tabulky.

λ [nm]	konstanta A	λ [nm]	konstanta A
360	90	516	130
450	114	556	140
477	120	635	160

Máme-li plně využít této rozlišovací meze, je třeba, aby oko umístěné za okulárem dalekohledu bylo schopno tuto hodnotu samo rozpoznat. Rozlišovací

mez oka je s ohledem na podmínky pozorování a věk pozorovatele v rozmezí 1 až 4 úhlové minuty a proto můžeme psát, že :

$$240'' \geq \Gamma \cdot A \cdot D^{-1} \geq 60'' .$$

Pokud za konstantu A dosadíme hodnotu 120, obdržíme praktický vztah :

$$D/2 \leq \Gamma \leq 2D .$$

Zvětšení dalekohledu, splňující tuto nerovnost se nazývá užitečné zvětšení. Je-li ale $\Gamma > 2D$, nazýváme toto zvětšení prázdné, protože již nezískáme žádnou další informaci o struktuře pozorovaného předmětu.

6.3.4. Světelnost dalekohledu

Světelnost dalekohledu je dána porovnáním světelného toku dopadajícího z bodového nebo plošného předmětu na sítnici při pozorování přes dalekohled s tokem, dopadajícím na sítnici při pozorování neozbrojeným okem pozorovatele.

Situace je komplikovaná tím, je-li předmět bodový či plošný a dále zda je pupila oka větší nebo menší než výstupní pupila dalekohledu. To vše je nutno zohlednit.

6.3.4.1. Světelnost vzhledem k bodovým předmětům

Vyjdeme ze situace, kdy bodový předmět je umístěn na optické ose dalekohledu ve vzdálenosti g od vstupní pupily dalekohledu a pupila oka splývá s výstupní pupilou dalekohledu. Světelný tok vstupující objektivem do dalekohledu je dán vztahem:

$$\Phi = (\pi D^2 I) / (4 g^2) , \quad I \text{ je svítivost bodového předmětu.}$$

Z dalekohledu vystupuje tok:

$$\Phi' = \Phi \cdot T , \quad \text{kde } T \text{ je propustnost dalekohledu.}$$

Na sítnici oka dopadá tok :

$$\Phi'' = \Phi' \cdot T_o , \quad \text{kde } T_o \text{ je propustnost oka.}$$

V případě pozorování téhož bodového předmětu prostým okem, dopadá na sítnici oka tok:

$$\Phi_o' = (\pi D_o^2 I T_o) / (4 g^2) .$$

Světelnost dalekohledu vzhledem k bodovým předmětům je potom :

$$S_b = \Phi'' / \Phi_o' = T \cdot (D / D_o)^2 = T \cdot \Gamma^2 .$$

Tento vztah platí za předpokladu, že platí $D' = D_o$.

Pokud je průměr pupily oka menší, než průměr výstupní pupily dalekohledu, platí rovněž výše uvedený vztah. Dojdeme k němu tak, že v tomto případě platí : $D^* = D_o \cdot \Gamma$, a tudíž:

$$S_b = T \cdot (D^* / D_o)^2 = T \cdot \Gamma^2 \quad .$$

Pokud je ale průměr pupily oka větší než průměr výstupní pupily dalekohledu, platí vztah obdobný předchozímu, ale protože zde neplatí, že $D' = D_o$, nelze podíl v závorce nahradit zvětšením dalekohledu Γ a musíme dodržet, že :

$$S_b = T \cdot (D / D_o)^2 \quad .$$

Závěrem můžeme shrnout, že :

- je-li $D_o > D'$ světelnost dalekohledu S_b je přímo úměrná $(D/D_o)^2$,
- je-li $D' > D_o$, resp. $D' = D_o$, potom je světelnost S_b přímo úměrná Γ^2 .

6.3.4.2. Světelnost vzhledem k plošným předmětům

Plošný předmět o velikosti S a jas L se nachází v blízkosti optické osy dalekohledové soustavy. Do objektivu dopadá světelný tok:

$$\Phi = \pi \cdot L \cdot S \cdot \sin^2 \sigma \quad .$$

Tento předmět je optickou soustavou dalekohledu zobrazen na plochu o velikosti S' a jas L' . Světelný tok přicházející do tohoto obrazu je:

$\Phi' = \pi \cdot L' \cdot S' \cdot \sin^2 \sigma'$, kde $L' = \pi \cdot L \cdot (n'/n)^2$, ale protože $n' = n$ lze psát:

$$\Phi' = \pi \cdot T \cdot L \cdot S' \cdot \sin^2 \sigma' .$$

Světelný tok dopadající na sítnici oka:

$$\Phi'' = \pi \cdot L'' \cdot S'' \cdot \sin^2 \sigma_0' , \text{ kde}$$

S'' je plocha a L'' jas obrazu na sítnici oka, $L'' = T_0 \cdot T \cdot L \cdot (n_0'/n_0)^2$, přitom n_0 , n_0' jsou indexy lomu prostředí před okem a uvnitř oka. Můžeme tedy psát:

$$\Phi'' = \pi \cdot T \cdot T_0 \cdot L \cdot S'' \cdot (n_0'/n_0)^2 \cdot \sin^2 \sigma_0' .$$

