

UNIVERZITA KARLOVA

ZÁKLADNÍ FYZIKÁLNÍ PRAKTIKUM

FYZIKÁLNÍ PRAKTIKUM III.  
PRO OBOR OBECNÁ FYZIKA

---

## **VII. Overenie Fresnelových vzorcov**

---

*Autor:*  
Samuel Kočiščák

13. oktobra 2017

## 1 Pracovné úlohy

1. Nájdeite smer ľahkého priechodu polarizátora používaného v aparátúre.
2. Overte, že zdroj svetla je polarizovaný kolmo k vodorovnej rovine.
3. Na priložených vzorkách premerajte závislosť intenzity odrazeného svetla na uhle dopadu pre TE aj TM polarizáciu.
4. Namerané výsledky porovnajte s teoretickými prebehmi závislostí.
5. Určite indexy lomu meraných vzoriek a ich relatívnu chybu.

## 2 Teoretická časť

### 2.1 Lineárny polarizátor

Prvok, ktorý prepúšťa iba svetlo jednej lineárnej polarizácie nazývame *lineárnym polarizátorom*. Ak je svetlo polarizované lineárne pod uhlom, pod ktorým ho lineárny polarizátor najľahšie prepúšťa, hovoríme, že svetlo je polarizované v smere ľahkého priechodu polarizátora. Ak svetlo alebo lineárny polarizátor otočíme o štvrt otáčky (alebo nepárny násobok štvrtotáčky), bude polarizácia svetla kolmá na smer ľahkého priechodu a polarizátor nebude prepúšťať žiadne svetlo (to len v ideálnom prípade, reálny lineárny polarizátor v reálnom experimente bude pod týmto uhlom prepúšťať najmenej svetla).

### 2.2 Štvrtvlnová doštička

*Štvrtvlnová doštička* je polarizátor z dvojlomného materiálu, ktorej hrúbka je (s ohľadom na vlnovú dĺžku použitého svetla) nastavená tak, že vhodnou retardáciou jednej zložky svetla zmení charakter polarizácie – z lineárne polarizovaného svetla robí svetlo s kruhovou polarizáciou a naopak. Vhodným použitím dvoch štvrtvlnových doštičiek možno docieľiť preklopenie roviny pôvodne lineárne polarizovaného svetla o ľubovoľný uhol.

### 2.3 Odraz a priechod rozhraním

Pri dopade svetla na povrch skla sa časť svetla odrazí a časť prestúpi do skla. Označme elektrickú amplitúdu dopadajúcej vlny  $E_i$  a elektrickú amplitúdu odrazenej vlny  $E_t$ . Skúmame zvlášť zložku dopadajúceho svetla s polarizáciou (elektrickej zložky) kolmou na rovinu dopadu (rovinu definovanú vlnovým vektorom dopadajúceho a odrazeného svetla) a označme ju  $E_i^s$ , zložku amplitúdy s polarizáciou ležiacou v tejto rovine  $E_i^p$ . Podobne pre odrazené svetlo: značme kolmú zložku amplitúdy  $E_t^s$  a rovnobežnú zložku amplitúdy  $E_t^p$ . Namiesto označenia *s* a *p* (z nem. *sankrecht* resp. *parallel*) niekedy používame referencie *TE* (*transverzálne elektrická*) pre *s* resp. *TM* (*transverzálne magnetická*) pre *p* polarizáciu.

Pre závislosť pomeru amplitúd od uhla dopadajúceho svetla  $\theta_i$  (meraného od kolmice), uhol prechádzajúceho svetla  $\theta_t$ , indexu lomu prostredia z ktorého lúč dopadá na rozhranie  $n_i$  (typicky vzduch, teda  $n_i = 1$ ) a indexu lomu prostredia na opačnej strane rozhrania  $n_t$  (index lomu skla) možno podľa [Op] odvodiť vzťahy

$$r_s := \frac{E_r^s}{E_i^s} = \frac{n_i \cos \theta_i - n_t \cos \theta_t}{n_i \cos \theta_i + n_t \cos \theta_t} \quad (1)$$

