Úkoly

1. Najděte směr snadného průchodu polarizátoru užívaného v aparatuře.
2. Ověřte, že zdroj světla je polarizován kolmo k vodorovně 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.

Teorie

V tomto praktiku budeme zkoumat odrazivost materiálů a její závislost na úhlu dopadu, kterou popisují Fresnelovy vzorce:

$$r_k = \sqrt{\frac{E_{0k}}{E_k}} = \frac{\cos\theta - \sqrt{n^2 - \sin^2\theta}}{\cos\theta + \sqrt{n^2 - \sin^2\theta}} \tag{1}$$

$$r_s = \sqrt{\frac{E_{0s}}{E_s}} = \frac{n^2\cos\theta - \sqrt{n^2 - \sin^2\theta}}{n^2\cos\theta + \sqrt{n^2 - \sin^2\theta}} \tag{2}$$

kde jsme použili zákon lomu, index lomu vzduchu položili $n_v = 1$ a zavedli označení: index k – kolmá složka, s – rovnoběžná, E_0 – intenzita dopadajícího světla, E – odraženého, n – index lomu skel, θ – úhel dopadu

Uspořádání experimentu je dobře popsáno v [1], k určování intenzity záření jsme používali optodiodu připojenou na zesilovač signálu a voltmetr. Potom pro intenzitní (a amplitudový) koeficient platí vztah

$$R = \frac{U_\theta}{U_0}\ ; \quad |r| = \sqrt{R} \tag{3}$$

U rovnoběžné polarizace existuje význačný úhel zvaný Brewsterův, který lze pro náš experiment vypočíst podle vztahu

$$\theta_B = \arctan n \tag{4}$$

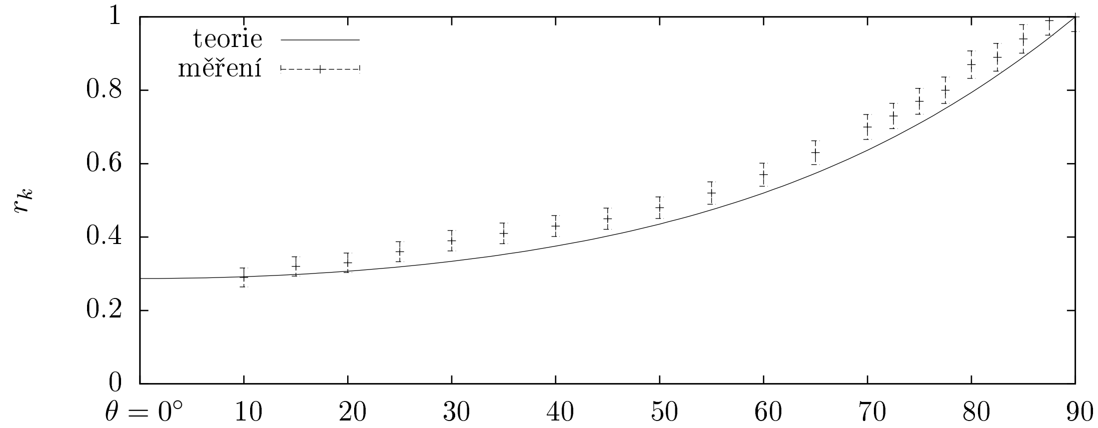
Pomůcky

laser, čtvrtvlnné destičky, polarizátor, goniometr, optodioda, zesilovač signálu, voltmetr, sklíčka, stolní lampa, chopper

