

## FYZIKÁLNÍ PRAKTIKUM

**Zpracoval:** Jakub Jedlička

**Naměřeno:** 14. 10. 2022

**Obor:** Učitelství Bi F    **Ročník:** 2.    **Semestr:** 3.

**Testováno:**

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

$T = 22,7\text{ }^{\circ}\text{C}$

$p = 995,7\text{ hPa}$

$\varphi = 67\text{ }^{\circ}$

### 1. Úvod

V první části úkolu budeme měřit odrazivost s a p polarizovaného světla od dielektrika. Dále najdeme Brewstedův úhel a z něj určíme index lomu a porovnáme naměřené závislosti na úhlu dopadu paprsku s vypočítanými hodnotami.

V druhé části úkolu budeme měřit posun paprsku při průchodu planoparalelní deskou a z průběhu závislosti posunu na úhlu dopadu určíme index lomu desky.

### 2. Teorie

#### Odraz a lom světla

V této úloze se budeme zabývat závislostí s a p složky polarizovaného světla na úhlu dopadu. Při měření bude úzký svazek paprsků procházet polarizátorem. Otáčením polarizátoru jsme schopni měnit záření na p a s složku. P složka je taková, že kmitová rovina je rovnoměrná s rovinou dopadu. Pokud je kmitová rovina kolmá na rovinu dopadu, tak hovoříme o s polarizaci. Dále soustava, ve které měříme obsahuje stoleček, který se otáčí okolo svislé osy a díky tomu jsme schopni měřit úhel dopadu paprsku polarizovaného světla na dielektrikum. Po odraze polarizované světlo dopadá do detektoru, který se také otáčí okolo svislé osy. Tento detektor měří foto-napětí, tzn., že intenzitu dopadeného světla převede na napětí. Čím více světla, tím větší napětí jdoucí z detektoru.

Potřebujeme zjistit fotonapětí  $U_{s0}$  a  $U_{p0}$ , to provedeme tak, že necháme polarizované světlo přímo zářit do detektoru a zaznamenáme dané hodnoty napětí. Tyto hodnoty napětí jsou přímo úměrné intenzitám  $I_0^s$  a  $I_0^p$ .

Odrazivosti pro s a p složky amplitudy polarizovaného světla spočítáme pomocí vztahů

$$R_s = \frac{I_R^s}{I_0^s} \quad 1)$$

$$R_p = \frac{I_R^p}{I_0^p} \quad 2)$$

Kde  $R_p$  a  $R_s$  jsou odrazivosti v rovině p a s,  $I_R^s$  a  $I_R^p$  jsou intenzity odrazivosti světla v rovině s a p a  $I_0^s$  a  $I_0^p$  jsou již zmíněné veličiny.

Intenzita nepolarizovaného světla vztahem

$$I = \frac{I_R^s + I_R^p}{2} \quad 3)$$

A odrazivost nepolarizovaného světla vztahem

$$R = \frac{R_s + R_p}{2} \quad 4)$$

Existuje tzv. Brewstedův úhel  $\varphi_B$ , což je polarizační úhel dopadu. Při tomto úhlu dochází pouze k odrazu s složky polarizovaného světla. Pro rostoucí úhel dopadu  $\varphi$  klesá  $I_R^p$  k nule a v bodě

$\varphi_B$  se rovná nule úplně. Poté co je úhel  $\varphi > \varphi_B$ , tak  $I_R^p$  začíná růst.  $I_R^s$  monotónně roste s přibývajícím úhlem  $\varphi$ .

Pomocí Brewsterova úhlu se dá vypočítat index lomu dielektrika pomocí tohoto vztahu

$$\tan \varphi_B = n \quad 5)$$

toto platí, pokud je intenzita okolního světla  $n_0 = 1$ . Index lomu dielektrika lze i spočítat pomocí úhlu v okolí Brewsterova úhlu.