a

$$r_p := \frac{E_r^p}{E_i^p} = \frac{n_t \cos \theta_i - n_i \cos \theta_t}{n_t \cos \theta_i + n_i \cos \theta_t}, \quad (2)$$

kde  $r_s$  resp.  $r_p$  nazývame amplitúdovými koeficientmi odrazivosti pre jednotlivé polarizácie. Podľa známeho Snellohvo zákona, taktiež odvodeného v [Op], platí vzťah

$$n_i \sin \theta_i = n_t \sin \theta_t \Leftrightarrow \sin \theta_t = \frac{n_i}{n_t} \sin \theta_i \Rightarrow \cos \theta_t = \sqrt{1 - \frac{n_i^2}{n_t^2} \sin^2 \theta_i}, \quad (3)$$

ktorého použitím možno vzťahy 1 resp. 2 preformulovať do podoby vzťahov

$$r_s := \frac{E_r^s}{E_i^s} = \frac{n_i \cos \theta_i - n_t \sqrt{1 - \frac{n_i^2}{n_t^2} \sin^2 \theta_i}}{n_i \cos \theta_i + n_t \sqrt{1 - \frac{n_i^2}{n_t^2} \sin^2 \theta_i}} = \frac{n_i \cos \theta_i - \sqrt{n_t^2 - n_i^2 \sin^2 \theta_i}}{n_i \cos \theta_i + \sqrt{n_t^2 - n_i^2 \sin^2 \theta_i}} \quad (4)$$

resp.

$$r_p := \frac{E_r^p}{E_i^p} = \frac{n_t \cos \theta_i - n_i \sqrt{1 - \frac{n_i^2}{n_t^2} \sin^2 \theta_i}}{n_t \cos \theta_i + n_i \sqrt{1 - \frac{n_i^2}{n_t^2} \sin^2 \theta_i}}, \quad (5)$$

ktoré nám udávajú teoretickú podobu závislosti  $r_s$  resp.  $r_p$  na uhle  $\theta_i$ . Pre experiment vo vzduchu, pri ktorom vieme určiť iba veľkosť amplitúdy platia potom zjednodušené vzťahy 4 a 5:

$$|r_s| = \frac{\left| \cos \theta_i - \sqrt{n_t^2 - \sin^2 \theta_i} \right|}{\cos \theta_i + \sqrt{n_t^2 - \sin^2 \theta_i}} \quad (6)$$

resp.

$$|r_p| = \frac{\left| n_t \cos \theta_i - \sqrt{1 - \frac{1}{n_t^2} \sin^2 \theta_i} \right|}{n_t \cos \theta_i + \sqrt{1 - \frac{1}{n_t^2} \sin^2 \theta_i}}, \quad (7)$$

ktoré budeme ďalej využívať.

## 2.4 Detekcia reflexivity

Ak meriame napätie  $U$  na fotodióde osvetlenej lúčom odrazeného svetla, tak pre (sugestívne označenú) relatívnu intenzitu  $R$  tohto svetla platí (pri predpoklade linearity fotodiódy) vzťah

$$R = \frac{U}{U_0}, \quad (8)$$

kde  $U_0$  je napätie na fotodióde namerané pre osvetlenie neodrazeným lúčom ( $E_i$ ). Táto relatívna intenzita  $R$  je zároveň tzv. *intenzitným koeficientom odrazivosti*. Medzi amplitúdovým koeficientom odrazivosti  $r$  a intenzitným koeficientom odrazivosti  $R$  (pre ten istý experiment) platí vzťah

$$R = |r|^2 \Leftrightarrow |r| = \sqrt{R}, \quad (9)$$

z čoho vyplýva platnosť vzťahu

$$|r| = \sqrt{\frac{U}{U_0}}, \quad (10)$$

pomocou ktorého možno za známej hodnoty ( $U_0$ ) a známej závislosti  $U = f(\theta)$  určiť zvislosť  $r = f(\theta)$ .

## 3 Výsledky merania

Meranie prebehlo v priestoroch základného fyzikálneho praktika, pri (premenlivej) izbovej teplote (odmeraná  $t = 24,6^\circ\text{C}$ ) a (premenlivom) normálnom tlaku (odmeraný  $p = 995,8\text{ hPa}$ ). Výsledky merania sú spracúvané za predpokladu, že index lomu vzduchu je rovný indexu lomu vákua, teda  $n_i = 1$ , teda naše výsledky nezávisia na teplote ani tlaku.

