



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

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

Fyzikální praktikum

(optika)

OPT/FP4 a OPT/P2

Jan Ponec

Určeno pro studenty všech kombinací s fyzikou

Olomouc 2011

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

Obsahové teze k jednotlivým lekcím výuky

- 1. Úvodní praktikum** **5**

Vybavení optické laboratoře: optická lavice a optický stůl s příslušenstvím, kolimátor, autokolimátor, měřicí dalekohled, měřicí mikroskop, goniometr, refraktometr, spektrální fotometr, další vybavení jako zdroje a detektory záření a podobně. Nastavení a justáž některých přístrojů.

- 2. Měření ohniskové vzdálenosti objektivů** **7**

Na základě definice ohniskové vzdálenosti je praktikována Porrova metoda měření, zobrazovací vztahy využívá například metoda Besselova. Obě metody použijeme pro měření ohniskové vzdálenosti snímacích objektivů.

- 3. Měření indexu lomu vzorku skla goniometrem metodou měření minimální odchyšky svazku světla** **13**

Tato metoda se též nazývá Fraunhoferova. Při měření úhlů s přesností úhlové vteřiny, index lomu lze určit s přesností jednotek pátého desetinného místa.

4. Měření hlavních parametrů dalekohledů **19**

Měření zvětšení, polohy a velikosti pupil, zorného pole, rozlišovací meze u Keplerova dalekohledu bez převraccující soustavy.

5. Měření hlavních parametrů mikroskopů **26**

Měření zvětšení, rozlišovací meze, velikosti číselné apertury, velikosti a polohy výstupní pupily, zorného pole u dvoustupňového mikroskopu.

6. Měření rozlišovací schopnosti snímacích objektivů **36**

Vztah mezi rozlišovací mezí a rozlišovací schopností, měření rozlišovací schopnosti objektivu na vzdušném obraze testu, měření ve spojení s detektorem (filmem), funkce optického přenosu. Typy objektivů- normální objektiv, teleobjektiv, širokoúhlý objektiv, zoom.

7. Světlo a barva **41**

Co je to barva, vnímání barev, spektrální složení barev, skládání barev, měření barev, barevné modely.

8. Spektrální analýza **42**

Disperzní soustavy hranolové a mřížkové. Analýza různých zdrojů záření monochromatických i polychromatických pomocí

spektrálního fotometru. Výpočet teploty chromatičnosti zdrojů.
Smluvní zdroje bílého světla. Měření kolority.

9. Interference světla **54**

Pokusy s různými typy interferometrů, počítačová simulace
interferenčních polí.

10. Ohyb světla **66**

Pokusy demonstrující Fraunhoferovy a Fresnelovy ohybové jevy,
měření vlnové délky světla pomocí ohybu na mřížce, měření
periody mřížky. Simulace ohybových jevů na počítači.

11. Polarizace světla **70**

Způsoby polarizace světla. Malusův zákon a jeho ověření.

Interference polarizovaného světla. Simulace jevů na počítači.

1. Úvodní praktikum

Vybavení optické laboratoře: optická lavice a optický stůl s příslušenstvím, kolimátor, autokolimátor, měřicí dalekohled, měřicí mikroskop, goniometr, refraktometr, spektrální fotometr, další vybavení jako zdroje a detektory záření apod.

Úlohy:

a) Nastavení kolimátoru na nekonečno

Kolimátor je správně nastaven na nekonečno tehdy, leží-li záměrný obrazec testové destičky v předmětovém ohnisku objektivu kolimátoru.

Pro toto nastavení použijeme *autokolimátor*, který si předem nastavíme na nekonečno pomocí zrcadla, které vrací zpět svazek světla vysílaný autokolimátorem. Nejprve zaostříme okulár autokolimátoru na záměrný obrazec testové destičky v libovolné poloze. Před objektiv autokolimátoru umístíme odraznou plochu (rovinnou skleněnou desku) ukolmenou k optické ose objektivu autokolimátoru (většina autokolimátorů pro usnadnění ukolmení odrazné destičky k optické ose má přední plochu objímky objektivu kolimátoru zabroušenou kolmo na optickou osu). Pokud je odražený obraz testu neostrý, leží testová destička mimo předmětové ohnisko objektivu autokolimátoru. Posouváme testovou destičkou ve směru osy objektivu oběma směry tak dlouho, až je záměrný obrazec testové destičky i jeho obraz ostrý.

Takto nastavený autokolimátor umístíme souose před nastavovaný *kolimátor*, prosvítíme testový obrazec nastavovaného kolimátoru a v okuláru autokolimátoru pozorujeme jednak zaostřený vlastní testový obrazec autokolimátoru a přes něj se promítající testový obrazec nastavovaného kolimátoru. Testovou ploténku kolimátoru posouváme v ose kolimátoru opět oběma směry tak dlouho, až je obraz jejího testového obrazce v okuláru autokolimátoru taktéž ostrý.

b) Určení převodní konstanty měřicího mikroskopu

Jelikož stupnice *měřicího okuláru* měřicího mikroskopu je cejchována v dílečkách, aby bylo možno měřit s objektivy různých zvětšení, je před měřeními nutno si tuto stupnici ocejchovat tak, abychom měřenou hodnotu znali v jednotkách SI, nebo jejich odvozeninách, nejčastěji v milimetrech.

Provedeme to tak, že změříme úsečku známé velikosti v předmětové rovině mikroskopu v dílečkách okulárového mikrometru měřicího okuláru a vypočteme převodní konstantu, kterou je nutno násobit velikost měřeného útvaru v dílečkách, abychom dostali tuto hodnotu v milimetrech.

Jako měřený předmět použijeme *objektivový mikrometr*, což je mikroskopový preparát na němž je úsečka 1 mm dělená po 0,01 mm. (Některé firmy dodávají tyto objektivové mikrometry, na nichž je úsečka pouze velikosti 0,5 mm). Před měřením se seznámíme s dělením měřicího okuláru, které může být odlišné podle výrobce daného okuláru.

Na optickou lavici umístíme proměřovaný mikroskop, držák s objektivovým mikrometrem a prosvětlovací zdroj, nejlépe mikroskopovou lampu. Zaostříme mikroskop na stupničku (onen milimetr) objektivového mikrometru, dle zvětšení mikroskopu vybereme ze stupničky úsek, přibližně rovný $2/3$ zorného pole mikroskopu a odečteme jeho velikost v dílečkách mikrometru měřicího okuláru. Velikost měřeného úseku objektivového mikrometru v milimetrech podělíme velikostí jeho obrazu v dílečkách měřicího okuláru a takto získáme požadovanou převodní konstantu mezi dílky mikrometru měřicího okuláru a skutečnou velikostí měřeného útvaru v mm.

2. Měření ohniskové vzdálenosti objektivů

Měřicí metody k určování ohniskových vzdáleností jsou založeny na použití zobrazovacích vztahů nebo vztahu pro definici této vzdálenosti. Na základě definice ohniskové vzdálenosti je praktikována Porrova metoda, zobrazovací vztahy využívá například metoda Besselova.

a) Měření ohniskové vzdálenosti Porrovou metodou

Ohnisková vzdálenost je definována vztahem

$$f' = \lim_{\tau \rightarrow 0} (y' / \operatorname{tg} \tau)$$

kde τ je úhel pod kterým je viděna úsečka velikosti y ležící v nekonečnu a y' velikost jejího obrazu vytvořeného měřeným objektivem.

Limita ve vztahu udává, že měření má probíhat v paraxiálním prostoru.

Poznámka: pro nekorigovanou čočku s velkým otvorem nemůžeme principiálně určit přesnou hodnotu f' . I tak vždy jde o měření efektivní ohniskové vzdálenosti za daných podmínek měření. Přednostně bychom měli f' měřit pro monochromatické světlo o vlnové délce 546,1 nm, což je Fraunhoferova e čára rtuti. Pokud použijeme zdroj bílého světla, měli bychom přednostně používat smluvní bílá světla (viz lekce č.8)

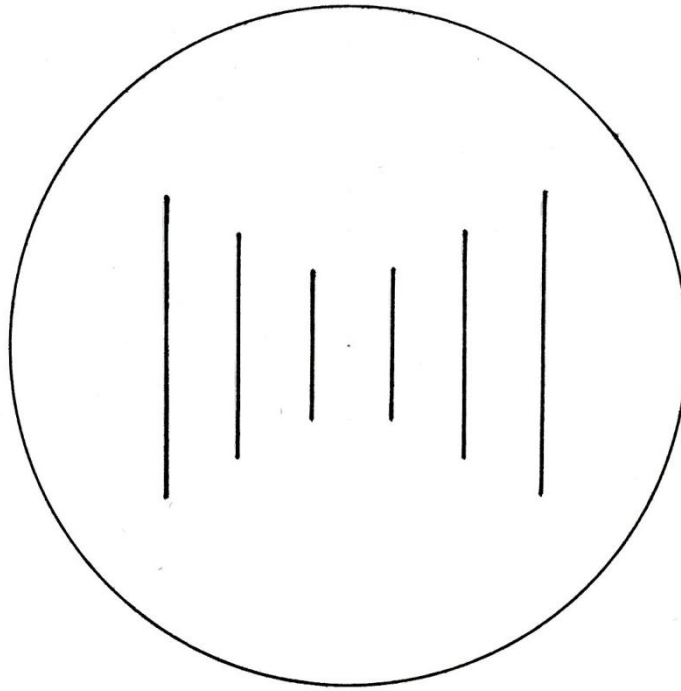
Měřicí zařízení:

Předmět v nekonečnu o známé úhlové velikosti τ je realizován dvojicí značek v předmětové ohniskové rovině objektivu kolimátoru symetricky rozložených oproti optické ose objektivu- *Porrotest*. Předmět je difúzně osvětlen světlem příslušného spektrálního složení. Měřený objektiv je umístěn před kolimátorem tak, že jejich optické osy jsou pokud možno totožné. Malé příčné posunutí je bez vlivu na úhlová měření. Pro určení velikosti obrazu y' v obrazové ohniskové rovině měřeného objektivu použijeme mikroskop vybavený měřicím okulárem. Předpokládáme, že známe měřicí konstantu mikroskopu (viz minulé praktikum).

Požadavky kladené na měřicí zařízení:

Kolimátor:

- průměr výstupní pupily kolimátoru by měl být větší, než je průměr vstupní pupily měřeného objektivu
- ohnisková vzdálenost objektivu kolimátoru by měla být 3 – 10 krát větší než ohnisková vzdálenost měřeného objektivu
- Porrotest* by měl obsahovat několik párů rysek, souměrně rozložených vzhledem ke středu pole s takovými roztečemi, aby platilo, že úhel τ je pro největší dvojici rysek menší než 4° (paraxiální omezení měření).



Obr.1. Porrotest

Měřicí mikroskop:

- číselná apertura měřicího mikroobjektivu A_n by měla být větší, než apertura měřeného objektivu
- zvětšení měřicího mikroskopu by mělo být na dolní hranici rozsahu užitečného zvětšení, čili asi $250 A_n$.

Postup měření:

Na optické lavici si sestavíme měřicí uskupení v pořadí: osvětlovač s kondenzorem, kolimátor osazený Porrotestem, měřený objektiv a měřicí mikroskop. Předpokládáme, že známe polohu předmětového ohniska objektivu

kolimátoru a Porrotest je v této rovině aby se test zobrazoval z ∞ . Měřený objektív nastavíme na ∞ , odcloníme, pokud chceme měřit při plném otvoru, jinak zacloníme na požadované clonové číslo. Zaostříme si záměrný obrazec okulárového mikrometru měřicího mikroskopu. Zaostříme mikroskop na obraz Porrotestu. Odečteme velikost úsečky y' v dílečkách měřicího okuláru a tuto hodnotu vynásobíme konstantou měřicího okuláru (viz minulá úloha). Do vzorce pro ohniskovou vzdálenost dosadíme a a spočteme f' měřeného objektívu. Předem jsme si spočítali hodnotu $\text{tg } \tau$ ze znalosti velikosti úsečky y Porrotestu a ohniskové vzdálenosti objektívu kolimátoru

$$\text{tg } \tau = y / f'_{\text{kolimátoru}} .$$

Měření několikrát opakujeme i pro různé rozteče čar Porrotestu (Ize provést aproximaci na hodnotu úhlu $\tau = 0$, čili jakoby dokonalé paraxiální zobrazení). Přesnost metody je dána přesností s jakou známe jednotlivé parametry do měření vstupující.

