

Oddělení fyzikálních praktik při Kabinetu výuky obecné fyziky MFF UK

PRAKTIKUM III – Optika

Úloha č. VII.

Název: Ověření Fresnelových vzorců

Pracoval: Radim Pechal

stud. skup. F-11

dne 26. března 2009

Odevzdal dne:

	Možný počet bodů	Udělený počet bodů
Práce při měření	0 – 5	
Teoretická část	0 – 1	
Výsledky měření	0 – 8	
Diskuse výsledků	0 – 4	
Závěr	0 – 1	
Seznam použité literatury	0 – 1	
Celkem	max. 20	

Posuzoval: dne

Pracovní úkol

1. Najděte směr snadného průchodu polarizátoru užívaného v aparatuře.
2. Ověřte, že zdroj světla je polarizován kolmo k vodorovné rovině.
3. Na přiložených vzorcích proměřte závislost intenzity odraženého světla na úhlu dopadu pro TE i TM polarizaci.
4. Naměřené výsledky porovnejte s teoretickým průběhem závislostí.
5. Určete indexy lomů měřených vzorků a jejich relativní chybu.

Teoretický úvod

Při dopadu rovinné vlny na skleněnou destičku dochází k průchodu vlny a k odrazu. V této úloze budeme zkoumat odraženou vlnu. Dopadající a odraženou vlnu si můžeme rozdělit na kolmou (tzv. TM polarizace) a rovnoběžnou (tzv. TE polarizace) složku. Označíme¹ E_0^\perp resp. E_{0r}^\perp jako velikost kolmé části dopadající resp. odražené vlny a E_0^\parallel resp. E_{0r}^\parallel označíme velikost kolmé části dopadající resp. odražené vlny. Dle [1] pak můžeme vyjádřit amplitudové koeficienty odrazu r^\perp , r^\parallel pro obě polarizace

$$r^\perp = \frac{E_{0r}^\perp}{E_0^\perp} = \frac{n_1 \cos \theta - n_2 \cos \theta_t}{n_1 \cos \theta + n_2 \cos \theta_t}, \quad (1)$$

$$r^\parallel = \frac{E_{0r}^\parallel}{E_0^\parallel} = \frac{n_2 \cos \theta - n_1 \cos \theta_t}{n_2 \cos \theta + n_1 \cos \theta_t}, \quad (2)$$

kde n_1 je index lomu prostředí ze kterého dopadá paprsek (v našem případě můžeme brát $n_1 = 1$), n_2 je index lomu skla, θ je úhel pod kterým dopadá paprsek na vzorek, θ_t je úhel pod kterým paprsek prochází do materiálu.

Uvážením Snellova zákona lomu

$$\sin \theta = n_2 \sin \theta_t, \quad (3)$$

je možno vztahy (1) a (2) upravit na tvar

$$r^\perp = \frac{\cos \theta - \sqrt{n_2^2 - \sin^2 \theta}}{\cos \theta + \sqrt{n_2^2 - \sin^2 \theta}}, \quad (4)$$

$$r^\parallel = \frac{n_2^2 \cos \theta - \sqrt{n_2^2 - \sin^2 \theta}}{n_2^2 \cos \theta + \sqrt{n_2^2 - \sin^2 \theta}}. \quad (5)$$

K detekci signálu se používá optodioda. K ní je připojen voltmetr. Odrazivost R pro daný úhel θ se určí pomocí vztahu

$$R = \frac{U_\theta}{U_{90}}, \quad (6)$$

kde U_{90} je napětí naměřené pro úhel $\theta = 90^\circ$. Koeficient odrazu r mohu určí pomocí vztahu

$$r = \sqrt{\frac{U_\theta}{U_{90}}}. \quad (7)$$

Při rovnoběžné polarizaci světla existuje tzv. Brewsterův úhel θ_B , pro který vymizí odražená vlna. Tento úhel je možné pro rozhraní vzduchu a skla s indexem lomu n určit vztahem

$$\theta_B = \arctan n. \quad (8)$$

¹Používám stejné značení fyzikálních veličin jako je uvedeno v [1].

