Fyzikální sekce přírodovědecké fakulty Masarykovy univerzity v Brně

FYZIKÁLNÍ PRAKTIKUM

Fyzikální praktikum 2

Zpracoval: Tomáš Plšek **Naměřeno:** 3. října 2017

Obor: Astrofyzika **Ročník:** II **Semestr:** III **Testováno:**

Úloha č. **7: Odraz a lom světla. Fresnelovy vztahy, Snellův zákon.**

Povinná část:

1. Stanovte úhlové závislosti signálu detektoru, resp. odrazivosti R_p , R_s lineárně polarizovaného světla pro danou látku.
2. Určetě hodnotu Brewsterova úhlu daného dielektrického zrcadla.
3. Stanovte ze vztahu (4) hodnotu indexu lomu dané látky.
4. Pro tři úhly dopadu stanovte index lomu destičky ze vztahu (8), případně (9). Výsledek porovnejte s předchozím výpočtem.
5. Vypočítejte a znázorněte průběh signálu detektoru přirozeného světla ze vztahu (7).
6. Sestrojte grafy závislostí R_p a R_s na úhlu dopadu a porovnejte s teoretickou závislostí podle vztahů (1) nebo (3).

Povinně volitelná část (varianta B):

1. Proveďte justaci hranolu a naměřte závislost deviace δ na úhlu dopadu α.
2. Z minima deviace určete index lomu hranolu pomocí vztahu (13).
3. Vyneste naměřenou závislost deviace na úhlu dopadu a porovnejte se závislostí podle vztahu (12).

1. Teoretický úvod

Z Maxwellových rovnic určíme chování elektromagnetické vlny při odrazu na rozhraní dvou neabsorbujících prostředí. Pro odraženou vlnu dále platí Fresnelovy amplitudy $r_p = \bar{R}_p/\bar{A}_p$ a $r_s = \bar{R}_s/\bar{A}_s$ ($\bar{R}$, $\bar{A}$ - amplitudy dopadající a održené vly), které jsou dány vztahy:

$$r_p = \frac{\tan(\varphi_0 - \varphi_1)}{\tan(\varphi_0 + \varphi_1)}, \qquad r_s = -\frac{\sin(\varphi_0 - \varphi_1)}{\sin(\varphi_0 + \varphi_1)}, \tag{1}$$

kde φ_0 je úhel dopadu a φ_1 je úhel lomu. Tyto úhly spolu souvísí:

$$n_0 \sin\varphi_0 = n_1 \sin\varphi_1. \tag{2}$$

Na základě Snellova zákona můžeme vztahy (1) přepsat do tvaru:

$$r_p = \frac{n\cos\varphi_0 - n_0\cos\varphi_1}{n\cos\varphi_0 + n_0\cos\varphi_1}, \qquad r_s = \frac{n_0\cos\varphi_0 - n\cos\varphi_1}{n_0\cos\varphi_0 + n\cos\varphi_1}. \tag{3}$$

Ukazuje se, že amplituda $r_s < 0$ pro všechny úhly, avšak $r_p > 0$ pro $\varphi > \varphi_B$ a $r_p < 0$ pro $\varphi < \varphi_B$, kde φ_B je tzv. Brewsterův (polarizační) úhel, pro nějž je platí $r_p(\varphi_B) = 0$. Z rovnic (3) tedy pro index lomu látky získáváme vztah (předpokládáme, že index lomu vzduchu $n_0 = 1$):

$$\tan \varphi_B = n. \tag{4}$$

Pro jednotlivé polarizace tedy můžeme definovat odrazivosti:

$$R_p = \frac{I_p^R}{I_p^0}, \qquad R_s = \frac{I_s^R}{I_s^0}, \tag{5}$$

kde I^0 je intenzita dopadajícího světla a I^R je amplituda odraženého světla. Pro odrazivosti dále platí:

$$R_p = r_p^2, \qquad R_s = r_s^2. \tag{6}$$

Intenzita přirozeného světla odraženého na rozhraní dvou neabsorbujících prostředí je dána vztahem:

$$I^R = I_p^R/2 + I_s^R/2. \tag{7}$$

Dosazením vztahu (6) do rovnic (3) získáváme závislost indexu lomu na odrazivsti v p a s-polarizaci pro $\varphi_0 < \varphi_B$:

$$n = \sqrt{\frac{(1 + \sqrt{R_s})(1 + \sqrt{R_p})}{(1 - \sqrt{R_s})(1 - \sqrt{R_p})}}, \tag{8}$$

pro případ $\varphi_0 > \varphi_B$:

$$n = \sqrt{\frac{(1 + \sqrt{R_s})(1 - \sqrt{R_p})}{(1 + \sqrt{R_s})(1 - \sqrt{R_p})}}. \tag{9}$$

