

Fyzikální měření pro gymnasia

V. část

Optika

Fyzika mikrosvět

Gymnasium F. X. Šaldy • Honsof

Liberec 2009

ÚVODNÍ POZNÁMKA EDITORA

Obsah. Pátá, poslední část publikace *Fyzikální měření pro gymnasia* obsahuje návody k laboratorním pracím z optiky a fyziky mikrosvěta. Je určena pro laboratorní cvičení z fyziky v prvním pololetí posledního ročníku. Konkrétní výběr úloh odpovídá mj. vybavení fyzikální laboratoře Gymnasia F. X. Šaldy. Protože některé pomůcky (optické lavice, lasery, výbojky) nejsou k dispozici ve větším počtu exemplářů, věnuje se každá skupina během jednoho cvičení jiné úloze; v dalších týdnech se skupiny permutují. Aby mohla každá skupina pracovat samostatně, jsou v této brožuře shrnuty návody ke všem měřeným úlohám. Bylo by možno připojit další úlohy (např. měření refraktometrem, určení zvětšení lupy), ale vzhledem ke snížení počtu hodin fyziky a k nutnosti zařadit také cvičení teoretická, se uvedený počet laboratorních měření jeví jako dostatečný. Úlohy jsou vybrány ze tří tradičních celků gymnasiální optiky: první úloha je postavena na základních principech paprskové optiky (zákon odrazu, zákon lomu), druhá se věnuje zobrazovacím soustavám, třetí je vybrána z optiky vlnové. Při měření se užívá laser; zastoupeno je tedy i jedno téma fyziky mikrosvěta.

Uspořádání. V textech pro jednotlivé úlohy jsou uvedeny úkoly, pomůcky a postupy; kromě toho tam lze zpravidla najít i inspiraci k teoretickému úvodu, zpracování měření a závěru. Tato inspirace je někdy formou otázek; cílem však není odpovídat na otázky, nýbrž zformulovat samostatný, souvislý, smysluplný text (těmito otázkami inspirovaný). Podrobnosti o obsahu a formě referátů jsou ostatně na webu vyučujícího <http://jan.gfxs.cz/>. Nutno připomenout, že zpracování referátů o měření předložených úloh jsou nutné znalosti z první části učebního textu, zejména znalosti o stanovení chyb měření. Na tuto první část se návody k úlohám soustavně, implicitně odvolávají.

Zdroje a autoři úloh. Vzhledem k vybavení fyzikálních laboratoří nelze vymýšlet příliš „originální“ úlohy, proto i předkládané návody jsou spíše kompilací dříve vydaných učebních textů pro laboratorní měření. Bylo čerpáno z gymnaziálních učebnic i vysokoškolských skript, zejména z knihy [ŽL]; seznam literatury je uveden v závěru tohoto sešitu. Cenným zdrojem inspirace byly editorovi laboratorní úlohy zadávané jeho vyučující J. Kuglerovou.

Zpracování. Návody byly napsány v systému $\mathcal{A}\mathcal{M}\mathcal{S}$ - $\mathcal{T}\mathcal{E}\mathcal{X}$. V textu nejsou vzory tabulek a náčrty uspořádání *všech* měření; laboranti případně dostanou potřebnou informaci od vyučujícího.

INDEX LOMU SKLA

Pracovní úkol

Změřte index lomu skla pomocí a) půlkruhové skleněné desky, b) skleněné krychle (resp. kvádru).

Pomůcky

Půlkruhová skleněná deska, skleněná krychle (resp. kvádr), papírový úhloměr, špendlíky, milimetrové měřítko, posuvné měřítko, obdélníková stěna, polystyrenová podložka.

Teoretický úvod

- Pojedejte o zákonu lomu, definujte absolutní index lomu.