Ako zdroj svetla sme použili HeNe laser s vlnovou dĺžkou stimulovanej emisie  $632,8\text{ nm}$ , všetky naše výsledky (najmä týkajúce sa indexu lomu použitého skla) teda platia pre túto vlnovú dĺžku.

### 3.1 Určenie smeru ľahkého priechodu svetla polarizátorom

Smer ľahkého priechodu lineárnym polarizátorom sme určili iba približne, polarizátor bol osadený v štvorcovom ráme, v ktorom ho bolo možné nastavovacou šrúbou otáčať. Bol taktiež vybavený mierkou udávajúcou orientáciu polarizátora voči rámu. Cez polarizátor položený na (približne pravouhlej) papierovej krabici sme pozorovali odraz svetla žiarovky od (vodorovne orientovanej) sklenenej tabličky (s uhlom medzi polarizátorom a doštičkou približne rovným Brewsterovmu uhlu) a určili sme orientáciu polarizátora, v ktorej prepúšťal najmenej odrazeného svetla žiarovky (pri orientácii rámu kolmej (otočenej o  $90^\circ$ ) oproti polohe, v ktorej sa pripevňuje do sústavy lasera a goniometra) na  $160^\circ$  (a samozrejme aj  $340^\circ$ ). Presnosť určenia tohto uhla odhadujeme s prihliadnutím na opakované pokusy o jeho určenie, ktorých výsledky boli veľmi konzistentné, na  $2^\circ$ . Podobnú nepresnosť môže mať aj papierová krabica,

na ktorej polarizátor pri tomto meraní stál, teda za smer ľahkého priechodu polarizátorom považujeme  $70(4)^\circ$ . Toto číslo sedí so smerom ľahkého priechodu určeným hľadáním maxima prepusteného od horizontálneho povrchu odrazeného svetla, avšak keďže v okolí smeru ľahkého priechodu svetla polarizátorom sa funkcia prepustenej intenzity na uhle správa ako  $\cos x$  v okolí 0 (teda do prvého rádu konštantne), toto meranie malo oveľa väčšiu chybu ako hľadanie minima, preto sa budeme riadiť výsledkom získaným hľadáním minima a nie maxima prepustenej intenzity.

### 3.2 Overenie vertikálnej polarizácie lasera a horizontálna polarizácia lasera

Polarizáciu lasera sme overili sústavou lasera a goniometra popísanou v [Pm] (bez štvrtvlnových doštičiek) s goniometrom nastaveným na uhol dopadu  $90^\circ$  bez meraného sklíčka, teda na priamy prechod lúča aparátúrou. Fotodiódou sme snímali intenzitu dopadajúceho lúča (v arbitrárnych jednotkách) a zmenou orientácie polarizátora sme hľadali minimum priepustnosti (opäť kvôli vyššej presnosti oproti hľadaniu maxima) a určili ho na  $160(2)^\circ$ , kde chyba  $2^\circ$  je opäť odhadnutá len na základe opakovaných pokusov o určenie a ako interval, do ktorého sa určíte každé meranie trafí. Lúč lasera bol teda s neistotou približne  $5^\circ$  polarizovaný kolmo na podložku.

Aby sme dosiahli horizontálnu polarizáciu lasera, použili sme sústavu 2 štvrtvlnových doštičiek, obe sme umiestnili pred lineárny polarizátor. Jedna polarizovala svetlo lasera kruhovo, zmenou orientácie druhej sme potom mohli nastaviť sklon roviny polarizácie svetla na ľubovoľnú hodnotu. Tú sme nastavili tak, že pri pre nemeňte nastavený lineárny polarizátor, pôvodne nastavený v smere ľahkého priechodu (vertikálne) sme menili orientáciu druhej štvrtvlnovej doštičky nájst minimum prepustenej svetla. Vtedy bolo svetlo dopadajúce na lineárny polarizátor polarizované kolmo na smer ľahkého priechodu. Potom sme zafixovali orientáciu štvrtvlnových doštičiek a otočili sme o  $90^\circ$  lineárny polarizátor, čím sme vo výsledku dostali intenzívny horizontálne polarizovaný lúč svetla.