Za ukazatele nepřesnosti považujeme relativní směrodatnou odchylku, pro kterou lze diferencováním odvodit vztah:

$$\delta f' / f' = \pm [(\delta y' / y')^2 + (\delta \tau / \sin \tau)^2]^{1/2}$$

v němž je směrodatná odchylka $\delta \tau$ měřené úhlové velikosti předmětu totožná s chybou kalibrace kolimátoru a je dána v obloukové míře tj. v radiánech. Pokud je úhel τ malý, jak je to obvykle žádoucí, můžeme psát $\sin \tau \approx \tau$ a protože zpravidla přesnost kalibrace převyšuje přesnost vlastního měření, je možné příspěvek $\delta \tau / \sin \tau$ zanedbat a potom :

$$\delta f' / f' = \pm \delta y' / y'$$

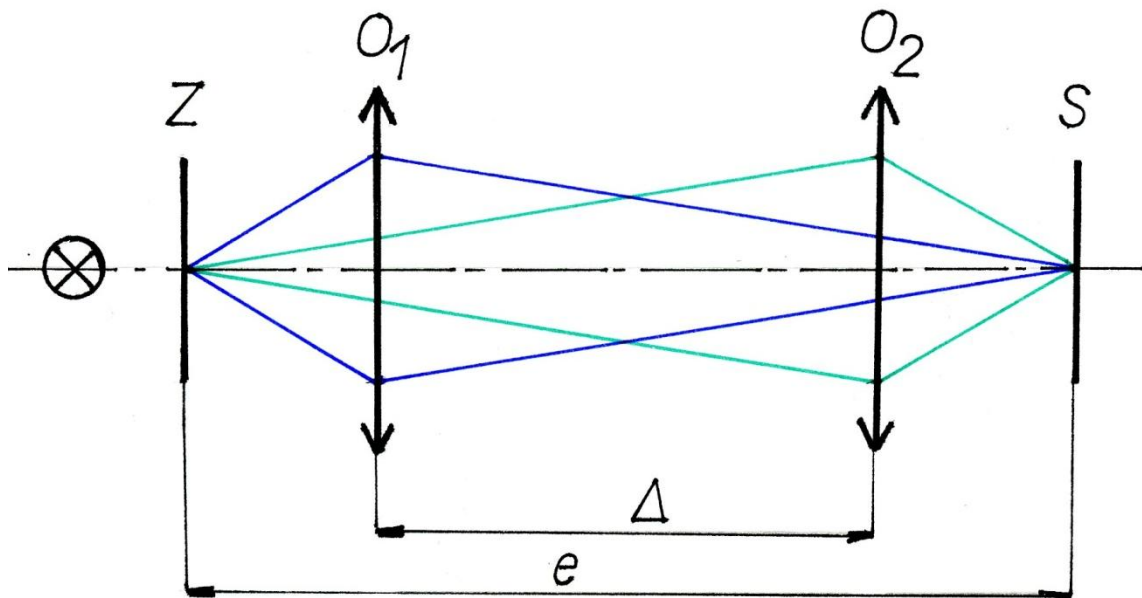
a docházíme k závěru, že relativní chyba měření ohniskové vzdálenosti je prakticky rovna relativní chybě měření příčné velikosti obrazu úsečky y' , nebo je jen o málo větší.

b) Měření ohniskové vzdálenosti Besselovou metodou

Ne vždy máme k dispozici příslušné laboratorní vybavení pro exaktní měření Porrovou metodou jak bylo popsáno a přesto požadujeme alespoň orientačně ohniskovou vzdálenost objektivu znát.

K tomu nám může posloužit Besselova metoda měření, založená na zobrazovací rovnici.

Princip metody je zobrazen na obr.2.



Obr.2.

Na obrázku je Z záměrný obrazec, vytvořený třeba černou fixou na pauzovacím papíře prosvětlený žárovkou, S stínítko, opět buď matnička, pokud ji nemáme můžeme použít pauzovací (nebo jiný poloprůsvitný) papír. Stínítko umístíme do vzdálenosti e , která je minimálně 4x větší, než je předpokládaná hodnota měřené ohniskové vzdálenosti. Hledáme polohu O_1 měřeného objektivu při které dojde k zobrazení záměrného obrazce na stínítku se zvětšením, polohu si

označíme. Potom posuneme objektiv do polohy O_2 , kdy opět dojde k ostrému zobrazení záměrného obrazce na stínítku, nyní se zmenšením. Polohu objektivu si opět označíme. Pro přesnější nastavení je dobré pozorovat obrazy lupou. Změříme vzdálenost značek polohy O_1 a O_2 , tuto označíme Δ .

Při využití zobrazovací rovnice:

$$1/a' - 1/a = 1/f',$$

kde můžeme dosadit : $a' + a = e$, $a' - a = \Delta$, při zanedbání vzdálenosti hlavních rovin objektivu. Potom pro ohniskovou vzdálenost měřeného objektivu dostaneme vztah:

$$f' = (e^2 - \Delta^2) / 4e.$$

3. Měření indexu lomu vzorku skla goniometrem metodou měření minimální odchyšky svazku světla

Index lomu n_λ je materiálová „konstanta“, charakterizující lámavost daného optického prostředí. Udává kolikrát je rychlost šíření světla v daném prostředí menší než ve vakuu

$$n_\lambda = c / v_\lambda ,$$

kde c je rychlost šíření světla ve vakuu a v_λ rychlost šíření světla v daném prostředí pro danou vlnovou délku světla λ .

Vlivem disperze je tato veličina závislá na vlnové délce světla pro které ji uvažujeme. Index lomu měříme obvykle speciálními přístroji pro tato měření určenými, refraktometry, ale je mnoho metod nerefraktometrických, které umožňují měřit index lomu s dostatečnou přesností. Jednou z nich je měření pomocí goniometru. Tato metoda se nazývá Fraunhoferova. Využívá průchodu světla lámavým trojbokým hranolem pod minimální odchyškou.

Pokud odečteme příslušné úhly s přesností lepší než $\pm 2''$, lze index lomu vypočítat s přesností asi $\pm 1,5 \times 10^{-5}$.

Měření budeme provádět v monochromatickém světle vybraných vlnových délek. Pokud požadujeme znalost indexu lomu i *Abbeova čísla*, musíme měření provést pro hlavní index lomu n_e pro Fraunhoferovy čáry e, F' a C', pokud uvažujeme hlavní index lomu n_d , měříme pro čáry d, F a C. Tabulka vybraných

Fraunhoferových čar je uvedena na konci úlohy. Vzorek měřeného skla musí být ve tvaru lámavého trojbokého hranolu s lámavým úhlem θ přibližně 60° .

Počítáme-li změnu deviačního úhlu hranolu δ jako funkci úhlu dopadu ϵ_1 pomocí derivace $d\delta / d\epsilon_1$, najdeme minimální deviaci δ_{\min} odpovídající symetrickému průchodu svazku paprsků hranolem (obr.3.) a pro tento případ musí platit pro úhel dopadu $\epsilon_1 = \epsilon_{1\text{sym}}$ vztah

$$\sin \epsilon_{1\text{sym}} = n_\lambda \cdot \sin (- \theta / 2)$$

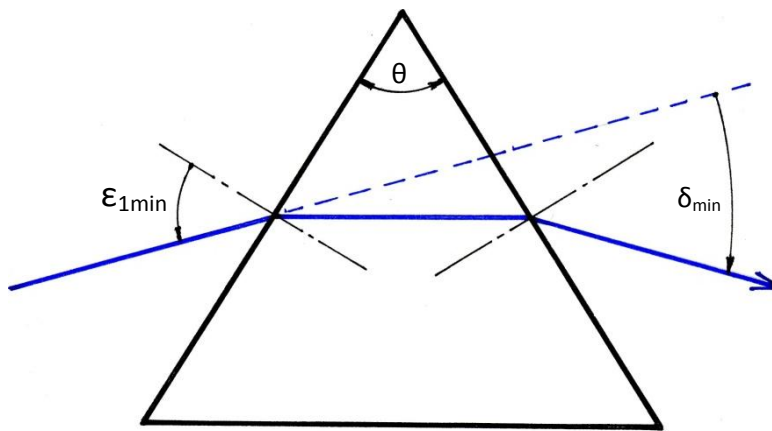
a pro minimální deviaci platí vztah

$$\delta_{\min} = - \theta - 2\epsilon_{1\text{sym}} .$$

Spojením těchto vztahů obdržíme vztah, použitelný pro výpočet n_λ skla, z něhož je hranol vyroben ve tvaru

$$n_\lambda = \sin [(\delta_{\min} + \theta) / 2] / \sin (\theta / 2) .$$

Pro výpočet indexu lomu skla z něhož je hranol vyroben je nutno změřit lámavý úhel hranolu θ autokolimační metodou a úhel minimální odchylky (deviace) svazku světla procházejícího hranolem δ_{\min} .



Obr.3.

Postup měření :

1) Provedeme justáž goniometru (viz návod k přístroji) :

- nastavíme záměrnou osu autokolimačního dalekohledu kolmo na osu otočného ramene goniometru
- nastavíme záměrnou osu kolimátoru rovnoběžně se záměrnou osou dalekohledu

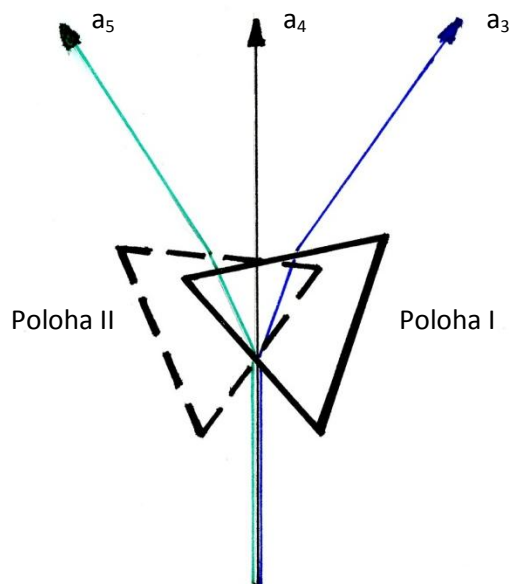
2) Změříme lámavý úhel hranolu autokolimační metodou

Hranol uložíme na stolek goniometru tak, aby jedna z lámavých ploch hranolu byla kolmá na osu jednoho ze šroubů náklonu stolku a osa symetrie lámavého úhlu procházela osou kolimátoru. Je-li to nutné, upravíme výšku stolku vložkami. Pro měření použijeme Gaussův autokolimační okulár. Najdeme

autokolimační obraz záměrného kříže odraženého od jedné z lámavých ploch hranolu a jemným posuvem ramene s autokolimátorem ho ztotožníme se záměrnou značkou v okuláru. Provedeme odečet polohy ramene autokolimátoru na děleném kruhu - čtení a_1 . Nalezneme autokolimační obraz záměrné značky od druhé lámavé plochy hranolu a provedeme odečet polohy ramene - čtení a_2 . Lámavý úhel hranolu vypočteme ze vztahů :

$$\theta = 180 - \alpha , \quad \text{kde } \alpha = a_2 - a_1 .$$

3) Změříme úhel minimální odchyšky svazku světla – poloha hranolu I (viz obrázek 4)



Obr.4.

Kolimátor goniometru vybavíme spektrální štěrbinou a osvětlíme ji monochromatickým světlem příslušné nízkotlaké výbojky doplněné příslušným interferenčním filtrem. Pozorováním štěrbinou dalekohledem, vybaveným okulárem o $f' = 9,8$ mm upravíme její šířku pro přesný odečet. Hranol položíme

na stolek goniometru přibližně do polohy I. Dalekohledem nalezneme polohu odchýleného směru svazku paprsků hranolem. Nyní pozorujeme v dalekohledu obraz štěrbinu a zároveň otáčíme stolkem goniometru s hranolem. Při tomto pohybu se obraz štěrbinu pohybuje v zorném poli dalekohledu. Ramenem s dalekohledem sledujeme pohyb štěrbinu. Při určité poloze stolku s hranolem vůči kolimátoru se obraz štěrbinu zastaví a začne se pohybovat opačným směrem bez ohledu na to, že stolkem otáčíme stále stejným směrem. Moment změny směru pohybu obrazu štěrbinu je ta poloha hranolu vůči kolimátoru, ve které svazek světla dopadá na hranol pod úhlem dopadu $\varepsilon_{1\text{sym}}$ a odchylna svazku je minimální. Navedeme zámerný kříž okuláru dalekohledu na obraz štěrbinu v této poloze a provedeme odečet polohy dalekohledu na děleném kruhu – čtení a_3 . Pokud je hranol tak velký, že zakrývá cele zorné pole optických přístrojů – kolimátoru i dalekohledu, sejmem je, pokud ne, můžeme je ponechat na stolku. Provedeme odečet přímého chodu svazku světla neodchýleného hranolem – čtení a_4 .

Úhel minimální odchylny

$$\delta_{1\text{min}} = a_4 - a_3 .$$

4) Změříme dvojnásobný úhel minimální odchylny – poloha hranolu II

Překlopíme hranol kolem optické osy kolimátoru vzhledem k poloze I do polohy II a opět nalezneme polohu minimální odchylny svazku světla postupem stejným jako v minulém případě. Provedeme odečet polohy dalekohledu pro nastavení na minimální odchylnu v pozici II – čtení a_5 .

Úhel minimální odchylny $\delta_{2\text{min}}$ v tomto případě vypočteme jako

$$\delta_{2\text{min}} = (a_5 - a_3) / 2 .$$

Zpracování výsledků

Všechna čtení a_j provedeme alespoň 10x. Spočítáme chybu měření. Abychom určili n_λ s přesností $\pm 1,5 \times 10^{-5}$, musíme úhly určit s přesností alespoň 2".

Podle vztahu uvedeného v úvodní části návodu provedeme výpočet n_λ , kde za δ_{\min} dosadíme průměrnou hodnotu obou měření $\delta_{\min} = (\delta_{1\min} + \delta_{2\min}) / 2$.

