

Interferencia a ohyb světla

Číslo úlohy: 10 Skupina: 4 Krúžok: pondelok
Meno: Zuzana Moravcová Dátum merania: 11.4.2016 Klasifikácia:

1 Pracovné úlohy

1. Rozšírite zväzok laseru pomocou dvoch spojok (+50 a +200).
2. Zmerajte priemer troch kruhových otvorov pomocou Fraunhoferovho ohybu svetla z laseru a pomocou meriaceho mikroskopu. Odhadnite, s akou chybou ste schopní merať šírku štrbiny mikroskopom. Poznamenajte si odhad chyby merania dĺžky optickej dráhy a priemeru tmavých prúžkov. Predveďte riadne spracovanie chýb (t.j. určite štatistickú aj systematickú chybu merania) a výsledky z mikroskopu a interferencie zrovnajte. Pre aký priemer kruhového otvoru je presnejšie meranie interferenciou a pre aký priamo mikroskopom?
3. Zmerajte aspoň 6 širok štrbiny (šírka nastaviteľná šrôbom) pomocou Fraunhoferovho ohybu svetla z laseru a pomocou indikátorových hodiniiek, ktoré sa dotýkajú šrôbu. Predveďte riadne spracovanie chýb (t.j. určite štatistickú aj systematickú chybu merania) a výsledky z indikátorových hodiniiek a interferencie zrovnajte. Zostrojte graf závislosti šírky štrbiny zmeranej laserom na šírke štrbiny zmeranej indikátorovými hodinkami. Hodnoty opatrite x-ovými a y-ovými chybovými úsečkami (errorbarami). Pre aké šírky štrbiny je výhodnejšie meranie interferencie a pre aké indikátorovými hodinkami?
4. Zmerajte pomocou laseru mriežkovú konštantu optickej mriežky a zrovnajte s hodnotou uvedenou na mriežke.
5. Pomocou laseru, dvoch rovinných zrkadiel a deliža zväzku (Abbeho kocka) zostave Michelsonov interferometer a zmerajte vlnovú dĺžku svetla laseru.

2 Použité prístroje a pomôcky

Železná doska s magnetickými stojanmi, He-Ar laser 633 nm, 2 zrkadlá, delič zväzku (Abbeho kocka), laboratórny zvedák, optická lavica s jazdcami, 2 spojné šošovky (+50, +200), rozptylka (-50), sada kruhových otvorov, štrbina s nastaviteľnou šírkou, držiak na mriežku, optická mriežka, tienitko (na stene), meter (5m), lampička, meriaci mikroskop.

3 Teoretický úvod

Svetlo je elektromagnetická vlna (s vlnovou dĺžkou v rozsahu 400 až 700 nm), pričom pokiaľ viaceré vlny skladáme, môžeme pozorovať javy nazývané interferencia a difrakcia. Keď svetlo dopadá na štrbinu alebo napríklad optickú mriežku, jednotlivé vrypy môžeme považovať za nové zdroje svetla. V [1] je podrobne odvodené, ako dostaneme intenzitu svetla v konkrétnom bode v závislosti na jeho polohe. Na tienitku, ktoré je vzdialené od zdroja svetla o vzdialenosť d (tzv. optická dráha), je možné vidieť svetlé a tmavé pruhy. Pre minimá (čiže časti z najmenšou intenzitou) dostávame vzťah

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

kde θ je uhol medzi pôvodným a "zlomeným" svetelným lúčom, m udáva rád maxima a D je šírka štrbiny.

Kruhový otvor si vieme predstaviť ako nekonečne mnoho štrbín (ktoré sa rozširujú a zužujú podľa funkcie $2\sqrt{R^2 - s^2}$, kde R je polomer daného otvoru a s vzdialenosť od stredu). V [1] je podrobne odvodené, že pokiaľ zavedieme uhol θ ako uhol medzi normálou roviny daného kruhového otvoru a lúča, dostávame pre jednotlivé minimá (čiže pre prvý, druhý a tretí tmavý krúžok na tienitku) vzťahy

$$\sin \theta_1 = 0,610 \frac{\lambda}{R}, \quad \sin \theta_2 = 1,116 \frac{\lambda}{R}, \quad \sin \theta_3 = 1,619 \frac{\lambda}{R}, \quad (2)$$

kde λ je vlnová dĺžka svetla.