Protože $\sin \sigma_0' = D' / 2f_0'$, $f_0' = -(n_0'/n_0) \cdot f_0$, platí dále, že při $D' \leq D_0$:

$$\Phi'' = \pi \cdot T \cdot T_0 \cdot L \cdot S'' \cdot (D'^2 / 4f_0'^2) .$$

Tento světelný tok vyvolá osvětlení sítnice:

$$E'' = F'' / S'' = (\pi \cdot T \cdot T_0 \cdot L \cdot D'^2) / (4 f_0'^2) .$$

Pokud tentýž předmět pozorujeme neozbrojeným okem, přichází do obrazu S_0' na sítnici oka světelný tok:

$\Phi_0' = \pi \cdot T_0 \cdot L \cdot (n_0'/n_0)^2 \cdot S_0' \cdot \sin^2 \sigma_0'$, kde $\sin \sigma_0' = D_0 / 2f_0'$, tudíž :

$$\Phi_o' = \pi \cdot T_o \cdot L \cdot S_o' \cdot (D_o' / 2f_o)^2 .$$

Tento světelný tok vyvolá na sítnici osvětlení obrazu:

$$E_o' = F_o' / S_o' = (\pi \cdot T_o \cdot L \cdot D_o'^2) / 4f_o^2 .$$

Pro světelnost S_p dalekohledu vzhledem k plošným předmětům:

$$S_p = E'' / E_o' = \dots = T \cdot (D' / D_o)^2 = T \cdot (D / D_o \Gamma)^2 .$$

Pokud platí, že $D' = D_o$, potom $S_p = T < 1$.

Protože S_p záleží i na Γ , lze najít takové zvětšení, pro něž je $S_p = 1$, to znamená, že subjektivní jas obrazu je stejný jak při pozorování prostým okem, tak při použití takového dalekohledu. Pro toto tzv. *normálové zvětšení* Γ_n lze odvodit vztah :

$$\Gamma_n = (D / D_o) \cdot \sqrt{T} .$$

Závěrem lze opět shrnout:

- *je-li $D' < D_o$, je subjektivní jas pozorovaného předmětu menší, než při pozorování prostým okem*
- *je-li $D' \geq D_o$, je subjektivní jas pozorovaného předmětu stejný, jako při pozorování prostým okem, při zanedbání absorpce v dalekohledové soustavě.*

6.3.5. Praktické nekonečno dalekohledu

Prozatím jsme předpokládali, že dalekohled jako afokální optická soustava je nastaven na předmětovou vzdálenost ∞ . To znamená, že v jeho zorném poli by měly být ostře zobrazeny pouze předměty nacházející se v ∞ . Ve skutečnosti se však pozorovateli jeví „ostře“ i bližší předměty a to až do určité předmětové vzdálenosti které říkáme *praktické nekonečno dalekohledu*.

Bez odvozování si určíme tuto vzdálenost. Aby oko umístěné za dalekohledem vidělo obraz předmětu ostře, je nutné, aby tento obraz padl do akomodačního intervalu oka, tzn. mezi jeho blízký a vzdálený bod. Jak víme, polohy těchto bodů jsou závislé na věku pozorovatele a stavu jeho oka. Pokud si označíme polohu vzdáleného bodu r a blízkého bodu p , musí pro polohu obrazu z' od výstupní pupily dalekohledu (v této poloze předpokládáme polohu vstupní pupily oka) platit, že:

$$p \leq z' \leq r .$$

Protože r je velké, je tato část podmínky splněna prakticky vždy. Pro druhou část podmínky lze vyvodit, pokud si polohu předmětu označíme z , potom pro z' platí, že: $z' = z / \Gamma^2$ a tudíž:

$$z \geq p \cdot \Gamma^2 .$$

Z uvedeného plyne, že praktické nekonečno dalekohledu závisí na věku pozorovatele a zvětšení dalekohledu.

6.3.6. Paralaxa dalekohledu

O *paralaxe dalehledu* hovoříme v případech, kdy v obrazové rovině objektivu se nachází záměrná značka, stupnice a podobně. Paralaxa se projevuje tím, že při příčném pohybu oka přes výstupní pupilu dalekohledu se obraz předmětu vzhledem k záměrnému obrazci příčně pohybuje. Je to způsobeno tím, že obraz předmětu se nachází v jiné poloze než záměrný obrazec dalekohledu. Tato chyba nastavení vede k nepřesnosti zamíření.

Poznámka: této chyby v nastavení lze naopak využít pro přesné nastavení dalekohledu na předmětovou rovinu. Příčným pohybem oka přes výstupní pupilu dalekohledu za průběžného přeastřování dalekohledu hledáme takovou polohu zaostření, kdy se předmět vůči záměrnému obrazci při příčném pohybu oka přes pupilu nepohybuje.