Pracovní postup

- (1) Půlkruhovou skleněnou desku položíme na větší papírový úhloměr tak, aby jejich středy splynuly (viz OBR. 1A z [ŽL]).
- (2) Do středu S a některého bodu A stupnice zabodneme svisle špendlíky a najdeme na stupnici takovou polohu B pro další špendlík, abychom při pohledu přes skleněnou desku viděli všechny tři špendlíky v jedné přímce.
- (3) Určíme příslušné úhly α a β (měříme je *od* kolmice!) a podle zákona lomu vypočteme n . Měření v dané poloze opakujeme pětkrát; krajní chybu určíme jako chybu opakovaných měření.¹⁾
- (4) Měření popsané v bodech (2)–(3) opakujeme pro tři různé polohy bodů A , B .
- (5) Na horní stěnu skleněné krychle (resp. kvádru) o hraně 4 cm až 8 cm přilepíme papírovou milimetrovou stupnici; před těleso umístíme svislou obdélníkovou stěnu výšky h tak, aby byla kolmá k hraně s milimetrovou stupnicí (viz OBR. 1B z [ŽL]).
- (6) Díváme-li se přes horní okraj stěny na vzdálenější spodní hranu krychle, promítne se tato hrana na horní stěnu krychle do vzdálenosti i od zadní stěny. Je-li d vzdálenost plechové stěny od zadní stěny krychle, platí pro úhly α , resp. β :

$$\sin \alpha = \frac{d - i}{\sqrt{(h - a)^2 + (d - i)^2}}, \quad \sin \beta = \frac{i}{\sqrt{a^2 + i^2}}. \quad (1)$$

- (7) Index lomu n spočítáme dle vztahu

$$n = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{(d - i)\sqrt{a^2 + i^2}}{i\sqrt{(h - a)^2 + (d - i)^2}}. \quad (2)$$

- (8) Měření v dané poloze opakujeme pětkrát; krajní chybu určíme jako chybu opakovaných měření.
- (9) Měření popsané v bodech (5)–(8) opakujeme pro tři různé polohy krychle vzhledem ke stěně.

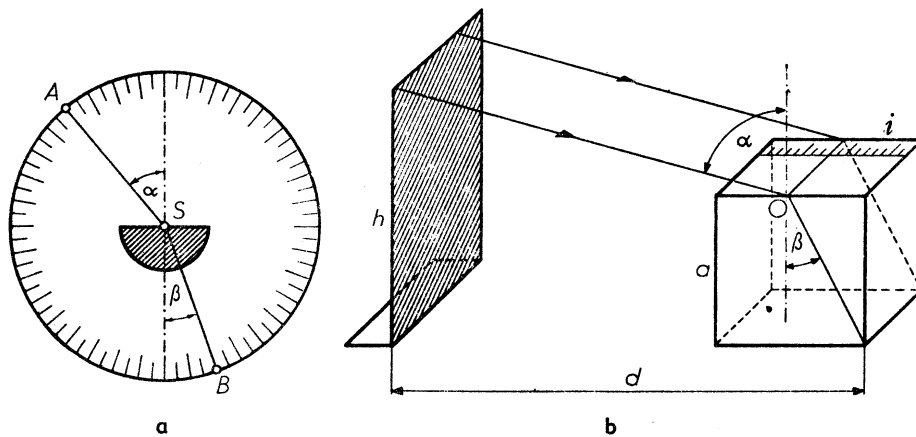
¹⁾ Tento postup není zcela korektní; správnější by bylo opakovaně měřit úhly, stanovit jejich krajní chybu (chybu opakovaného měření, chybu měřidla) a z těchto výsledků určit krajní chybu indexu lomu jako chybu nepřímého měření. Popsaný postup však nelze v gymnasiu realizovat, neboť „neumíme“ spočítat chybu výrazu typu $\sin \alpha$.