4 Postup merania

Ako prvé sme rozširovali zväzok laseru, konkrétne pomocou dvoch spojok, +50 a +200. Na optickú lavicu sme umiestnili He-Ar laser a nechali sme jeho lúč dopadať na prvú spojku (+50). Do jej predmetového ohniska sme umiestnili druhú spojku (+200), pričom sme dané predmetové ohnisko hľadali len takým spôsobom, že sme druhú šošovku posúvali po optickej lavici, dokiaľ zväzok nemal dobré vlastnosti (čiže bol ostrý a bodový na tienitku, čiže na stene). Následne sme pred zväzok umiestnili kruhový otvor a optickú dráhu sme pomocou dvoch zrkadiel výrazne predĺžili. Následne sme pre tri rôzne kruhové otvory odčítavali pomocou milimetrového papiera a pravítka vzdialenosť miním od stredu.¹ Polomer daných kruhových otvorov sme taktiež odmerali aj pomocou mikroskopu s kurzorom. Následne sme na miesto kruhových otvorov umiestnili štrbinu s nastaviteľnou hrúbkou a znova sme merali vzdialenosť miním od stredu. Šírku štrbiny sme nastavovali pomocou mikrometrického šróbu, ktorý sa priamo nachádzal na danej optickej pomôcke. V ďalšej úlohe sme na miesto štrbiny použili optickú mriežku, pričom sme chceli odmerať jej mriežkovú konštantu. Pre dané meranie bolo tienidlo potrebné umiestniť oveľa bližšie, čiže sme už nepoužívali sústavu zrkadiel, ale tienidlo vo forme kartónu obaleného milimetrovým papierom sme umiestnili priamo pred mriežku.

V poslednej úlohe sme pomocou laseru, dvoch rovinných zrkadiel a Abbeho kocky, ktorá nám poslúžila ako delič zväzku, zostavili podľa Obr. 1 Michelsenov interferometer. Ako prvé sme (ešte pred umiestnením rozptylky do sústavy) nastavili, aby oba odrazené lúče smerovali do jedného bodu na tienitku (stene), následne sme celú sústavu zaaretovali.² Jedno zo zrkadiel (na Obr. 1 označené ako Z_2) malo na sebe posuvný šrób, ktorým sme ho vedeli posunúť o veľmi malé vzdialenosti Δx . Pri posúvaní daného zrkadla sa posúvali na tienitku tmavé a svetlé pružky. Pre každé meranie sme si zaznamenali vzdialenosť Δx a počet pružkov, o ktorý sa obraz posunul.

5 Namerané hodnoty

V prvej úlohe sme merali polomer kruhovej štrbiny, a to ako pomocou laseru, tak pomocou mikroskopu. Po zostavení sústavy sme si odmerali optickú dráhu, ktorá nám vyšla $d = (8,193 \pm 0,009)$ m, následne sme pre jednotlivé kruhové otvory merali vzdialenosti miním od stredu. Pomocou vzťahu 2 a pomocou toho, že uhol θ bol dostatočne malý, čiže sme mohli položiť $\sin \theta \approx \tan \theta$, pričom $\tan \theta$ udáva pomer vzdialeností miním od stredu a optickej dráhy, sme si vypočítali polomery kruhových otvorov pomocou Fraunhoferovho ohybu svetla, namerané hodnoty sa nachádzajú v Tab. 1. Rovnaké kruhové otvory sme merali aj pomocou mikroskopu, pričom sme merali ich priemer, nakoľko ten sme vedeli zistiť s väčšou presnosťou. Namerané hodnoty (po delení dvomi, aby sme dostali hodnotu polomeru) sa nachádzajú rovnako v Tab. 1.

#	R_F [mm]	R_m [mm]
1	$0,98 \pm 0,02$	$1,019 \pm 0,001$
2	$0,504 \pm 0,005$	$0,606 \pm 0,001$
3	$0,110 \pm 0,008$	$0,250 \pm 0,001$

Tab. 1: Namerané hodnoty polomerov troch rôznych kruhových otvorov, R_F udáva meranie pomocou Fraunhoferovho ohybu svetla, R_m je polomer, ktorý sme získali meraním pomocou mikroskopu.