6.3.7. Nastavení okuláru

Ne všichni pozorovatelé mají normální, zdravé oko. Pokud pozorovatel je krátkozraký, nebo naopak dalekozraký, musí používat pro správné vidění brýle. V tomto případě nastává problém, protože kvůli brýlím nemůže takový pozorovatel umístit vstupní pupilu oka do výstupní pupily dalekohledu. Proto se dalekohledy konstruuují tak, že okulár je posuvný a jeho posuvem se provede *kompensace ametropie* pozorovatelova oka. Pokud je pozorovatel krátkozraký, posune se okulár k objektivu, pokud je dalekozraký, vysune se okulár naopak od objektivu. Pro ametropii X dioptrií je tento posuv x roven hodnotě:

$$x = - (f_2'^2 / 1000) \cdot X \quad [\text{mm}] \quad .$$

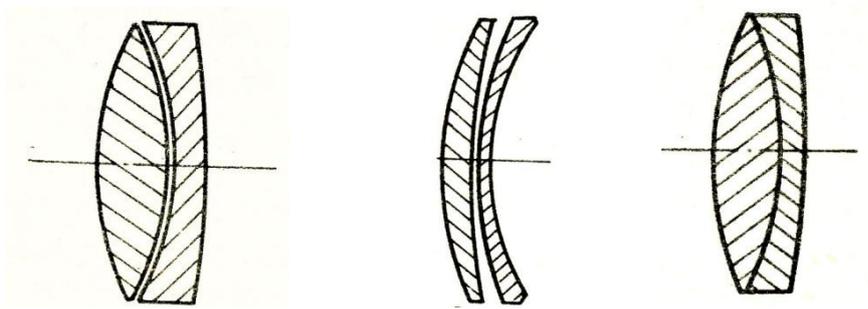
Poznámka: při porušení afokálnosti dalekohledu nastavením opravy pro ametropické oko se nepatrně změní i zvětšení dalekohledu.

6.4. Stavební prvky dalekohledů

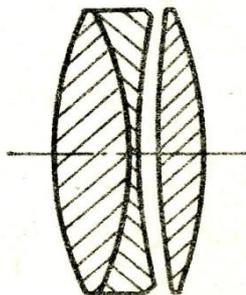
6.4.1. Objektivy dalekohledů

Na úvod této kapitoly jsme uvedli, že dalekohled byl objeven kolem roku 1610. Až do roku 1758 byla jako objektiv používána jednoduchá čočka, která byla zatížena enormní barevnou vadou. Dollond toho roku zkonstruoval *achromatický objektiv*. Návrhem objektivů se nebudeme v našich přednáškách zabývat, tato problematika je řešena v jiném předmětu. Rovněž se nebudeme zabývat zrcadlovými a zrcadločočkovými objektivy hvězdářských dalekohledů, tato problematika je rovněž náplní jiných přednášek.

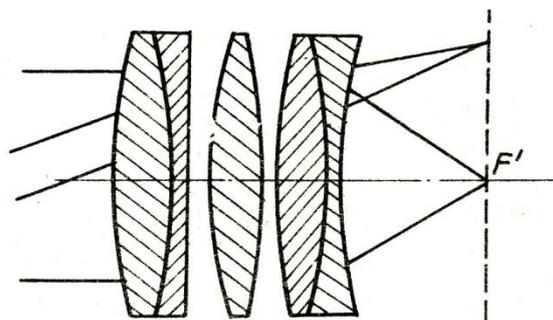
Jak již bylo řečeno, kvalitu dalekohledových objektivů hodnotíme jejich rozlišovací mezí na niž má podstatný vliv průměr vstupní pupily tohoto objektivu. Důležitým parametrem dalekohledových objektivů je jejich světelnost, přesněji řečeno *relativní otvor*, což je podíl D / f' . U méně světelných objektivů dosahuje relativní otvor hodnoty přibližně 1 : 15, u vysoce světelných objektivů i 1 : 4. *Zorné pole* těchto objektivů se pohybuje od jednotek stupňů pro velká celková zvětšení dalekohledů po asi 20° pro malá zvětšení. Běžné achromatické objektivy jsou konstruovány jako *dublety*, apochromatické objektivy, které mají potlačenu i sekundární barevnou vadu jsou *triplety*. Jako vícečočkové se konstruují objektivy záměrných dalekohledů u nichž je požadováno velké zorné pole (50° i více) při relativním otvoru 1 : 5 apod. Příklady konstrukce dalekohledových objektivů jsou uvedeny na následujících obrázcích.



Obr. 6.5. Příklady dalekohledových objektivů - dublety



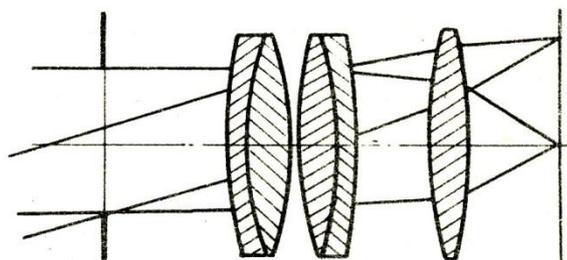
Obr. 6.6. Dalekohledový objektiv – triplet



Objektiv širokoúhlý



Objektivy zaměřovačů



Objektiv periskopu

Obr. 6.7. Speciální objektivy dalekohledových soustav

6.4.2. Okuláry

Na úvod této podkapitoly si řekněme, že se nebudeme zabývat rozptylnými okuláry Galileovských dalekohledů, které jsou obvykle tvořeny jednoduchou rozptylnou čočkou. V případě Keplerových dalekohledů je situace následující: u dalekohledů, u nichž není do optické soustavy vložena záměrná ploténka je možno konstruovat okulár jako pevnou součást dalekohledové dvoučlenné soustavy a korigovat takový systém jako celek tak, že okulárem částečně korigujeme vady objektivu. Tato situace je ale v menšině a okuláry dalekohledů obecně tvoří samostatné optické soustavy, které jsou katalogizovány pro libovolné použití dle svých optických parametrů. Důležité údaje o okuláru jsou : *ohnisková vzdálenost, zorné pole, poloha vstupní a výstupní pupily, relativní otvor* apod.