Zpracování výsledků měření

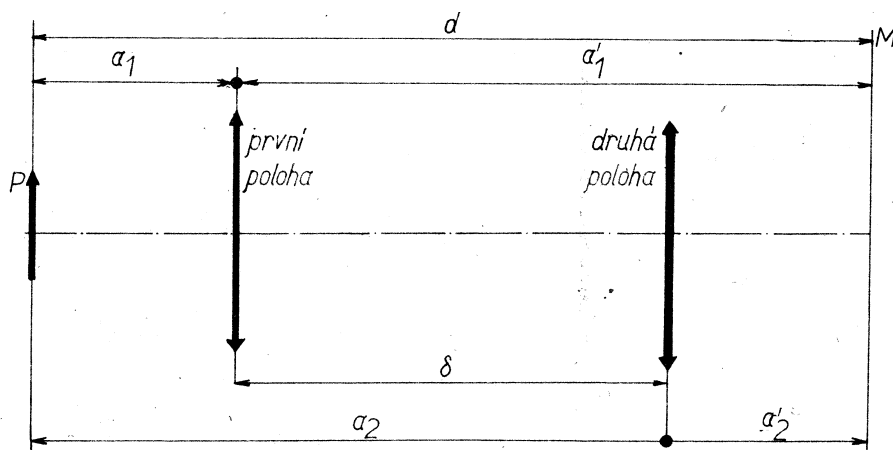
- Pro každou metodu: tři tabulky pro trojí měření za různých podmínek; každá obsahuje pět opakovaných měření potřebných veličin (s výpočtem chyby opakovaných měření).
- Šesterý výpočet n pro tři různé polohy v obou metodách včetně výpočtu krajní chyby.

Náměty pro závěr

- Porovnání měření oběma metodami, diskuse o chybě měření.



OBR. 1



OBR. 2

OHNISKOVÁ VZDÁLENOST ČOČKY

Pracovní úkol

Změřte ohniskovou vzdálenost spojky a) Besselovou, b) Abbeovou metodou

Pomůcky

Optická lavice, spojná čočka, světelný zdroj, předmět, stínítko, milimetrové měřítko.

Teoretický úvod

Poloha obrazu a předmětu při zobrazení tenkou spojnou čočkou je dána zobrazovací rovnicí, která má (s užitím obvyklé znaménkové konvence) tvar

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{a'} = \frac{1}{f}. \quad (3)$$

Podíl

$$\varphi := \frac{1}{f} \quad (4)$$

definuje **optickou mohutnost čočky**. Jednotkou je dioptrie (D).

Z rovnice (3) plyne pro ohniskovou vzdálenost tenké čočky

$$f = \frac{a \cdot a'}{a + a'}. \quad (5)$$

Je-li velikost předmětu y a obrazu y' , odvodí se (viz např. [OP]) z podobnosti trojúhelníků pro příčné zvětšení vztah

$$Z = \frac{y'}{y} = -\frac{a'}{a} = \frac{f - a'}{f}, \quad (6)$$

a tedy

$$f = \frac{a'}{1 - Z}. \quad (7)$$

Potíže s přesným měřením vzdáleností a a a' odstraňuje **Besselova metoda**. Nemění-li se vzdálenost d předmětu od stínítka, pro $d > 4f$ existují dvě polohy čočky vzdálené δ , při kterých se předmět zobrazí na stínítku ostře (jeden obraz je zvětšený, druhý zmenšený – viz OBR. 2). Vzdálenost d je možno vyjádřit jako lineární kombinace vzdáleností předmětu a obrazu v obou polohách; uváží-li se dále, že $a_1 = -a'_2$ a $\delta = a_2 - a_1$, vychází

$$f = \frac{d^2 - \delta^2}{4d}. \quad (8)$$

S velikostí předmětu a obrazu pracuje **metoda Abbeova**. Při určitých pevných polohách předmětu P a stínítka S najdeme takovou polohu čočky, aby na S vznikl zvětšený ostrý obraz předmětu. Pak změříme velikost y předmětu a y' obrazu a určíme zvětšení $Z = y'/y$. Při nezměněné poloze čočky přiblížíme stínítko k čočce o délku l do polohy S_1 a vyhledáme takovou polohu předmětu P_1 , aby opět vznikl ostrý zvětšený obraz, jehož velikost y'_1 odečteme; stanovíme pak nové zvětšení Z_1 . Z čočkové rovnice obdržíme:

$$f = \frac{l}{Z - Z_1}. \quad (9)$$

- Odvodte podrobně vztahy (8) a (9).