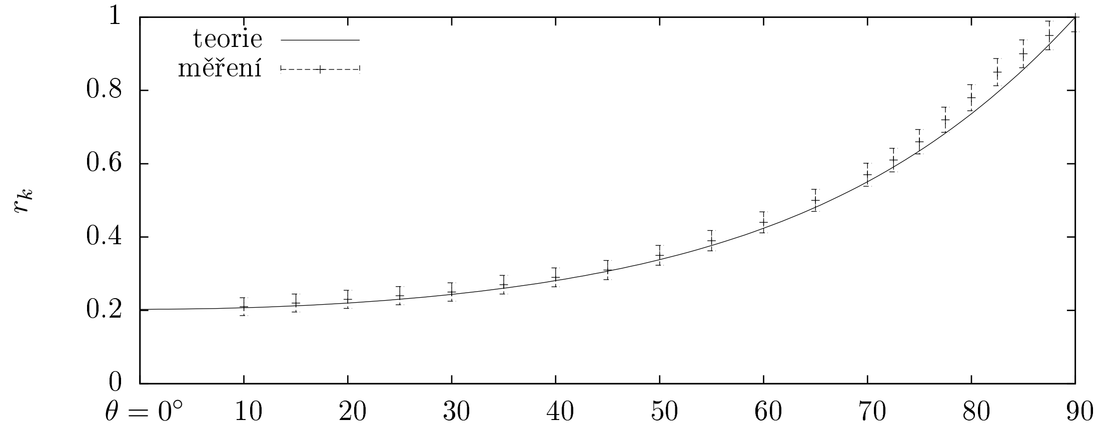
Měření

Polarizátor jsme nastavili tak, abychom při odrazu nepolarizovaného světla ze stolní lampičky od průhledného skla viděli nejnižší intenzitu světla. Tento jev byl nejlépe vidět, když jsme odraz pozorovali přes polarizátor přibližně pod Brewsterovým úhlem. Úhel natočení polarizátoru pak vyšel 53°.

Při měření na goniometru jsme postupovali tak, že jsme nejdříve změřili kolmou polarizaci pro oba vzorky a pak rovnoběžnou. U kolmé polarizace byl do cesty zařazen pouze polarizátor, u rovnoběžné ještě dvě čtvrtvlnné destičky, abychom stočili rovinu polarizace o pravý úhel. Měření jsme začali přibližně po dvaceti minutách od zapnutí laseru a pro každou destičku jsme je provedli nejvýše dvakrát, protože se při opakování výsledky dobře shodovaly. Naměřené hodnoty jsou v tabulkách 1 a 2.



Obrázek 1: závislost r_k na úhlu dopadu pro vzorek 1 $n = 1,8051$



Obrázek 2: závislost r_k na úhlu dopadu pro vzorek 2 $n = 1,509$

Naměřené hodnoty jsme nafitovali v programu GNUplot, vyšlo nám:

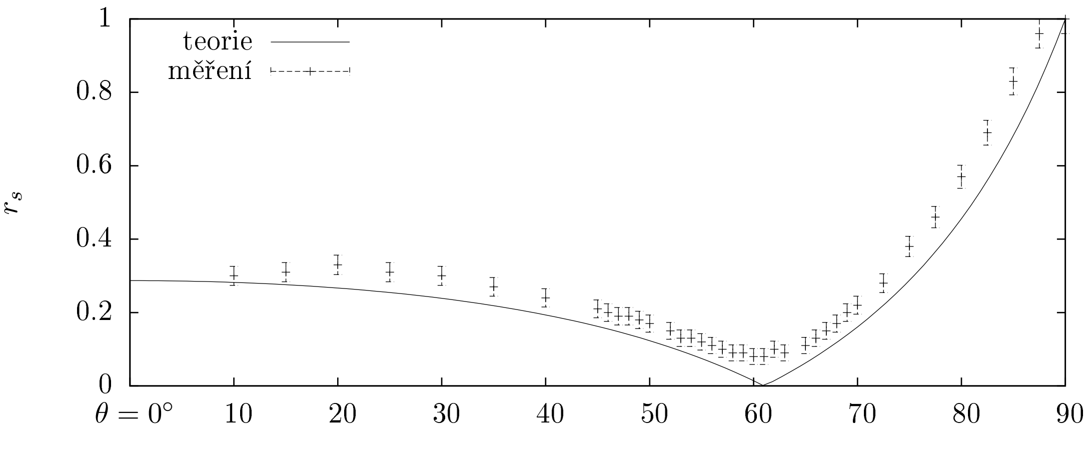
$$n_{k1} = 2,01 \pm 0,03\,; \quad \delta = 1,5\%$$

$$n_{s1} = 1,85 \pm 0,06\,; \quad \delta = 3,0\%$$

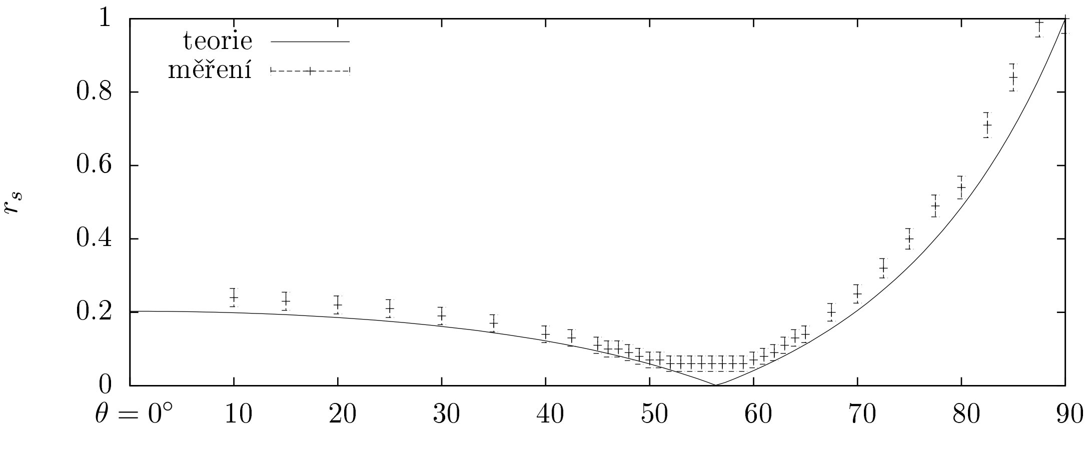
$$n_{k2} = 1,56 \pm 0,01\,; \quad \delta = 0,8\%$$