Pokud uvažujeme okulár za samostatnou optickou soustavu pak jeho *vstupní pupila* leží v nekonečnu a *výstupní pupila* v obrazové ohniskové rovině. Pokud okulár použijeme v dalekohledu, tak se poloha výstupní pupily příliš nezmění, protože ohnisková vzdálenost objektivu značně překračuje ohniskovou vzdálenost okuláru.

Relativním otvorem okuláru uvažujeme poměr průměru jeho výstupní pupily D' k jeho ohniskové vzdálenosti f_2' :

$$D' / f_2' = D / (\Gamma / f_2') = D / f_1' , \quad \text{pokud uvažujeme zvětšení absolutně.}$$

Z tohoto vyplývá, že v případě Keplerova dalekohledu bez převracející soustavy je relativní otvor okuláru rovný relativnímu otvoru objektivu. Pokud je v dalekohledu zabudována převracející soustava o měřítku zobrazení β , platí, že relativní otvor okuláru

$$D' / f_2' = D / (\Gamma \cdot \beta / f_2') = D / (f_1' \cdot \beta) .$$

Pro *zorné pole* okuláru τ' plyne : $\text{tg } \tau' = \text{tg } \tau \cdot \Gamma$, pokud pomineme zkreslení okuláru.

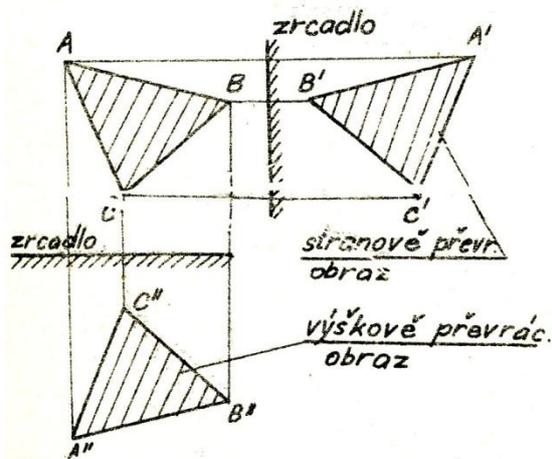
Po konstrukční stránce se v dalekohledech používají stejné optické soustavy jako u mikroskopů. Jsou to *okuláry Huygensovy, Ramsdenovy, Kellnerovy, ortoskopické, širokoúhlé, souměrné atd.*

6.4.3. Převracející soustavy

Jak jsme již uvedli, vytváří Keplerův dalekohled převrácený obraz. U mnohých typů tohoto dalekohledu, např. astronomických, geodetických, laboratorních to není na závadu. Problém se řeší jinak. U většiny ostatních, hlavně pozorovacích dalekohledů, je ovšem převrácený obraz na závadu. V těchto případech je nutno dalekohledovou optickou soustavu doplnit o *převracející soustavu*. Ta má za úkol otočit obraz vytvořený objektivem dalekohledu v jeho rovině kolem optické osy o 180° . Lze toho dosáhnout *lámavou* nebo *odraznou* soustavou. Každé toto řešení má své výhody i nevýhody, proto dle účelu použití se volí buď převracející soustava lámavá, tudíž soustava čoček, nebo odrazná a to zrcadlová nebo hranolová.

6.4.3.1. Zrcadlová převracející soustava

Rovinné zrcadlo zobrazuje předmět tak, že obraz je souměrný s předmětem podle roviny tohoto zrcadla. Podle orientace zrcadla je obraz otočen vzhledem k předmětu stranově nebo výškově. Má-li být obraz otočen kolem optické osy o 180° , je nutno použít dvou odrazů, jak plyne z obr.6.8. Toto dvojí zobrazení je ekvivalentní otočení obrazu kolem průsečnice O obou zrcadel.



Obr. 6.8.

Ve skutečnosti se zrcadla jako převracející soustavy používají pouze v těch případech, kdy je optický průměr svazku značně velký a hranolová soustava by byla příliš těžká a obtížně by se hledal velký homogenní kus optického skla. Ve skutečnosti jsou odrazná rovinná zrcadla nahrazena odraznými hranoly, které mají řadu výhod:

- mají větší odrazivost, pokud lze využít úplného odrazu
- vylučují zdvojení obrazu, ke kterému dochází u zrcadel opatřených zrcadlovou vrstvou na zadní ploše zrcadla kvůli její ochraně
- jsou stabilnější co se týče tvaru i polohy
- umožňují snadnější mechanickou konstrukci.
-

Při konstrukci hranolových převracejících soustav je však nutno splnit některé důležité podmínky:

- úhel lomu procházejících paprsků na výstupní ploše má být roven úhlu dopadu paprsků na vstupní plochu hranolu

- jednotlivé paprsky svazku rovnoběžných paprsků procházejících hranolem musí mít stejnou optickou dráhu
- hranol má být rovnocenný planoparalelní desce, jejíž tloušťka se rovná dráze osového paprsku svazku v hranolu.