Výsledky měření

Nejdříve jsem našel snadný směr průchodu používaného polarizátoru. Ručně jsem nastavil natočení polarizátoru na úhel, pro který jsem viděl nejmenší intenzitu. Tento úhel mi vyšel $\alpha_r = 54^\circ$. Následně jsem provedl obdobné měření pomocí detektoru. Zde jsem hledal maximum. To jsem našel při úhlu $\alpha_d = 329^\circ$, což je podle očekávání asi o 180° více než při ručním nastavení minima.

Nejdříve jsem proměřil kolmou (tzv. TM) polarizaci.

θ	R^\perp	R^\perp	R^\perp	R^\perp	R^\perp	\widetilde{R}^\perp	\widetilde{r}^\perp	r_{teor}^\perp
90°	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,00 ± 0,07	1,00 ± 0,04	1,000
88°	0,990	0,914	0,913	0,961	0,981	0,95 ± 0,07	0,98 ± 0,04	0,940
86°	0,838	0,839	0,835	0,860	0,863	0,85 ± 0,06	0,92 ± 0,03	0,884
84°	0,744	0,765	0,760	0,756	0,744	0,75 ± 0,05	0,87 ± 0,03	0,831
82°	0,000	0,659	0,678	0,668	0,646	0,66 ± 0,05	0,81 ± 0,03	0,782
80°	0,584	0,560	0,591	0,583	0,571	0,58 ± 0,04	0,76 ± 0,02	0,736
78°	0,000	0,496	0,507	0,490	0,507	0,50 ± 0,04	0,71 ± 0,02	0,694
76°	0,468	0,438	0,441	0,442	0,451	0,45 ± 0,03	0,67 ± 0,02	0,654
74°	0,410	0,409	0,409	0,393	0,392	0,40 ± 0,03	0,63 ± 0,02	0,617
72°	0,000	0,378	0,363	0,349	0,349	0,36 ± 0,03	0,60 ± 0,02	0,583
70°	0,363	0,346	0,323	0,313	0,311	0,33 ± 0,03	0,58 ± 0,02	0,551
68°	0,306	0,313	0,289	0,279	0,277	0,29 ± 0,03	0,54 ± 0,02	0,521
66°	0,274	0,279	0,260	0,250	0,249	0,26 ± 0,02	0,51 ± 0,02	0,494
64°	0,251	0,245	0,235	0,224	0,223	0,24 ± 0,02	0,49 ± 0,02	0,469
62°	0,000	0,213	0,212	0,203	0,201	0,21 ± 0,02	0,455 ± 0,012	0,445
60°	0,000	0,192	0,196	0,183	0,181	0,19 ± 0,02	0,434 ± 0,012	0,424
58°	0,185	0,174	0,182	0,166	0,165	0,17 ± 0,02	0,417 ± 0,012	0,404
56°	0,168	0,158	0,168	0,151	0,149	0,159 ± 0,014	0,399 ± 0,011	0,386
54°	0,153	0,144	0,154	0,138	0,137	0,145 ± 0,013	0,381 ± 0,010	0,369
52°	0,141	0,132	0,140	0,134	0,124	0,134 ± 0,012	0,366 ± 0,010	0,353
50°	0,134	0,122	0,126	0,123	0,114	0,124 ± 0,011	0,352 ± 0,010	0,338
48°	0,125	0,112	0,115	0,113	0,105	0,114 ± 0,011	0,338 ± 0,009	0,325
46°	0,110	0,105	0,103	0,105	0,097	0,104 ± 0,009	0,322 ± 0,008	0,313
44°	0,102	0,100	0,095	0,096	0,091	0,097 ± 0,008	0,311 ± 0,007	0,301
42°	0,094	0,095	0,088	0,089	0,086	0,090 ± 0,008	0,301 ± 0,007	0,291
40°	0,089	0,089	0,082	0,082	0,080	0,084 ± 0,007	0,290 ± 0,007	0,281
38°	0,085	0,081	0,077	0,075	0,076	0,079 ± 0,007	0,281 ± 0,007	0,272
36°	0,083	0,075	0,072	0,070	0,072	0,074 ± 0,007	0,273 ± 0,007	0,264
34°	0,078	0,068	0,067	0,065	0,068	0,069 ± 0,007	0,263 ± 0,007	0,257
32°	0,071	0,064	0,064	0,061	0,065	0,065 ± 0,006	0,255 ± 0,006	0,250
30°	0,066	0,061	0,061	0,058	0,061	0,061 ± 0,005	0,248 ± 0,005	0,244
28°	0,063	0,057	0,058	0,055	0,058	0,058 ± 0,005	0,241 ± 0,005	0,238
26°	0,060	0,055	0,055	0,053	0,056	0,056 ± 0,005	0,236 ± 0,005	0,233
24°	0,058	0,053	0,054	0,051	0,053	0,054 ± 0,004	0,232 ± 0,005	0,228
22°	0,056	0,051	0,054	0,049	0,052	0,052 ± 0,004	0,228 ± 0,005	0,224
20°	0,056	0,049	0,052	0,047	0,049	0,051 ± 0,005	0,225 ± 0,005	0,220
18°	0,055	0,048	0,050	0,046	0,047	0,049 ± 0,005	0,222 ± 0,005	0,217

