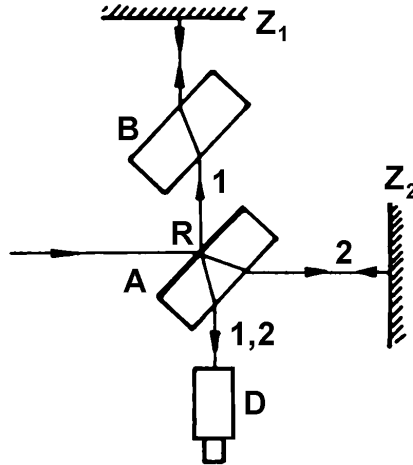


## 4.1 Měření vlnových délek světla interferometry

Interferometry jsou přístroje využívající jevu interference světla k měření vlnových délek světla (*interferenční komparátory*) či některých dalších veličin (jako je rychlost světla nebo relativní změny rychlosti světla). Tímto způsobem lze také určit index lomu plynů nebo kapalin. Tyto přístroje pak nazýváme *interferenční refraktometry*. K určení jemné struktury spektrálních čar používáme tzv. *interferenční spektroskopy*.

V této úloze pracujeme s interferometry Michelsonovým a Fabryho-Perotovým. Uspořádání Michelsonova interferometru vidíme na obr. 4.1–1.

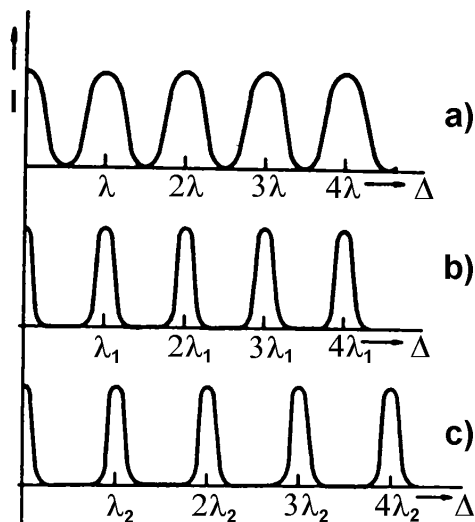


Obr. 4.1–1 Michelsonův interferometr

Paprsek ze zdroje dopadá v bodě  $R$  pod úhlem  $45^\circ$  na rovinnou stěnu planparalelní skleněné destičky  $A$ , kde se dělí na paprsek odražený (1) a procházející (2). Stěna destičky je slabě pokovená tak, aby oba paprsky měly přibližně stejnou intenzitu ( $I_1 = I_2$ ). Odražený paprsek 1 dopadá kolmo na zrcadlo  $Z_1$ , odráží se zpět a po průchodu deskou  $A$  vstupuje do dalekohledu  $D$  či přímo do oka. Procházející paprsek 2 se odráží zpět na zrcadlo  $Z_2$ , odráží se dále od polopropustné vrstvy na destičce  $A$  a interferuje s paprskem 1. Paprsek 2 přitom ovšem projde destičkou  $A$  celkem třikrát, zatímco paprsek 1 pouze jednou. Proto se do cesty paprsku 1 staví kompenzační planparalelní destička  $B$  stejná jako  $A$  (ovšem nepokovená), čímž se dosáhne ekvivalence obou drah. (Někdy bývá pokovená druhá strana destičky  $A$ . Pak se ovšem paprsek dělí až na této stěně a kompenzační destičku je třeba umístit do dráhy paprsku 2). Jedno ze zrcadel (např.  $Z_1$ ) je umístěno na saních s mikrometrickým posuvem, jímž lze měnit vzdálenost zrcadla od destičky  $A$ . Jsou-li vzdálenosti zrcadel  $Z_1$ ,  $Z_2$  od bodu  $R$  stejné, je dráhový rozdíl paprsků 1, 2 nulový a dostáváme interferenční maximum. Jestliže posuneme zrcadlo  $Z_1$  o  $l$ , získají paprsky dráhový rozdíl  $\Delta = 2l$ . V závislosti na dráhovém rozdílu pak dostáváme interferenční maxima pro  $\Delta = k\lambda$  (kde  $k$  je celé číslo) a minima pro  $\Delta = (2k + 1)\lambda/2$ . Průběh výsledné intenzity v závislosti na  $\Delta$  lze popsat vztahem

$$I = 2I_0 \left( 1 + \cos \frac{2\pi\Delta}{\lambda} \right), \quad (1)$$

který ihned vyplývá z výrazu (4.1) v kap. 4 pro  $I_1 = I_2 = I_0$ . Tento průběh je znázorněn na obr. 4.1–2a.



