

Kabinet výuky obecné fyziky, UK MFF

Fyzikální praktikum ...



Úloha č.

Název úlohy:

Jméno: Obor: FOF FAF FMUZV

Datum měření:

Datum odevzdání:

Připomínky opravujícího:

	Možný počet bodů	Udělený počet bodů
Práce při měření	0 - 5	
Teoretická část	0 - 1	
Výsledky měření	0 - 8	
Diskuse výsledků	0 - 4	
Závěr	0 - 1	
Seznam použité literatury	0 - 1	
Celkem	max. 20	

Posuzoval:.....

dne:

Pracovní úkoly

1. Na optickém stole je sestaven Koherentní optický procesor. Na obr. v „Pokynech měření“ (nebo skripta str. 188) je vyznačeno schematické uspořádání a vyznačeny ohniskové délky čoček, které jsou v úloze k dispozici. Ověřte, zda čočky Č1 a Č2 zachovávají rovnoběžnost paprsků. Spočítejte a ověřte rozšíření paprsku použitým teleskopem. Změřte zvětšení obrazu předmětu v rovině P3 a zvětšení obrazu Fourierova spektra v rovině P4.
2. Pozorujte Fourierovský obraz následujících tří předmětů umístěných v rovině P1: čtvercového otvoru, soustavy rovnoběžných pruhů a sítky. Proměřte Fourierova spektra těchto předmětů v rovině P2 nebo P4 a z naměřených údajů vypočítejte rozměry předmětů, tj. velikost stran čtvercového otvoru, šířku a periodu soustavy rovnoběžných pruhů a periodu a šířku pruhů sítky.
3. Parametry předmětů z úkolu 2 změřte mikroskopem, který je v úloze č. 6, č. 30 nebo č. 14. Porovnejte hodnoty vypočtené z Fourierova spektra s přímým měřením mikroskopem.
4. Po dohodě s vyučujícím vyberte a kvalitativně ověřte některou z vlastností Fourierovy transformace, které jsou uvedeny v odd. 4.10.2 části I skript nebo na www.
5. V rovině P1 umístěte vybraný předmět. Do roviny P2 vkládejte různé filtry a zkoumejte jejich vliv na geometrický obraz v rovině P3. Pozorované jevy vysvětlete.

Teoretická část

Fourierovu transformaci definujeme jako v [1].

Čočka vytváří ve své obrazové předmětové rovině rozložení amplitudy světla úměrné Fourierově transformaci rozložení amplitudy světla v předmětové rovině. [2] Používáme aparaturu jako v [2]

V následujícím budeme λ značit vlnovou délku laseru, f ohniskovou vzdálenost čočky Č a x, y budeme značit souřadnice ve Fourierově rovině s počátkem v optické ose. Pokud do předmětové roviny umístíme obdélník se stranami a resp. b ve směru x resp. y , budou ve Fourierově rovině minima intenzity v bodech $x = k\lambda f/a$ nebo $y = k\lambda f/b$ pro celé k různé od nuly. [3]

Pokud do předmětové roviny umístíme soustavu svislých šterbin širokých b , od sebe vzdálených l , budou ve Fourierově rovině maxima intenzity v bodech $x = k\lambda f/l, y = 0$ pro celé k . Intenzita bude ve vodorovném směru modulována funkcí sinc s minimy v bodech $x = k\lambda f/d$ pro celé k různé od nuly. [3]

Pokud do předmětové roviny umístíme síť čtvercových otvorů se stranou c od sebe vzdálených w , budou ve Fourierově rovině maxima intenzity v bodech $x = m\lambda f/w, y = n\lambda f/w$ pro celé m, n . Intenzita bude opět modulována funkcemi sinc s minimy v bodech $x = k\lambda f/c$ nebo $y = k\lambda f/c$ pro celé k různé od nuly.

Výsledky měření

Vlnová délka použitého laseru je $\lambda = 543$ nm. Ohnisková vzdálenost čočky Č je $f = 100$ cm. Chybu těchto veličin zanedbáváme vzhledem k chybám vnesených vlastním měřením.