Tabulka 1: Výsledky měření závislosti amplitudového koeficientu r^\perp na úhlu θ pro materiál s indexem lomu $n = 1,509$.

θ	R^\perp	R^\perp	R^\perp	R^\perp	R^\perp	R^\perp	r^\perp	r_{teor}^\perp
90°	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,00 ± 0,07	1,00 ± 0,04	1,000
88°	0,892		0,883	0,861	0,871	0,88 ± 0,06	0,94 ± 0,03	0,955
86°		0,843		0,821	0,812	0,83 ± 0,06	0,91 ± 0,03	0,911
84°	0,794	0,787	0,787	0,744	0,753	0,77 ± 0,06	0,88 ± 0,03	0,870
82°	0,714	0,726	0,723	0,684	0,691	0,71 ± 0,05	0,84 ± 0,03	0,831
80°	0,660	0,659	0,657	0,623	0,632	0,65 ± 0,05	0,80 ± 0,03	0,794
78°	0,611	0,621	0,604	0,571	0,595	0,60 ± 0,05	0,78 ± 0,03	0,759
76°	0,516		0,532	0,536	0,536	0,53 ± 0,04	0,73 ± 0,02	0,726
74°	0,474		0,510	0,510	0,474	0,49 ± 0,04	0,70 ± 0,02	0,694
72°	0,464	0,487	0,482	0,449	0,432	0,46 ± 0,04	0,68 ± 0,02	0,665
70°	0,424	0,451	0,408	0,408	0,424	0,42 ± 0,03	0,65 ± 0,02	0,637
68°	0,383	0,424	0,392	0,394	0,368	0,39 ± 0,03	0,63 ± 0,02	0,610
66°	0,360	0,388	0,347	0,353	0,351	0,36 ± 0,03	0,60 ± 0,02	0,586
64°	0,329	0,347	0,327	0,335	0,320	0,33 ± 0,03	0,58 ± 0,02	0,562
62°	0,304	0,322	0,303	0,310	0,292	0,31 ± 0,02	0,55 ± 0,02	0,541
60°	0,281	0,297	0,280	0,285	0,268	0,28 ± 0,02	0,53 ± 0,02	0,520
58°	0,263	0,275	0,261	0,268	0,245	0,26 ± 0,02	0,51 ± 0,02	0,501
56°	0,245	0,258	0,245	0,251	0,223	0,24 ± 0,02	0,49 ± 0,02	0,483
54°	0,230	0,240	0,228	0,235	0,203	0,23 ± 0,02	0,48 ± 0,02	0,466
52°	0,218	0,224	0,216	0,220	0,181	0,21 ± 0,02	0,46 ± 0,02	0,450
50°	0,205	0,210	0,202	0,208	0,169	0,20 ± 0,02	0,45 ± 0,02	0,435
48°	0,192	0,198	0,190	0,195	0,166	0,19 ± 0,02	0,434 ± 0,014	0,422
46°	0,181	0,187	0,179	0,184	0,163	0,18 ± 0,02	0,423 ± 0,012	0,409
44°	0,172	0,177	0,170	0,175	0,157	0,170 ± 0,014	0,413 ± 0,011	0,397
42°	0,163	0,167	0,160	0,166	0,155	0,162 ± 0,012	0,403 ± 0,010	0,386
40°	0,155	0,158	0,152	0,158	0,147	0,154 ± 0,012	0,393 ± 0,010	0,375
38°	0,147	0,150	0,145	0,151	0,139	0,146 ± 0,011	0,383 ± 0,009	0,366
36°	0,140	0,142	0,138	0,144	0,134	0,139 ± 0,011	0,373 ± 0,009	0,357
34°	0,136	0,136	0,131	0,137	0,127	0,133 ± 0,010	0,365 ± 0,009	0,349
32°	0,129	0,130	0,125	0,131	0,121	0,127 ± 0,010	0,357 ± 0,008	0,341
30°	0,126	0,121	0,120	0,129	0,117	0,123 ± 0,010	0,350 ± 0,009	0,334
28°	0,119	0,116	0,119	0,123	0,112	0,118 ± 0,009	0,343 ± 0,008	0,328
26°	0,120	0,115	0,111	0,118	0,109	0,115 ± 0,010	0,339 ± 0,008	0,322
24°	0,111	0,114	0,107	0,117	0,104	0,111 ± 0,009	0,333 ± 0,008	0,316
22°	0,118	0,110	0,103	0,108	0,144	0,117 ± 0,018	0,342 ± 0,016	0,311
20°	0,108	0,109	0,096	0,104	0,082	0,100 ± 0,014	0,316 ± 0,012	0,307
18°	0,107	0,108	0,095	0,101	0,076	0,097 ± 0,015	0,312 ± 0,014	0,303