V následující tabulce jsou uvedeny některé vybrané spektrální čáry, nejčastěji používané v optické měřičské praxi:

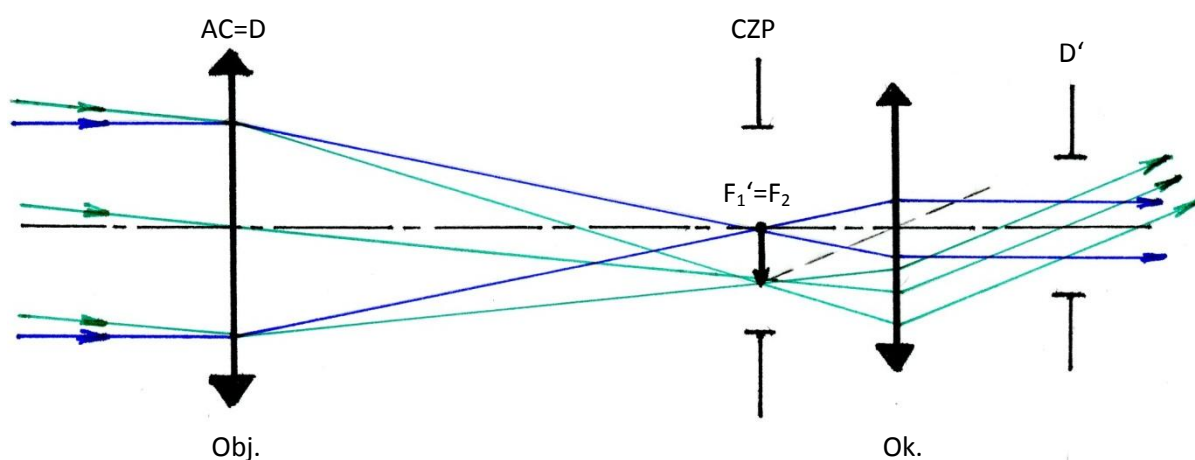
λ /nm/	symbol	prvek	spektr. oblast
312,6	u2	Hg	UV
334,1	u1	Hg	UV
365,0	i	Hg	UV
404,7	h	Hg	fialová
435,8	g	Hg	modrá
480,0	F'	Cd	modrá
486,1	F	H ₂	modrá
546,1	e	Hg	zelená
587,6	d	He	žlutá
589,3	D	Na	žlutá
643,8	C'	Cd	červená
656,3	C	H ₂	červená
768,2	A'	K	červená
852,1	11	Cs	IR
1013,9	12	Hg	IR
1128,6	13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

4. Měření hlavních parametrů 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.

Poznámka : v našich úvahách budeme uvažovat Keplerův dalekohled, mající spojný okulár, bez převracující soustavy (obr.5.).



Obr.5. Keplerův dalekohled

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 :

$$\Gamma = - (f'_1 / f'_2) = - (D / D') = \text{tg } \tau' / \text{tg } \tau ,$$

kde f'_1 , f'_2 jsou ohniskové vzdálenosti objektivu a okuláru

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

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.

Clona zorného pole (CZP) je obvykle zvláštní objímka, ležící v předmětové ohniskové rovině okuláru, tudíž i v rovině meziobrazu, vytvořeného objektivem.

Rozlišovací mez

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

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

Postup měření :

1) Měření polohy a průměru vstupní pupily

a) Toto měření provedeme na optické lavici v uspořádání : osvětlovač – rozptylovač světla (matnice) – měřený dalekohled (okulárem přivrácený k osvětlovači) – odečítací mikroskop. Přes rozptylovač světla prosvětíme výstupní pupilu dalekohledu. Podélným posuvem mikroskopu jej zaostříme na vstupní pupilu měřeného dalekohledu, záměrný okulárový kříž mikroskopu nastavíme na jeden okraj vstupní pupily, na příčné stupnici odečteme polohu

mikroskopu a příčným posuvem celého dalekohledu přejdeme na protilehlý okraj vstupní pupily. Opět odečteme příčnou polohu mikroskopu, rozdíl těchto čtení nám udává průměr vstupní pupily měřeného dalekohledu D .

b) Poloha vstupní pupily je obvykle dána přímo objímkou objektivu, takže další možností zjištění průměru pupily je přímo posuvným měřítkem změřit vnitřní průměr objímky.

2) Měření polohy a průměru výstupní pupily

a) Měření průměru a polohy výstupní pupily lze provést obdobně, jako v předešlém případě při opačné orientaci měřeného dalekohledu. Odečítací mikroskop zaostříme na obraz aperturní clony (objímky objektivu)- výstupní pupilu a příčným posuvem celého mikroskopu provedeme odečet průměru výstupní pupily D' . V této poloze mikroskopu odečteme na podélné stupnici jeho polohu, přeostříme na poslední optickou plochu okuláru měřeného dalekohledu a opět provedeme odečet podélné polohy mikroskopu. Rozdíl těchto čtení udává polohu výstupní pupily dalekohledu z' od okuláru.

b) Druhou možností je provést toto měření *dynametrem*. Nejprve si zaostříme okulárovou stupnici dynametru. Dynametr přiložíme na očníci měřeného dalekohledu, posuvem vnitřního tubusu vzhledem k vnějšímu zaostříme obraz pupily a na okulárové stupnici provedeme odečet její velikosti D' . Na vnější podélné stupnici dynametru provedeme odečet polohy výstupní pupily vzhledem k očníci měřeného dalekohledu.

3) Měření zvětšení

a) Z předchozích měření průměrů vstupní a výstupní pupily vypočteme zvětšení dle vztahu

$$\Gamma_1 = D / D' .$$

b) Přesnější údaj nám poskytne měření dle vztahu pro definici zvětšení

$$\Gamma_2 = \text{tg } \tau' / \text{tg } \tau .$$

Měření provedeme na optické lavici vybavené kolimátorem a měřicím dalekohledem, ocejchovaným pro úhlová měření.

Do předmětové ohniskové roviny kolimátoru umístíme test s dvojicí rysek o známe rozteči y , čímž si vymežíme předmětový úhel τ . Známe-li velikost ohniskové vzdálenosti objektivu kolimátoru f'_{kol} , potom

$$\text{tg } \tau = y / f'_{\text{kol}} .$$

Měřicím dalekohledem ocejchovaným pro úhlová měření provedeme odečet velikosti úhlu τ' a dosazením do výše uvedeného vztahu vypočteme zvětšení měřeného dalekohledu. Přesnost metody je dána přesností určení úhlů τ a τ' .

4) Měření velikosti zorného pole

a) Měření goniometrem

Měřený dalekohled umístíme na stůl goniometru tak, aby vstupní pupila ležela v rovině, v níž leží i osa rotace ramene se záměrným kolimátorem goniometru. Kolimátor na otočném rameni uvedeme postupně do dvou poloh tak, aby záměrný kříž protínal protilehlé kraje zorného pole měřeného dalekohledu. Hodnota rozdílu čtení obou krajních poloh ramene nám udává úhlovou velikost zorného pole měřeného dalekohledu 2ω .

b) Měření širokouhlým kolimátorem

Širokouhlý kolimátor je určen pro měření zorných polí optických přístrojů. V předmětové ohniskové rovině objektivu kolimátoru je křížová stupnice cejchovaná v úhlové míře. Měřený dalekohled představíme před kolimátor a odečteme velikost pole, které právě ještě vidíme v zorném poli. Jemnost odečtu našeho přístroje je $6'$.

5) Měření rozlišovací meze

Měření provedeme na optické lavici s kolimátorem, vybaveným testy pro měření rozlišovací meze. Jelikož rozlišení je funkcí vlnové délky, omezíme spektrální obor světla osvětlovače kolimátorových testů alespoň žlutozeleným filtrem. Při měření je nutno splnit podmínku

$$\psi_m \cdot \Gamma > \psi_o ,$$

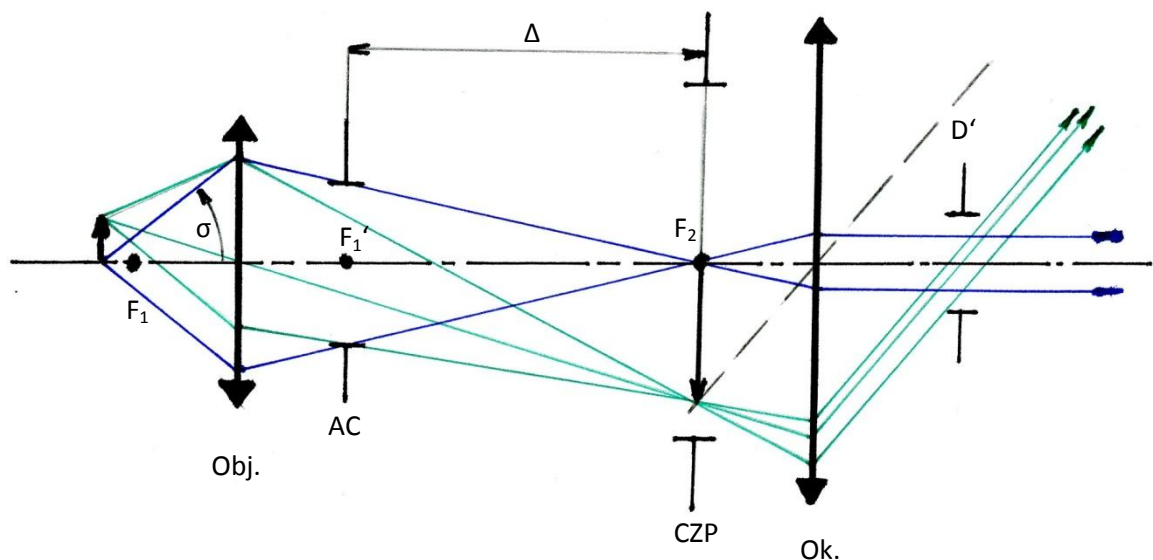
kde ψ_0 je rozlišovací mez oka pozorovatele, kterou v tomto případě uvažujeme asi 2' až 3'. Pokud tato podmínka není splněna s dostatečnou rezervou, je nutno použít pomocný dalekohled, který zařadíme do měřicího uskupení mezi měřený dalekohled a oko. Nyní provedeme odečet čísla testového obrazce, právě ještě rozlišeného a v tabulce k testům zjistíme hodnotu rozlišovací meze ψ .

5. Měření hlavních parametrů 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.

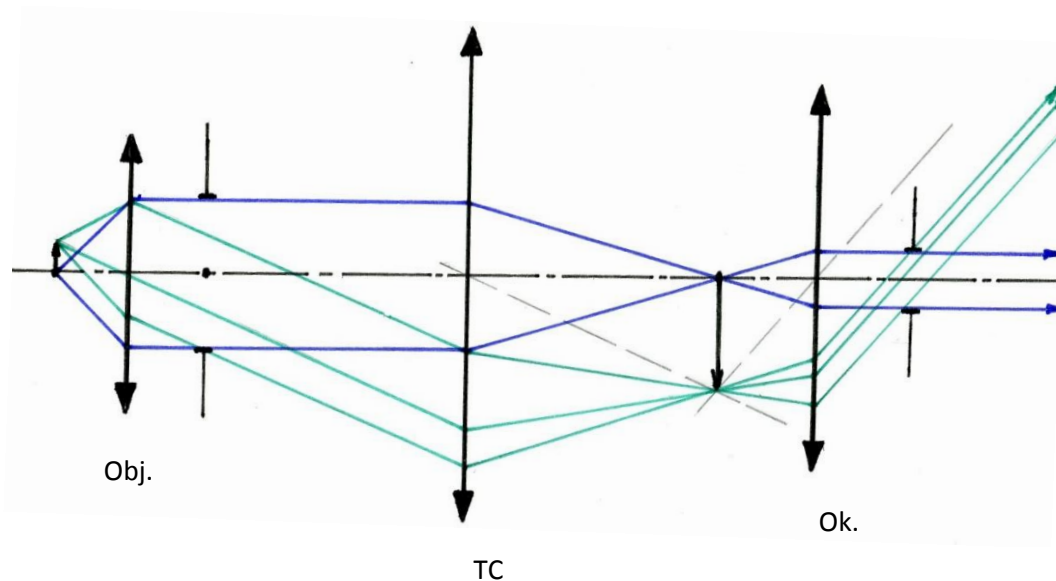
Konvenční zraková vzdálenost je 250 mm.

Při našich měřeních budeme uvažovat dvoustupňový mikroskop, který se skládá z objektivu o ohniskové vzdálenosti f_1' , který vytváří zvětšený, převrácený obraz předmětu vloženého do těsné blízkosti před předmětovou ohniskovou rovinu objektivu a okuláru o ohniskové vzdálenosti f_2' , kterým obraz vytvořený objektivem pozorujeme jako lupou, tudíž je umístěn v předmětové ohniskové rovině tohoto okuláru, viz obr.6.



Obr.6.

Vícestupňové mikroskopy mají dále tzv. tubusovou čočku(TC), jelikož předmět se vkládá do předmětové ohniskové roviny objektivu a tubusová čočka vytváří zvětšený, převrácený obraz, pozorovaný okulárem jako lupou, viz obr.7.



Obr.7.

Dále může být mikroskop vybaven pankratickou soustavou pro plynulou změnu zvětšení, hranolovým systémem binokulární hlavice, dalšími hranolovými systémy pro dělení svazku světla ,doplňkovým

vybavením pro různé druhy pozorování, např. v polarizovaném světle, fázovým kontrastem, DIC, vybavením pro fluorescenci a podobně.