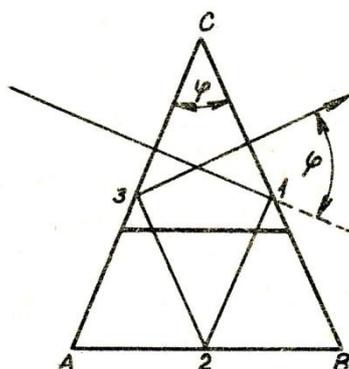
Poznámka:

Pokud je u odrazného hranolu využit úplný odraz, je nutno v případě, že na odraznou plochu dopadá sbíhavý nebo rozbíhavý svazek světla kontrolovat krajní paprsky svazku, zda i pro ně je podmínka úplného odrazu splněna.

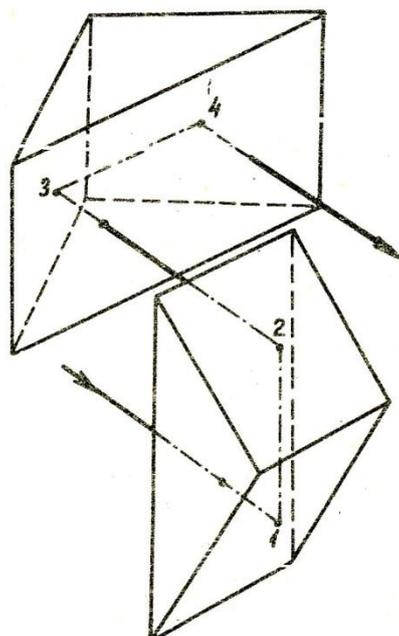
Rovněž je nutno kontrolovat, zda je podmínka úplného odrazu splněna pro celé spektrum. Připomínám, že pro úplný odraz je nutno pro úhel dopadu ϵ na odraznou plochu splnit podmínku $\sin \epsilon_{\lambda} \geq 1 / n_{\lambda}$.

Pro konstrukci převracujících soustav se používá velmi početná řada hranolů různých tvarů a vlastností. Využívají se hranoly přímohledné, které nemění směr optické osy vystupujícího svazku paprsků vzhledem k ose svazku paprsků na hranol dopadajícího i hranoly, které směr osy vystupujícího svazku různým způsobem odchyľují. Hranoly rovněž zkracují optickou dráhu svazku procházejícího dalekohledem.

Existují dvě odlišné konstrukce hranolových převracujících soustav. V prvním případě se opatřují odrazné hranoly střechami a potom je možno jediným hranolem dosáhnout úplného otočení obrazu o 180° a nebo se kombinuje několik hranolů a jejich vhodnou orientací se opět dosáhne požadovaného otočení obrazu. Příkladem prvního způsobu je třeba Schmidtův střechový hranol, obr.6.9., druhý druh je např. Porrova soustava I viz. obr.6.10.



Obr. 6.9. Schmidův střeňový hranol



Obr. 6.10. Porrova soustava I

Pro konstrukci hranolových převracjících soustav platí pravidlo: aby soustava hranolů výškově převracela obraz, je třeba kombinovat hranoly tak, aby celkový

počet odrazných ploch kolmých na společnou svislou rovinu byl lichý. Má-li soustava současně otočit obraz stranově, je nutno místo jedné z těchto odrazných ploch začlenit do některého vhodného hranolu střechu.

Poznámka: více o hranolových soustavách viz např.:

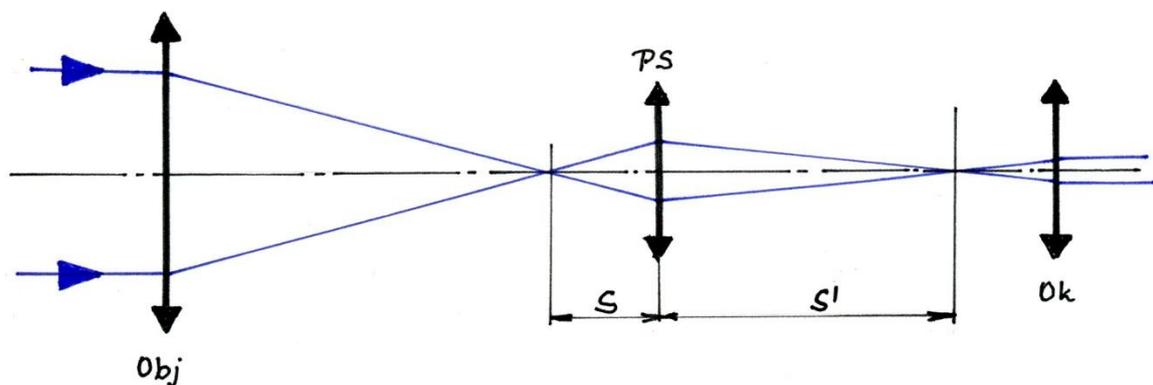
- Klabazňa, J.: Základy teorie a konstrukce odrazných hranolů. Skripta UP. Olomouc 1982.