Tabulka 2: Výsledky měření závislosti amplitudového koeficientu r^\perp na úhlu θ pro materiál s indexem lomu $n = 1,8051$.

Naměřená data jsem fitoval pomocí vztahu (4). Pro první materiál mi vyšel index lomu $n_{m1} = 1,54 \pm 0,05$, a pro druhý materiál mi vyšel index lomu $n_{m2} = 1,86 \pm 0,08$.

Při měření Brewsterova úhlu jsem nejdříve určil teoretickou hodnotu pro sklo s indexem lomu $n_1 = 1,509$ $\theta_{B1} = 56^\circ 28'$. Pro sklo s indexem lomu $n_2 = 1,8051$ mi vyšel Brewsterův úhel $\theta_{B2} = 61^\circ 6'$.

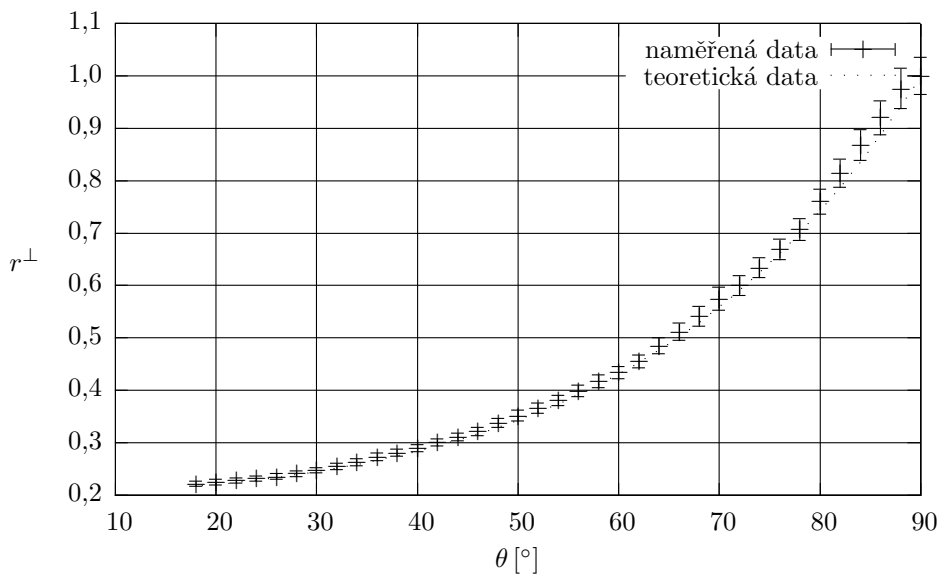
θ	R^{\parallel}	r^{\parallel}	r_{teor}^{\parallel}	θ	R^{\parallel}	r^{\parallel}	r_{teor}^{\parallel}
90°	1,00 ± 0,2	1,00 ± 0,12	1,000	58°	0,004 ± 0,015	0,07 ± 0,11	0,017
85°	0,48 ± 0,2	0,69 ± 0,11	0,702	57°	0,004 ± 0,014	0,06 ± 0,11	0,006
80°	0,27 ± 0,12	0,52 ± 0,11	0,486	56°	0,004 ± 0,014	0,06 ± 0,11	0,005
78°	0,20 ± 0,10	0,45 ± 0,11	0,416	55°	0,004 ± 0,014	0,06 ± 0,11	0,015
76°	0,15 ± 0,09	0,38 ± 0,11	0,354	54°	0,004 ± 0,015	0,06 ± 0,11	0,025