Zvětšení mikroskopu

Pro ohniskovou vzdálenost dvoustupňového mikroskopu jako celku platí

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

kde Δ je optický interval $F_1'F_2$, viz obr.6. Uvažujeme-li mikroskop jako lupu (lupa splňuje definici) o ohniskové vzdálenosti f' , potom můžeme pro zvětšení mikroskopu odvodit vztah

$$\Gamma = 250 / f' = - [(\Delta / f_1') \cdot (250 / f_2')] = m_1 \cdot m_2 .$$

První faktor m_1 představuje příčné měřítko zobrazení objektivu, druhý m_2 zvětšení okuláru.

Poznámka: Pro vícestupňové mikroskopy by potom platilo $\Gamma = m_1 \cdot m_2 \cdot m_3 \dots$, podle toho, mají-li další členy vliv na zvětšení mikroskopu jako celku.

Omezení paprskových svazků

Objektivy o měřítku zobrazení asi $m_1 < 6$ jsou tvořeny dubletem, proto objímka objektivu zastupuje funkci aperturní clony, vstupní i výstupní pupily objektivu. Objektivy o větším měřítku zobrazení mají složitější optickou stavbu. Aperturní clona objektivu bývá umístěna buď přímo, nebo v blízkosti obrazového ohniska objektivu. Vstupní pupila objektivu leží potom v $-\infty$ a tedy výstupní pupila mikroskopu jako celku v jeho obrazové ohniskové rovině. Funkci vstupní pupily přebírá *číselná apertura* A_n , což je součin indexu lomu předmětového prostředí a sinu aperturního úhlu objektivu σ :

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

Lineárním zorným polem mikroskopu se rozumí průměr kruhu v předmětové rovině, jehož obraz vyplňuje clonu zorného pole v okuláru.

Rozlišovací mez

Rozlišovací mez mikroskopu je podmíněna ohybem světla na objímce objektivu, která působí na procházející světlo jako omezující kruhový otvor. Z teorie Fraunhoferova ohybu na kruhovém otvoru o průměru D je známo, že rozdělení intenzity světla za otvorem je dáno vztahem:

$$I = I_0 \cdot \left[\frac{2 J_1(\tau)}{\tau} \right]^2 ,$$

kde $J_1(\tau)$ je Besselova funkce prvního řádu, $\tau = (\pi \cdot D \cdot \sin \alpha) / \lambda$.

Funkce nabývá nulových hodnot pro $\tau = 3,832, 7,016, \dots$. Pro směr α_1 , určený prvním ohybovým minimem, kam smí padnout vedlejší maximum, aby nastalo rozlišení podle Rayleighova kritéria platí, že $\sin \alpha_1 = 1,22 \cdot \lambda \cdot D^{-1}$. Odtud můžeme odvodit vztah pro rozlišovací mez objektivu mikroskopu ve tvaru :

$$\gamma = 0,61 \cdot \lambda \cdot A_n^{-1} \quad .$$

Tento vztah platí pro předměty, vysílající vlastní, nekoherentní světlo. V ostatních případech se konstanta v předešlém vztahu mění od 0,5 do 1. (Výše uvedený vztah se bere jako obecně platný.)

Poznámka: Opět pro rychlou orientaci, při hodnotě $\lambda = 0,55 \cdot 10^{-3}$ mm můžeme spočítat pro rozlišovací mez mikroskopu zjednodušený vztah

$$\gamma = 0,33 \cdot A_n^{-1} [\mu\text{m}] \quad .$$

Postup měření :

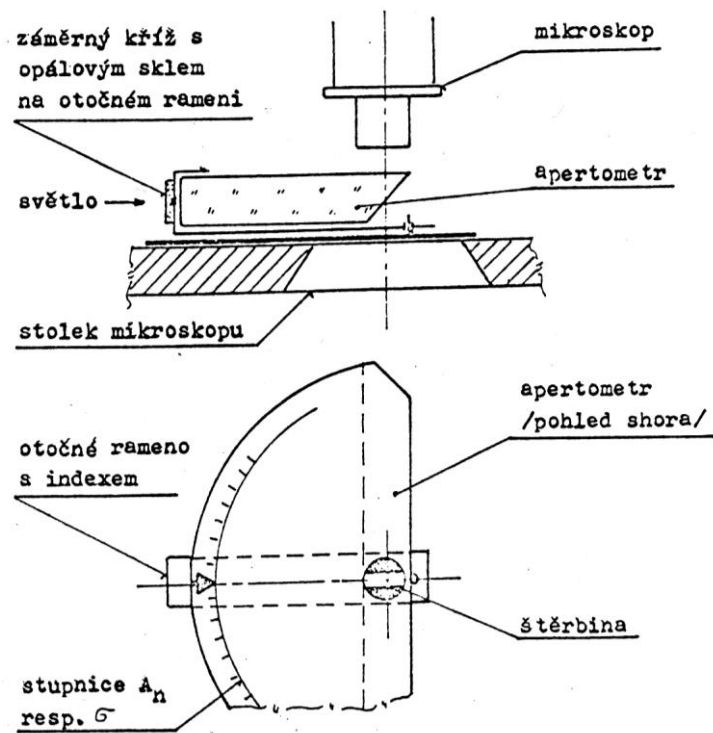
1) Měření velikosti a polohy výstupní pupily

Měření provedeme dynametrem známým postupem.

(Viz měření dalekohledu.)

2) Měření číselné apertury mikroobjektivu

Toto měření se normálně provádí Abbeovým apertometrem, ale pro jeho nedostupnost, nelze tuto hodnotu měřit. Vycházet musíme z hodnoty uvedené na těle mikroobjektivu.



Obr.8. Abbeův apertometr

3) Měření velikosti zorného pole mikroskopu

a) Určení velikosti zorného pole mikroskopu

V katalogu optického vybavení měřeného mikroskopu si v seznamu okulárů najdeme k příslušnému použitému okuláru číslo zorného pole. Pokud toto číslo podělíme příčným měřítkem zobrazení použitého objektivu, obdržíme velikost zorného pole v mm.

b) Měření velikosti zorného pole

U objektivů o velkém zvětšení, u kterých dle bodu ad a) určíme velikost zorného pole menší než 1 mm, provedeme měření tak, že na stolek mikroskopu místo preparátu položíme *objektivový mikrometr*, mikroskop na něj zaostříme a provedeme odečet velikosti zorného pole jako viditelnou část stupnice v zorném poli. Přesnost odečtu je 0,01 mm.

U objektivů o menším zvětšení, u kterých je zorné pole ve spojení s příslušným okulárem větší jak 1 mm provedeme měření za pomoci milimetrové stupnice s noniem u příčného posuvu stolku mikroskopu. (Pokud máme mikroskop vybaven kruhovým stolkem, nelze toto měření provést a musíme se spolehnout na určení zorného pole dle bodu ad a.) Jako preparát použijeme podložní sklíčko a na něj umístíme test se záměrnou značkou. Příčným posuvem stolku mikroskopu nastavíme značku na levý okraj zorného pole, provedeme odečet polohy, přejedeme na pravý okraj a opět provedeme odečet polohy stolku se záměrnou značkou. Rozdíl čtení nám udává velikost zorného pole příslušně vybaveného mikroskopu optikou, ale přesnost je pouze 0,1 mm.

4) Měření zvětšení mikroskopu

a) Určení zvětšení

Z údajů o příčném měřítku zobrazení objektivu a okuláru určíme zvětšení mikroskopu jejich vynásobením, při dodržení předepsané tubusové délky a tím i optického intervalu příslušného mikroskopu.

$$\Gamma_1 = m_1 \cdot m_2$$

b) Určení zvětšení při splnění sinové podmínky

Z již dříve zjištěných hodnot můžeme určit velikost zvětšení, uvažíme-li že při splnění sinové podmínky platí:

$$m_1 = n \cdot \sin \sigma / \sin \sigma' \sim A_n / \sin \sigma', \quad \sin \sigma' \sim \operatorname{tg} \sigma' = D' / 2 f_1'$$

$$\text{a jelikož } m_2 = 250 / f_2',$$

můžeme psát že:

$$\Gamma_2 = m_1 \cdot m_2 = \dots = 500 \cdot A_n / D'.$$

Protože velikost výstupní pupily i číselnou aperturu objektivu známe, lze dosazením těchto hodnot do uvedeného vztahu vypočítat velikost zvětšení. Přesnost metody závisí hlavně na přesnosti určení D' .

c) Měření zvětšení na základě definice zvětšení mikroskopu

Vyjdeme ze vztahu pro definici zvětšení mikroskopu $\Gamma = \text{tg } \tau' / \text{tg } \tau$, kde τ je úhel, pod kterým vidíme předmět v konvenční zrakové vzdálenosti 250 mm a τ' je úhel pod kterým pozorujeme tentýž předmět za okulárem mikroskopu.

Velikost hodnoceného předmětu označíme y , potom $\text{tg } \tau = y / 250$ a dosazením do výše uvedeného vztahu obdržíme :

$$\Gamma_3 = 250 \cdot \text{tg } \tau' / y .$$

Předmět realizujeme jistým úsekem stupnice objektivového mikrometru v předmětové rovině objektivu a τ' je zdánlivá úhlová velikost jeho obrazu vytvořeného v nekonečnu. Měření úhlu τ' provedeme odečítacím dalekohledem, jehož stupnici si nejprve úhlově ocejchujeme.

5) K rozlišovací mezi mikroskopu

Rozlišovací mez mikroskopu se obvykle neměří. K jejímu přibližnému určení se využívají preparáty přírodnin s jemnou, opakující se strukturou. V přiložené tabulce jsou některé uvedeny i s údajem číselné apertury, pro kterou jsou vhodné.

Preparát	Perioda opakujícího se motivu [μm]	Pro A_n
<i>Navicuea viridis</i>	1,33	0,2
<i>Pleurosigma balticum</i>	0,7	0,45
<i>Pleurosigma angulatum</i>	0,5	0,7 – 0,8
<i>Surirella gemma</i>		
- příčné proužky	0,4	1,0
- podélné proužky	0,3	1,25 – 1,4
<i>Amphipleura pellucida</i>	0,25	1,25 – 1,4

6. Měření rozlišovací schopnosti snímacích objektivů

Do rozsáhlé skupiny snímacích objektivů řadíme objektivy fotoaparátů, kamer, projekční objektivy, zvětšovací objektivy aj. Mimo projekční objektivy jsou význačné tím, že nemají pevnou velikost aperturní clony a jsou konstruovány pro velký rozsah předmětové pracovní vzdálenosti. Charakterizují se ohniskovou vzdáleností, respektive rozsahem ohniskových vzdáleností u pankratických soustav, nejmenším clonovým číslem, někdy nesprávně označovaným jako světelnost a úhlopříčkou formátu, pro který je objektiv určen. Jejich kvalitu hodnotíme na rozdíl od objektivů dalekohledů a mikroskopů nikoliv rozlišovací mezí v předmětovém prostoru, ale rozlišovací schopností v prostoru obrazovém.

Rozlišovací schopnost objektivu je převrácenou hodnotou rozlišovací meze. Jestliže rozlišovací mez vyjadřujeme v úhlových nebo lineárních jednotkách, pro rozlišovací schopnost používáme jejich převrácenou hodnotu, prostorovou frekvenci [1 / mm].

Teoretická rozlišovací mez snímacího objektivu je dána na podkladě ohybové teorie známým vztahem

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

Je-li r nejmenší vzdálenost čar testu (perioda) v obrazové rovině, která je právě ještě rozlišena, je rovněž

$$\psi_m = r \cdot f'^{-1} \text{ [rad] ,}$$

kde f' je ohnisková vzdálenost objektivu, pokud uvažujeme předmět v ∞ .

Rozlišovací schopnost μ_R snímacího objektivu je potom dána vztahem

$$\mu_R = 1/r = 1/(\psi_m \cdot f') \text{ [mm}^{-1}\text{] ,}$$

kde ψ_m je naměřená reálná hodnota rozlišovací meze objektivu.

Pro hrubý odhad μ_R pro $\lambda = 5 \cdot 10^{-4}$ mm můžeme použít upravený vztah

$$\mu_R = 1/(\psi_m \cdot f') = D / (1,22 \cdot \lambda \cdot f') = [1 / (6c)] \cdot 10^4 \text{ [mm}^{-1}\text{] ,}$$

kde c je clonové číslo hodnoceného objektivu, pro které platí $c = f' \cdot D^{-1}$.

V běžné praxi, pro informaci fotografické veřejnosti, se rozlišovací schopnost objektivu hodnotí fotografickou zkouškou tak, že se příslušný test snímá hodnoceným objektivem na jemnozrnou fotografickou emulzi a po pečlivém a normalizovaném zpracování se vyhodnotí záznam testu mikroskopem. Touto metodou hodnotíme ovšem μ_c řetězce objektiv-film, kde platí vztah

$$\mu_c^{-1} = \mu_R^{-1} + \mu_F^{-1} \text{ ,}$$

kde μ_F je rozlišovací schopnost fotografické emulze.

V našem případě, pokud požadujeme znalost rozlišovací schopnosti hodnoceného objektivu, budeme hodnotit vzdušný obraz testu vytvořený hodnoceným objektivem kvalitním mikroskopem, jehož rozlišovací mez by měla být bez vlivu na výsledek měření.