Ohniskové vzdálenosti čoček jsou $f_{\text{Č1}} = -2,5$ cm a $f_{\text{Č2}} = 15$ cm, z toho vyplývá zvětšení teleskopu 7. Na milimetrovém papíru jsme změřili průměr svazku před teleskopem ($2,0 \pm 0,3$) mm a za teleskopem ($12,0 \pm 0,5$) mm. Průměr svazku jsme změřili ještě v několika místech mezi čočkami Č2 a Č a nikde jsme nenaměřili žádný rozdíl, teleskop tedy dostatečně zachovává rovnoběžnost paprsků. Rozšíření svazku vypočtené z průměrů svazku před a za teleskopem je 6 ± 1 , což se v rámci chyby shoduje s hodnotou vypočtenou z ohniskových vzdáleností.

Na mikroskopu jsme změřili rozměry předmětů (tabulka 1).

mřížka	vzdálenost děr vodorovně	$(760 \pm 10) \mu\text{m}$
	vzdálenost děr svisle	$(700 \pm 10) \mu\text{m}$
čtvereček	šířka	$a = (800 \pm 10) \mu\text{m}$
	výška	$b = (793 \pm 10) \mu\text{m}$
proužky	vzdálenost proužků	$l = (99 \pm 3) \mu\text{m}$
	šířka proužků	$(22 \pm 2) \mu\text{m}$
	šířka šterbin ⁱ	$d = (77 \pm 4) \mu\text{m}$
síťka	vzdálenost otvorů ⁱⁱ	$w = (104,7 \pm 1,0) \mu\text{m}$
	šířka vláken	$(50 \pm 4) \mu\text{m}$
	strana čtvercových otvorů ⁱⁱⁱ	$c = (54 \pm 5) \mu\text{m}$

Tabulka 1: Mikroskopem naměřené rozměry předmětů

Ke změření zvětšení obrazu předmětu v rovině P3 jsme použili *mřížku*. Na stínítku v rovině P3 jsme změřili vodorovnou vzdálenost děr $(3,04 \pm 0,08) \text{ mm}$ a svislou $(2,89 \pm 0,08) \text{ mm}$. Pro větší přesnost jsme měřili vždy vzdálenost více děr. Z naměřených hodnot a tabulky 1 vyplývá zvětšení ve vodorovném směru $4,01 \pm 0,10$ a svislém $4,15 \pm 0,10$. Za skutečné zvětšení považujeme jejich střední hodnotu $4,08 \pm 0,10$.

Ke změření zvětšení obrazu Fourierova spektra v rovině P4 *čtvereček* $\delta 01$ (čtvercový otvor), pro který jsme změřili relativní polohy minim intenzity v rovinách P2 i P4. Hodnoty jsme kvůli určení zvětšení měřili přesněji ve vodorovném směru, ve svislém směru jsme měřili jen v rovině P2. Naměřené hodnoty jsou v grafu 1. Lineární regresí pro hodnoty v rovině P2 jsme dostali $\lambda f/a = (0,736 \pm 0,005) \text{ mm}$. V rovině P4 dostáváme $Y\lambda f/a = (2,87 \pm 0,07) \text{ mm}$, kde Y je hledané zvětšení. Z toho dostáváme zvětšení v rovině P4 $Y = 3,9 \pm 0,1$. Zároveň dostáváme $a = (737 \pm 5) \mu\text{m}$ a $b = (720 \pm 20) \mu\text{m}$.

Pozorovali jsme Fourierův obraz soustavy rovnoběžných *proužků*. Změřili jsme relativní polohy maxim intenzity v rovině P2. Hodnoty jsou v tabulce 2. Lineární regresí dostáváme vzdálenost šterbin $l = (92 \pm 3) \mu\text{m}$. Difrakční minimum jsme nepozorovali ostře, ale odhadujeme, že nebylo blíže než 2,5 cm. Dostáváme proto dolní odhad pro šířku šterbin $d > 20 \mu\text{m}$.

