

# FYZIKÁLNÍ PRAKTIKUM FJFI ČVUT V PRAZE

Datum měření: 16.4.2011	Jméno: Jakub Kákona
Pracovní skupina: 2	Hodina: Po 7:30
Spolupracovníci: -	Hodnocení:

## Úloha 10: Interference a ohyb světla

### Abstrakt

Cílem úlohy je vyzkoušet metody měření rozměrů kruhových otvorů a štěrbin pomocí difrakce optického záření a výsledky porovnat s klasickými metodami měření rozměrů.

## 1 Úvod

### 1.1 Zadání

1. Bonus: spočítejte hodnotu konstanty  $C$  u kruhového otvoru pro 4. a 5. tmavý kroužek.
2. Rozšířte svazek laseru pomocí dvou spojek (+50 a +200).
3. Změřte průměr tří nejmenších kruhových otvorů pomocí Fraunhoferova ohybu světla z He-Ne Laseru vlnové délky 594 nm a pomocí měřicího mikroskopu. Odhadněte, s jakou chybou jste schopni měřit šířku štěrbin mikroskopem. Poznamenejte si odhad chyby měření délky, chyby měření optické dráhy a průmětu tmavých proužků. Proveďte řádné statistické zpracování (tj. včetně propagace chyb) a výsledky z mikroskopu a interference srovnejte. Pro jaký průměr kruhového otvoru je přesnější měření interferencí a pro jaký přímo mikroskopem?
4. Změřte 10 šířek štěrbin (šířka nastavitelná šroubem) pomocí Fraunhoferova ohybu světla z He-Ne Laseru vlnové délky 594 nm a pomocí indikátorových hodinek, které se dotýkají šroubu. Proveďte řádné statistické zpracování (tj. včetně propagace chyb) a výsledky z indikátorových hodinek a interference srovnejte. Pro jaké šířky štěrbin je výhodnější měření interferencí a pro jaké indikátorovými hodinkami?
5. Změřte pomocí He-Ne laseru 543 nm (zelený laser) mřížkovou konstantu optické mřížky a srovnejte s hodnotou uvedenou na mřížce.
6. Pomocí He-Ne laseru 597 nm, dvou rovinných zrcadel a děliče svazku (Abbeho kostka) sestavte Michelsonův interferometr a změřte vlnovou délku světla laseru.

## 2 Experimentální uspořádání a metody

### 2.1 Pomůcky

Železná deska s magnetickými stojánky, Polovodičový diodový laser (633 nm, 5 mW), 2 zrcadla, 1 dělič svazku (Abbeho kostka), laboratorní zvedák, optická lavice s jezdcí, 2 spojné čočky (+50, +200), rozptylka (-50), sada kruhových otvorů, štěrbina s nastavitelnou šířkou, držák na mřížku, opt. mřížka 600 vrypů na mm, stínítko na zdi, pásmo (5 m), měřítko (1 m), měřicí mikroskop.

## 2.2 Teoretický úvod

Při odvozování vzorce ohybu na kruhovém otvoru vycházíme z Babinetova principu, který nám říká, že štěrbinu si můžeme nahradit stejně velkou plochou s nekonečně mnoha zdroji, jejichž vlny budou interferovat. Tedy pro kruhový otvor můžeme počítat příspěvky

$$dE = E_0 \frac{2\sqrt{R^2 - s^2}}{\pi R^2} ds, \quad (1)$$

z toho se lze dostat k eliptickému integrálu

$$J(C) = \int_{-1}^1 \sqrt{1 - u^2} \cos(2\pi C u) du, \quad (2)$$

Odsud je potřeba numericky získat konstantu  $C$ , ta se pak využije do finálního vztahu pro interferenční minima

$$\sin \varphi_i = C_i \frac{\lambda}{R}. \quad (3)$$

K odvozování vztahu se ohybu na štěrbině se použije opět Babinetův princip a výsledný vztah pro interferenční minima je

$$\sin \theta = \frac{m\lambda}{D} \quad m = 1, 2, 3, \dots \quad (4)$$

Pro difrakci na mřížce se z Babinetova principu dá odvodit vztah pro hlavní interferenční maxima

$$\lim_{\sin \vartheta \rightarrow \frac{m\lambda}{d}} \frac{I}{I_0} = N^2, \text{ v bodech } \sin \vartheta_m = \frac{2\pi m}{kd} = \frac{m\lambda}{d}, \text{ kde } m = 0, 1, 2, \dots \quad (5)$$

## 3 Výsledky a postup měření

Z důvodu vytvoření lepších podmínek pro difrakci na otvorech bylo třeba rozšířit svazek vycházející z laseru, k tomu jsme využili kolimátor sestavený ze dvou spojných čoček (+50 a +200) jejich konfigurace je identická s Keplerovým dalekohledem a "okulárová čočka je umístěna" blíže v výstupní apertuře laseru.