Pro měření použijeme optickou lavici vybavenou kolimátorem s testy rozlišovací schopnosti požadované prostorové frekvence větší, než předpokládané teoreticky rozlišitelné frekvence a měřicím mikroskopem. Vybavení naší laboratoře nám neumožňuje mimosová měření. Pro tato měření bychom museli mít optickou lavici kamerového typu, nebo přesný úzlový vozík.

Požadavky na vybavení

a) Ohnisková vzdálenost objektivu kolimátoru by měla být 5- 10 x větší, než ohnisková vzdálenost měřeného objektivu.

b) Průměr výstupní pupily objektivu kolimátoru musí být větší, než průměr vstupní pupily měřeného objektivu.

c) Testovací destička musí obsahovat prostorové frekvence větší, než lze předpokládat jako rozlišitelné u měřeného objektivu, braného jako ideální optická soustava.

d) Měřicí mikroskop by měl mít rozlišovací schopnost $1/\gamma$ lepší, než předpokládané rozlišení měřeného objektivu, kde γ je rozlišovací mez mikroskopu.

e) Číselná apertura objektivu mikroskopu musí být větší, než výstupní apertura měřeného objektivu.

Postup měření

Měřený objektiv upneme do držáku na optickou lavici oproti kolimátoru, za něj umístíme mikroskop a sjednotíme optické osy všech komponent. Zaostřovací kruh objektivu nastavíme na ∞ . Měření provedeme pro plný otvor (nejmenší clonové číslo) a nejméně pro další dvě clonová čísla. (Maximální zaclonění je dáno tím, abychom ještě vzhledem k úbytku světla mohli spolehlivě odečíst právě ještě rozlišené políčko testu.) V tabulce přiložené ke kolimátorovým testům odečteme úhlovou hodnotu právě ještě rozlišeného pole ψ_R , převedeme ji na radiány (v tabulce jsou hodnoty v úhlových vteřinách) a dle vztahu

$$\mu_R = 1 / (f' \cdot \psi_R)$$

vypočteme rozlišovací schopnost pro nastavené clonové číslo. Tuto hodnotu porovnáme s teoretickou hodnotou pro ideální optickou soustavu dané světelnosti s přihlédnutím k vlnové délce použitého osvětlení testu.

Toto porovnání nám ukáže kvalitu měřeného objektivu, jak dalece jsou srovnatelné hodnoty teoretického rozlišení u ideální optické soustavy a rozlišení skutečně dosažené.

Poznámka na závěr

V současné době již kvalitativní kritérium rozlišovací schopnost u snímacích objektivů ztrácí na užitečnosti, protože nám nic nepoví o tom, s jakým kontrastem jsou přenášeny nižší prostorové frekvence než limitní a to je mnohem užitečnější informace, než pouhá znalost toho, pro jakou prostorovou frekvenci kontrast přenášené struktury klesl na nulu. Používá se hodnocení pomocí *funkce optického přenosu*, resp. její reálné části *funkce přenosu*

modulace. Tato teorie a její praktické měření bude probírána v předmětu Optické přístroje.

7. Světlo a barva

Co je to barva ? Vnímání barev. Měření barev. Barevné modely. Skládání barev aditivní a subtraktivní.

Výklad o barvě je náplní tohoto laboratorního cvičení, aby se posluchači obeznámili se zajímavou problematikou popisu a měření barev.

V teoretické části praktika bude promítnuta PP prezentace „ **O BARVĚ**“, která je obsažena v příloze.

V praktické části si posluchači vyzkouší skládání barev jednak aditivní s barvami RGB, jednak subtraktivní s barvami CMY a na závěr složené, kdy lze při aditivním skládání barev dvě barvy základní (R,G,B) nahradit jednou doplňkovou (C,M,Y). Pro tuto část laboratorního cvičení lze použít stavebnici

„ **Skládání barev**“, která je dostupná v optické laboratoři.

Na závěr si mohou studenti zkusit namíchat libovolnou barvu metodou aditivního, nebo subtraktivního skládání v osmibitové barevné hloubce na počítačovém simulačním programu na internetové adrese:

<http://www.volny.cz/lk77/barvy/mb.htm>

8. Spektrální analýza zdrojů záření

V optické laboratoři se využívají různé zdroje záření. Jako příklad je možno uvést zdroje bílého světla, monochromatické zdroje světla o různých vlastnostech (dominantní vlnové délce, monochromazi, stupni koherence) a různá „barevná světla“. Jejich kvalitu lze hodnotit za pomoci spektrální analýzy.

a) Popis spektrálních fotometrů

Nejprve si zhruba schematicky popíšeme různé typy *spektrálních fotometrů*, které lze pro popsanou činnost používat.

Spektrální fotometr se skládá z několika základních prvků:

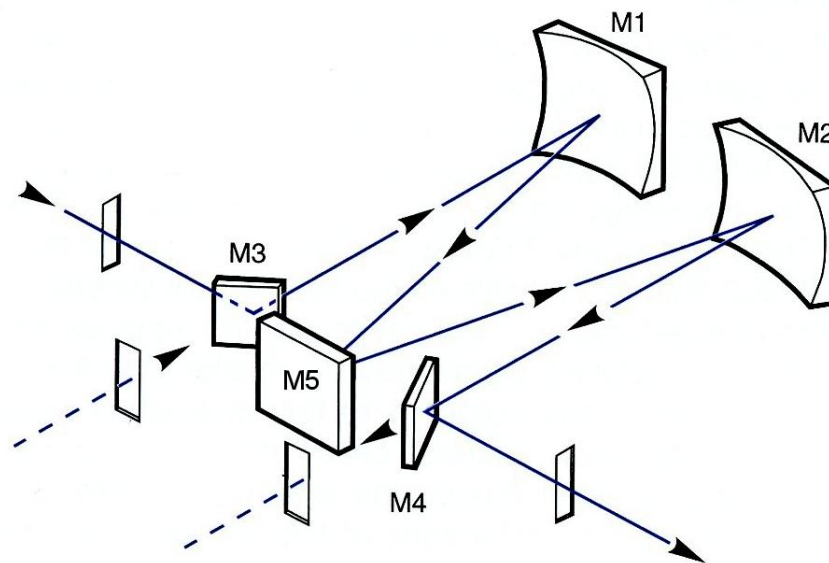
- zdroje záření
- monochromátoru
- skříně pro vzorky
- detektoru záření
- vyhodnocovací jednotky.

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

Hlavní částí spektrálního fotometru je **monochromátor** (viz obr.9.), který rozkládá záření zdroje ve spektrum.

Prvky monochromátoru:

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



Obr.9. Princip mřížkového monochromátoru. Na obrázku jsou: M1- kolimační zrcadlo, M2-dekolimační zrcadlo, M3 a M4 pomocná zrcadla, M5- mřížka.

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.

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.

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

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

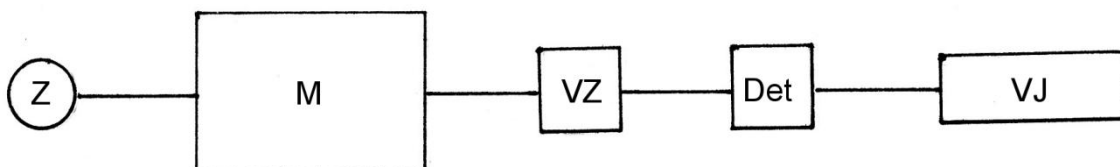
kde k je řád spektra ve kterém je mřížka použita a N je rovno celkovému počtu vrypů mřížky.

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).

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

1) Jednocestný spektrální fotometr (obr.10.)

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



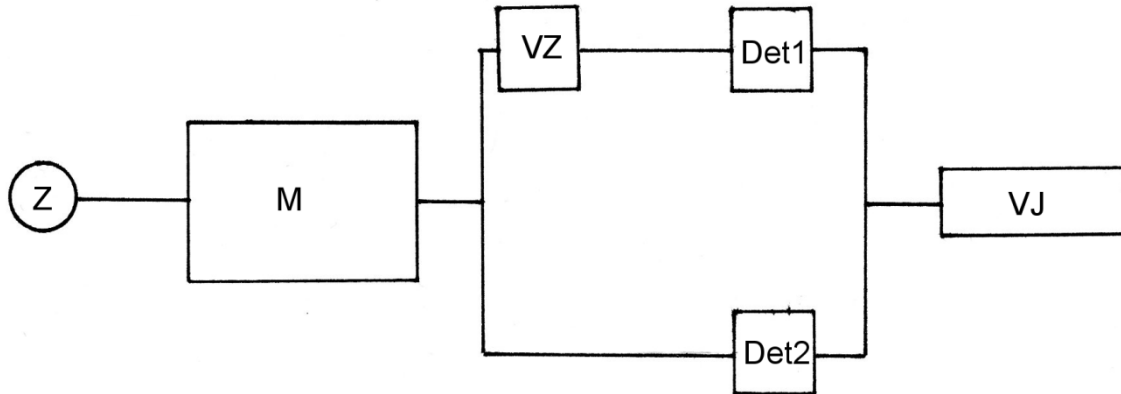
Obr.10. Schema jednocestného SF

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

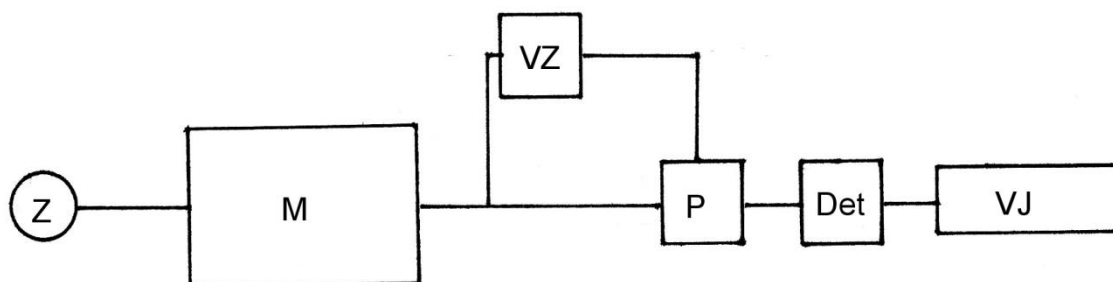
Tento typ spektrálního fotometru se v dnešní době nepoužívá pro rutinní měření, ale spíše se skládá z jednotlivých potřebných komponent pro speciální jednoúčelové úlohy.

2) Dvoucestný spektrální fotometr (obr.11a, 11b.)

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, 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.11a. Funkční schéma dvoucestného SF se dvěma detektory



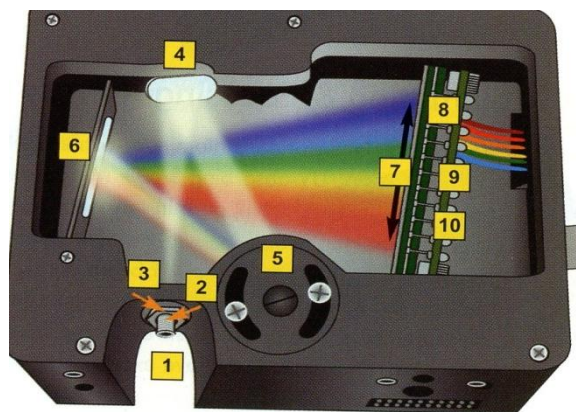
Obr.11b. Funkční schema dvoucestného SF s jedním detektorem

3) Diodový spektrální fotometr (obr.12.)

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.12.) jsou:

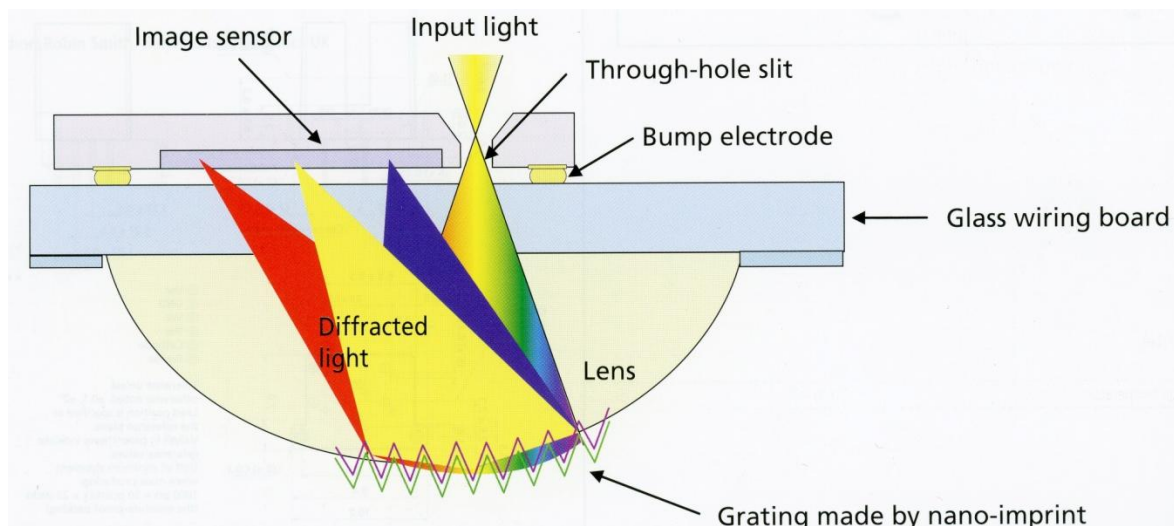
- 1- SMA905 připojovací konektor světlovodu
- 2- pevná vstupní štěrba
- 3- dlouhovýlný absorpční filtr
- 4- kolimační zrcadlo
- 5- disperzní mřížka
- 6- fokusační zrcadlo
- 7- válcová čočka před detektorem
- 8,9,10- CCD lineární detektory pro UV, VIS a IČ oblast spektra



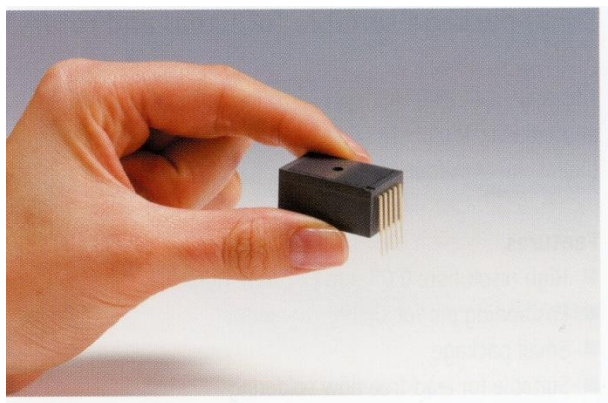
Obr.12. Diodový spektrální fotometr

4) Kompaktní spektrální fotometr Hamamatsu (obr.13.)