$$n_{s2} = 1,53 \pm 0,04\,; \quad \delta = 2,8\%$$

kde index k resp. s označuje kolmou resp. rovnoběžnou polarizaci a číslo první resp. druhý materiál.



Obrázek 3: závislost r_s na úhlu dopadu pro vzorek 1 $n = 1,8051$



Obrázek 4: závislost r_s na úhlu dopadu pro vzorek 2 $n = 1,509$

Brewsterovy úhly vyšly teoreticky a experimentálně (rovnice 4):

$$\theta_{B1teor} = 61,0°$$

$$\theta_{Bk1} = 63,5° \pm 0,6°$$

$$\theta_{Bs1} = 61,6° \pm 0,2°$$

$$\theta_{B2teor} = 56,5°$$

$$\theta_{Bk2} = 57,3° \pm 2,4°$$

$$\theta_{Bs2} = 56,8° \pm 1,7°$$

Diskuse

Z experimentálních výsledků zjišťujeme výchylku měření od teorie směrem k lepší odrazivosti. Příčinou může být příspěvek okolního osvětlení ke snímanému signálu. Jelikož naměřené hodnoty kopírují teoretickou křivku přibližně ve stejné vzdálenosti, tato příčina je docela pravděpodobná.

K dalším nepřesnostem při měření mohl přispět uvolněný držák u goniometru, nestálost laserového svazku a určení polarizace pouhým pozorováním „v ruce". Jelikož jsme však dbali zvýšené opatrnosti při obsluze goniometru, laser jsme zapnuli s dostatečným předstihem a odchylku od správné polarizace odhadujeme do deseti stupňů, soudíme, že tyto nedostatky do výsledku nevnesly značnou chybu.

Chyby určení koeficientů jsme odhadli (vzhledem k těžko měřitelným vlivům) na $\pm 0,02$ a 2%, což odpovídá odhadu chyby vnesené systémem zesilovač–voltmetr a zvyšujícímu se vlivu kolísání svazku (a tím určení intenzity dopadajícího světla) pro vyšší úhly.

Jelikož nás zajímá více velikost samotných koeficientů, ve výpočtech uvádíme jejich absolutní hodnoty.

Tabulka 1: Měření kolmé polarizace

θ [°]	**Vzorek 1**	n=1,8051	R_1	r_1	r_{teor}	**Vzorek 2**	n=1,509	R_1	r_1	r_{teor}
90	1812	1828	1,00	1,00	1,00	1915	1903	1,00	1,00	1,00
87,5	1771		0,97	0,99	0,94	1749	1697	0,90	0,95	0,93
85	1636	1613	0,89	0,94	0,89	1557	1536	0,81	0,90	0,86
82,5	1456		0,80	0,89	0,84	1376	1387	0,72	0,85	0,79
80	1392	1383	0,76	0,87	0,79	1172	1172	0,61	0,78	0,74
77,5	1170		0,64	0,80	0,75	974	991	0,51	0,72	0,68
75	1076	1068	0,59	0,77	0,71	827	825	0,43	0,66	0,63
72,5	978		0,54	0,73	0,67	717		0,38	0,61	0,59
70	892	876	0,49	0,70	0,64	624	622	0,33	0,57	0,55
65	716	709	0,39	0,63	0,57	473	471	0,25	0,50	0,48
60	595	593	0,33	0,57	0,52	366	371	0,19	0,44	0,42
55	498	488	0,27	0,52	0,47	288	289	0,15	0,39	0,38
50	428	421	0,23	0,48	0,44	231	233	0,12	0,35	0,34
45	370	372	0,20	0,45	0,40	189	187	0,10	0,31	0,31
40	335		0,18	0,43	0,38	156	157	0,08	0,29	0,28
35	305		0,17	0,41	0,35	133	136	0,07	0,27	0,26
30	276		0,15	0,39	0,33	119		0,06	0,25	0,24
25	241		0,13	0,36	0,32	107		0,06	0,24	0,23
20	202		0,11	0,33	0,31	103		0,05	0,23	0,22
15	188		0,10	0,32	0,30	95		0,05	0,22	0,21
10	148		0,08	0,29	0,29	88		0,05	0,21	0,21

