

1 Pracovní úkoly

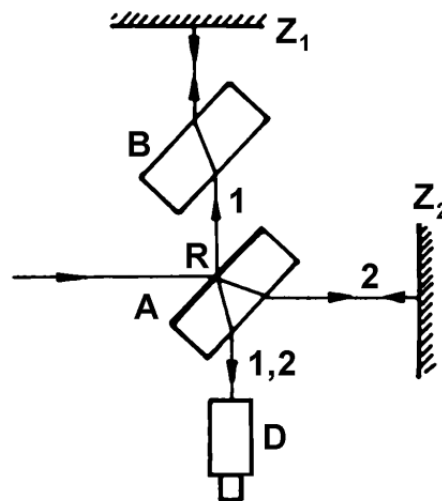
1. S použitím zelené čáry rtuti okaličte pákový převod Michelsonova interferometru. Měřte od polohy mikrometru 15 mm směrem k vyšším hodnotám.
2. Michelsonovým interferometrem změřte vlnovou délku He-Ne laseru.
3. Fabryho – Perotovým interferometrem změřte vzdálenost spektrálních čar sodíkového dubletu.
4. Všechna měření proveďte metodou postupných měření a zpracujte lineární regresí. Stanovte chybu vlnových délek získaných lineární regresí.

2 Teoretická část

Dva světelné svazky nazveme koherentní, pokud jsou v pevné fázové relaci, tedy jejich fáze nejsou nezávislé. Pokud se dva takové svazky potkají v jednom bodě prostoru, můžeme pozorovat interferenci světla, kdy výsledná intenzita není rovna pouhému součtu intenzit jednotlivých svazků, ale je modulována dodatečným interferenčním členem.

Výsledná intenzita je maximální, pokud fázový rozdíl mezi interferenčními svazky je roven sudému násobku π (nebo dráhový rozdíl roven celistvému násobku vlnové délky λ). Naopak je minimální v případě, kdy je fázový rozdíl roven lichému násobku π (či dráhový rozdíl roven lichému násobku $\lambda/2$).

Dvousvazkovou interferenci můžeme pozorovat v Michelsonově interferometru, který je schématicky znázorněn na obrázku 1.



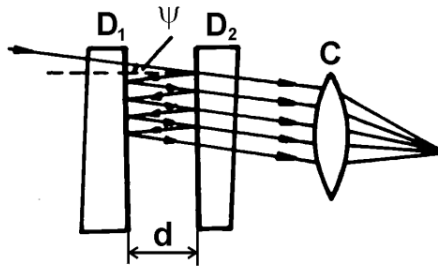
Obrázek 1: Michelsonův interferometr [1]

Ze zdroje obecně vychází záření, které se v bodě R při odrazu rozdělí na paprsky 1 a 2. Paprsky 1 a 2 poté postupují interferometrem po různých drahách, tak aby při stejné vzdálenosti zrcadel Z_1 , Z_2 od bodu R měly nulový dráhový rozdíl. Toho je docíleno umístěním kompenzační destičky B do cesty paprsku 1. Posuneme-li zrcadlem Z_1 , paprsky 1 a 2 získají určitý dráhový rozdíl a budeme moci pozorovat interferenční maxima a minima. Pokud jsou zrcadla vůči sobě skloněna o určitý úhel, tak výsledný interferenční obrazec bude soustava rovnoběžných proužků.

Pokud zrcadlo Z_1 posuneme o vzdálenost l a při tomto posuvu napočítáme k prošlých proužků, které se objevily (nebo zmizely) ve středu zorného pole, můžeme určit vlnovou délku světla podle rovnice [1]

$$\lambda = \frac{2l}{k} \quad (1)$$

Ve Fabryho-Perotově interferometru, znázorněném na obrázku 2, můžeme pozorovat mnohosvazkovou interferenci.



Obrázek 2: Fabryho-Perotův interferometr [1]

Interferometr je tvořen dvěma skleněnými deskami D_1 , D_2 , jejichž vnitřní strany jsou rovnoběžné a mají velkou odrazivost. Světlo ze zdroje tak prochází deskou D_1 , mnohonásobně se odráží ve vzduchové mezeře a z desky D_2 vychází koherentní paprsky, které jsou soustředěny čočkou C do ohniskové roviny, kde interferují.