Pracovní postup

- (1) Na jeden konec optické lavice umístíme předmět (tenký plech s vyříznutým obrazcem) a osvětlíme světelným zdrojem. Na lavici se dále umístí držák se spojnou čočkou. Obraz se vytvoří na stínítku, které je umístěno ve vzdálenosti d od předmětu; tuto vzdálenost zvolíme pevně, pětkrát změříme a stanovíme chybu měření (chyba měřidla, chyba opakovaných měření). (Vzdálenost d zvolíme tak, aby byla větší než čtyřnásobek předpokládané ohniskové vzdálenosti.)
- (2) Posouváním čočky vytvoříme na stínítku ostrý obraz. Zaznamenáme předmětovou vzdálenost a_1 . Čočku nyní posuneme na opačnou stranu od středu vzdálenosti mezi předmětem a stínítkem, nový obraz zaostříme a změříme novou vzdálenost předmětu a_2 . Rozdíl těchto vzdáleností je roven δ . Vyhledání obou poloh provedeme pětkrát, stanovíme krajní chyby veličin a_1 , resp. a_2 (chyba měřidla, chyba opakovaných měření). Krajní chybu δ vypočteme jako chybu nepřímého měření.
- (3) Podle vzorce (8) vypočteme f ; stanovíme krajní chybu jako chybu nepřímého měření.
- (4) Body (1)–(3) postupu opakujeme *ještě pro jednu jinou* hodnotu d ; oba výsledky porovnáme.
- (5) Na optickou lavici upevníme zdroj, předmět a stínítko; najdeme takovou polohu čočky, aby vznikl zvětšený ostrý obraz předmětu.
- (6) Stanovíme zvětšení Z .
- (7) Stínítko přiblížíme k čočce o zvolenou hodnotu l , vyhledáme takovou polohu předmětu, aby opět vznikl ostrý zvětšený obraz, analogicky dle vztahu (6) určíme zvětšení Z_1 . Ze vztahu (9) určíme f .
- (8) Měření opakujeme pro pět různých vzdáleností l ; vždy vypočteme příslušné f .
- (9) Spočteme průměrnou hodnotu f z pěti měření; chybu měření nebudeme vyhodnocovat.

Zpracování výsledků měření

- Tabulky pro jednotlivá měření. Náčrty uspořádání měření oběma metodami.
- Dva výpočty f (včetně krajní chyby) pro měření Besselovou metodou. Jeden výpočet průměrné hodnoty f pro měření Abbeovou metodou (bez chyby měření).

Náměty pro závěr

- Jaké nepřesnosti, zanedbání apod. ovlivňují výsledek měření? Jak by bylo možno měření zpřesnit, vylepšit?
- Pokuste se navrhnout ještě jinou metodu měření f . Jak by se postupovalo v případě rozptylky, která vytváří zdánlivý obraz?

OPTICKÁ MŘÍŽKA

Pracovní úkol

a) Určete mřížkovou konstantu dodané optické mřížky. b) Určete vlnovou délku laserového ukazovátka.

Pomůcky

Rtuťová výbojka, optická mřížka, tyčová měřítka, laserové ukazovátka, CD, stojany, černé papíry.

Teoretický úvod

Optická mřížka je soustava rovnoběžných štěrbin, oddělených neprůhlednými pruhy. Mřížky se zhotovují rytím rovnoběžných vrypů do povrchu skleněné desky nebo do kovové vrstvy napařené na desku. (Lze je také vyrobit fotografickou cestou.) Světlo může deskou procházet pouze v místech, která nejsou porušena vrypem. Rovinnou mřížku pak tvoří řada štěrbin, přičemž šířku štěrbin a vrypu udává **mřížková konstanta** (perioda mřížky) b .