74°	0,11 ± 0,07	0,33 ± 0,11	0,299	53°	0,004 ± 0,015	0,07 ± 0,11	0,034
72°	0,08 ± 0,06	0,28 ± 0,11	0,250	52°	0,005 ± 0,016	0,07 ± 0,11	0,043
70°	0,05 ± 0,05	0,23 ± 0,11	0,205	51°	0,01 ± 0,02	0,07 ± 0,11	0,051
69°	0,04 ± 0,05	0,21 ± 0,11	0,185	50°	0,01 ± 0,02	0,08 ± 0,11	0,059
68°	0,03 ± 0,04	0,19 ± 0,11	0,165	48°	0,01 ± 0,02	0,09 ± 0,11	0,074
67°	0,03 ± 0,04	0,17 ± 0,11	0,147	46°	0,01 ± 0,02	0,10 ± 0,11	0,088
66°	0,02 ± 0,03	0,16 ± 0,11	0,129	44°	0,01 ± 0,03	0,11 ± 0,11	0,100
65°	0,02 ± 0,03	0,13 ± 0,11	0,113	42°	0,01 ± 0,03	0,12 ± 0,11	0,112
64°	0,02 ± 0,03	0,12 ± 0,11	0,097	40°	0,02 ± 0,03	0,13 ± 0,11	0,122
63°	0,01 ± 0,02	0,11 ± 0,11	0,082	35°	0,02 ± 0,03	0,15 ± 0,11	0,144
62°	0,01 ± 0,02	0,10 ± 0,11	0,067	30°	0,03 ± 0,04	0,17 ± 0,11	0,161
61°	0,01 ± 0,02	0,09 ± 0,11	0,054	25°	0,03 ± 0,04	0,18 ± 0,11	0,175
60°	0,01 ± 0,02	0,08 ± 0,11	0,041	20°	0,03 ± 0,04	0,19 ± 0,11	0,186
59°	0,005 ± 0,016	0,07 ± 0,11	0,029				

Tabulka 3: Výsledky měření závislosti amplitudového koeficientu r^{\parallel} na úhlu θ pro materiál s indexem lomu $n = 1,509$.