Najprv sme merali obe sklíčka vertikálne polarizovaným svetlom (vzhľadom na sklenenú doštičku *s*-polarizovaným), potom sme zmenili polarizáciu svetla a merali opäť obe sklíčka horizontálne polarizovaným svetlom (vzhľadom na sklenenú doštičku *p*-polarizovaným).

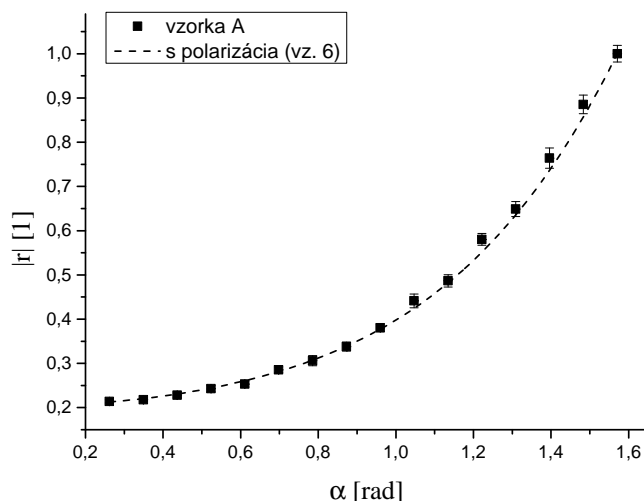
### 3.3 Meranie závislosti odrazivosti na uhle dopadajúceho svetla

Meranie sme realizovali taktiež v usporiadaní popísanom v [Pm], pre 2 rôzne sklíčka, obe hrúbky približne 1 mm, jedno s uvádzaným indexom lomu  $n = 1,509$  (značme ho *sklíčko A*), druhé s uvádzaným indexom lomu  $n = 1,516$  (značme ho *sklíčko B*).

Pred meraním sme laser nechali asi 20 minút svietiť, aby sa výkon podľa možnosti čo najlepšie ustálil. Aparatúra bola vybavená rotujúcim tienidlom s pravidelnými výrezmi v ceste lúča, čo umožnilo analyzovať výkon signálu tejto rotáciou tienidla danej frekvencie a nebrať do úvahy šum. Meracia elektronika fotodiódy mala digitálny displej so 4 číslicami, udával kladné hodnoty do 2000 arb u. Tienidlom a zosilnením sme nastavili intenzitu vstupu tak, aby mal priamy laserový lúč intenzitu okolo  $I = 1900$  arb u. Signál bol aj po tom, ako laser 20 minút svietil veľmi kolísavý,

interval v ktorom sa hodnota pohybovala je zohľadnený v nepresnosti jednotlivých nameraných bodov (v prílohe). Po úplnom zaclonení laserového lúča udával merací prístroj intenzitu približne  $I = 11$  arb u, to prisudzujeme nedokonalkej filtrácii signálu - šumu od okolia. To je teda hodnota, pod ktorú signál neklesne ani pri nulovom odraze.

Dáta z prílohy sú nanormované na  $R = 1 \Leftrightarrow I = I(\theta = 0)$ , kde  $\theta$  je uhol medzi sklenenou doštičkou a dopadajúcim lúčom, meraný od doštičky (prenášame relatívnu chybu). Tieto dáta  $R = f(\theta)$  je možné ľahko previesť na závislosť na uhle  $\alpha$  dopadajúceho lúča meranom od kolmice, pretože  $R(\pi/2 - \theta) = R(\alpha)$ . Táto závislosť  $R(\alpha)$  možno jednoduchým použitím vzťahu 9 previesť na závislosť  $|r|(\alpha)$  a následne fitovať teoretickou závislosťou (vzťah 6 alebo vzťah 7, podľa polarizácie svetla). Výsledky všetkých 4 meraní možno vidieť v grafoch na obrázkoch 1, 2, 3 a 4.