Dopadá-li světlo kolmo na optickou mřížku, dochází k jeho ohybu a interferenci tak, že na stínítku lze pozorovat maxima ve směrech určených úhly α , pro které platí vztah

$$b \sin \alpha = k \lambda, \quad (11)$$

kde λ je vlnová délka monochromatického světla a $k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ je **řád maxima**. Ve středu osvětleného pole je pruh odpovídající maximu nultého řádu ($k = 0$), od něho symetricky na obě strany jsou úzké spektrální čáry odpovídající $k = 1, 2, 3, \dots$. Označí-li se vzdálenost čar stejného řádu od osy aparatury y_+ a y_- , vzdálenost mřížky od stínítka x , potom úhel α ve vztahu (11) lze určit z rovnosti

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{y}{x} = \frac{y_+ + y_-}{2x}; \quad (12)$$

y jsme určili jako průměrnou hodnotu z y_+ a y_- , tedy $y = (y_+ + y_-)/2$. Potřebný $\sin \alpha$ je možno vyjádřit také přímo:

$$\sin \alpha = \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2}} = \frac{1}{\sqrt{\frac{x^2}{y^2} + 1}}. \quad (13)$$

Znalost mřížkové konstanty b a určení úhlu α umožňuje stanovit vlnovou délku spektrální čáry, nebo naopak: z údaje vlnové délky *jisté* čáry a úhlu α lze vypočítat b . Ze vztahů (11) a (13) dostáváme (pro $k = 1$) užitečný vztah

$$\lambda = \frac{b}{\sqrt{\frac{x^2}{y^2} + 1}}. \quad (14)$$

Záznam zvuku nebo počítačového souboru na **kompaktním disku** (CD audio, popř. CD ROM) má podobu mikroskopických prohlubní různé délky (tzv. pitů), jejichž posloupnost nese informaci. Pity jsou v drážkách stejné šířky, které na zrcadlovém povrchu disku vytvářejí v podstatě optickou mřížku na odraz. Na 1 mm šířky záznamu připadá 625 drážek. To znamená, že kompaktní disk má vlastnosti optické mřížky s mřížkovou konstantou $b = 1/625 \text{ mm} = 1,6 \cdot 10^{-6} \text{ m}$.

Pracovní postup

- (1) Mřížku prosvítíme úzkým svazkem paprsků známé vlnové délky (rtuťovou výbojkou) a na stínítku pozorujeme maxima.
- (2) Změříme vzdálenost stínítka a mřížky x .
- (3) Desetkrát měříme vzdálenost $y_+ + y_-$ 1., resp. 2. maxim. Pro obě maxima spočítáme průměrnou hodnotu y této vzdálenosti a dle vztahu (12) určíme úhel α .
- (4) Ze vztahu (11) vypočteme mřížkovou konstantu b . Chybu měření nebudeme stanovovat.
- (5) Body (1)–(4) postupu opakujeme pro dvě různé vzdálenosti mřížky od stínítka.
- (6) Kompaktní disk upevníme (užitím držáku) do svislé polohy a zhruba ve vzdálenosti 10 cm umístíme tuhý bílý papír s otvorem, jehož průměr odpovídá průměru laserového ukazovátka. Výška otvoru nad plochou stolu je 6 cm (poloměr kompaktního disku). Laserové ukazovátka upevníme vodorovně do stojanu rovněž ve vzdálenosti 6 cm od plochy stolu a vsuneme ho do otvoru v papíru. Laserový paprsek namíříme přibližně do středu záznamu na disku.
- (7) Desetkrát změříme vzdálenost x stínítka (tedy papíru s otvorem) a CD; stanovíme krajní chybu měření (chyba opakovaných měření, chyba měřidla).
- (8) Rozsvítíme ukazovátka. Na papíru pozorujeme jednak výraznou stopu paprsku odraženého od povrchu disku (difrakční maximum 0. řádu; při přesném seřízení stopa dopadne zpět na ukazovátka a není vidět), jednak po obou stranách méně výrazná difrakční maxima 1. a 2. řádu. Desetkrát změříme vzdálenost $y_+ + y_-$ maxim 1. řádu; spočteme $y = (y_+ + y_-)/2$; stanovíme krajní chybu tohoto měření. Podobně postupujeme pro maxima 2. řádu.
- (9) Hodnotu λ vypočteme podle (14); stanovíme krajní chybu jako chybu nepřímého měření (přitom chyba b , tj. chyba vzniklá při výrobě CD, je vzhledem k chybám ostatních měřených veličin zanedbatelná).