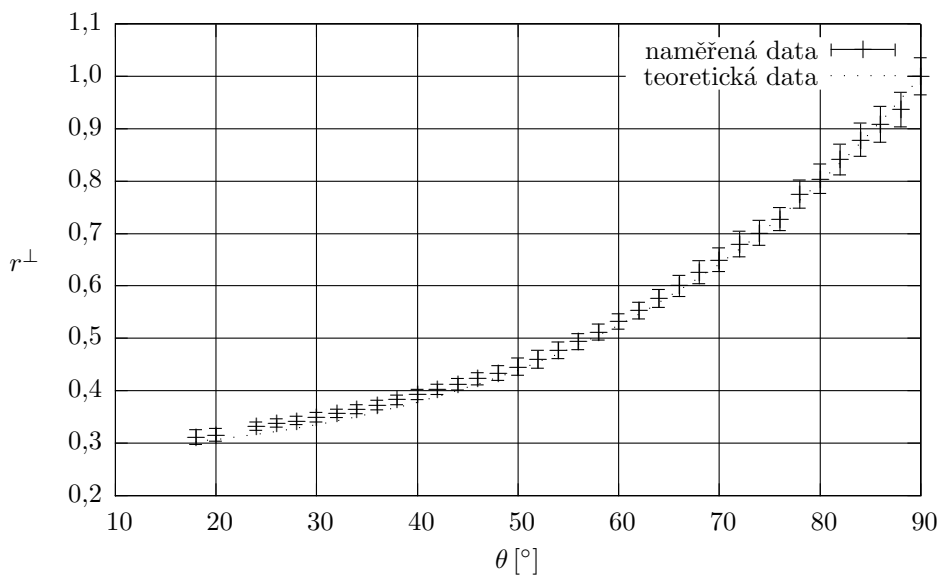
θ	R^{\parallel}	R^{\parallel}	\widehat{R}^{\parallel}	r^{\parallel}	r_{teor}^{\parallel}
90	1,0 ± 0,2	1,0 ± 0,2	1,0 ± 0,2	1,00 ± 0,12	1,000
85	0,6 ± 0,2	0,5 ± 0,2	0,5 ± 0,2	0,74 ± 0,11	0,683
80	0,27 ± 0,12	0,24 ± 0,11	0,25 ± 0,11	0,50 ± 0,11	0,456
78	0,18 ± 0,10	0,18 ± 0,10	0,18 ± 0,10	0,42 ± 0,11	0,383
76	0,13 ± 0,08	0,12 ± 0,08	0,12 ± 0,08	0,35 ± 0,11	0,318
74	0,08 ± 0,07	0,09 ± 0,07	0,09 ± 0,07	0,29 ± 0,11	0,260
72	0,07 ± 0,06	0,06 ± 0,05	0,06 ± 0,06	0,25 ± 0,11	0,208
70	0,04 ± 0,05	0,04 ± 0,04	0,04 ± 0,05	0,20 ± 0,11	0,161
69	0,03 ± 0,04	0,03 ± 0,04	0,03 ± 0,04	0,18 ± 0,11	0,139
68	0,03 ± 0,04	0,03 ± 0,04	0,03 ± 0,04	0,16 ± 0,11	0,118
67	0,02 ± 0,03	0,02 ± 0,03	0,02 ± 0,03	0,14 ± 0,11	0,099
66	0,02 ± 0,03	0,02 ± 0,03	0,02 ± 0,03	0,13 ± 0,11	0,080
65	0,01 ± 0,03	0,01 ± 0,03	0,01 ± 0,03	0,12 ± 0,11	0,063
64	0,01 ± 0,02	0,01 ± 0,02	0,01 ± 0,02	0,10 ± 0,11	0,046
63	0,01 ± 0,02	0,01 ± 0,02	0,01 ± 0,02	0,10 ± 0,11	0,030
62	0,01 ± 0,02	0,01 ± 0,02	0,01 ± 0,02	0,09 ± 0,11	0,014
61	0,01 ± 0,02	0,01 ± 0,02	0,01 ± 0,02	0,09 ± 0,11	0,000
60	0,01 ± 0,02	0,01 ± 0,02	0,01 ± 0,02	0,09 ± 0,11	0,014
59	0,01 ± 0,02	0,01 ± 0,02	0,01 ± 0,02	0,09 ± 0,11	0,027
58	0,01 ± 0,02	0,01 ± 0,02	0,01 ± 0,02	0,09 ± 0,11	0,040
57	0,01 ± 0,02	0,01 ± 0,02	0,01 ± 0,02	0,10 ± 0,11	0,052
56	0,01 ± 0,02	0,01 ± 0,02	0,01 ± 0,02	0,11 ± 0,11	0,064
55	0,01 ± 0,03	0,01 ± 0,03	0,01 ± 0,03	0,12 ± 0,11	0,075
50	0,02 ± 0,03	0,02 ± 0,03	0,02 ± 0,03	0,15 ± 0,11	0,123