Pokud dopadající světlo není monochromatické, ale obsahuje dvě spektrální čáry s blízkými vlnovými délkami λ_1 a λ_2 , tak každá z nich vytvoří svoji vlastní soustavu interferenčních kroužků. Změnou vzdálenosti obou desek interferometru pak lze najít dvě polohy desek, vzdálené od sebe o l , takové, že se maximum k -tého řádu čáry λ_1 překryje s maximum $(k-1)$ -ho řádu čáry λ_2 . Pro rozdíl vlnových délek pak bude platit

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

kde λ_s značí průměr vlnových délek λ_1 a λ_2 .

3 Výsledky měření

První měření proběhlo s Michelsonovým interferometrem, který je schématicky znázorněn na obrázku 1. Posun zrcadla 1 byl zařízen pomocí mikrometrického šroubu, jehož posuv byl pákovým převodem převeden na posuv zrcadla 1. Naměřené hodnoty posunu šroubu jsem označil y , pro posunutí zrcadla pak platí $l = py$, kde p značí převodní poměr.

Pro určení hodnoty převodního poměru p jsem nejdříve měřil se světelným zdrojem o známé vlnové délce. Byla využita rtuťová výbojka se zeleným filtrem, čemuž odpovídá vlnová délka $546,074 \text{ nm}$ [2].

Hodnota převodního poměru p závisí na výchozí poloze šroubu. Pro účely tohoto měření jsme uvažovali hodnotu p konstantní na měřeném rozsahu. Vždy jsem měřil od výchozí polohy šroubu $15,000 \text{ mm}$ směrem k vyšším hodnotám.

Nejmenší dílek na stupnici při měření polohy šroubu činil $0,01 \text{ mm}$. Snažil jsem se však odečítat i polohy mezi dvěma dílky stupnice a chybu tohoto měření tedy považuji rovnu $\sigma_y = 0,005 \text{ mm}$.

Naměřené hodnoty pro kalibraci pákového převodu Michelsonova interferometru jsou uvedeny v tabulce 1. Naměřené hodnoty byly proloženy přímkou ve tvaru $\Delta y = A \cdot k$, kde konstanta A byla určena pomocí lineární regrese. Číselně vyšlo $A = (1,380 \pm 0,004) \mu\text{m}$.

Hodnota převodního poměru pak byla určena jako

$$p = \frac{\lambda_{Hg}}{2A} \quad (3)$$

kde $\lambda_{Hg} = 546,074 \text{ nm}$. Chyba výsledku byla určena ze zákona šíření chyb [3] podle rovnice

$$\sigma_p = \frac{\lambda_{Hg}}{2A^2} \sigma_A \quad (4)$$

kde chybu určení vlnové délky λ_{Hg} považuji za zanedbatelnou. Číselně vyšlo $p = (0,198 \pm 0,001)$.

Pro změření vlnové délky He-Ne laseru jsem vrátil šroub do původní polohy 15,000 mm a opět měřil směrem k vyšším hodnotám. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 2. Změřenou závislost jsem proložil přímkou ve tvaru $\Delta y = B \cdot k$ pomocí lineární regrese. Vyšlo mi tak $B = (1,584 \pm 0,003) \mu\text{m}$.

Ze známé hodnoty B a převodního poměru p jsem určil vlnovou délku He-Ne laseru podle rovnice $\lambda = 2pB$ a chybu výsledku jako

$$\sigma_\lambda = \lambda \sqrt{\left(\frac{\sigma_p}{p}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_B}{B}\right)^2} \quad (5)$$