¹Keďže stred kruhu nie je jednoduché určiť, pre väčšiu presnosť sme merali nie polomer, ale priemer danej kružnice, čiže nebolo potrebné určovať stred.

²Meranie prebiehalo na magnetickom stole, na každej súčiastke sme vedeli nastavovať jej magnetickú intenzitu.

V druhej úlohe sme merali vzdialenosť miním svetelnej intenzity po prechode svetla úzkou štrbinou, ktorej šírku sme nastavovali pomocou mikrometrického šróbu. Namerané hodnoty pomocou mikrometrického šróbu sa nachádzajú v Tab. 2. Na tienitku sme merali vzdialenosť miním od stredu, následne sme použili vzťah 1 a rovnako ako v predchádzajúcej úlohe aproximáciu $\sin \theta \approx \tan \theta$ pre malé uhly θ , pričom $\tan \theta$ je opäť pomer medzi vzdialenosťou miním od stredu a optickej dráhy (ktorá ostala nezmenená z prechádzajúcej úlohy). Takto vypočítané hodnoty sa nachádzajú rovnako v Tab. 2. Dané hodnoty sme rovnako vyniesli do grafu, ktorý sa nachádza na Obr. 2, kde je rovnako vynesená aj teoretická predpoveď, čiže funkcia $y = x$, keďže namerané a vypočítané hodnoty šírky štrbiny by sa mali (v rámci chyby) zhodovať.

D_s [μm]	D_l [μm]
500 ± 10	210 ± 12
750 ± 10	387 ± 27
1000 ± 10	557 ± 34
1250 ± 10	741 ± 61
1100 ± 10	719 ± 56
900 ± 10	529 ± 51

Tab. 2: Namerané a vypočítané hodnoty šírky štrbiny, D_s je meraná pomocou mikrometrického šróbu, D_l laserom.

V tretej úlohe sme mali odmerať mriežkovú konštantu danej optickej mriežky. Na mriežke bolo uvedené, že sa tam nachádza 600 vrypov na 1 mm, z čoho sme jednoducho vypočítali mriežkovú konštantu ako $D = 1,66 \mu\text{m}$. Optická dráha bola v danom prípade oveľa kratšia, a to $d = (145 \pm 3) \text{ mm}$. Namerali sme vzdialenosť maxím od stredu a rovnako v predchádzajúcom prípade sme ich vyhodnocovali pomocou vzťahu 1. Mriežková konštantu nám vyšla $D = (1,30 \pm 0,03) \mu\text{m}$.

V poslednej úlohe sme si zostrojili Michelsonov interferometer (nachádza sa na Obr. 1) a merali sme závislosť počtu prejdých prúžkov N (cez nejaký referenčný bod na tienitku) od Δx , čo je vzdialenosť, o ktorú sa posunulo zrkadlo Z_2 . Namerané hodnoty Δx a N sa nachádzajú v Tab. 3. Vlnovú dĺžku λ sme určili pomocou vzťahu $\lambda = \frac{2\Delta x}{N}$, konkrétne pomocou fitu v programe ROOT, pričom sa na x-ovú os nanášali hodnoty Δx a na y-ovú os N . Graf sa nachádza na Obr. 3, výslednú hodnotu vlnovej dĺžky λ určil daný program ako $\lambda = (635 \pm 8) \text{ nm}$.

Δx [nm]	N
1700	5
2800	9
3900	11
4000	13
4600	15
6400	20
8100	25
9800	30
12200	40

Tab. 3: Namerané hodnoty vzdialenosti Δx a počtu prejdých prúžkov N pri meraní pomocou Michelsonovho interferometru (na Obr. 1).