θ	R^{\parallel}	R^{\parallel}	$\widetilde{R}^{\parallel}$	r^{\parallel}	r_{teor}^{\parallel}
45	$0,03 \pm 0,04$	$0,04 \pm 0,04$	$0,03 \pm 0,04$	$0,19 \pm 0,11$	0,162
40	$0,05 \pm 0,05$	$0,05 \pm 0,05$	$0,05 \pm 0,05$	$0,22 \pm 0,11$	0,193
35	$0,06 \pm 0,05$	$0,06 \pm 0,06$	$0,06 \pm 0,05$	$0,24 \pm 0,11$	0,219
30	$0,07 \pm 0,06$	$0,07 \pm 0,06$	$0,07 \pm 0,06$	$0,27 \pm 0,11$	0,239
25	$0,08 \pm 0,06$	$0,08 \pm 0,06$	$0,08 \pm 0,06$	$0,28 \pm 0,11$	0,254
20	$0,09 \pm 0,07$	$0,09 \pm 0,07$	$0,09 \pm 0,07$	$0,30 \pm 0,11$	0,267

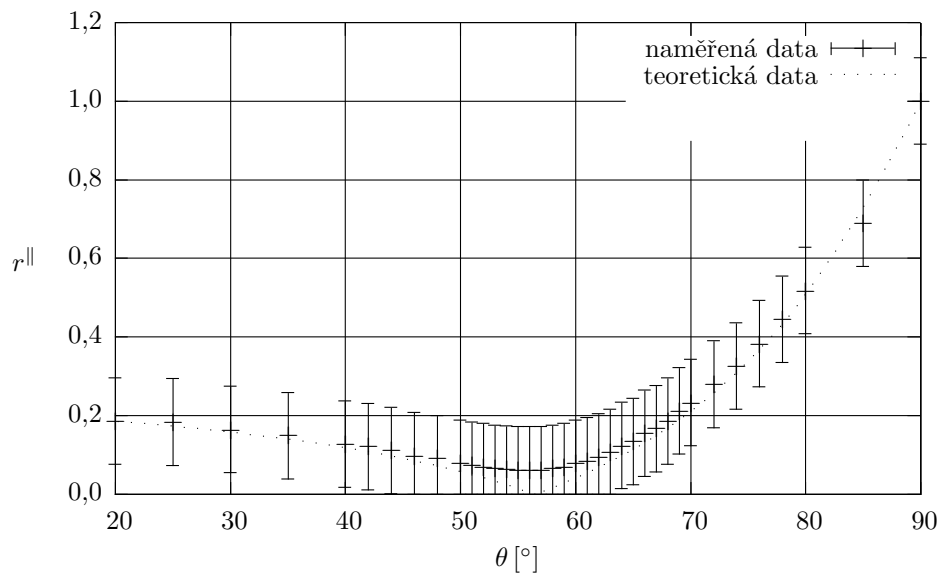
Tabulka 4: Výsledky měření závislosti amplitudového koeficientu r^{\parallel} na úhlu θ pro materiál s indexem lomu $n = 1,8051$.



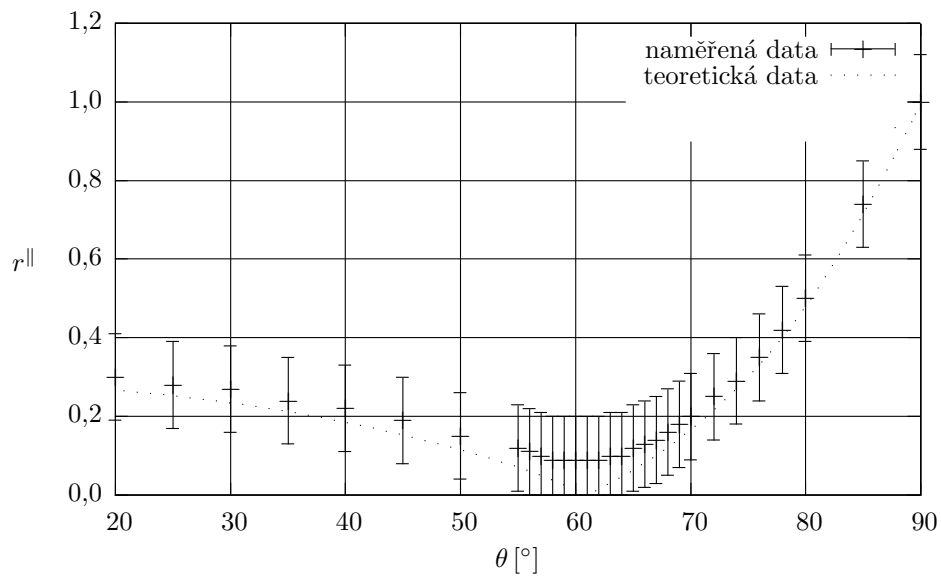
Graf 1: Závislost amplitudového koeficientu r^{\perp} na úhlu θ pro materiál s indexem lomu $n = 1,509$.