Obr. 4.1–2 Interferenční obrazec v Michelsonově interferometru (a) a ve Fabryho–Perotově interferometru (b, c)

Uspořádání Fabryho-Perotova interferometru je na obr. 4.1–3. Přístroj se skládá ze dvou rovnoběžně umístěných skleněných desek  $D_1$ ,  $D_2$ , jejichž vnitřní stěny jsou velmi přesně rovinné (s přesností  $0,05\lambda$ ) a opatřené polopropustnou zrcadlicí vrstvou. Vnější stěny desek svírají s vnitřními malý úhel, aby spolu s vnitřními povrchy nevytvářely nežádoucí interference. Vzdálenost  $d$  vnitřních stěn interferometru je buď nastavitelná mikrometrickým posuvem nebo nastavena pevně; v druhém případě se přístroj také označuje jako Fabryho-Perotův etalon.

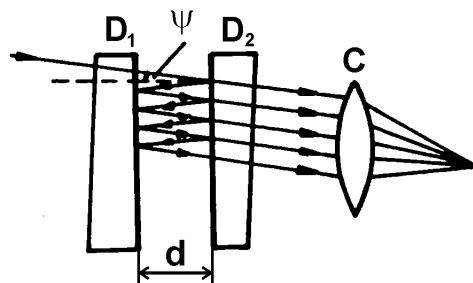
Jak je znázorněno na obr. 4.1–3, vzniká z dopadajícího monochromatického světla mnohonásobnými odrazy od polopropustných vrstev celá řada koherentních paprsků, které polopropustnými vrstvami částečně procházejí a jsou soustředěny objektivem dalekohledu (nebo oční čočkou)  $C$  do ohniskové roviny, kde interferují. O této interferenci mnoha svazků je pojednáno v odst. 4.5 části I.

Dráhový rozdíl dvou „sousedních“ paprsků je dán vztahem (4.7)

$$\Delta = 2d \cos \psi, \quad (2)$$

kde  $\psi$  je úhel dopadu paprsku ve vzduchové mezeře na odrazující vrstvu. Intenzita  $I$  světla vzniklého interferencí mnoha svazků má v závislosti na dráhovém rozdílu  $\Delta$  ostrá maxima opět pro  $\Delta = k \lambda$  (schematicky viz obr. 4.1–2b), kde celé číslo  $k$  je řád interference. Pološířka  $\Delta\lambda_p$  interferenčního maxima (plná šířka měřena v poloviční výšce) je přibližně dána výrazem (4.11)

$$\Delta\lambda_p \sim \frac{\lambda}{m}, \quad (3)$$



Obr. 4.1–3 Fabryho–Perotův interferometr

kde  $m$  je počet interferujících paprsků. K získání ostrých interferenčních maxim je tedy třeba dosáhnout velkého  $m$ . Počet interferujících svazků u Fabryho-Perotova interferometru je omezen (pro malé úhly  $\psi$ ) poklesem intenzity paprsků při mnohonásobném odrazu. Tak dospíváme k požadavku velké odrazivosti polopropustných vrstev, odrazivost ovšem lze zvyšovat jen omezeně, neboť tím klesá propustnost vrstev. Při použití postříbřených desek lze dosáhnout počtu svazku 20 až 40, se speciálními vícenásobnými reflexními vrstevami však až trojnásobné hodnoty.

Základní rozdíl mezi Michelsonovým a Fabryho-Perotovým interferometrem tedy spočívá v tom, že v Michelsonově přístroji interferují pouze dva paprsky, zatímco ve Fabryho-Perotově interferometru jde o interferenci mnoha svazků, což vede k podstatnému zúžení pološířky maxim. Odtud pak vyplývá rozdílné použití těchto přístrojů v interferenční spektroskopii.

## Postup měření

### Měření vlnových délek Michelsonovým interferometrem

Interferometr osvětlíme zkoumaným světlem a při pomalém otáčení mikrometrickým šroubem sledujeme kroužky stejného sklonu (viz kap. 4, odst. 4.4), objevující se (nebo mizící) ve středu zorného pole. Odpočítáme určitý počet  $k$  prošlých kroužků a na mikrometrickém šroubu odečteme příslušný posuv zrcadla  $l$ . Vlnová délka  $\lambda$  je pak dle (1)

$$\lambda = \frac{2l}{k}. \quad (4)$$

Při praktickém provedení odpočítáme určitý počet (např. 50) kroužků několikrát (např. 10 krát) za sebou a výsledky zpracujeme metodou postupných měření.

### Proměřování jemné struktury spektrálních čar Fabryho-Perotovým interferometrem

Vstupuje-li do interferometru světlo složené z více spektrálních čar, pak každá z těchto čar vytváří vlastní soustavu světlých interferenčních kroužků. Na obr. 4.1–2b,2c jsou schematicky nakreslena interferenční maxima, příslušející dvěma spektrálním čarám s blízkými vlnovými délkami  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  ( $\lambda_2 > \lambda_1$ ,  $\lambda_2 - \lambda_1 \ll \lambda_1$ ).

Je vidět, že s rostoucím řádem se vzdálenost mezi oběma maximy zvětšuje; v  $k$ -

tém řádu činí  $k(\lambda_2 - \lambda_1)$ . Je-li tato vzdálenost rovna šířce maxima  $\Delta\lambda_p$ , jsou čáry právě na hranici rozlišení.

Fabryho-Perotův interferometr je nazýván interferenčním spektroskopem. Proto je charakterizován také rozlišovací schopností a disperzní oblastí.