Pro úhel dopadu menší než Brewsterův úhel  $\varphi < \varphi_B$  platí vztah

$$n = \sqrt{\frac{(1 + \sqrt{R_s})(1 + \sqrt{R_p})}{(1 - \sqrt{R_s})(1 - \sqrt{R_p})}} \quad 6)$$

Pro úhel dopadu větší než Brewsterův úhel  $\varphi > \varphi_B$  platí vztah

$$n = \sqrt{\frac{(1 + \sqrt{R_s})(1 - \sqrt{R_p})}{(1 - \sqrt{R_s})(1 + \sqrt{R_p})}} \quad 7)$$

Po výpočtu indexu lomu použitého dielektrika můžeme hodnoty odrazivosti stanovit i výpočtem pomocí vztahů pro Fresnerovy amplitudy

$$R_s = \left( -\frac{\sin(\varphi_0 - \varphi_1)}{\sin(\varphi_0 + \varphi_1)} \right)^2 \quad 8)$$

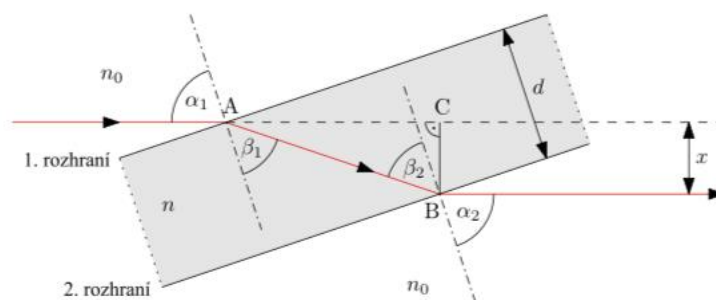
$$R_p = \left( \frac{\tan(\varphi_0 - \varphi_1)}{\tan(\varphi_0 + \varphi_1)} \right)^2 \quad 9)$$

Kde  $\varphi_0$  je úhel dopadu a  $\varphi_1$  je úhel odrazu, který se zjistí ze Snellova vztahu

$$\sin \varphi_1 = \frac{n_0 \sin \varphi_0}{n_1} \quad 10)$$

### Průchod světla plexisklem a sklem

Při průchodu světla sklem nebo plexisklem, dochází k vychýlení vystupujícího paprsku vůči paprsku dopadajícímu. Budeme pozorovat úhlovou odchylku vstupujícího paprsku a paprsku vystupujícího paprsku a podle toho lze určit index lomu skla nebo plexiskla v prostředí, které má index lomu  $n_0$ .



Obrázek 1. průchod paprsku planparalelní vrstvou

Po vstupu paprsku do planparalelní vrstvy platí zákon lomu, který je pro pravé rozhraní

$$n_0 \sin \alpha = n \sin \beta \quad 11)$$

A pro levé rozhraní

$$n \sin \beta = n_0 \sin \alpha \quad 12)$$

Kde  $n$  je index lomu desky,  $n_0$  je index lomu prostředí,  $\alpha = \alpha_1 = \alpha_2$  a jsou úhly dopadu a  $\beta = \beta_1 = \beta_2$  jsou úhly lomu.

Délka dráhy paprsku mezi body AB je

$$|AB| = \frac{d}{\cos \beta} \quad 13)$$

Odchylka vstupujícího a vystupujícího paprsku je

$$x = |BC| = |AB| \sin -\beta) \quad 14)$$

Po použití goniometrických vztahů poté dostaneme vztahy pro odchylku vstupujícího a vystupujícího paprsku  $x$  a z něj dostanu vztah pro index lomu  $n$

$$x = \left( 1 - \frac{n_0 \cos \alpha}{\sqrt{n^2 - n_0^2 \sin^2 \alpha}} \right) d \sin \alpha \quad 15)$$

$$n = n_0 \sqrt{\sin^2 \alpha + \left( 1 - \frac{x}{d \sin \alpha} \right)^{-2} \cos^2 \alpha} \quad 16)$$

### 3. Postup

#### Odraz a lom světla

Na začátku musíme zjistit fotonapětí  $U_{s0}$  a  $U_{p0}$  a to tak, že do detektoru musí přesně dopadat světlo z laseru. Poté si zapíšeme hodnoty pro  $s$  a  $p$  polarizaci. Poté do goniometru vložíme dielektrikum s jednou lesklou stranou namířenou k laseru. Dielektrikum upravíme tak, aby bylo vzhledem k laseru kolmo. Jakmile dielektrikum přesně nastavíme, tak ho vychýlíme do nejkrajnější polohy a detektor nastavíme tak, aby do něj směřovalo odražené světlo z laseru, poté si zapíšeme hodnoty napětí pro  $s$  a  $p$  polarizaci. Tento postup opakujeme po pěti stupních, dokud nedojdeme k úhlu  $88^\circ$ . V zapsaných výsledcích si můžeme všimnout, že se  $p$  polarizace blíží v určitém intervalu k 0. K tomuto intervalu se vrátíme a nastavíme citlivost detektoru na maximum a v tomto intervalu zapisujeme hodnoty napětí na detektoru po jednom stupni, tím pak určíme Brewsterův úhel  $\varphi_B$ .