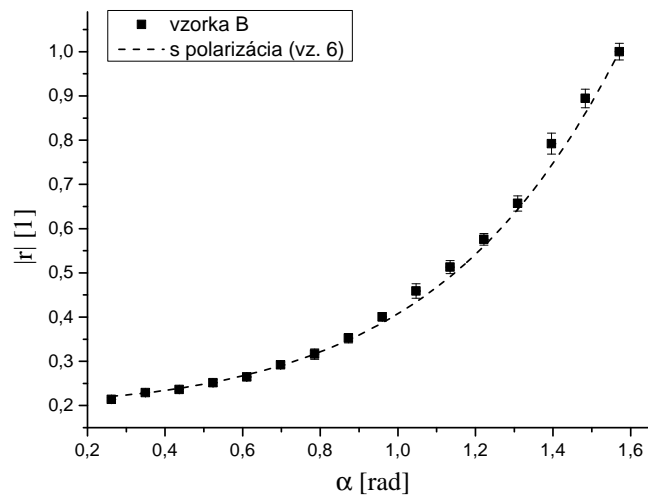


Obr. 1: Graf závislosti  $|r| = f(\alpha)$  pre vzorku A pri s-polarizácii dopadajúceho svetla

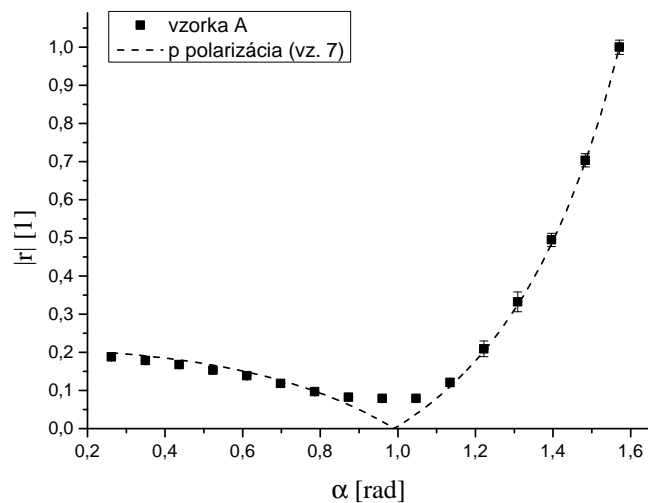
Jediným voľným parametrom fitov vzťahmi 6 a 7 je index lomu sklenenej doštičky  $n_t$ . Jeho fitovaním určené hodnoty sú aj s chybou určenia zapísané v tabuľke 1.

Tabuľka 1: Fitovaním určené hodnoty indexu lomu  $n_t$  skla použitých doštičiek

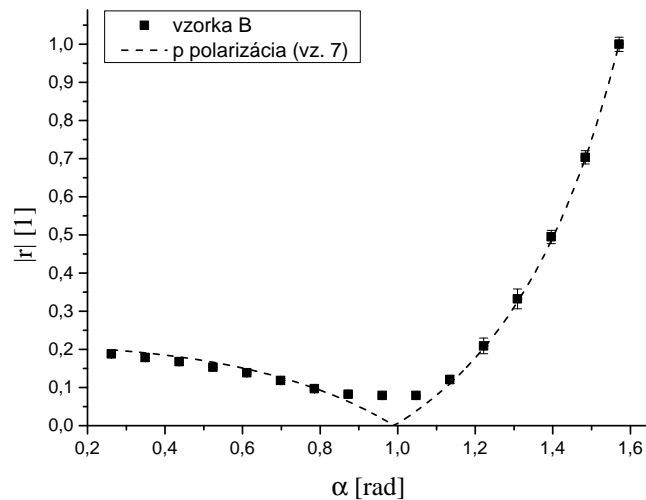
	$n_t$ [1]	$\sigma_{n_t}$ [1]	relat. $\sigma_{n_t}/n_t$ [%]	udávaná $n_t$ [1]
s-polarizácia sklíčko A	1,511	0,005	0,3	1,509
s-polarizácia sklíčko B	1,535	0,006	0,4	1,516
p-polarizácia sklíčko A	1,53	0,03	2	1,509
p-polarizácia sklíčko B	1,53	0,03	2	1,516