*Rozlišovací schopnost*  $R$  v  $k$ -tém řádu, definovaná na základě vlnových délek  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  právě ještě rozlišených čar vztahem

$$R = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1}$$

je pak při podmínce  $k(\lambda_2 - \lambda_1) = \Delta\lambda_p$  dána dle (3) jako

$$R = k m. \quad (5)$$

Uvedli jsme již, že vzdálenost maxim  $k$ -tého řádu, příslušící vlnovým délkám  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$ , činí  $k(\lambda_2 - \lambda_1)$ . Jestliže bude tato vzdálenost rovna právě  $\lambda_1$ , bude se překrývat maximum  $k$ -tého řádu čáry  $\lambda_2$ , s maximem  $(k + 1)$ -ho řádu čáry  $\lambda_1$  - viz obr. 4,1-2b, 2c. Rozdíl obou vlnových délek pak právě udává velikost *disperzní oblasti*  $D_k$ , tj. oblasti, kterou obvykle volíme tak, aby v  $k$ -tém řádu nedošlo k překrývání s maximy řádů sousedních (neboť to ztěžuje analýzu a interpretaci interferogramu). Platí tedy

$$D_k = \frac{\lambda}{k}. \quad (6)$$

Ve speciálních případech však naopak i překrývání sousedních řádů můžeme využít ke spektroskopickým měřením, což je náplní pracovního úkolu č.2.

Stanovení rozdílů vlnových délek  $(\lambda_1, \lambda_2)$  čar žlutého dubletu sodíkového spektra provedeme pozorováním kroužků stejného sklonu, odpovídajících několika interferenčním maximům vysokého řádu  $k \approx d/\lambda$ . Používáme Fabryho-Perotova interferometru s proměnnou vzdáleností desek  $d$ . Zvětšujeme-li postupně vzdálenost desek, zvyšujeme řád  $k$  a dle (6) zmenšujeme  $D_k$ . Lze pak najít takovou polohu, že maximum  $k$ -tého řádu čáry  $\lambda_1$  se překryje s maximem  $(k - 1)$ -ho řádu čáry  $\lambda_2$ . Označíme-li  $\Delta_1$  příslušnou hodnotu dráhového rozdílu, platí tedy

$$\Delta_1 = k \lambda_1 = (k - 1)\lambda_2. \quad (7a)$$

Stejná situace – splynutí obou druhů kroužků – nastává i při libovolném celočíselném násobku tohoto dráhového rozdílu. Stanovíme-li tedy vzdálenost  $l$  mezi dvěma sousedními polohami posuvu, při nichž dojde ke splynutí kroužků, platí

$$l = \frac{\Delta_1}{2} \quad (7b)$$

a kombinací (7a), (7b) lze určit

$$\lambda_2 - \lambda_1 = \frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2}{2l} \doteq \frac{\lambda_s^2}{2l}, \quad (8)$$

kde  $\lambda_s$  jsme označili průměr z obou vlnových délek. Při výpočtu položíme  $\lambda_s$  rovno tabulkové hodnotě 589,3 nm.

Při praktickém provedení odečteme polohu několika za sebou následujících splynutí a výsledky zpracujeme metodou postupných měření. Místo splynutí lze odečíst

také polohy, kdy kroužky jedné čáry leží právě v polovině mezi kroužky druhé čáry; nastavení těchto poloh lze provést s větší přesností.

#### Pokyny k měření

Nedotýkejte se zrcátek a planparalelních desek interferometrů. Hrubý posuv interferometru používejte jen tehdy, je-li jemný posuv vyřazen ze záběru (poloha V).

#### Seřizování interferometrů

Před měřením ověřte či seřídte (se souhlasem dozírajícího učitele) Michelsonův interferometr. K seřízení je vhodné umístit před interferometr ze strany světelného zdroje malý, ostře ohraničený předmět (špendlíková hlavička), jehož obrazy, vytvořené paprsky 1, 2 (viz obr. 4,1-1) pozorujeme. Nejprve je třeba nastavit mikrometrický posuv do místa, kdy se relativní poloha obrazu vůči sobě nemění, vychýlíme-li do strany oko (tj. pozorujeme-li obrazy „z různých stran“). Potom je vzdálenost zrcadel od bodu  $R$  na obr. 4,1-1 stejná. Když nyní otáčením nastavovacímí šrouby zrcadel oba obrazy spolu dostatečně přesně ztotožníme, objeví se při osvětlení interferometru monochromatickým zdrojem interferenční proužky stejné tloušťky. U Fabryho-Perotova interferometru lze proužky stejné tloušťky získat při malé vzdálenosti desek nastavením jejich rovnoběžnosti „od oka“. Užitím proužků již pak snadno nastavíme rovnoběžnost desek u obou typů interferometrů tak, že se objeví kroužky stejného sklonu. Konečné nastavení rovnoběžnosti provedeme tak, aby se průměry kroužků neměnily, pohybujeme-li okem do stran nebo nahoru a dolů.