1.1. Průchod světla hranolem

V této části bude naším úkolem odvození závislosti úhlové odchylky (deviace) δ na úhlu dopadu α, lámavém úhlu hranolu ω a indexu lomu hranolu n. Na prvním a druhém rozhraní bude platit zákon lomu a pro jednotlivé úhly platí (obrázek 1):

$$n_0 \sin \alpha_1 = n \sin \beta_1, \qquad n \sin \beta_2 = n_0 \sin \alpha_2, \tag{10}$$

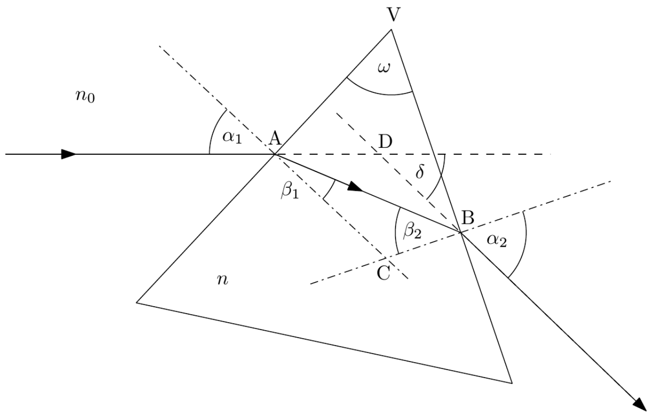
kde $n_0 = 1$ je index lomu pro vzduch a n je index lomu skla, z nějž je vyroben hranol. Z obrázku 1 jsme schopni určit vztahy pro deviaci δ a lámavý úhel hranolu ω a následně z rovnic (10) a (11) vyjádřit deviaci δ:

$$\delta = (\alpha - \beta_1) + (\alpha_2 - \beta_2), \qquad \omega = \beta_1 + \beta_2 \tag{11}$$

$$\delta = \alpha - \omega + \arcsin \left[\sin \omega \sqrt{\left(\frac{n}{n_0}\right)^2 - \sin^2 \alpha} - \cos \omega \sin \alpha \right]. \tag{12}$$

Rovnice (12) má určité minimum δ_m, které nastane ve chvíli, kdy vstupující a vystupující paprsky leží symetricky vzhledem k rovině půlící lámavý úhel hranolu. Pro index lomu skla n pak platí:

$$n = \frac{\sin([\delta_m + \omega] / 2)}{\sin(\omega / 2)}. \qquad (13)$$



Obrázek 1: Průchod světla hranolem.

2. Měření

2.1. Stanovení úhlové závislosti odrazivosti

Při určování odrazivostí budeme využívat vztahu (5), měříme tedy intenzitu přímého paprsku a následně pro jednotlivé úhly i intenzitu paprsku odraženého. Odrazivost vyjadřuje vztah mezi vyslaným a odraženým signálem, intenzitu světla tedy můžeme měřit něpřímo jakožto napětí.

Tabulka 1: Měření intenzity světla a určení odrazivosti pro s a p polarizaci.

$$I_s^0 = (3{,}046 \pm 0{,}001)\ \mathrm{V}$$
$$I_p^0 = (4{,}227 \pm 0{,}001)\ \mathrm{V}$$

φ_0 [°]	I_s^R [V]	I_p^R [V]	R_s	R_p
30	0,151	0,097	0,050	0,023
35	0,181	0,073	0,059	0,017
40	0,213	0,045	0,070	0,011
45	0,260	0,017	0,085	0,004
50	0,322	0,008	0,106	0,002
55	0,407	0,004	0,134	0,001
60	0,533	0,004	0,175	0,001
65	0,698	0,042	0,229	0,010
70	0,930	0,185	0,305	0,044
75	1,255	0,481	0,412	0,114
80	1,698	0,988	0,557	0,234
85	2,336	2,160	0,767	0,511

2.2. Určení Brewsterova úhlu dielektrického zrcadla

Brewsterův úhel určíme jakožto minimum závislosti R_p odrazivosti na úhlu dopadu φ_0. Jak vidíme z tabulky 1 Brewsterův úhel se nachází v rozmezí 55° až 60°. Toto rozmezí úhlů je tedy potřeba přesněji proměřit - zesilovač napětí nastavíme na maximum a postupujeme po jednom stupni.

Tabulka 2: Hledání Brewsterova úhlu z minima funkce.

φ_0 [°]	I_p^R [mV]
52	188,1
53	124,2
54	70,0
55	24,5
56	7,8
57	24,6
58	71,2
59	152,7

Z tabulky 2 vidíme, že hodnoty intenzity světla (měřené jako napětí na fotodiodě) kolem úhlu 56° jsou téměř symetrické. Můžeme tedy tento úhel prohlásit za hledaný Brewsterův úhel $\varphi_B = (56{,}0 \pm 0{,}5)°$.