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 viz obr.14.



Obr.13.



Obr.14

b) Zdroje světla

V optické laboratoři, jak již bylo řečeno na úvod, se používají různé zdroje světla podle toho, co je nutno zkoumat.

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.

1a) Nízkotlaké spektrální výbojky

Některé vybrané typy jsou uvedeny v tabulce v kapitole 3. Připomínám, že pro optická měření 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.)

1b) Lasery

Často, zvláště, pokud požadujeme aby záření bylo koherentní se v optické laboratoři používají *lasery*, převážně plynové s kontinuálním provozem.

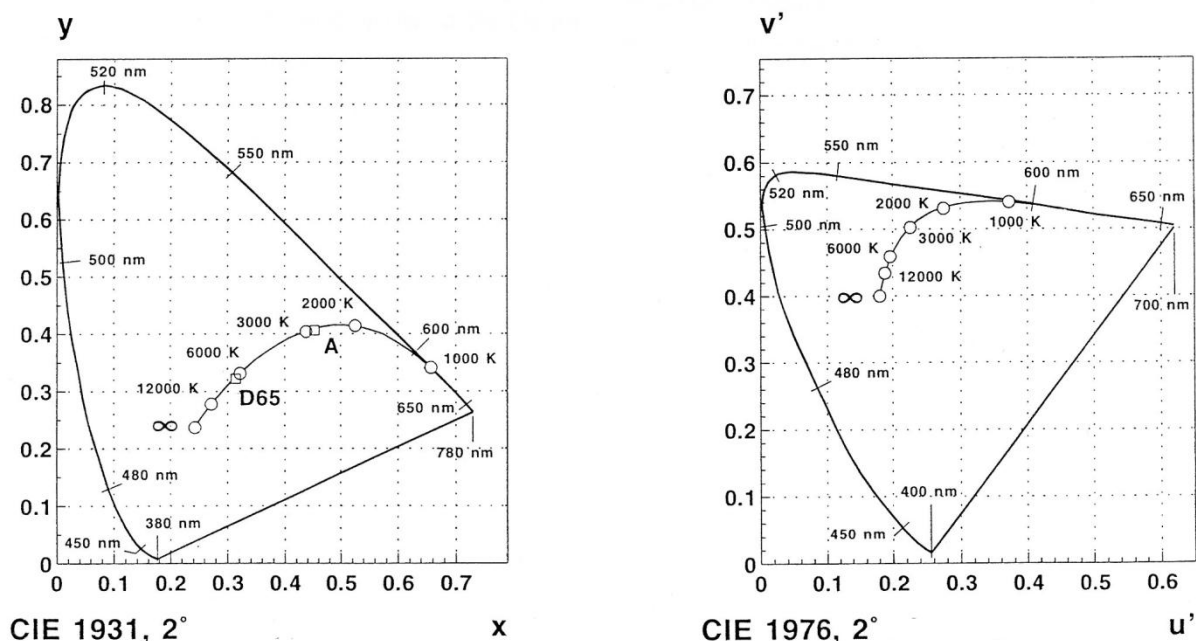
1c) Kombinace žárovky a monochromatického interferenčního filtru

Pro méně náročná měření je možno využít kombinace žárovky, nejlépe halogenové a interferenčního monochromatického filtru. Je to finančně nejméně náročná varianta, dostačující pro většinu měření

2) Zdroje bílého světla

Zde 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 15.



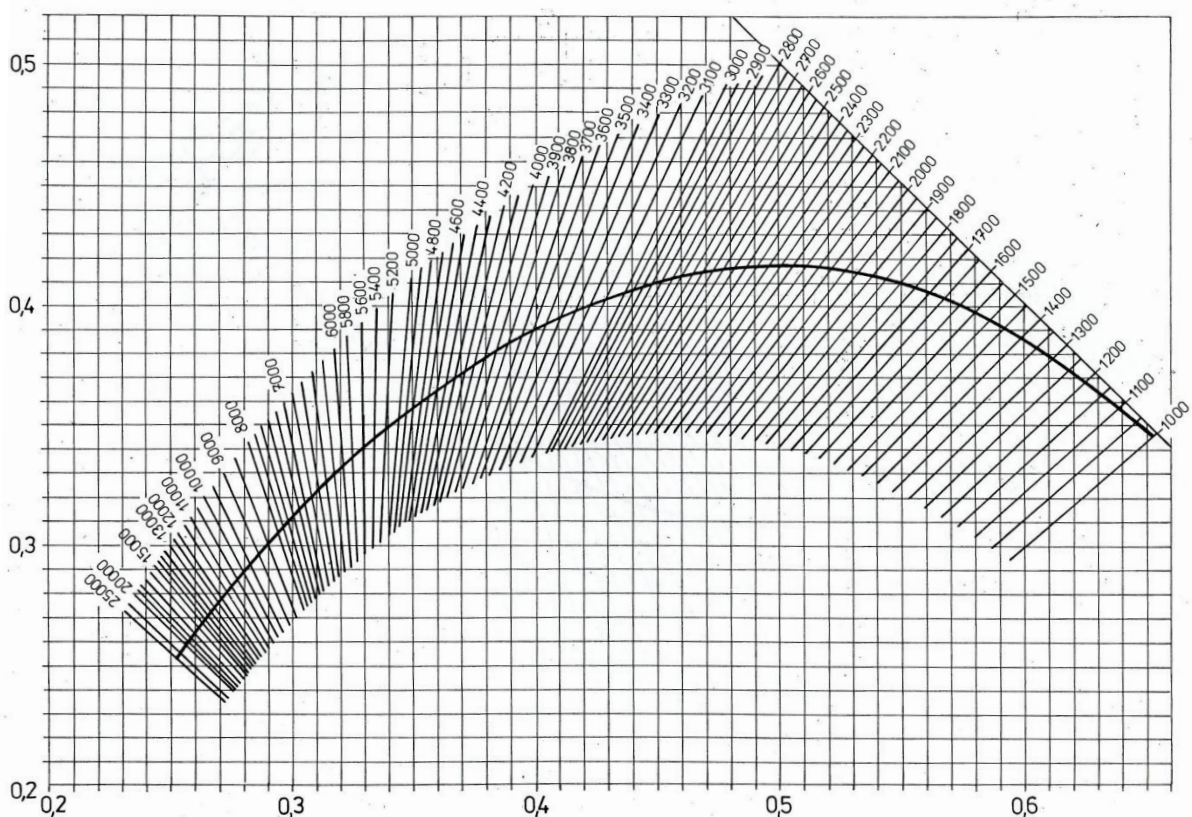
Obr. 15.

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. (Viz minulá lekce.)

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 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.16.



Obr. 16.

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.15.) 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 ($350,14 \text{ MK}^{-1}$),
- normalizovaný druh světla B, odpovídající střednímu dennímu světlu s převažující složkou přímého slunečního světla s ekvivalentní teplotou chromatičnosti asi 4874 K ($205,17 \text{ MK}^{-1}$),
- normalizovaný druh světla C, odpovídající průměrnému dennímu světlu (bez přímého slunečního světla) s ekvivalentní teplotou chromatičnosti asi 6774 K ($147,62 \text{ MK}^{-1}$),
- 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 D_{65} s ekvivalentní teplotou chromatičnosti 6504 K ($153,75 \text{ MK}^{-1}$),
- 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 D_{65} .

Praktická část

1) Disperzní soustavy

Pro demonstraci činnosti disperzních soustav použijeme stavebnici „ Rozklad světla hranolem a mřížkou“ , za pomoci které s využitím zpětného projektoru můžeme zkoumat vlastnosti hranolových (skleněný a vodní hranol) a mřížkových spekter pro mřížky o různé hustotě čar (mřížkové konstantě). Všimneme si hlavně pořadí barev spektra od přímého směru šíření, počtu spekter, linearitu a podobně.

2) Spektrální měření různých zdrojů záření

Pro tato měření použijeme diodový spektrální fotometr LASP 2. Nejprve je nutno se seznámit s obsluhou tohoto přístroje dle přiloženého návodu k použití. Následně provedeme měření spektrálního složení následujících zdrojů záření:

Monochromatické zdroje záření:

- nízkotlaké spektrální výbojky Na, Hg, Cd a další
- HeNe laser , laserová LED
- halogenová žárovka + interferenční monochromatické filtry
- „barevné“ LED

Zdroje bílého světla:

- halogenová žárovka, klasická žárovka
- vysokotlaké výbojky xenonové, rtuťové
- „bílý“ LED

Měření spektrální propustnosti filtrů R, G, B a C, M, Y

Jako doplněk k minulé lekci o skládání světla si proměříme spektrální propustnosti jednotlivých filtrů a jejich kombinací.

9) Interference světla

V této lekci si na úvod zopakujeme látku, týkající se koherentního skládání optických polí, provedeme několik pokusů s různými typy interferometrů a další pokusy provedeme pomocí počítačové simulace.

Interference světla je vlnově-optický jev, při kterém dochází ke koherentnímu skládání optických polí, kdy se projevuje mimo amplitudovou i fázová složka signálů.

Na obrázku 17 je fotografie stavebnice interferometrů, kterou použijeme v praktické části pro sestavení interferometrů různých typů.

Na obrázku 18 je interferometr Fizeau, sloužící pro měření rovinnosti optických leštěných ploch.



Obr. 17. Stavebnice interferometrů



Obr. 18. Fizeauův interferometr

Nyní si shrneme teoretické vědomosti o interferenci :

Superpozice koherentních zdrojů →
→ interference v koherentním objemu

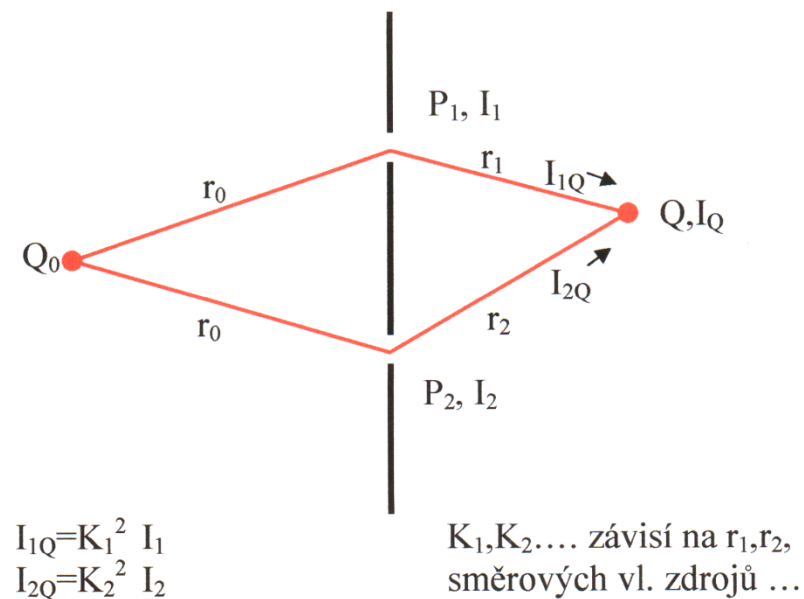
Koherentní vlny jsou izochronní ⇒ mají stejnou v
resp. λ

Koherentní vlny jsou synchronní ⇒ mají konstantní
fázový rozdíl

Koherentní vlny mají stejný polarizační stav.