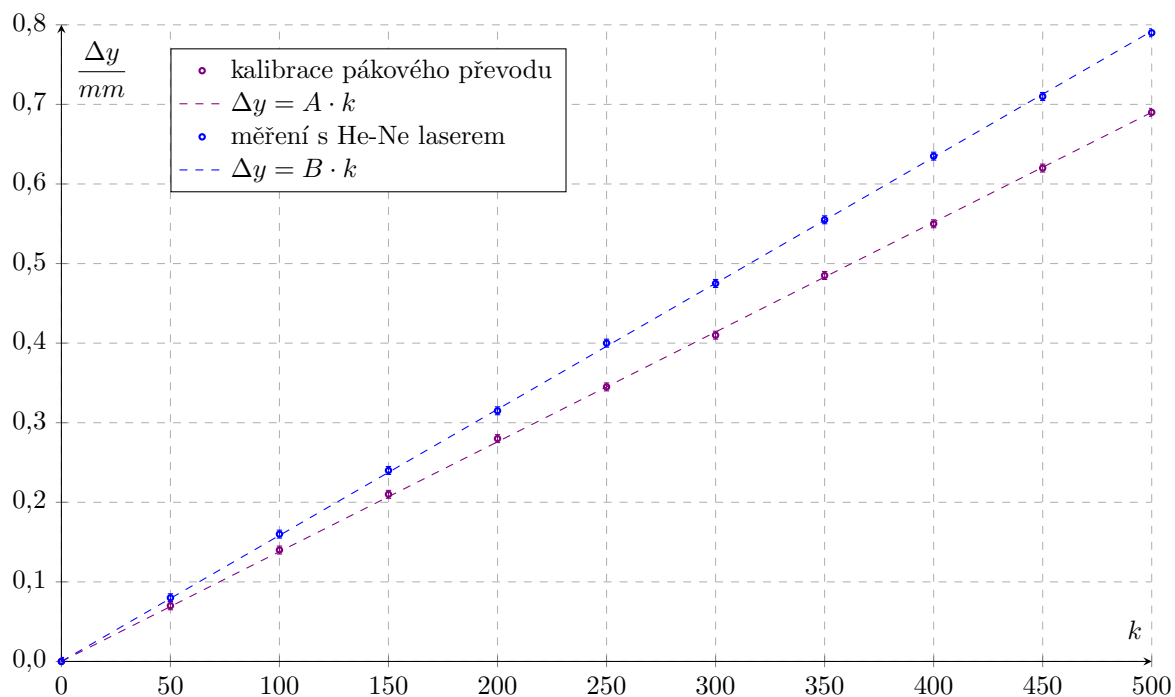
Číselně tak vyšla vlnová délka laseru $\lambda = (627 \pm 3) \text{ nm}$.

Tabulka 1: Kalibrace pákového převodu

k	$\frac{y}{\text{mm}}$	$\frac{\Delta y}{\text{mm}}$
0	15,000	0,000
50	15,070	0,070
100	15,140	0,140
150	15,210	0,210
200	15,280	0,280
250	15,345	0,345
300	15,410	0,410
350	15,485	0,485
400	15,550	0,550
450	15,620	0,620
500	15,690	0,690

Tabulka 2: Měření vlnové délky He-Ne laseru

k	$\frac{y}{\text{mm}}$	$\frac{\Delta y}{\text{mm}}$
0	15,000	0,000
50	15,080	0,080
100	15,160	0,160
150	15,240	0,240
200	15,315	0,315
250	15,400	0,400
300	15,475	0,475
350	15,555	0,555
400	15,635	0,635
450	15,710	0,710
500	15,790	0,790



Graf 1: Výsledky měření s Michelsonovým interferometrem

Další měření proběhlo s Fabry-Perotovým interferometrem, který je znázorněn na obrázku 2. Jako zdroj světla byl použit sodíkový dublet, pro který je průměrná vlnová délka $\lambda_s = 589,3 \text{ nm}$ [1].

Pro určení rozdílu vlnových délek λ_1 a λ_2 ve spektru sodíkového dubletu bylo potřeba změřit polohy desek interferometru, kdy se interferenční obrazce těchto dvou vlnových délek překrývají nebo polohy, ve kterých jsou kroužky jedné vlnové délky právě v polovině mezi kroužky druhé vlnové délky. Po prvním měření jsem však zjistil, že obě tyto polohy se v interferometru odečítají velmi obtížně. Po dohodě s vyučujícím jsem se tedy rozhodl měřit polohy desek interferometru, kdy se kroužky obou vlnových délek začnou rozcházet, neboť tento přechod byl v interferometru dobře rozpoznatelný.

Naměřené polohy desek interferometru, ve kterých došlo ke zmíněnému přechodu jsem označil y . Nejmenší hodnota na stupnici při posunu skleněných desek byla $0,0001 \text{ mm}$, ovšem mnohem větší vliv na přesnost měření bude mít nepřesné nastavení desek interferometru do polohy, kdy dochází k přechodu. Správné nastavení desek interferometru jsem musel posuzovat subjektivně okem a chyba měření y tak bude mnohem větší než přesnost samotné stupnice. Tuto chybu odhaduji na hodnotu $\sigma_y = 0,02 \text{ mm}$.

Měřil jsem od polohy $2,70 \text{ mm}$ do polohy přibližně $4,00$. Pro větší hodnoty už byly kroužky velmi úzké a špatně se odečítaly jejich překryvy. Jelikož je každé z měření zatíženo poměrně velkou chybou, tak jsem celé měření provedl celkem tři krát. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 3. Pořadí hodnot v i -tém měření jsem označil n s počáteční hodnotou $n = 0$.