řád maxima	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
relativní poloha (mm)	-19,62	-13,84	-7,79	0,00	6,00	10,66	15,80	21,27

Tabulka 2: Relativní polohy maxim intenzity ve Fourierově obrazu soustavy pruhů

	řád maxima					řád minima ^{iv}				
	-3	-1	0	1	3	-2	-1	0	1	2
vodorovně (cm)	-1,7	-0,6	0,0	0,5	1,6	-2,4	-1,3	0,0	1,2	2,2
svisle (cm)	-1,4	-0,2	0,4	1,0	2,1	-0,4	0,8	2,0	3,2	4,1

Tabulka 3: Relativní polohy maxim a minim intenzity ve Fourierově obrazu sítky

Pozorovali jsme Fourierův obraz *sítky*. Obraz jsme měřili v rovině P2. Zde nám ohybová minima znemožnili pozorování některých maxim. Naměřené hodnoty jsou v tabulce ???. Lineární regresí jsme určili vzdálenost děr $w = 0 \mu\text{m}$ a velikost čtvercových otvorů $c = 0 \mu\text{m}$ (uvádíme pouze jednu hodnotu, protože pro vodorovný a svislý směr vyšla totožná hodnota, což odpovídá tomu, že síťka je skutečně čtvercová, jak jsme ověřili i na mikroskopu).

Ověřili jsme následující vlastnosti Fourierovy transformace z [2]. Podobnostní teorém: při vkládání podobných předmětů se Fourierův obraz náležitě roztahoval. Posunovací teorém: při posunu předmětu ve směru kolmém na optickou osu se rozložení intenzity ve Fourierově rovině neměnilo. Dvojitá Fourierova transformace: v rovině P3 vznikl převrácený obraz předmětu. Transformace konvoluce: v předmětové rovině jsme umístili dva filtry (konkrétně např. trojúhelníkový otvor a síťku), čímž jsme efektivně provedli násobení těchto dvou funkcí. Ve Fourierově rovině jsme poté skutečně pozorovali konvoluci Fourierových obrazů obou předmětů.

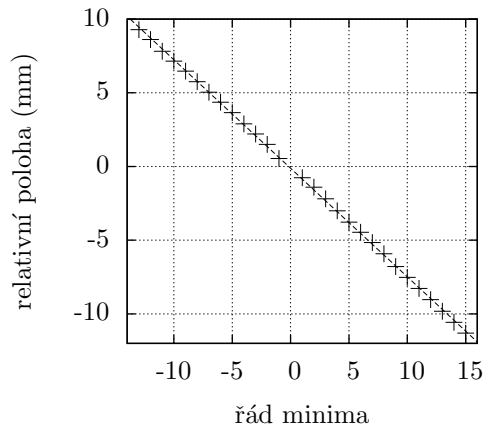
V rovině P2 jsme umísťovali prostorové filtry (např. horní a dolní propust', síťku) a pozorovali obraz v rovině P3. Provedli jsme např. "osvobození tygra z klece". Všechny pozorované obrazy byly v souladu s teorií.

ⁱŠířka šterbin nebyla změřena mikroskopem přímo, určili jsme ji jako rozdíl vzdálenosti a šířky proužků.

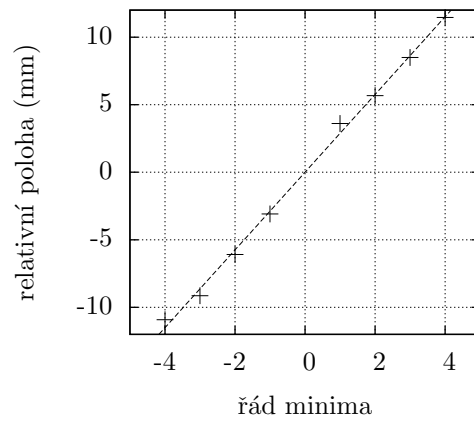
ⁱⁱV obou směrech se lišila až na prvním desetinném místě, síť byla tedy dobře čtvercová.