Obr. 2: Graf závislosti  $|r| = f(\alpha)$  pre vzorku B pri s-polarizácii dopadajúceho svetla



Obr. 3: Graf závislosti  $|r| = f(\alpha)$  pre vzorku A pri p-polarizácii dopadajúceho svetla

Obr. 4: Graf závislosti  $|r| = f(\alpha)$  pre vzorku  $B$  pri  $p$ -polarizácii dopadajúceho svetla

## 4 Diskusia výsledkov

Aj napriek tomu, že sme polarizačný filter nenastavili presne do smeru ľahkého priechodu, on vo výsledku prepustil len svetlo lineárnej polarizácie v jeho smere. Merali sme teda s lineárne polarizovaným svetlom, aj keď nevieme presne zaručiť, že bolo polarizované presne vertikálne.

Pre  $\alpha \rightarrow 0$  predpokladáme, že sa hodnoty  $r$  budú zhodovať pre obe polarizácie, keďže pre kolmý dopad svetla na doštičku nemožno dobre definovať orientáciu roviny polarizácie. Aj napriek tomu, že sa nám nepodarilo premerať závislosť až po  $\alpha = 0$  (kvôli usporiadaniu aparatury, fotodióda nemôže byť na rovnakom ieste ako laser) vidno, že pre najmenšie hodnoty  $\alpha$  sa hodnoty  $r$  v grafoch 1 a 3 resp. 2 a 4 blížia rovnakej hodnote.

Ako z výsledkov v tabuľke 1 vidno, určenie indexu lomu z odrazu  $s$ -polarizovaného svetla možno určiť index lomu oveľa presnejšie, než z  $p$ -polarizovaného svetla. Je tomu tak najmä preto, že nepoznáme hodnoty odrazivosti akurát v okolí Brewsterovho uhla, ktorého určením by sme zistili index lomu veľmi presne. Zároveň je zaujímavé, že fit pekne skonvergoval, teda zdanlivý šum, ktorý prekoná signál v okolí Brewsterovho uhla nie je aditívny, ale skôr akýsi disjunktný, teda intenzita len nemôže klesnúť pod túto hodnotu, ale nad ňou sa šum neuplatňuje. Toto je pravdepodobne spôsobené filtrom, ktorý sa nemohol chytiť známej frekvencie a preto neudával správnu hodnotu. Meranie by teda bolo potrebné zopakovať v tmavej komore a s jednoduchšou elektronikou.

Pri meraní sklička  $B$  so svetlom  $s$ -polarizácie sa správna hodnota vojde až do  $3\sigma$  okolia naftovanej hodnoty. Keďže pri všetkých meraniach ukazuje výsledok na



mierne vyšší index lomu, než aký sme očakávali, pravdepodobne pôjde o systematickú chybu, túto pripisujeme filtru, o ktorého funkcii veľa nevieme.

## 5 Záver

Podarilo sa nám určiť smer ľahkého prechodu polarizátorom na  $70(4)^\circ$  a s podobnou neistotou veriť, že laser je polarizovaný vertikálne.

Podarilo sa nám premerať priebeh odrazivosti kolmo aj rovnobežne polarizovaného od dvoch sklenených doštičiek a s presnosťou lepšou ako 1 %, pre doštičku B iba s presnosťou 2 %, keďže nemožno veriť meraniu s s-polarizovaným svetlom. Teoretický fit na dáta dobre sedí.

## 6 Zoznam použitej literatúry

- [St] Kolektív ZFP KVOF MFF UK. *Študijný text k meraniu: Meranie parametrov zobrazovacích sústav*. [cit. 2017-03-10]. URL: [http://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/\\_media/zadani/texty/txt\\_307.pdf](http://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/_media/zadani/texty/txt_307.pdf).
- [Pm] Kolektív ZFP KVOF MFF UK. *Pokyny pro měření: Meranie parametrov zobrazovacích sústav*. [cit. 2017-03-10]. URL: [http://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/\\_media/zadani/pokyny/mereni\\_307.pdf](http://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/_media/zadani/pokyny/mereni_307.pdf).
- [Op] MALÝ, Petr 2013. *Optika*. Praha: Karolinum, 2013. s. 51-53.