Interference je periodický jev s periodou λ , resp. 2π

Obecný interferenční zákon pro 2 interferující svazky -Youngův pokus



$$I_Q = I_{1Q} + I_{2Q} + 2[I_{1Q}I_{2Q}]^{\frac{1}{2}} \cdot \gamma_{12}^r(\tau)$$

$\gamma_{12}^r(\tau)$ reálná část kompl. stupně koherence

a) Interference 2 vln od nezávislých zdrojů P_1, P_2

$$\gamma_{12} = 0 \Rightarrow I_Q = I_{1Q} + I_{2Q} = \text{konst.} \quad \text{pro různá } \tau$$

b) Interference 2 vln z bodových zdrojů P_1 a P_2 ,
synchronních a izochronních

$$\gamma_{12}^r(\tau) = \frac{\Gamma_{12}^r(\tau)}{[I_1 I_2]^{\frac{1}{2}}} \quad \Gamma_{12} \dots \text{ funkce vzájemné koherence}$$

$$\text{potom } \Gamma_{12}(\tau) = A^2 \cdot \exp(-i 2\pi \nu \tau)$$

$$\gamma_{12}(\tau) = \frac{\Gamma_{12}(\tau)}{\Gamma_{11}(0)} = \exp(-i 2\pi \nu \tau)$$

$$\gamma_{12}^r(\tau) = \cos(2\pi \nu \tau)$$

$$I_Q = I_{1Q} + I_{2Q} + 2 \left[I_{1Q} I_{2Q} \right]^{1/2} \cdot \cos (2\pi \nu \tau)$$

Pro $|\gamma_{12}| = 1$ k interferenci dochází pro libovolné τ

Pozn: $\cos (2\pi \nu \tau) = \cos \left(2\pi \nu \frac{n}{c} \Delta x \right) = \cos \left(\frac{2\pi}{\lambda} \Delta x \right)$

$$\frac{2\pi}{\lambda} = k, \quad \Delta x \cdot k = \varphi$$

$$\underline{I_Q = I_{1Q} + I_{2Q} + 2 \left[I_{1Q} I_{2Q} \right]^{1/2} \cdot \cos \varphi} \quad [1]$$

α) $\cos \varphi = 1 \Rightarrow I_Q = I_{Q\max}$

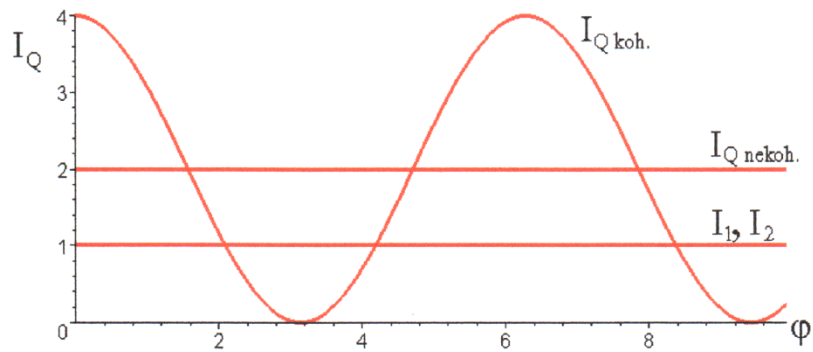
$$I_{Q\max} = I_{1Q} + I_{2Q} + 2(I_{1Q}I_{2Q})^{1/2}$$

a platí-li $I_{1Q} = I_{2Q} = I \Rightarrow \underline{I_{Q\max} = 4 I}$

β) $\cos \varphi = -1 \Rightarrow I_Q = I_{Q\min}$

$$I_{Q\min} = I_{1Q} + I_{2Q} - 2(I_{1Q}I_{2Q})^{1/2}$$

a platí-li $I_{1Q} = I_{2Q} = I \Rightarrow \underline{I_{Q\min} = 0}$



$I_{Q \text{ koh}}$... periodická funkce s periodou 2π , resp. λ

Změna φ a její využití v metrologii

$$\varphi = k \cdot \Delta x = \frac{2\pi}{\lambda} (n \cdot \Delta r)$$

Δx optický dráhový rozdíl

n index lomu

Δr geometrický dráhový rozdíl

$$\Delta r = |r_1 - r_2|$$

Interference N zdrojů, kde $N > 2$

- 1) Položme stupeň koherence = 1
- 2) Nechť dráhové rozdíly Δr_i zdrojů P_i, P_{i+1} tvoří aritmetickou řadu

V praxi mohou nastat 2 případy:

- a) $A_i = \text{konst.}$ pro $i \in 1..N$
- b) $A_i = A_{i-1} \cdot q$, $q < 1$
 $A_1^2 = I_0$

Vydeme-li z předpokladu ad b) obdržíme

$$I_Q = I_0 \frac{(1 - q^N)^2 + 4q^N \sin^2 \frac{N\varphi}{2}}{(1 - q)^2 + 4q \sin^2 \frac{\varphi}{2}} \quad [2]$$

v případě ad a) $A_1 = A_2 = A_3 = \dots = A_N = A$, $q = 1$

$$I_Q = I_0 \left(\frac{\sin \frac{N\varphi}{2}}{\sin \frac{\varphi}{2}} \right)^2 \quad [3]$$

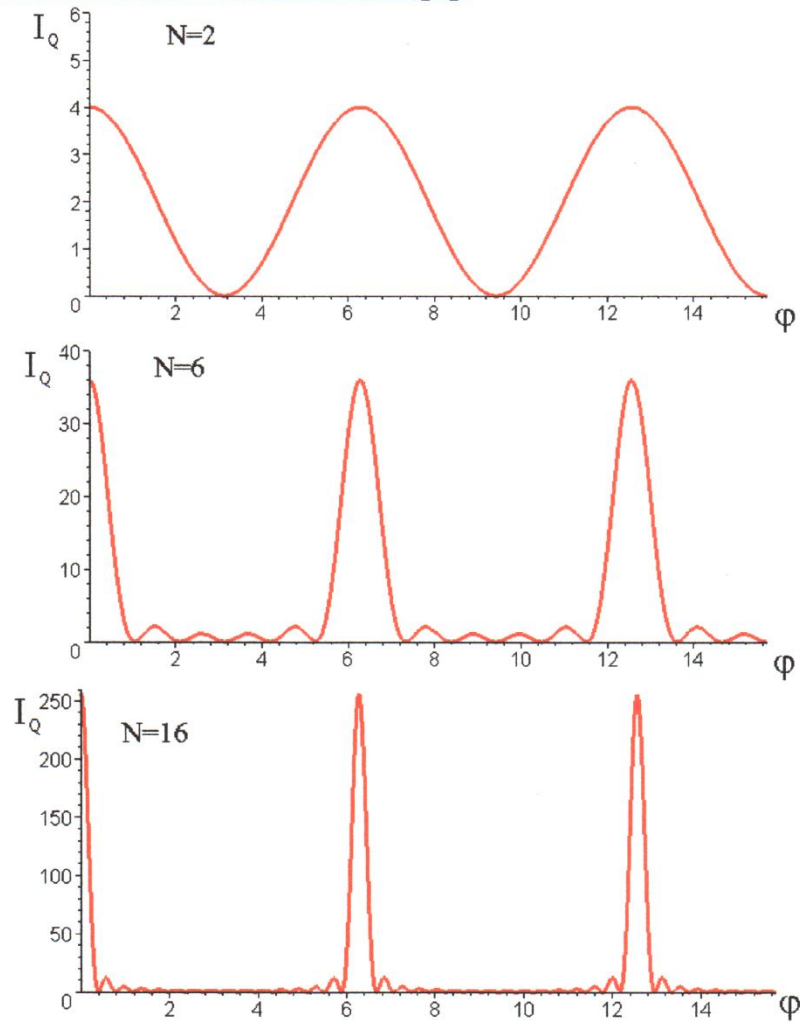
Pokud $N=2$, $q=1$ obdržíme ze vztahu [2]

$$I_Q = 4 I_0 \cos^2 \frac{\varphi}{2}$$

což je vztah [1] u nějž mimo $I_{Q1} = I_{Q2} = I_0$ použijeme

identitu $1 + \cos \varphi = 2 \cos^2 \frac{\varphi}{2}$

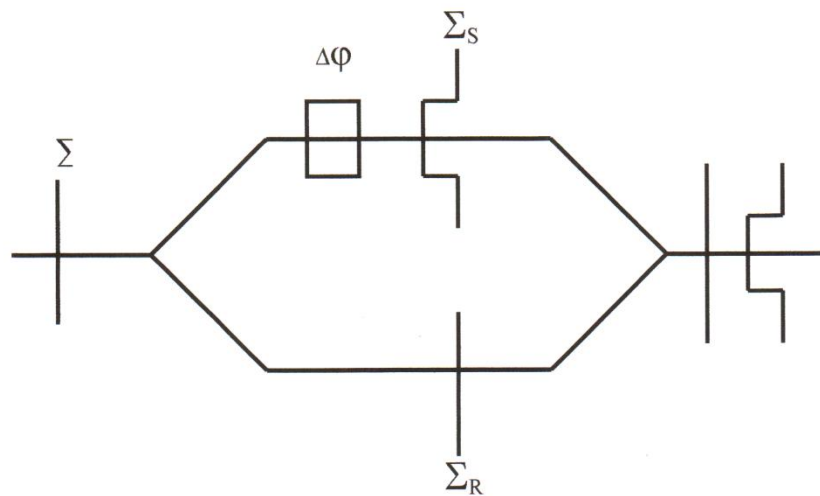
Grafické znázornění vztahu [3]:



Rozdělení interferometrů

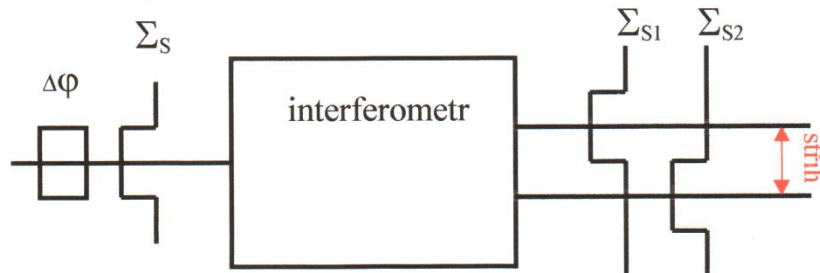
- 1) Klasické:
 - a) – dle počtu interferenčních svazků
 - α) dvousvazkové
 - β) vícesvazkové
 - b) – dle metody rozdělení na svazky
 - α) dělením čela vlny
 - β) dělením amplitudy
- 2) Dle techniky měření:
 - a) – statické (fázová složka nemění hodnotu během měření)
 - b) – dynamické (fáze se mění)
- 3) Dle konstrukčního provedení:
 - a) – klasické
 - b) – stříhové
 - α) paralelní stříh
 - β) úhlový stříh
 - b1) – polarizační
 - c) – holografické
 - d) – vláknové
 - e) – speciální

ad a) klasické – mají referenční vlnu

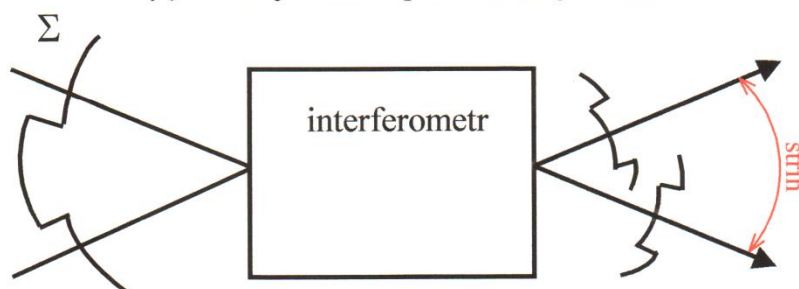


ad b) stříhové – nemají referenční vlnu

ad α) paralelní stříh – pro paralelní svazek



ad β) úhlový stříh – pro sbíhavý svazek



Nyní si provedeme několik praktických ukázek různých typů interferometrů.

K dispozici máme jednak stavebnici interferometrů na optické dvojlavici (viz obr.17), pomocí které lze sestavit mnoho typů interferometrů, jako např.:

Mach-Zehnderův interferometr

Twyman-Greenův interferometr

Fizeauův interferometr

Střihový interferometr Murtyho

a jiné .

Stavebnice je tvořena HeNe laserem o malém výkonu, prostorovým filtrem, kolimačním objektivem a sadou rovinných zrcadel z nichž některá jsou polopropustná, uložených na jezdcích vybavených jemnými justážními škouby pro regulaci vzájemné polohy zrcadel vůči sobě.

S pomocí stavebnice je možno složit i klasické školské interferenční pokusy jako např. dvojhranol, Biletovy čočky a podobně.

Interferenci bílého světla na tenké vzduchové vrstvě si můžeme ukázat pomocí přípravku, kde vrstva (pro Newtonovy kroužky stejné tloušťky) je tvořena rovinnou deskou a kulovou plochou o velkém poloměru křivosti plankonvexní čočky staženými v přípravku.

Dále máme k dispozici Fizeauův interferometr, pomocí něhož si změříme rovinnost skleněných rovinných desek.

Dále lze využít počítačové simulační programy:

INTERFER a **Young2**,

kteří umožňují simulovat další varianty interferenčních polí. Oba programy jsou součástí přílohy k tomuto návodu na optická praktika.

Program **INTERFER** umožňuje zkoumat interferenční pole od až devíti koherentních zdrojů rovinných a kulových vln, rozložených dosti libovolně vůči sobě v prostoru. Protože výsledné pole je zobrazováno na dvou paralelních okénkách, kde v levém je předpokládán stupeň koherence 1 a ve druhém okénku lze koherenční délku měnit, je tento program velice praktický pro výuku, protože můžeme realizovat situace, které nelze v laboratoři reálně vytvořit.

Program **Young2** umožňuje simulovat Youngův pokus popsaný výše a to pro srovnání současně pro dvě různá zadání.

10. Ohyb světla

Ohyb světla je po interferenci další projev vlnové povahy světla, který budeme v našem praktiku zkoumat.