5.1 Chyby meraní

Namerané hodnoty v tomto protokole som udávala v tvare (*značka veličiny*) = $(x_0 \pm \sigma)$ (jednotka). Pri veličinách, ktoré sme merali len raz, chyba predstavuje veľkosť najmenšieho dielika stupnice. Pri opakovane meraných veličinách x_0 predstavuje vážený priemer, ktorý dosiahneme vo vzťahu

$$x_0 = \frac{\sum_{i=1}^n x_i p_i}{\sum_{i=1}^n p_i}, \quad (3)$$

kde p_i vypočítame zo vzťahu $p_i = 1/\sigma_i^2$. σ predstavuje strednú kvadratickú odchylku, ktorú získame z rovnice $\sigma = \sqrt{\frac{\sum(\Delta i)^2}{n \cdot n - 1}}$, kde $\Delta i = x_i - x_0$, x_i je nameraná hodnota pri i -tom meraní, Δi nazývame odchylka a n je celkový počet meraní. Pri hodnotách, ktoré sú závislé na viacerých veličinách sa odchylka počíta ako $\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^k \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 (\sigma_{x_i})^2}$, kde σ_{x_i} je chyba x_i -tej veličiny.

6 Diskusia

Ako prvé sme merali polomer kruhového otvoru, namerané hodnoty pre jednotlivé otvory sa nachádzajú v Tab. 1. Dané hodnoty by sa mali (v rámci chyby) zhodovať, avšak nie je tomu tak. Chyba môže byť spôsobená nielen meracími prístrojmi, ale aj ľudským faktorom, keďže bolo veľmi problematické určiť, kde presne sa nachádza dané minimum, rovnako bol problém aj odhadnúť, kde by sa mohol nachádzať stred daného kruhu (a to nie len pri meraní pomocou ohybu svetla, ale aj v mikroskope). V treťom, najmenšom otvore, je uvedená chyba najväčšia, čo bolo s najväčšou pravdepodobnosťou spôsobené nejakou nečistotou v danom otvore, nakoľko na tienitku sa neobjavovali kruhy, ale výrazné elipsy, tým pádom sa veľmi zle odhadovalo, čo mohlo byť skutočné minimum daného obrazca.³ Je ťažké rozhodnúť, ktoré z daných meraní je presnejšie, ale myslím, že čím väčší polomer daného kruhového otvoru, tým je jednoduchšie a dôveryhodnejšie merať pomocou mikroskopu.

V druhej úlohe sme merali šírku štrbiny, a to priamou metódou pomocou mikrometrického šróbu a nepriamou metódou, pomocou ohybu svetla, ktoré prešlo cez danú štrbinu konečnej šírky. Namerané hodnoty pre jednotlivé šírky sa nachádzajú na Obr. 2, ich grafické znázornenie sa nachádza na Obr. 2. Z daného grafu je jasné, že namerané a vypočítané hodnoty sa výrazne nezhodujú (danú funkciu tvaru $y = x$ by bolo potrebné posunúť o konštantu, aby nastala približná zhoda), z čoho možno dedukovať, že počas celého merania vznikala výrazná systematická chyba, ktorá ovplyvnila každý z výsledkov. Daná chyba mohla byť spôsobená napríklad meriacou aparátúrou, rovnako ako mohla byť značne ovplyvnená tým, že pri odčítaní míním nebolo možné s absolútnou presnosťou stanoviť ich polohu.

V nasledujúcej úlohe sme merali mriežkovú konštantu danej optickej mriežky. Z hodnôt uvedených priamo na mriežke nám vyšla ako $D = 1,66 \mu\text{m}$, pričom z nameraných hodnôt a pomocou výpočtov nám vyšla ako $D = (1,30 \pm 0,03) \mu\text{m}$. Naša nameraná hodnota sa ani v rámci chyby zďaleka nezhoduje s referenčnou hodnotou, na čo existuje viac vysvetlení. Ako prvé sa ponúka, čo už býva v praktiku zvykom, že nastala chyba v dôsledku nepresnosti alebo nefunkčnosti meracej aparatúry. Na druhej strane, chyba mohla nastať aj vo výpočte (a teoretickom úvode [1]), keďže bolo uvedené, že výpočet máme predvídať pre namerané maximum, avšak pri výsledku, ktorý sa takto moc odlišoval od tabuľkovej hodnoty, sme pre zaujímavosť vypočítali mriežkovú konštantu pomocou rovnakého vzťahu, do ktorého sme však dopĺňali polohy míním, a mriežková konštantu nám vyšla ako $D = (1,63 \pm 0,03) \mu\text{m}$, čo v rámci chyby presne sedí s nameranou hodnotou. Nechcem však prehlasovať, že v danom návode sú uvedené chybné vzťahy, nakoľko daná chyba mohla rovnako vzniknúť z množstva iných príčin, napr. zo spomínanej chyby meriacich prístrojov, ďalej z odčítania hodnôt, atď.