ⁱⁱⁱStejně jako ⁱ.

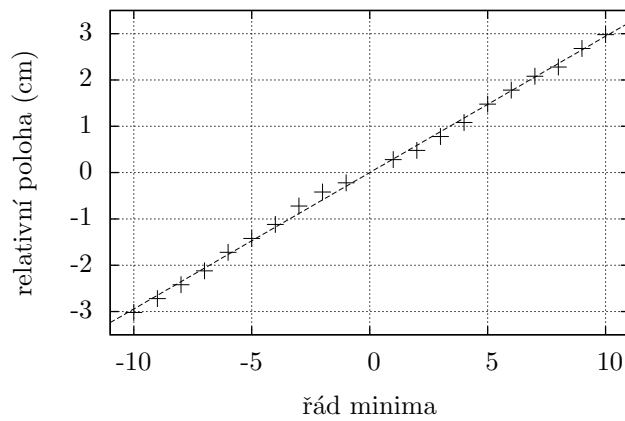
^{iv}Nultý řád ve skutečnosti není minimum, přesto jsme ho změřili a uvádíme kvůli zvýšení počtu fitovaných hodnot.



(a) vodorovný směr v P2



(b) vodorovný směr v P4



(c) svislý směr v P4

Graf 1: Relativní polohy minim intenzity ve Fourierově obrazu čtverečku

Diskuze

Změřené rozšíření svazku se shoduje s teoretickou hodnotou v rámci standardní odchylky. Měření průměru svazku před dalekohledem bylo velice nepřesné.

Rozměry předmětů se sice poměrně dobře shodují s těmi naměřenými mikroskopem, nicméně v rámci standardní odchylky se neshodují (u čtverečku dokonce ani 3σ). To nasvědčuje tomu, že je buď podhodnocená chyba měření vzdáleností maxim a minim intenzity, chyba f není nezanedbatelná, nebo se uplatňuje ještě nějaká jiná neodhalená systematická chyba. Hodnoty změřené z Fourierova spektra jsou vždy přibližně o 8 % nižší, pravděpodobně jde tedy o systematickou chybu. Graf 1 naznačuje, že při měření ve svislém směru mohlo dojít k hrubé chybě při počítání řádů minim intenzity.

Dolní odhad pro šířku štěrbin změřený z Fourierova spektra je skutečně menší než hodnota naměřená na mikroskopu.

Závěr

Rozšíření svazku za dalekohledem tvořeným čočkami Č1 a Č2 jsme změřili 6 ± 1 , z poměru ohniskových vzdáleností vyplývá zvětšení 7.

Zvětšení obrazu v rovině P3 jsme změřili $4,08 \pm 0,10$.

Zvětšení obrazu Fourierova spektra v rovině P4 jsme změřili $3,9 \pm 0,1$.

Z Fourierova spektra jsme změřili rozměry čtverečku: $a = (737 \pm 5) \mu\text{m}$ a $b = (720 \pm 20) \mu\text{m}$. Dále vzdálenost proužků v soustavě rovnoběžných proužků $l = (92 \pm 3) \mu\text{m}$ a dolní odhad šířky štěrbin mezi nimi $d > 20 \mu\text{m}$. Dále vzdálenost děr v síťce $w = (97 \pm 2) \mu\text{m}$ a jejich velikost $c = (47 \pm 1) \mu\text{m}$.

Seznam použité literatury

1. ČERNÝ, Robert; POKORNÝ, Milan. *Matematická analýza pro fyziky IV* [online]. 2017 [cit. 2017-04-20]. Dostupný z WWW: <http://www.karlin.mff.cuni.cz/~rcerny/analyzaIV2017.html>.
2. *Základní fyzikální praktikum* [online]. [cit. 2017-04-20]. Dostupný z WWW: <http://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/start>.
3. MALÝ, Petr. *Optika*. Praha: Nakladatelství Karolinum, 2013. ISBN 978-80-246-2246-0.