#### Průchod světla plexisklem a sklem

Do goniometru vložíme námi zkoumanou destičku a nastavíme ji tak aby byla k laseru, jako v předchozím případě, kolmo. Poté planparalelní destičku vychýlíme o úhel  $\varphi$  a detektor nastavíme tak, aby do něj dopadalo světlo z destičky. Zapíšeme si úhel vychýlení  $\varphi$  a vychýlení detektoru  $x$ . Tento postup opakuje po  $5^\circ$ .

### 4. Zpracování měření

#### Odraz a lom světla

Intenzita přímého svazku pro  $s$  a  $p$  polarizaci

$$I_0^s = 2,569 \text{ V}$$

$$I_0^p = 3,602 \text{ V}$$

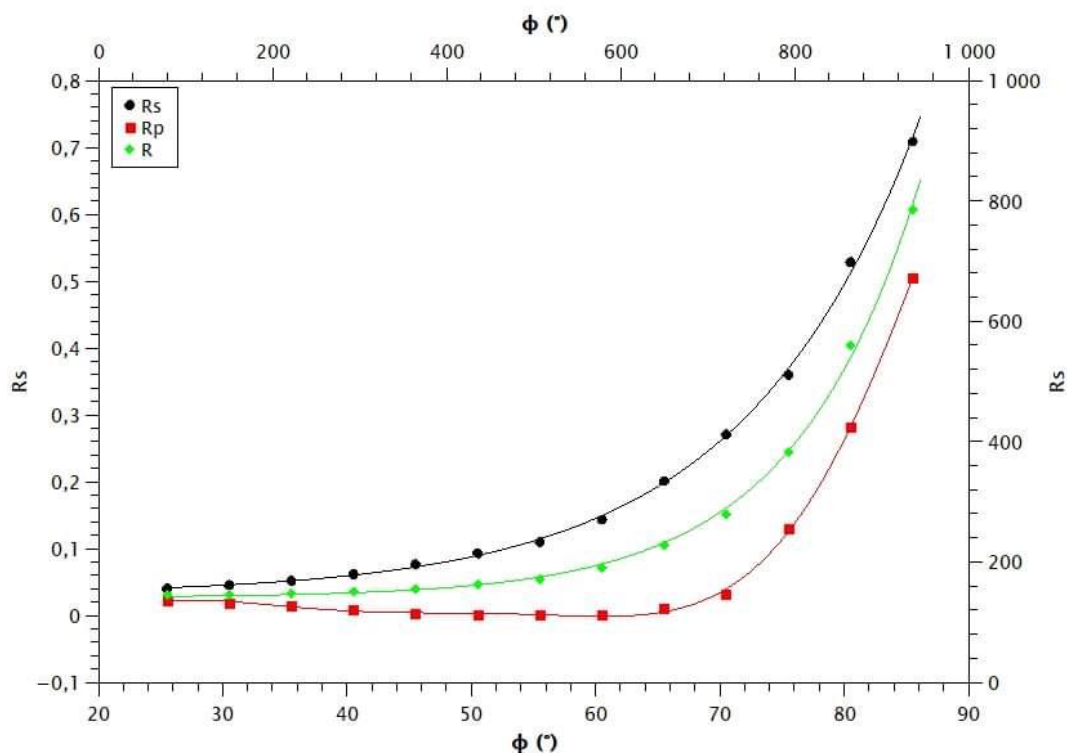
Tabulka s naměřenými hodnotami  $I_R^s$  a  $I_R^p$ , vypočítanou hodnotou  $I$ ,  $R_s$ ,  $R_p$  a  $R$ , podle vzorců 1), 2), 3) a 4).