Tabulka 3: Měření vzdálenosti spektrálních čar sodíkového dubletu

n	$\frac{y_1}{\text{mm}}$	$\frac{\Delta y_1}{\text{mm}}$	$\frac{y_2}{\text{mm}}$	$\frac{\Delta y_2}{\text{mm}}$	$\frac{y_3}{\text{mm}}$	$\frac{\Delta y_3}{\text{mm}}$
0	2,74	0,00	2,72	0,00	2,73	0,00
1	3,03	0,29	3,01	0,29	3,03	0,30
2	3,32	0,58	3,30	0,58	3,31	0,58
3	3,58	0,84	3,61	0,89	3,60	0,87
4	3,88	1,14	3,89	1,17	3,89	1,16

Naměřené hodnoty jsem pro všechny tři měření proložil přímkou ve tvaru $\Delta y_i = C_i \cdot n$. Číselné výsledky jsou uvedeny v tabulce 4. Graficky jsou výsledky znázorněny v grafu 2. Takto vypočítané směrnice C_i jsem zprůměroval a určil hodnotu $C = (0,289 \pm 0,007) \text{ mm}$.

Tabulka 4: Výsledky lineární regrese pro Fabry-Perotův interferometr

i	$\frac{C_i}{\text{mm}}$	$\frac{\sigma_{C_i}}{\text{mm}}$
1	0,28	0,02
2	0,29	0,01
3	0,29	0,01

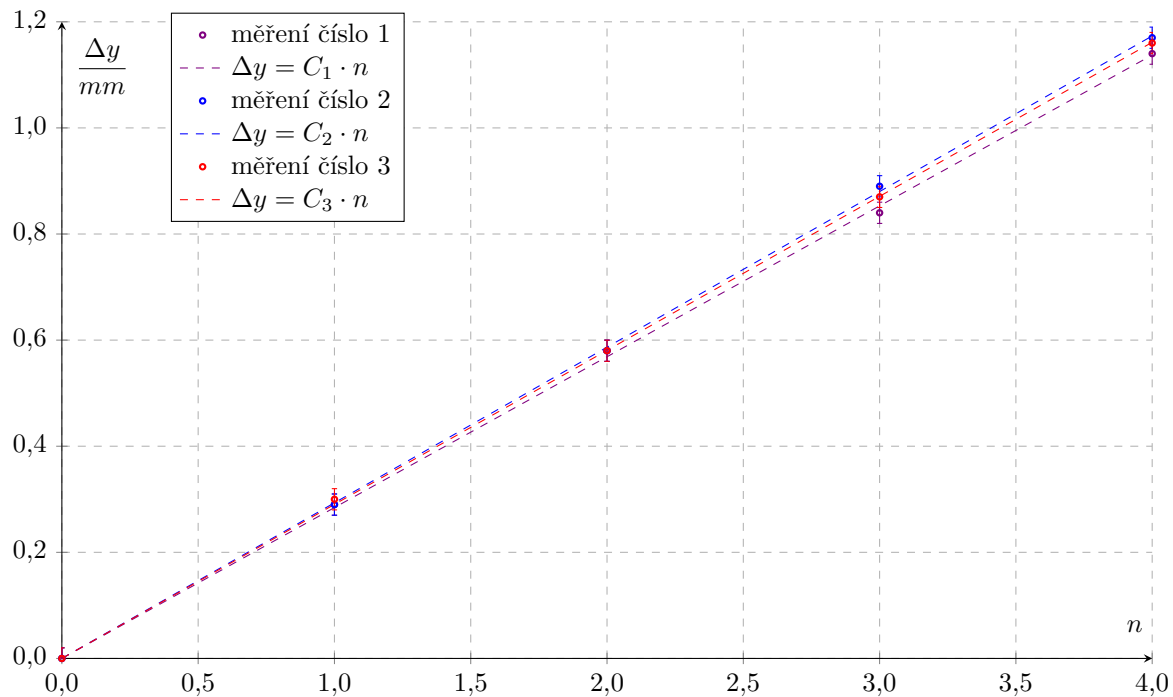
Změřená směrnice C odpovídá vzdálenosti l ve vzorci (2). Rozdíl vlnových délek spektrálních čar sodíkového dubletu jsem tedy určil jako

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda_s^2}{2C} \quad (6)$$

a chybu výsledku ze zákona šíření chyb [3]

$$\sigma_{\Delta\lambda} = \frac{\lambda_s^2}{2C^2} \sigma_C \quad (7)$$

kde chybu určení λ_s opět považuji za zanedbatelnou ve srovnání s σ_C . Vyšel mi tak rozdíl vlnových délek $\Delta\lambda = (0,60 \pm 0,01) \text{ nm}$.