2.3. Stanovení indexu lomu skla

Za předpokladu, že známe Brewsterův úhel, je nyní určení indexu lomu skla snadná záležitost - využijeme k tomu vztah (4).

$$\text{Index lomu skla } n = 1{,}48 \pm 0{,}01.$$

2.4. Stanovení indexu lomu pro tři různé úhly

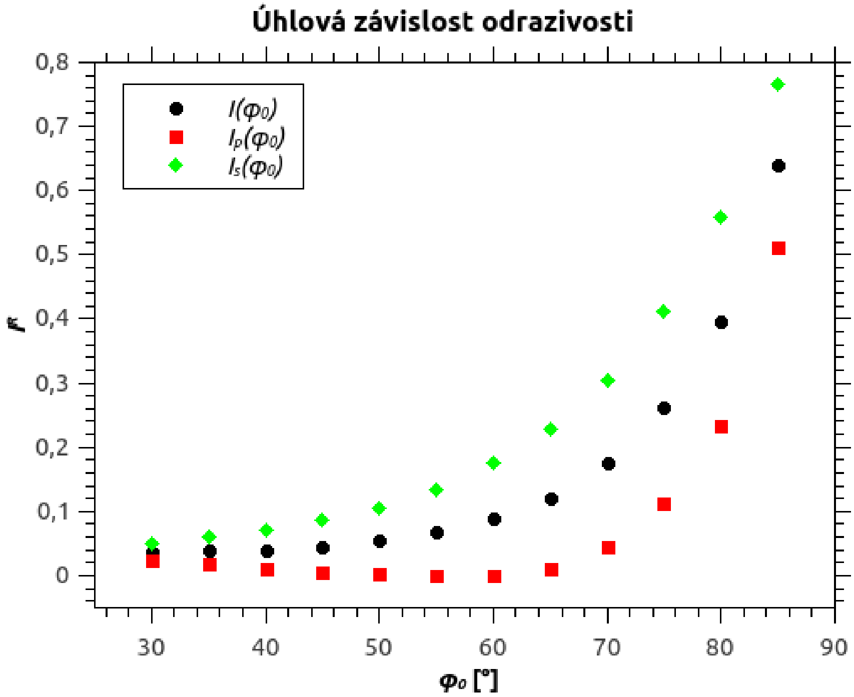
Nyní určíme index lomu ze tří různých úhlů pomocí vztahu (8) (případně (9) - podle velikosti úhlu dopadu).

Tabulka 3: Index lomu pro tři různé úhly.

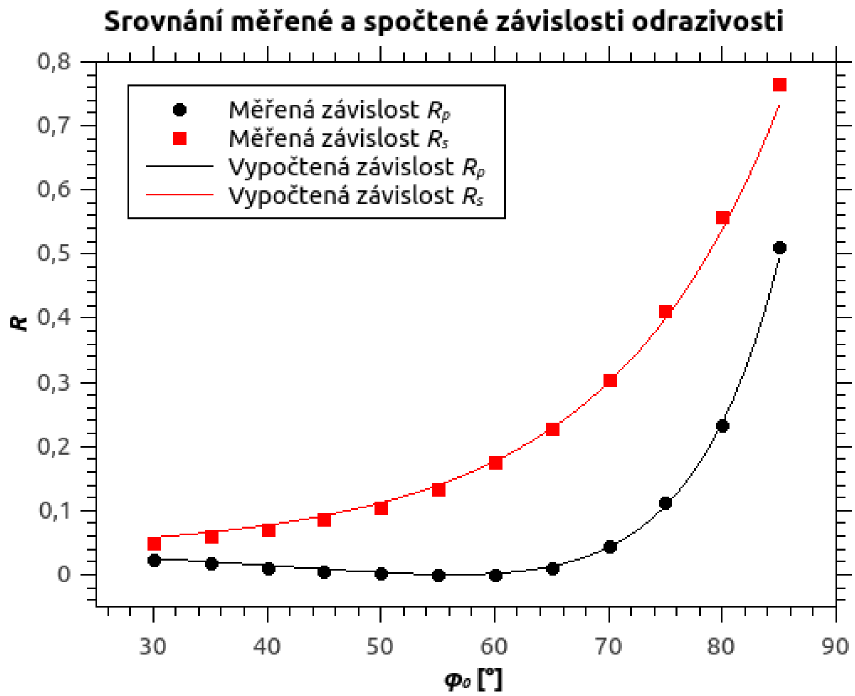
φ_0 [°]	R_s	R_p	n
40	0,070	0,011	1,45 ± 3
60	0,175	0,001	1,5 ± 4
80	0,557	0,234	1,549 ± 2

2.5. Srovnání měřené a spočtené úhlové závislosti s a p odrazivosti

Ze vztahu (7) určíme úhlovou závislost nepolarizovaného světla. Následně provedeme i srovnání naměřené a spočtené (vztah (3)) úhlové závislosti odrazivosti.