Zaostření soustavy na nekonečno bylo provedeno nastavením vzdálenosti čoček, tak aby odpovídala součtu jejich nominálních ohniskových vzdáleností 25cm. Na rozdíl od zadání byl v úloze využíván pouze polovodičový laser 633nm.

### 3.1 Měření průměru kruhových otvorů

Do rozšířeného gaussovského svazku, který byl v celém rozsahu měření přibližně kolineární a dosahoval šířky cca 5mm jsem v držáku umístili karuselovou clonu s otvory nominálních průměrů 0,5mm, 1mm a 2mm. Po umístění otvorů jsme vždy na stínítku odečítali rozměry interferenčních obrazců a zapisovali je.

Pro otvor 2mm nám z měření na měřícím mikroskopu vyšel průměr  $(2,098 \pm 0,093)$  mm a pro měření z difrakčních obrazců  $(2,71 \pm 0,19)$  mm.

Pro otvor 1mm nám z měření na měřícím mikroskopu vyšel průměr  $(1,248 \pm 0,079)$  mm a pro měření z difrakčních obrazců  $(1,06 \pm 0,08)$  mm.

Pro otvor 0,5mm nám z měření na měřícím mikroskopu vyšel průměr  $(0,758 \pm 0,064)$  mm a pro měření z difrakčních obrazců  $(0,47 \pm 0,01)$  mm.

**Tabulka 1:** Měření průměru otvoru 2mm

		naměřené	vypočtené
Řád	R [mm]	D [mm]	D [mm]
1	1.1	2,250	2.67
2	2.7	2,000	1.99
3	3.5	2,120	3.01
4	4.8	2,120	2.88
5	5.7	2,000	2.99

**Tabulka 2:** Měření průměru otvoru 1mm

		naměřené	vypočtené
Řád	R [mm]	D [mm]	D [mm]
1	2.4	1,250	1.23
2	5.2	1,120	1.04
3	7.6	1,250	1.03
4	10.1	1,370	1.01
5	12.4	1,250	1.02

**Tabulka 3:** Měření průměru otvoru 0,5mm

		naměřené	vypočtené
Řád	R [mm]	D [mm]	D [mm]
1	6	0,750	0.49
2	11.1	0,670	0.49
3	16.7	0,750	0.47
4	22.1	0,750	0.46
5	27.9	0,870	0.45

### 3.2 Měření šířek šterbin

Obdobně jako v předchozím bodě jsme postupovali i zde, ovšem nyní jsme měřili šterbinu s proměnlivou šířkou nastavitelnou šroubem a měřenou indikátorovými hodinkami.

**Tabulka 4:** Měřená difrakční minima pro šířku šterbiny 1.5mm

Číslo měření	$D_I$ [mm]	$D_{postupnou}$ [mm]
1	6.0	
2	11.0	
3	15.0	
4	19.5	2.25
5	24.0	2.17
6	28.0	2.17
Průměr		2.19
Směrodatná odchylka		0.04

**Tabulka 5:** Měřená difrakční minima pro šířku šterbiny 1.3mm

Číslo měření	$D_I$ [mm]	$D_{postupnou}$ [mm]
1	7.8	
2	12.2	
3	17.7	
4	22.5	2.45
5	27.6	2.57
6	32.6	2.48
Průměr		2.50
Směrodatná odchylka		0.05

**Tabulka 6:** Měřená difrakční minima pro šířku šterbiny 1.1mm

Číslo měření	$D_I$ [mm]	$D_{postupnou}$ [mm]
1	8.9	
2	16.3	
3	20.7	
4	27.0	3.02
5	33.2	2.82
6	39.4	3.12
Průměr		2.98
Směrodatná odchylka		0.12

### 3.3 Mřížková konstanta

Při tomto měření jsme laser sundali z laboratorního zvedáku a položili na bok na stůl, tak aby svazek laseru mohl procházet difrakční mřížkou umístěnou v držáku položeném na stole. Průchodem svazku skrz mřížku vznikl na stěně jednorozměrný bodový difrakční obrazec (mřížka tedy obsahovala pouze svislé vrypy). Mřížkovou konstantu jsme pak určili tak, že jsme změřili vzdálenost stěny od mřížky a vzdálenost 1. difrakčních maxim na stěně vzhledem k difrakčnímu maximu 0. řádu.