V poslednej úlohe sme zostavili Michelsonov interferometer (na Obr. 1) a merali vzdialenosť Δx , o ktorú sa posunulo zrkadlo Z_2 a počet prúžkov N , ktoré prešli pri danom posunutí cez referenčný bod. Namerané hodnoty sa nachádzajú v Tab. 3. Dané hodnoty sme taktiež vyniesli do grafu, ktorý sa nachádza na Obr. 3. Pomocou fitu daných hodnôt funkciou $y = 2x/\lambda$ sme získali vlnovú dĺžku svetla λ ako $\lambda = (635 \pm 8) \text{ nm}$, pričom na laseri bola uvedená $\lambda = 633 \text{ nm}$, čo sa v rámci chyby krásne zhoduje (napriek tomu, že s daným meraním boli isté problémy, keďže meriaca aparatúra bola veľmi citlivá na akékoľvek otrasy v miestnosti a v prípade, že napríklad na ulici prešla električka, bolo potrebné danú dvojicu Δx a N nanovo premerať).

7 Záver

Odmerali sme priemer kruhových otvorov pomocou Fraunhoferovho ohybu svetla a pomocou mikroskopu, namerané hodnoty sa nachádzajú v Tab. 1. Pokračovali sme meraním šírky štrbiny, a to pomocou mikrometric-

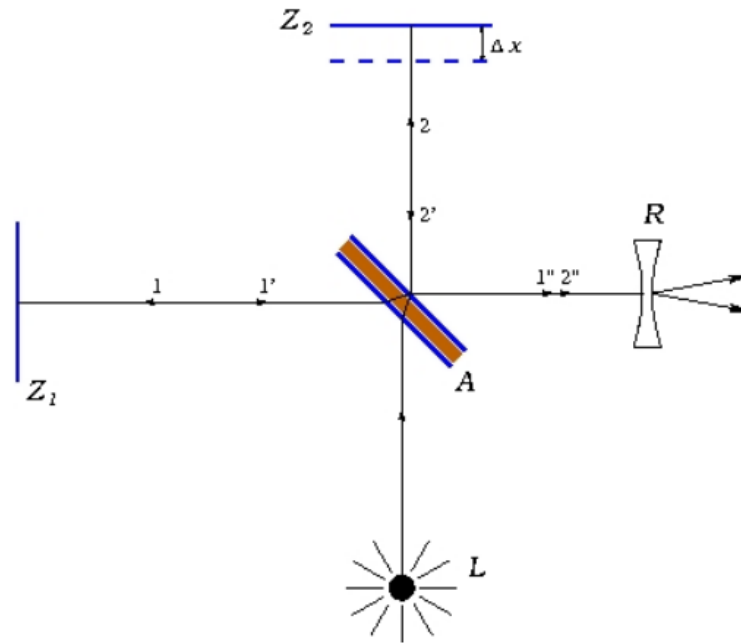
³Po čistení daného otvoru sa síce výrazne podarilo zlepšiť obraz na tienitku, avšak stále bolo voľným okom jasné, že sa nejedná o kruhy, ale o elipsy.

kého šróbu a rovnako pomocou ohybu svetla, namerané hodnoty sa nachádzajú v Tab. 2, ich grafické znázornenie sa nachádza na Obr. 2. Pokračovali sme meraním mriežkovej konštanty optickej mriežky, ktoré sme určili ako $D = (1,30 \pm 0,03) \mu\text{m}$, pričom hodnota danej konštanty (napísaná na danej pomôcke) je $D = 1,66 \mu\text{m}$. Na záver sme pomocou Michelsonovho experimentu (Obr. 1) merali vlnovú dĺžku svetla, ktorú sme pomocou fitu nameraných hodnôt (graf sa nachádza na Obr. 3) určili ako $\lambda = (635 \pm 8) \text{nm}$, pričom jej hodnota napísaná priamo na laseri je $\lambda = 633 \text{nm}$.