Graf 1: Srovnání úhlové závislosti intezity polarizovaného a nepolarizovaného světla.



Graf 2: Srovnání měřené a vypočítané (vztah (3)) úhlové závislosti odrazivosti.

2.6. Měření úhlové závislosti deviace

Pomocí goniometru změříme závislost deviace δ na úhlu dopadu α.

Tabulka 4: Úhlová závislost deviačního úhlu.

α [°]	δ [°]
40,0	47,1
45,0	44,1
50,0	43,5
55,0	44,0
60,0	45,2
65,0	47,3
70,0	50,0
75,0	54,0
80,0	58,5
85,0	67,1

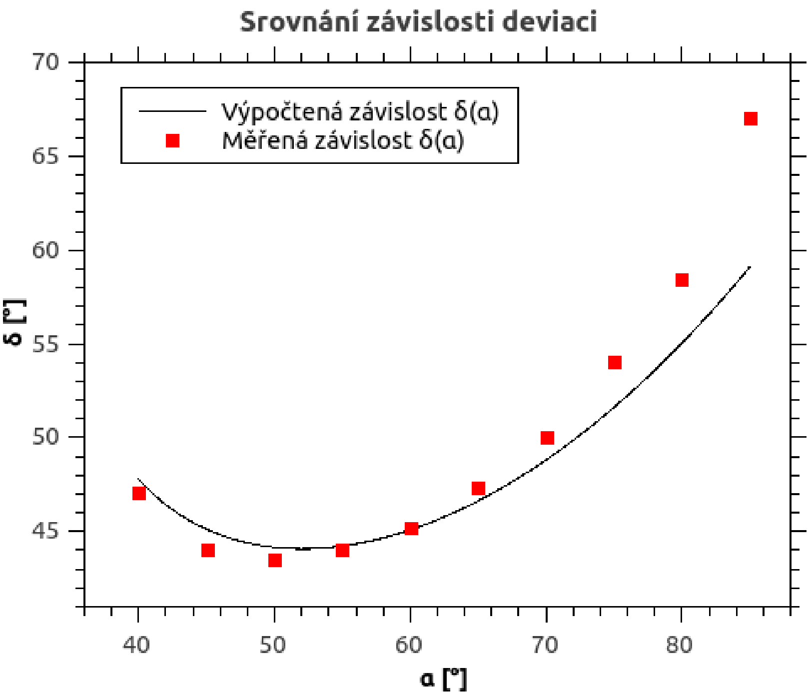
2.7. Určení indexu lomu z minima deviace

Z tabulky 4 vidíme, že minimum deviace se pravděpodobně nachází v okolí 43,5° tedy, že $\delta_m = (43{,}5 \pm 0{,}7)°$.

Index lomu hranolu $n = 1{,}57 \pm 0{,}03$.

2.8. Srovnání naměřené a spočtené závislosti deviace na úhlu dopadu

Pro získání teoretické závislosti deviace δ na úhlu dopadu α použijeme vztah (12), kde $n_0 = 1$ je index lomu vzduchu a n je index lomu hranolu, jež jsme určili v předchozí úloze.



Graf 3: Srovnání naměřené a teoretické úhlové závislosti deviace.

3. Závěr

Z měření odrazivosti dielektrického zrcadla jsem určil polohu Brewsterova úhlu na hodnotu $\varphi_B = (56{,}0 \pm 0{,}5)^\circ$ a z ní jsem následně určil index lomu skla, z nějž je dielektrické zdrcadlo vyrobeno, $n = 1{,}48 \pm 0{,}01$.

Dále jsem určoval index lomu skla obecně ze tří různých úhlů. Vidíme, že chyba pro jednotlivé úhly se řádově liší, což je způsobeno především meřením intenzity světelného paprsku.

Určil jsem závislosti odrazivosti na úhlu dopadu pro oba typy polarizovaného i pro nepolarizované světlo. Všechny tři závislosti docela dobře odpovídají očekávanému průběhu. Srovnání měřené a teoretické úhlové závislosti odrazivosti také dopadlo velmi dobře.

Minimum deviace jsem stanovil na hodnotu $\delta_m = (43{,}5 \pm 0{,}7)^\circ$ a z něj jsem určil index lomu hranolu $n = 1{,}57 \pm 0{,}03$.

Ze znalosti indexu lomu hranolu jsem určil průběh závislosti deviace δ na úhlu dopadu α. Pro velké úhly dopadu se naměřené hodnoty poněkud odchylují od spočtené závislosti.