Zpracování výsledků měření

- Dvě dvojice tabulek (dvě měření, dvojí maxima) obsahující výsledky měření $y_+ + y_-$.
- Čtyři výpočty průměrných hodnot $y_+ + y_-$, čtyři výpočty mřížkových konstant.
- Porovnání jednotlivých výsledků, diskuse; průměrná hodnota b ze všech měření.
- Tabulka pro 10 měření vzdálenosti CD a stínítka. Tabulka pro dvakrát 10 měření $y_+ + y_-$ pomocí CD (maxima 1. řádu, maxima 2. řádu).
- Výpočet λ laserového ukazovátka včetně výpočtu chyby měření.
- Nákresy uspořádání.

Náměty pro závěr

- Porovnání naměřených údajů s údaji uvedenými na mřížce, resp. laserovém ukazovátku.
- Jaké nepřesnosti, zanedbání apod. ovlivňují výsledek měření?
- Jak by bylo možno měření zpřesnit, vylepšit?

LITERATURA

- [Bro83] Brož, J. a kol.: Základy fyzikálních měření I. 1. vyd. Praha: SPN, 1983.
- [Mád91] Mádr, V. – Knejzlík, J. – Kopečný, J. – Novotný, I.: Fyzikální měření. 1. vyd. Praha: SNTL, 1991.
- [ČMB] Čmelík, M. – Machonský, L. – Burianová, L.: Úvod do fyzikálních měření. 1. vyd. Liberec: TUL, 1999.
- [Kaz76] Kazda, V. – Soška, F.: Laboratorní cvičení z fyziky. 1. vyd. Liberec: VŠST, 1976.
- [Čme85] Čmelík, M. – Machonský, L.: Fyzikální laboratoře. 1. vyd. Liberec: VŠST, 1985.
- [ŽL] Živný, F. – Lepil, O.: Praktická cvičení z fyziky. 7. vyd. Praha: SPN, 1977.
- [Vyb02] Vybíral, B.: Zpracování dat fyzikálních měření. 1. vyd. Hradec Králové: MAFY, 2002.
- [OP] Lepil, O.: Fyzika pro gymnázia: Optika. 3. vyd. Praha: Prometheus, 2002.
- [Hor61] Horák, Z. – Krupka, F. – Šindelář, V.: Technická fyzika. 3. vyd. Praha: SNTL, 1961.
- [VSF] Výkladový slovník fyziky pro základní vysokoškolský kurz. 1. vyd. Praha: Prometheus, 2001.
- [SŠF] Slovník školské fyziky. 1. vyd. Praha: SPN, 1988.

Kolektiv autorů

Fysikální měření pro gymnasia

V. část – Optika, Fysika mikrosvěta

Uspořádal Jan Voženílek

Sazbu v systému $\mathcal{A}\mathcal{M}\mathcal{S}$ - $\mathcal{T}\mathcal{E}\mathcal{X}$ připravil Honsoft

Vydáno pro Gymnasium F. X. Šaldy v Liberci
v roce 2009

Vydání 4., upravené

2008 – 4.0 – 091001