- Klabazňa, J.: Metody určování tolerancí optických soustav s odraznými hranoly. Skripta UP. Olomouc 1984.

6.4.3.2. Čočkové převraccjící soustavy

V některých případech je výhodnější na místo hranolové převraccjící soustavy použít soustavu čočkovou. Používají se dvě metody: *jednočočkové*, nebo *dvoučočkové převraccjící soustavy*. Pro průchod šikmých svazků by v některých případech bylo nutno používat čočky převraccjících soustav nebo okulárů příliš velkých průměrů, proto se do optické soustavy dalekohledu vkládá do vhodného místa další spojná čočka, tzv. *kolektiv*.

6.4.3.2.1. Převraccjící čočkové soustavy s jedním členem



Obr. 6.11. Jednočlenná čočková převraccjící soustava

Mezi objektiv a okulár se vloží další spojný člen tak, že zobrazuje obraz vytvořený objektivem do předmětové ohniskové roviny okuláru, viz obr.6.11. Jak plyne z obrázku, stavební délka dalekohledu se prodlouží o hodnotu $(s + s')$ při zanedbání tloušťky převracejícího členu a tento člen zavede do soustavy přidavné měřítko zobrazení:

$$\beta_p = s'/s ,$$

celkové zvětšení dalekohledu bude:

$$\Gamma = (f_1'/f_2') \cdot \beta_p .$$

Pokud chceme minimalizovat stavební délku dalekohledu s jednočlennou převracející soustavou, lze odvodit, že to bude platit v případě, kdy $\beta_p = -1$ a odtud

$$s = s' = 2 f_p' , \text{ kde } f_p' \text{ je ohnisková vzdálenost převracejícího členu.}$$

Aby se zmenšil průměr převracející soustavy, resp. okuláru, umísťuje se v rovině obrazu vytvořeného objektivem nebo v předmětové ohniskové rovině okuláru (nebo v jejich blízkosti, aby nebyl s obrazem ostře zobrazován i prach na nich usazený) tzv. kolektiv (spojný optický člen) o ohniskové vzdálenosti f_k' . Vypočteme-li celkovou ohniskovou vzdálenost tandemu objektiv-kolektiv f_c' zjistíme, že:

$$f_c' = (f_1' \cdot f_k') / (f_1' + f_k' - e) = f_1' ,$$

protože e (což je vzájemná vzdálenost obou členů) je rovno f_1' .

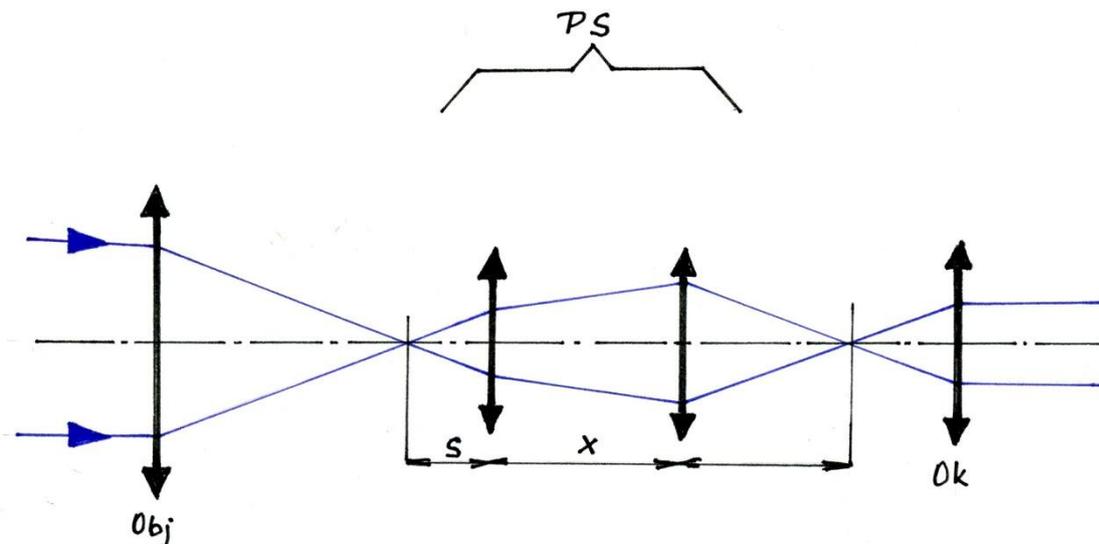
Vidíme, že tandem objektiv-převracející člen má stejnou ohniskovou vzdálenost jako samostatný objektiv. Kolektiv nemá tudíž vliv na polohu obrazu ani na zvětšení, pouze odklání šikmé paprskové svazky do vhodného směru.