Graf 2: Výsledky měření s Fabry-Perotovým interferometrem

4 Diskuse

Při měření s Michelsonovým interferometrem je možné, že jsem vždy přesně neodpočítal 50 kroužků, ovšem vzhledem k přesnosti měření posunutí šroubu považuji chybu určení k za zanedbatelnou. Posuv šroubu jsem měřil s přesností $0,005\text{ mm}$, což je poměrně velká chyba vzhledem k tomu, že 50-ti prošlým proužkům odpovídá posun šroubu přibližně $0,070\text{ mm}$ pro zelenou čáru rtuti a $0,080\text{ mm}$ pro He-Ne laser. Abych co nejvíce snížil vliv této chyby, tak jsem měřil metodou postupných měření až do 500-ti prošlých proužků a výsledky zpracoval pomocí lineární regrese.

Určitou systematickou chybu při měření Michelsonovým interferometrem mohl vnést převodní poměr p , který jsme na měřeném rozsahu považovali za konstantní. Je ovšem možné, že se jeho hodnota na použitém rozsahu postupně trochu měnila.

Nicméně, jak je vidět z grafu 1, tak změřené závislosti posunu šroubu Δy (resp. odpovídající posun zrcadla Δl) na počtu prošlých interferenčních proužků k jsou lineární a odpovídají tak teoretickým předpokladům. Mnou určená vlnová délka He-Ne laseru $\lambda = (627 \pm 3)$ odpovídá tabelované hodnotě $632,8\text{ nm}$ [4] v rámci dvou směrodatných odchylek měření. Rozdíl v naměřené a tabelované hodnotě byl pravděpodobně způsoben zmíněnými nepřesnostmi měření.

Při měření s Fabry-Perotovým interferometrem jsem odhadl chybu měření polohy desek interferometru na hodnotu $\sigma_y = 0,02\text{ mm}$, což je podstatně větší chyba než samotné dělení stupnice s nejmenším dílkem $0,0001\text{ mm}$. Tato chyba byla způsobena hlavně obtížným určením přesné polohy desek interferometrů, kdy se kroužky obou vlnových délek začnou rozcházet. Tuto polohu jsem posuzoval subjektivně podle toho, co jsem viděl okem, a proto je chyba tohoto měření tak velká. Pro snížení chyby měření jsem celé měření opakoval celkem tři krát.

Změřené závislosti Fabry-Perotovým interferometrem, zobrazené v grafu 2, jsou lineární a navzájem se shodují v rámci přesnosti měření. Mnou určená hodnota rozdílu vlnových délek sodíkového dubletu $\Delta\lambda = (0,60 \pm 0,01)\text{ nm}$ se v rámci chyby měření shoduje s tabelovanou hodnotou $0,5974\text{ nm}$ [5].

5 Závěr

Pomocí zelené čáry rtuti byl okalibrován pákový převod Michelsonova interferometru a byl určen převodní poměr na použitém rozsahu na hodnotu $p = (0,198 \pm 0,001)$. Michelsonovým interferometrem pak byla určena vlnová délka He-Ne laseru $\lambda = (627 \pm 3)\text{ nm}$. Pomocí Fabry-Perotova interferometru byla změřena vzdálenost spektrálních čar sodíkového dubletu $\Delta\lambda = (0,60 \pm 0,01)\text{ nm}$.

6 Seznam použité literatury

- [1] Měření vlnových délek světla interferometry. Fyzikální praktikum. [online]. [cit. 06-04-2019]. https://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/_media/zadani/texty/txt_341.pdf
- [2] Atomic Spectra. Hyperphysics. [online]. [cit. 06-04-2019]. <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/quantum/atspect2.html>
- [3] English, Jiří. Úvod do praktické fyziky I. 1. vyd. Praha: MATFYZPRESS, 2006, 145 s.
- [4] Helium–neon Lasers. RP Photonics Encyclopedia. [online]. [cit. 06-04-2019]. https://www.rp-photonics.com/helium_neon_lasers.html
- [5] Sodium Spectrum. Hyperphysics. [online]. [cit. 06-04-2019]. <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/quantum/sodium.html>