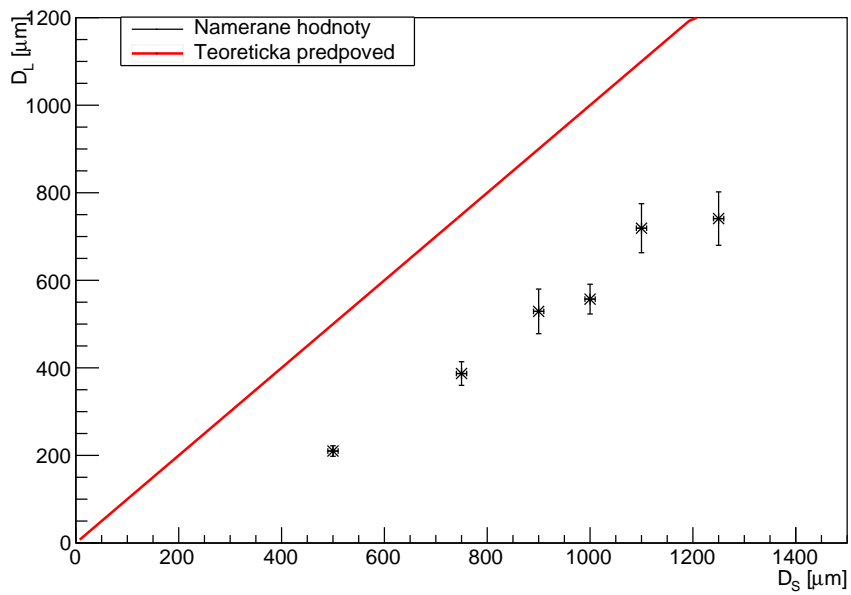
Literatúra

- [1] FJFI ČVUT: *Interference a ohyb světla* [online], [cit. 8-4-2016], dostupné z:
http://praktikum.fjfi.cvut.cz/pluginfile.php/423/mod_resource/content/7/interference_2013_04_04.pdf

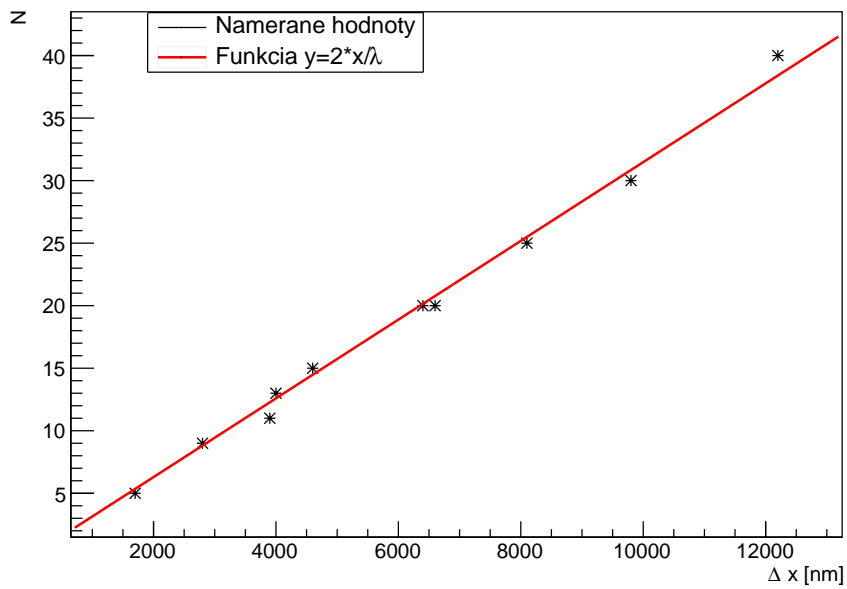
Príloha



Obr. 1: Michelsonov interferometer. Prevzaté z [1].



Obr. 2: Namerané a vypočítané hodnoty pre šírku štrbiny, teoretickú predpoveď tvorí funkcia v tvare $y = x$. D_s je meraná pomocou mikrometrickeho šróbu, D_l laserom.



Obr. 3: Namerané hodnoty vzdialenosti posunu zrkadla Δx a počtu prejdenných prúžkov N pri meraní pomocou Michelsonovho interferometru (Obr. 1).