$\varphi [^\circ]$	$I_s^R [V]$	$I_p^R [V]$	$I [V]$	$R_s$	$R_p$	$R$
25,5	0,1035	0,0795	0,0915	0,0403	0,0221	0,0312
30,5	0,1168	0,0642	0,0905	0,0454	0,0178	0,0316
35,5	0,1335	0,0501	0,0918	0,0519	0,0139	0,0329
40,5	0,1592	0,0330	0,0961	0,0619	0,0092	0,0356
45,5	0,1968	0,0123	0,1046	0,0766	0,0034	0,0400
50,5	0,2394	0,0008	0,1201	0,0932	0,0002	0,0467
55,5	0,2817	0,0008	0,1412	0,1096	0,0002	0,0549
60,5	0,3682	0,0008	0,1845	0,1433	0,0002	0,0717
65,5	0,5167	0,0399	0,2783	0,2011	0,0111	0,1061
70,5	0,6957	0,1126	0,4042	0,2707	0,0313	0,1510

75,5	0,9252	0,4689	0,6971	0,3600	0,1303	0,2451
80,5	1,3578	1,0133	1,1856	0,5283	0,2815	0,4049
85,5	1,8217	1,8164	1,8191	0,7088	0,5046	0,6067

Tabulka 1. naměřené hodnoty a odrazivosti

Graf závislosti odrazu na úhlu dopadu



Graf 1. závislost odrazivosti na úhlu dopadu

Pro zjištění Brewsterova úhlu jsem provedl měření intenzity  $I_p$  okolo  $\varphi_0$ , ve kterém byla naměřena minimální  $R_p$ .

$\varphi_0$ [°]	$I_p$ [V]
51	0,043
52	0,029
53	0,013
<b>54</b>	<b>0,001</b>
55	0,009
56	0,027

Tabulka 2. Intenzita  $p$  polarizace okolo Brewsterova úhlu

$$\varphi_B = 54,0(3)^\circ$$

Po dosazení  $\varphi_B$  do rovnice 5) dostaneme index lomu vzorku

$$n = 1,38(3)$$

Index lomu lze také zjistit z rovnic 6) a 7) pro dva úhly, které jsou nad a pod Brewsterovým úhlem

$\varphi$ [°]	$R_s$	$R_p$	$n$
45,5	0,07658	0,00342	1,41
50,5	0,09315	0,00023	1,39
60,5	0,14327	0,00023	1,47
65,5	0,20105	0,01108	1,46

Tabulka 3. indexy lomu pro úhly pohybující se okolo Brewsterova úhlu

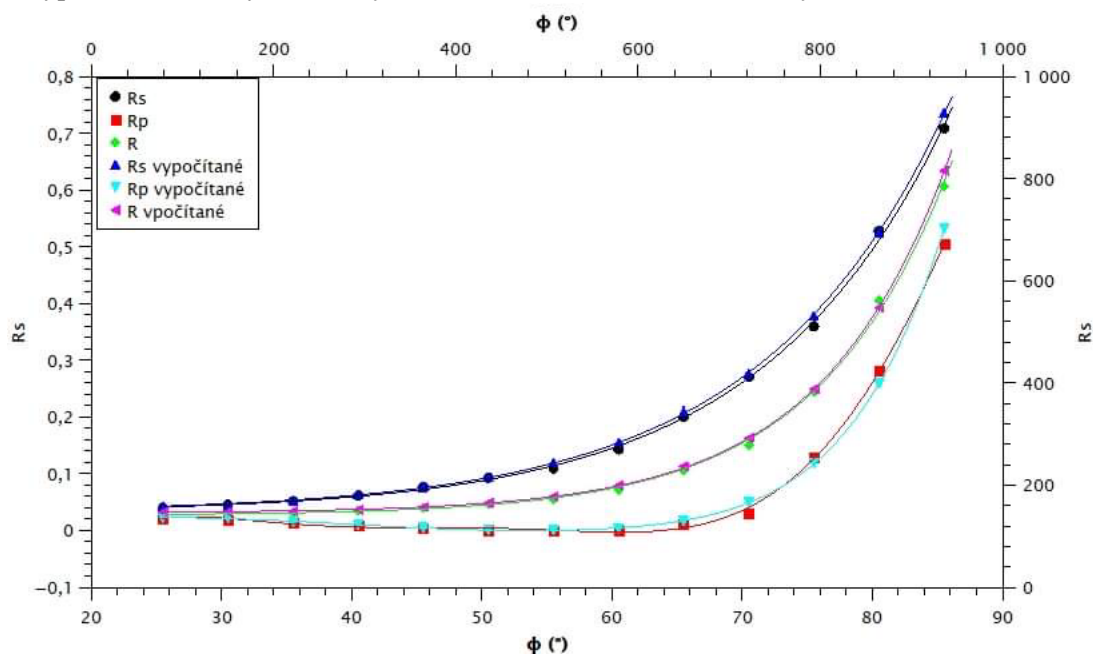
$$n = 1,43(4)$$

Pokud budeme uvažovat index lomu určený pomocí vzorce 5) ( $n=1,38$ ), můžeme pomocí rovnic 8) a 9) stanovit hodnoty odrazivosti pomocí výpočtu. Tyto hodnoty následně srovnáme s naměřenými hodnotami. Nejprve zjistíme hodnotu  $\varphi_1$  pomocí rovnice 10)