Několik poznámek:

- jak již bylo řečeno, pokud je kolektiv umístěn do obrazové ohniskové roviny objektivu, nebo do předmětové ohniskové roviny okuláru, jsou nečistoty na něm usazené ostře zobrazovány v zorném poli dalekohledu, což je rušivé. Proto se tento člen často umísťuje poblíž těchto rovin. V tomto případě má kolektiv ovšem vliv na polohu obrazu i na zvětšení, protože již neplatí, že $f_c' = f_1'$,
- je-li nutno umístit současně s kolektivem v obrazové rovině objektivu záměrný obrazec, volí se kolektiv jako plankonvexní čočka a na rovinné ploše se umístí požadovaný záměrný obrazec,
- přestože kolektiv může tvořit jednoduchá čočka, nezavádí tato do soustavy dalekohledu otvorovou vadu, komu nebo astigmatismus, mohou mít vliv na zklenutí obrazového pole a zkreslení.

6.4.3.2.2. Dvoučlenná převracející čočková soustava

Jednočlenná čočková převracející soustava má mimo jiné tu nevýhodu, že při dané stavební délce dalekohledu není možné nejstovat dalekohled pro předepsané zvětšení. Z toho důvodu se u dalekohledových soustav obvykle užívá dvoučlenná převracející soustava, viz obr.6.12.



Obr. 6.12. Dvoučlenná čočková převraccíjící soustava

I tato převraccíjící soustava zavádí změnu zvětšení celého dalekohledu, pokud opět nemá sama $\beta_p = -1$.

U takové převraccíjící soustavy, pokud se při výrobě nedodrží přesně ohniskové vzdálenosti jednotlivých členů, je možno zvětšení upravit změnou vzájemné vzdálenosti x a změnou sečné vzdálenosti s .

Z justážního hlediska je výhodné, pokud paprskové svazky mezi členy převraccíjící soustavy jsou rovnoběžné paprskové svazky.

I do dalekohledu s dvoučlennou čočkovou převraccíjící soustavou se vkládá kolektiv, pokud je to nutné z dříve uvedeného důvodu. Takovouto převraccíjící soustavou je dále možno ovlivňovat polohu výstupní pupily, což je využíváno hlavně u puškových zaměřovačů, kde je požadováno, aby výstupní pupila byla co možná nejdále od okuláru.

Další velkou předností dvoučlenných čočkových převraccíjících soustav je, že umožňují při konstantní vzdálenosti od obrazového ohniska objektivu po

předmětové ohnisko okuláru plynulou změnu zvětšení dalekohledu jako celku vzájemným pohybem jednotlivých členů převraccující soustavy vůči sobě. Takové soustavy nazýváme *pankratické*.

Pozn.: více o převraccících soustavách a pankratických čočkových soustavách viz např:

Keprt, E.: Teorie optických přístrojů I. Skripta. SPN Praha. 1965.

6.5. Binokulární dalekohledy

Je známo, že pouze při pozorování předmětového prostoru oběma očima dochází k *prostorovému vidění*. Hloubku prostoru můžeme vnímat jak při *monokulárním*, tak při *binokulárním vidění*, ale na různých principech. Při monokulárním vidění nám pomáhá při vytváření prostorového vjemu řada různých činitelů, ve většině případů plynoucích ze zkušenosti, např. porovnání rozměrů pozorovaných předmětů, změna barvy předmětů, překládání předmětů přes sebe a v neposlední řadě i akomodační úsilí při pozorování. Všechny tyto faktory se uplatňují i při binokulárním vidění, ale přistupuje zde další dva faktory. Prvním je *konvergenční úhel*, který se mění se vzdáleností pozorovaných předmětů a druhým je *odlišnost obrazů* téhož předmětu vytvořených na sítnici obou očí vzhledem k tomu, že odpovídající středy centrální projekce jsou vzájemně posunuty o oční rozestup.

6.5.1. Některé pojmy prostorového (stereoskopického) vidění

6.5.1.1. Stereoskopická paralaxa

Stereoskopickou paralaxou rozumíme úhel, který je tvořen osami očí pozorujících určitý předmět. Je-li d vzdálenost tohoto předmětu a b oční rozestup, pak pro stereoskopickou paralaxu δ platí :

$$\delta = b / d .$$

6.5.1.2. Mez (práh) stereoskopického vidění

Dva předměty A a B jsou vnímány očima jako různě vzdálené, je-li rozdíl jejich paralax větší než určitá hodnota δ_0 , která se nazývá *mezí stereoskopického vidění* a platí pro ni:

$$(\delta_A - \delta_B) \geq \delta_0 = 10'' .$$

6.5.1.3. Poloměr stereoskopického vidění

Vzdálenost

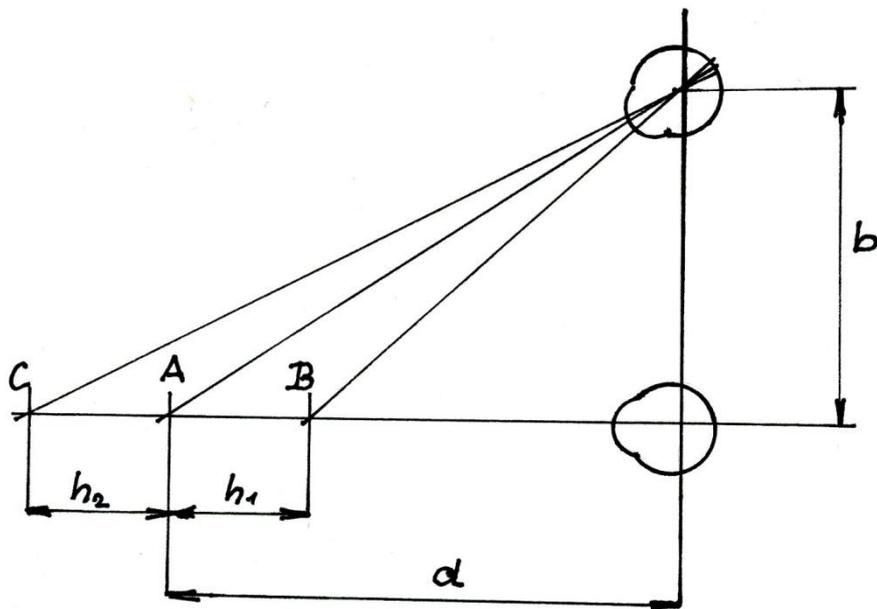
$$d_0 = b / \delta_0$$

předmětu, jehož stereoskopická paralaxa je rovna δ_0 se nazývá *poloměrem stereoskopického vidění*.

Pro pozorovatele s mezí stereoskopického vidění $20''$ je poloměr stereoskopického vidění 650 m, tento pozorovatel nebude hloubkově rozlišovat předměty ležící ve vzdálenosti větší než těch 650 m.

6.5.1.4. Hloubka stereoskopického vidění

Představme si situaci nakreslenou na obrázku 6.13. Oko pozoruje předmět A ve vzdálenosti d . Zajímá nás, jaké hloubky h_1 a h_2 na obě strany od bodu A, tudíž body B a C bude pozorovatel ještě hloubkově rozlišovat.



Obr. 6.13.

Lze odvodit, že pokud si situaci zjednodušíme tím, že položíme $h = h_1 = h_2$ bude platit:

$$h = h_1 = h_2 = d^2 / d_0 .$$

Veličinu h nazýváme *hloubkou stereoskopického vidění*. Aby tato hodnota byla co nejmenší, požadujeme, aby d_0 bylo co největší. Toho lze dosáhnout dvěma způsoby a to:

- zvětšením očního rozestupu pomocí zrcadlových soustav, případně při pozorování okem ozbrojeným binokulárním dalekohledem zvětšením báze (vzdáleností optických os obou větví dalekohledu), čímž zvětšíme poloměr stereoskopického vidění na hodnotu

$$d_0 = B / \delta_0 , \quad \text{kde } B \text{ je nová hodnota báze}$$

- zmenšením meze stereoskopického vidění, čehož dosáhneme zavedením do pozorování zvětšení Γ pozorováním binokulárním dalekohledem, tím změníme poloměr stereoskopického vidění na hodnotu

$$d_0 = (b \cdot \Gamma) / \delta_0 .$$

Při užití obou metod, tzn. pozorováním binokulárním dalekohledem majícím zvětšení Γ a bázi optických os B lze pro poloměr stereoskopického vidění psát, že:

$$d_{0D} = (B \cdot \Gamma) / \delta_0 ,$$

a pro hloubku stereoskopického vidění h_D užitím dalekohledu příslušných parametrů:

$$h_D = d_D^2 / d_{0D} = (d_D^2 \cdot \delta_0) / (B \cdot \Gamma) ,$$

kde d_D je vzdálenost předmětu, který vidíme dalekohledem při stejném konvergenčním uhlu pozorovatelových očí.

Poznámka: Z teorie dalekohledu je známo (viz pasáž o zvětšení), že dalekohled pozorovaný prostor **zplošťuje**, protože příčně předměty Γ krát zmenšuje ale osově Γ^2 zkracuje. Abychom přes dalekohled vnímali prostorové rozložení předmětů jako při pozorování neozbrojenýma očima, musí platit podmínka, že: $\mathbf{B} = \mathbf{b} \cdot \Gamma$.

6.5.2. Konstrukce binokulárních dalekohledů

Při návrhu a realizaci binokulárního dalekohledu je nutno dodržet několik konstrukčních podmínek.

- a) Je nutno pohlídat *správnou orientaci obrazu* v obou větvích dalekohledu, tzn., že si musíme hlídat návrh převraccjících soustav u Keplerových dalekohledů
- b) Je nutno dodržet *tolerance na zkřížení optických os* binokulárních dalekohledů. Povolené tolerance na konvergenci, divergenci a výškové zkřížení jsou následující:
 - Konvergence os: $\varepsilon_K \leq (20' - 30') / (\Gamma \pm 1)$
 - Divergence os: $\varepsilon_D \leq 8' / (\Gamma \pm 1)$
 - Výškové zkřížení: $\varepsilon_V \leq 8' / (\Gamma \pm 1)$
- c) Další důležitá podmínka je požadavek na *stejnou hodnotu zvětšení* obou větví binokulárního dalekohledu. Různost zvětšení narušuje prostorové vidění a vede ke zdvojení obrazu. Proto je nutné párovat objektivy, okuláry, resp. převraccjící soustavy.



Obr. 6.14. Binokulární dalekohled Meopta



Obr. 6.15. Monokulární dalekohled Meopta



Obr. 6.16. Puškový zaměřovač Meopta