Tabulka 2: Měření rovnoběžné polarizace

θ [°]	**Vzorek 1**	R_1	r_1	r_{teor}	θ [°]	**Vzorek 2**		R_1	r_1	r_{teor}
90	1921	1,00	1,00	1,00	90	1937	1923	1,00	1,00	1,00
87,5	1761	0,92	0,96	0,83	87,5	1875		0,98	0,99	0,84
85	1333	0,69	0,83	0,68	85	1377	1357	0,71	0,84	0,70
82,5	919	0,48	0,69	0,56	82,5	975		0,51	0,71	0,59
80	624	0,32	0,57	0,46	80	477	663	0,30	0,54	0,49
77,5	409	0,21	0,46	0,37	77,5	463		0,24	0,49	0,40
75	271	0,14	0,38	0,29	75	309	303	0,16	0,40	0,33
72,5	149	0,08	0,28	0,22	72,5	202		0,11	0,32	0,26
70	92	0,05	0,22	0,16	70	126	124	0,06	0,25	0,21
69	75	0,04	0,20	0,14	67,5	75		0,04	0,20	0,16
68	55	0,03	0,17	0,12	65	41	40	0,02	0,14	0,11
67	46	0,02	0,15	0,10	64	31		0,02	0,13	0,09
66	35	0,02	0,13	0,08	63	23		0,01	0,11	0,08
65	25	0,01	0,11	0,06	62	17		0,01	0,09	0,06
63	14	0,01	0,09	0,03	61	13		0,01	0,08	0,05
62	19	0,01	0,10	0,01	60	9		0,00	0,07	0,04
61	12	0,01	0,08	0,00	59	7		0,00	0,06	0,02
60	13	0,01	0,08	0,01	58	6		0,00	0,06	0,01
59	14	0,01	0,09	0,03	57	6		0,00	0,06	0,00
58	16	0,01	0,09	0,04	56	6		0,00	0,06	0,01
57	19	0,01	0,10	0,05	55	6		0,00	0,06	0,02
56	23	0,01	0,11	0,06	54	6		0,00	0,06	0,03
55	27	0,01	0,12	0,07	53	6		0,00	0,06	0,04
54	32	0,02	0,13	0,09	52	7		0,00	0,06	0,05
53	34	0,02	0,13	0,10	51	9		0,00	0,07	0,06
52	43	0,02	0,15	0,11	50	10		0,01	0,07	0,07
50	53	0,03	0,17	0,12	49	13		0,01	0,08	0,07
49	59	0,03	0,18	0,13	48	15		0,01	0,09	0,08
48	66	0,03	0,19	0,14	47	18		0,01	0,10	0,08
47	72	0,04	0,19	0,15	46	20		0,01	0,10	0,09
46	77	0,04	0,20	0,16	45	23	23	0,01	0,11	0,10
45	84	0,04	0,21	0,16	42,5	32		0,02	0,13	0,12
40	114	0,06	0,24	0,19	40	40	39	0,02	0,14	0,12
35	143	0,07	0,27	0,22	35	56	55	0,03	0,17	0,14
30	171	0,09	0,30	0,24	30	71	70	0,04	0,19	0,16
25	184	0,10	0,31	0,25	25	84	83	0,04	0,21	0,18
20	215	0,11	0,33	0,27	20	95	93	0,05	0,22	0,19
15	185	0,10	0,31	0,28	15	103		0,05	0,23	0,19
10	171	0,09	0,30	0,28	10	109		0,06	0,24	0,20

Závěr

Měřili jsme závislost amplitudových koeficientů na úhlu dopadu pro polarizaci kolmou i rovnoběžnou k rovině dopadu. Výsledky měření jsou v tabulkách 1 a 2, grafické zpracování jejich průběhu s konfrontací s teoretickou závislostí je na obrázcích 1–4. Indexy lomů měřených vzorků vyšly:

$$n_1 = 1,9 \pm 0,1$$

$$n_2 = 1,55 \pm 0,02$$

Literatura

[1] text k úlohám z pratika 3, http://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/zadani_f3.htm