**Tabulka 7:** Měřená difrakční minima pro šířku štěrbin 0.9mm

Číslo měření	$D_I$ [mm]	$D_{postupnou}$ [mm]
1	11.7	
2	18.2	
3	24.6	
4	32.9	3.53
5	40.1	3.65
6	47.6	3.83
Průměr		3.67
Směrodatná odchylka		0.12

**Tabulka 8:** Měřená difrakční minima pro šířku štěrbin 0.7mm

Číslo měření	$D_I$ [mm]	$D_{postupnou}$ [mm]
1	14.4	
2	23.7	
3	33.7	
4	43.3	4.82
5	53.0	4.88
6	63.0	4.88
Průměr		4.86
Směrodatná odchylka		0.03

**Tabulka 9:**  $D_I$  vypočtené hodnoty štěrbin,  $D_H$  změřené indikátorovými hodinkami, +chyby

Štěrba	$D_I$ [mm]	Směrodatná odchylka [mm]	$D_H$ [mm]	$\pm$ Chyba $_H$ [mm]
1.5	1.48	0.03	1.5	0.1
1.3	1.30	0.03	1.3	0.1
1.1	1.09	0.05	1.1	0.1
0.9	0.89	0.03	0.9	0.1
0.7	0.67	0.01	0.7	0.1

**Tabulka 10:** Měření mřížkové konstanty - X je pozice maxim vzhledem k 0. řádu

Rád	X [cm]	$D_{vyp}$ [mm]
-1.	55,9	0,00165
1.	56	0,00165

Z naměřených hodnot vychází hodnota mřížkové konstanty  $(1,65 \pm 0,05) \times 10^{-6}\text{m}$ , což by odpovídalo 605 čarám na mm. (Na mřížce bylo uvedeno 600/mm).

### 3.4 Michelsonův interferometr

Dle známého schématu jsme sestavili Michelsonův interferometr a výstupní svazek rozšířili přes rozptylku, poté jsme měřili interferenční přechody v závislosti na přibližování nebo oddalování jednoho zrcadla posunovaného mikrometrickým šroubem.

**Tabulka 11:** Naměřené a vypočtené hodnoty vlnových délek laseru pomocí Michelsonova interferometru

Posuv zrcadla [um]	$\lambda[nm]$
20	666
30	285
30	545

Je vidět, že při měření pravděpodobně vznikla hrubá chyba u druhého řádku, kde je zřejmě špatně spočítán počet prošlých interferenčních proužků (Bylo obtížné definovaně otočit posuvným šroubem a zároveň počítat interferenční proužky. Pokud tento řádek neuvažujeme, tak změřená vlnová délka laseru vyjde  $(606 \pm 86)$  nm.

## 4 Diskuse

- Pomocí numerických metod, se podařilo spočítat další dvě konstanty, kdy nabývá daný eliptický integrál nuly. Všech pět konstant tedy číselně vychází  $C_1 = 0.610$ ,  $C_2 = 1.117$ ,  $C_3 = 1.619$ ,  $C_4 = 2.121$ ,  $C_5 = 2.622$ .
- Laserový svazek jsme rozšířili pomocí dvou spojek +200 a +50 použitých jako kolimátor, tak aby divergence svazku byla co nejmenší.
- Změřili jsme průměr tří nejmenších kruhových otvorů z karuselu, jak pomocí ohybu světla tak pomocí mikroskopu. Naměřené a vypočtené hodnoty jsou uvedeny v tabulkách 1, 2 a 3. Popřípadě v jejich popisu.
- Změřili jsme šířky 5ti štěrbin, ohybem světla a indikátorovými hodinkami. Naměřené a postupnou metodou vypočtené hodnoty jsou v tabulkách 4-8, celkové vyhodnocení v tabulce 9. Měření ohybem světla předpokládáme zvláště výhodné při malých velikostech otvorů, naopak při větších otvorech začíná být výhodnější jiná metoda. Avšak velikost této hranice je relativní, neboť měření je závislé na použité vlnové délce, takže i průměry větších otvorů by při použití vhodného laseru pravděpodobně bylo možné měřit difrakční metodou.
- Pomocí polovodičového laseru 633nm jsme změřili mřížkovou konstantu. Hodnoty jsou uvedeny v tabulce 10. Počet vrypů na 1mm jsme určili 605 oproti hodnotě na mřížce 600.
- Sestrojili jsme dle návodu Michelsonův interferometr a posouváním jednoho ze zrcadel a pozorováním inteferenčních obrazců naměřili vlnovou délku daného laseru 594nm.

## 5 Závěr

Při měření jsme si prakticky vyzkoušeli zákon odrazu, lomu, ohybu a interference viditelného koherentního světla. Došli jsme k závěru, že ohybem viditelného se dají velmi efektivně měřit otvory menší než cca 1mm, ale větší je lepší měřit jinou metodou.

## Reference

- [1] Petržílka: Fyzikální optika, Přírodovědecké nakladatelství, Praha, 1952.
- [2] Friš, Timoreva: Kurs fyziky, díl III, NČSAV, Praha, 1954.
- [3] Krauford: Volny, Nauka, 1974; ruský překlad 3. dílu Berkleyského kurzu fyziky Crawford F. S.: Waves.