$\varphi_0[^\circ]$	$\varphi_1[^\circ]$	$R_s$	$R_p$	$R$
25,5	17,5	0,04164	0,02271	0,032175
30,5	20,1	0,04343	0,02272	0,033075
35,5	24	0,05354	0,01436	0,03395
40,5	27	0,06384	0,00989	0,036865
45,5	29,9	0,07722	0,00529	0,041255
50,5	32,7	0,09478	0,00147	0,048125
55,5	35,2	0,12038	0,00002	0,0602
60,5	37,5	0,15569	0,00356	0,079625
65,5	39,5	0,21041	0,01708	0,113745
70,5	41,25	0,27675	0,04992	0,163335
75,5	42,6	0,37915	0,11932	0,249235
80,5	43,6	0,52576	0,25841	0,392085
85,5	44,2	0,73584	0,53197	0,633905

Tabulka 4. Hodnoty odrazivosti zjištěné z rovnic 8) a 9)

Vypočítané hodnoty z Tabulky 1. srovnáme s hodnotami z Tabulky 4. v Grafu 2.



Graf 2. Srovnání odrazivosti

### Průchod světla plexisklem a sklem

Změřil jsem hloubku planparalelních desek a tabulky 5. a 6. zobrazují naměřené hodnoty vychýlení  $\alpha$  planparalelní desky vůči dopadajícímu laseru a hodnoty výchylny  $x$  detektoru, aby do něj dopadl laser procházející skrz planparalelní desku.

Planparalelní deska 1.:

$d = 20,15 \text{ mm}$

$\alpha [^\circ]$	$x \text{ mm}$	$n$
50	7,91	1,5251
45	6,81	1,5284
40	5,84	1,5365
35	4,91	1,5358
30	4,06	1,5347
25	3,30	1,5393
20	2,60	1,5477
15	1,96	1,5694

Tabulka 5. naměřené hodnoty  $\alpha$  a  $x$  pro planparalelní desku 1

**$n = 1,540(0,0138)$**

Planparalelní deska 2.:

$d = 9,225 \text{ mm}$

$\alpha [^\circ]$	$x \text{ mm}$	$n$
10	0,72	1,7977
15	1,01	1,6944
20	1,44	1,7626
25	1,71	1,6692
30	2,23	1,7500
35	2,67	1,7507
40	3,10	1,7296
45	3,64	1,7496
50	4,08	1,7033

Tabulka 6. naměřené hodnoty  $\alpha$  a  $x$  pro planparalelní desku 2

**$n = 1,734(0,0393)$**

## 5. Závěr

V první části úlohy jsme stanovili úhlovou závislost odrazivosti  $R_s$  a  $R_p$ , naměřené a teoreticky vypočítané. Hodnoty teoretické a naměřené se lehce lehce liší, hlavně s čím dál větším úhlem. Poté jsme určili hodnotu Brewsterova úhlu pomocí měření blízko poklesu p polarizace a poté pomocí nepřímé metody. Z ní jsme pak určili index lomu dielektrika, která činí 1,38(3) vypočítanou pomocí vztahu 5) a 1,43(4) vypočítanou pomocí vztahů 6) a 7). Jelikož je výsledek s nejistotou vypočítaný pomocí vztahu 5) v rámci nejistoty výsledku druhého si myslím, že měření bylo relativně přesné.

V druhé části úlohy jsme určili index lomu dvou planparalelních desek. První planparalelní deska má index lomu  $n = 1,540(0,0138)$ , což velice blízko indexu lomu pro plexisklo, která činí 1,48. Soudím, že se jedná o plexisklo, protože druhá planparalelní deska byla pocitově mnohem hustší, taky její index lomu vyšel  $n = 1,734(0,0393)$ , což je hodnota, která se nachází v rámci intervalu pro hodnotu indexu lomu skla, který činí 1,5 – 1,9.