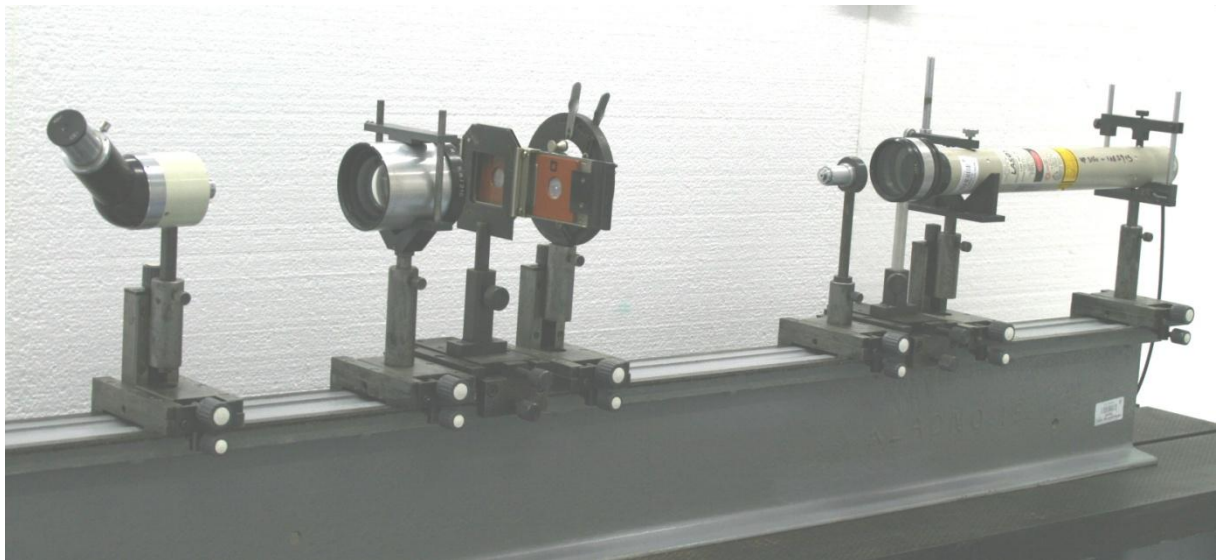
Pojmu interference se používá především k označení skládání libovolného, většinou konečného, počtu vlnění s přihlédnutím k jejich fázím. Takto pojem interference zavedl Young. Pojmu interference ve významu rozložení intenzity světla v nějaké rovině používáme jen pro výsledek vzájemné interakce vlnění pocházejících z konečného počtu koherentních zdrojů. Jestliže však počet zdrojů je nekonečný a zdroje vytvářejí jednu, nebo několik souvislých množin, použijeme pro výsledné rozložení intenzity termínu rozptylový nebo difrakční (ohybový) obrazec.

Historicky se ohybové jevy dělí na *Fresnelovy* a *Fraunhoferovy*. Fresnelovy ohybové jevy jsou obecnější, jejich zvláštní případ (pro zdroj a místo pozorování v ∞) jsou jevy Fraunhoferovy. Fraunhoferovy ohybové jevy můžeme pozorovat v rovině obrazu zdroje. Tyto jevy mají oproti jevům Fresnelovým několik zvláštností (jichž lze mimo jiné využít při pokusech k nalezení roviny Fraunhoferova ohybu), které lze objasnit při užití fourierovského přístupu řešení těchto jevů. Je to například vlastnost, že každá lichočetná nesymetrie difrakčního stínítka se v rovině Fraunhoferova ohybu změnila na sudočetnou symetrii. Dále pokud pohybujeme stínítkem kolmo ke směru šíření vlny, difrakční obrazec se ve fraunhoferově rovině nepohybuje.

Pokus č.1

To vše a další pokusy s ohybem si můžeme demonstrovat s pomocí stavebnice na optické lavici (viz obr.19.), jejíž popis je následující: zdrojem světla je malovýkonný plynový HeNe laser, svítící do prostorového filtru jehož dírka je předmětem kolimačního objektivu. Kolimovaný svazek světla prochází

atenuátorem, tvořeným dvěma polarizátory a dopadá na difrakční stínítko v držáku. Difrakovaný svazek je dekolimačním objektivem zobrazen do roviny pozorování, tato je zvětšena mikroskopem pro pohodlné pozorování očima, respektive místo mikroskopu je digitální kamera, která snímá rozdělení intenzity v pozorovací rovině a zobrazuje ho na displeji notebooku. Příslušná stínítka jsou k dispozici jak ve formě diapozitivů, tak i obrazců vypíchaných do fólie. V závislosti na rovině pozorování se snímá buď rozdělení intenzity Fraunhoferova difrakčního obrazce (v rovině obrazu zdroje- dírky v prostorovém filtru), tak i Fresnelova difrakce mimo tuto rovinu.



Obr.19. Difrakční stavebnice

Demonstrace

Výsledné obrázky zdokumentoval pomocí podobné stavebnice již kolem roku 1980 prof. Komrska a vydal je formou sady diapozitivů, jež jsou naskenovány a přístupny v příloze jako soubor pod názvem „Difraktografické album“. Příslušný komentář k obrázkům je v přiložené brožuře.

Počítačová simulace

Dále je možno v praktiku z ohybu světla využít dva simulační programy (oba jsou v příloze pod názvy „DIFRAKCE“ a „DIFRJEVY“).

Program DIFRAKCE, jehož autorem je prof. Bajer, umožňuje myší kreslit různá difrakční stínítka a výsledný jev pozorovat buď ve Fraunhoferově pozorovací rovině, nebo Fresnelově rovině jejíž polohu od difrakčního stínítka je možno měnit ve velkém rozsahu. Obsluha programu je velice jednoduchá a uživatelsky příjemná, návod je součástí obrazovky.

Program DIFRJEVY, autorů P. Šedivého a V. Arnošta umožňuje simulovat Fresnelovy a Fraunhoferovy jevy pro různá stínítka předdefinovaná autory, ale konečné rozložení zdrojů si vytváří uživatel sám. Je to praktická učební pomůcka, která ve velkém rozsahu umožňuje simulaci jevů, experimentálně těžko realizovatelných.

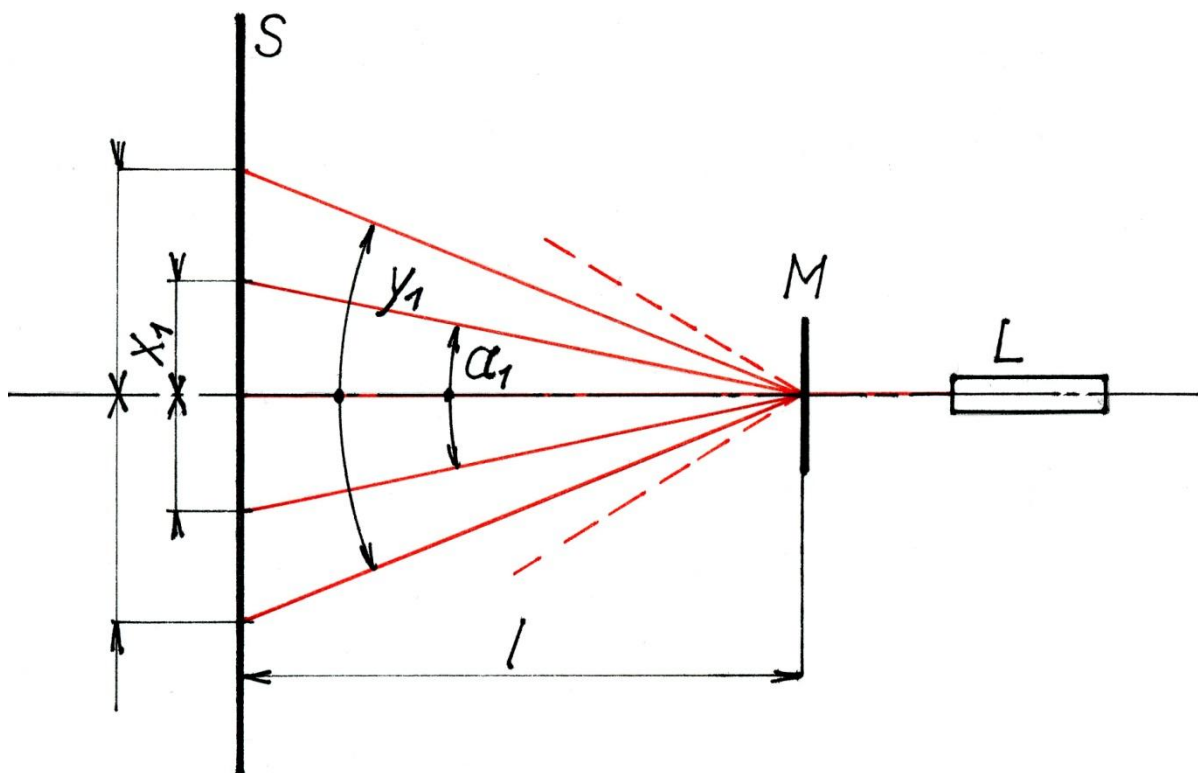
Pokus č.2

V laboratoři lze ukázat praktické využití základní mřížkové rovnice

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

kde k_i je difrakční i -tý řád, λ vlnová délka světla zdroje, a mřížková konstanta a α_i úhel ohybu světla příslušného řádu.

Můžeme určit buď vlnovou délku záření zdroje, nebo mřížkovou konstantu ohybové mřížky na základě geometrického uspořádání pokusu (obr.20.).



Obr.20.

Na obrázku 20 je L monochromatický zdroj záření, M mřížka a S stínítko, vzdálené o l od mřížky. Čím bude vzdálenost l větší, tím bude měření přesnější. Raději neměříme přeponu trojúhelníku y , ale tuto spočítáme po změření l a x . Je to přesnější. Z trojúhelníků, tvořených stranami l , x_i , y_i vypočteme $\sin \alpha_i$ pro více hodnot (difrakčních řádů), zprůměrujeme je a můžeme spočítat vlnovou délku záření zdroje, nebo mřížkovou konstantu mřížky.

11. Polarizace světla

Vysvětlení dvou základních pojmů vlnové optiky, vlnové povahy a periodicity světla neprobíhalo bez obtíží. Mezi zavedením vlnové teorie světla Huygensem, objevem periodicity měřením vlnových délek Newtonem, teoretickým zdůvodněním průchodu vlny izotropním a anizotropním prostředím Fresnelem je doba téměř 150 let. Počátkem 19. století objevy a zdůvodnění jevů ohybu a interference světla poskytly důkaz o jeho vlnové povaze, nebylo ale možno poznat, jestli se jedná o vlnění podélné či příčné. Polarizace světla objevená roku 1806 Malusem byla brzy vysvětlena zavedením představy, že světlo je příčné vlnění (r. 1817 Young).

V této lekci si provedeme několik pokusů s polarizovaným světlem užitím stavebnice „POLARIZACE SVĚTLA“ a s pomocí simulačního programu ANIZ4 si budeme demonstrovat jak Malusův zákon, tak i interferenci polarizovaného světla. Autorem tohoto programu je doc. Fiurášek. Na úvod je dobré si zopakovat které optické jevy vedou k polarizaci přirozeného světla. Polarizací neudělujeme světlu novou vlastnost, světlo vždy kmitá příčně, ale neuspořádaně. Polarizací pouze zajistíme jistou uspořádanost tohoto pohybu. Rozeznáváme dvě skupiny polarizačních jevů: *lineární polarizaci světla*, kdy světelný vektor kmitá v rovině a tato polarizace může být částečná nebo dokonalá a dále *polarizaci kruhovou*, což je speciální případ obecnější, *eliptické polarizace*. Tato opět může být částečná nebo úplná. Můžeme si ji představit jako složení dvou lineárně polarizovaných vln s kmity vzájemně kolmými, jejichž fázový rozdíl je stálý a libovolný. Je-li fázový rozdíl roven celistvému násobku čísla π , je výsledné světlo opět lineárně polarizované. Když amplitudy obou vln jsou shodné a fázový rozdíl roven lichému násobku $\pi/2$, je výsledné světlo kruhově polarizované.

Pokusy se stavebnicí POLARIZACE SVĚTLA

- průchod nepolarizovaného světla dvojicí polarizátorů , Malusův zákon
- průchod světla dvojlomným krystalem
- vliv anizotropní vrstvy vložené mezi zkřížené polarizátory
- zviditelnění anizotropie vyvolané vnějším tlakem nebo tahem (interference polarizovaného světla)
- zviditelnění vnitřního napětí v průhledných materiálech (fotoelasticimetrie)
- polarizace odrazem (Brewsterův úhel)

Simulační program ANIZ4

Program umožňuje jednak simulovat Malusův zákon, jednak, což je mnohem zajímavější, simulovat pokusy s interferencí polarizovaného světla. Volit můžeme tloušťku vrstvy anizotropního prostředí a indexy lomu pro řádnou a mimořádnou vlnu v širokém rozmezí. Předvolit lze i druh osvětlení. Lze pozorovat barevné efekty po průchodu bílého světla tímto prostředím a zároveň sledovat křivku spektrální propustnosti. Během pokusu lze libovolně otáčet jak polarizátorem, tak analyzátozem vzhledem k anizotropnímu prostředí mezi nimi. Na vysvětlenou je v úvodu k programu uveden matematický vztah pro výpočet interference a na obrázku uveden vektorový rozklad jak probíhá při průchodu jednotlivými prvky pokusu.