Graf 2: Závislost amplitudového koeficientu r^{\perp} na úhlu θ pro materiál s indexem lomu $n = 1,8051$.



Graf 3: Závislost amplitudového koeficientu r_{\parallel} na úhlu θ pro materiál s indexem lomu $n = 1,509$.



Graf 4: Závislost amplitudového koeficientu r_{\parallel} na úhlu θ pro materiál s indexem lomu $n = 1,8051$.

Diskuse výsledků

Při měření jsem se dopouštěl největší chyby při měření voltmetrem. Chybu jsem odhadl na $\sigma_V = \pm 5\%$. Tato chyba se může z pohledu měření rovnoběžné polarizace zdát poměrně velká, ovšem při kolmé polarizaci se ukázala jako ideální. A je zřejmé, že voltmetr měří se stejnou chybou pro oba případy. Chyba měření úhlu byla zanedbatelná.

Při měření kolmé polarizace vyšly výsledky podle očekávání. Pro daná sklíčka jsem provedl vždy 5 měření. Tyto měření jsem dále statisticky zpracoval. Pokud se některý údaj lišil o více než $3 \cdot \sigma$ vyřadil jsem jej a v protokolu neuváděl.

Při měření rovnoběžné polarizace jsem z časových důvodů po dohodě s vyučujícím provedl pouze jedno, resp. dvě měření (nejdříve jsem prováděl měření pouze do Brewsterova úhlu, ovšem je lepší provést měření až do úhlu $\approx 70^\circ$). Pro tyto měření mi také vycházely hodnoty, které jsem teoreticky očekával. Jen při nízké úrovni signálu jsem nedosahoval hodnotám napětí, které by se blížily (např. pro Brewsterův úhel) nule. Může to být dáno okolním osvětlením, které v malé míře dopadalo do fotodiody. Ovšem v rámci odhadnuté 5% chyby voltmetru naměřená data odpovídala.

Měření se provádí s goniometrem, který je mírně mechanicky poškozen a při otáčení dochází k vyosení. To má za následek, že se odražený paprsek postupně posunuje ze středu fotodiody. Ovšem ukázalo se, že této chybou je zanedbatelná.

Naměřená data pro kolmou polarizaci jsem pomocí programu GNUplot fitoval vztahem (4). Tímto fitem jsem určil index lomu materiálů. Index lomu by také bylo možné určit pomocí vztahu (8), ovšem jak jsem uváděl v předcházejícím textu, tak najít přesně minimum pro odražený paprsek při rovnoběžné polarizaci bylo takřka nemožné, proto jsem raději použil tento postup. Pro první materiál mi statistická chyba fitu vyšla $\sigma_{stat\ m1} = 0,006$ a pro druhý materiál mi vyšla $\sigma_{stat\ m2} = 0,004$.

Pro určení chyby u vypočtených veličin jsem používal kvadratický zákon přenosu chyb uvedený v [2].

Závěr

Ověřil jsem platnost Fresnelových vztahů pro odraženou vlnu. Naměřené průběhy spolu s teoretickými hodnotami jsou znázorněny v grafu 1 až grafu 4.

Z dat pro kolmou polarizaci jsem určil indexy lomu používaných sklíček

$$n_{m1} = 1,54 \pm 0,05,$$

$$n_{m2} = 1,86 \pm 0,08.$$

Seznam použité literatury

- [1] P. Malý: *Optika*. Karolinum, Praha 2008. ISBN 978-80-246-1342-0.
- [2] J. English: *Zpracování výsledků fyzikálních měření*. Praha 2000. <http://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/mereni.pdf>