

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.

Teorie

Fresnelovy vzorce popisují zákon odrazu a zákon lomu při dopadu světla na rozhraní dvou

prostředí [1]:
$$r_{\perp} = \frac{\cos \alpha - \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}}{\cos \alpha + \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}} = \sqrt{\frac{E_{0r}^{\perp}}{E_0^{\perp}}} \quad (1)$$

$$r_{\parallel} = \frac{n^2 \cos \alpha - \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}}{n^2 \cos \alpha + \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}} = \sqrt{\frac{E_{0r}^{\parallel}}{E_0^{\parallel}}} \quad (2)$$

kde n_1 je index lomu prostředí, odkud dopadá paprsek, n_2 index lomu prostředí, na kterém se odráží. α je úhel dopadu paprsku. E_{0r} , E_0 jsou pak intenzity dopadajícího resp. odraženého záření pro kolmou a rovnoběžnou složku.

Daný experiment je dobře popsán v [1].

V daném experimentu jsme pro určení intenzity používali optodiodu, na kterou byl připojen voltmetr. Odrazivost měřeného materiálu pak získáme ze vztahu [1]:

$$R = \sqrt{r_{\perp, \parallel}^2} = \frac{U_{\alpha}}{U_0} \quad (3)$$

kde U_{α} je hodnota napětí při úhlu dopadu α a U_0 je napětí při klouzavém dopadu.

V experimentu používáme lineárně polarizované světlo, pro které existuje význačný Brewsterův úhel, který lze vypočítat dle [1] podle vztahu:

$$\alpha_B = \arctg n \quad (4)$$

Výsledky měření

V prvním úkolu jsem hledala směr snadného průchodu polarizátoru. Nechala jsem nepolarizované světlo stolní lampičky odrážet na skle, stoupla si zhruba do Brewsterova úhlu a hledala, při jakém natočení polarizátorem je pole nejtmaší. K této hodnotě jsem pak přičetla 90° . Úhel natočení polarizátoru jsem naměřila **$(54 \pm 4)^\circ$** .

Polarizátor jsem vložila do aparatury, odstranila čtvrtvlnné destičky a opět hledala směr snadného průchodu, tedy, kdy bude voltmetr ukazovat nejvyšší intenzitu.

Úhel natočení polarizátoru naměřený touto metodou vyšel $(58 \pm 4)^\circ$.

Při měření na goniometru jsem měřila závislost intenzity odraženého záření na úhlu dopadu. Omylem jsem měla nesprávně nastavené čtvrtvlnné destičky, které stáčely rovinu polarizace záření. Tím jsem snížila intenzitu dopadajícího světla, a tak musím uvažovat větší chybu měření.

Měřila jsem rovnoběžnou a kolmou polarizaci pro dva vzorky o indexech lomu $n=1,509$ a $n=1,8051$.

Tabulka I – Kolmá polarizace pro vzorek 1 - $n=1,509$

α [°]	$U_{\alpha 1}$ [V]	$U_{\alpha 2}$ [V]	R_1	R_2	r_1	σ_{r1}	r_2	σ_{r2}	r_{teor}
90	345	330	1,00	1,00	1,00	0,03	1,00	0,03	1,00
89,5	325	-	0,94	-	0,97	0,03	-	-	0,98
89	332	-	0,96	-	0,98	0,03	-	-	0,97
88,5	315	-	0,91	-	0,96	0,03	-	-	0,95
88	306	-	0,89	-	0,94	0,03	-	-	0,94
87,5	296	-	0,86	-	0,93	0,03	-	-	0,93

87	288	-	0,83	-	0,91	0,03	-	-	0,91
86,5	279	-	0,81	-	0,90	0,03	-	-	0,90
86	273	-	0,79	-	0,89	0,03	-	-	0,88
85,5	263	-	0,76	-	0,87	0,03	-	-	0,87
85	257	276	0,74	0,84	0,86	0,03	0,91	0,03	0,86
84	241	-	0,70	-	0,84	0,03	-	-	0,83
83	226	-	0,66	-	0,81	0,03	-	-	0,81
82	212	-	0,61	-	0,78	0,03	-	-	0,78
81	200	-	0,58	-	0,76	0,03	-	-	0,76
80	192	202	0,56	0,61	0,75	0,03	0,78	0,03	0,74
79	185	-	0,54	-	0,73	0,03	-	-	0,71
78	176	-	0,51	-	0,7	0,03	-	-	0,69
77	167	-	0,48	-	0,70	0,03	-	-	0,67
76	158	-	0,46	-	0,68	0,03	-	-	0,65
75	150	153	0,43	0,46	0,66	0,03	0,68	0,03	0,63
72,5	126	-	0,37	-	0,60	0,03	-	-	0,59
70	109	118	0,32	0,36	0,56	0,03	0,60	0,03	0,55
67,5	93	-	0,27	-	0,52	0,04	-	-	0,51
65	80	91	0,23	0,28	0,48	0,04	0,53	0,04	0,481
62,5	69	-	0,20	-	0,45	0,04	-	-	0,45
60	61	70	0,18	0,21	0,42	0,04	0,46	0,04	0,42
57,5	54	-	0,16	-	0,40	0,04	-	-	0,40
55	48	55	0,14	0,17	0,37	0,04	0,41	0,04	0,38
50	39	44	0,11	0,13	0,34	0,05	0,37	0,04	0,34
45	32	33	0,09	0,10	0,30	0,05	0,32	0,05	0,31
40	27	27	0,08	0,08	0,28	0,06	0,29	0,06	0,28
35	23	23	0,07	0,07	0,26	0,06	0,26	0,06	0,26
30	20	21	0,06	0,07	0,24	0,06	0,25	0,06	0,24
25	18	18	0,05	0,05	0,23	0,07	0,23	0,07	0,23
20	17	17	0,05	0,05	0,22	0,07	0,23	0,07	0,22
15	16	16	0,05	0,05	0,22	0,07	0,22	0,07	0,21
12,5	15	16	0,04	0,05	0,21	0,07	0,22	0,07	0,21

Tabulka II – Kolmá polarizace pro vzorek 2 - n=1,8051

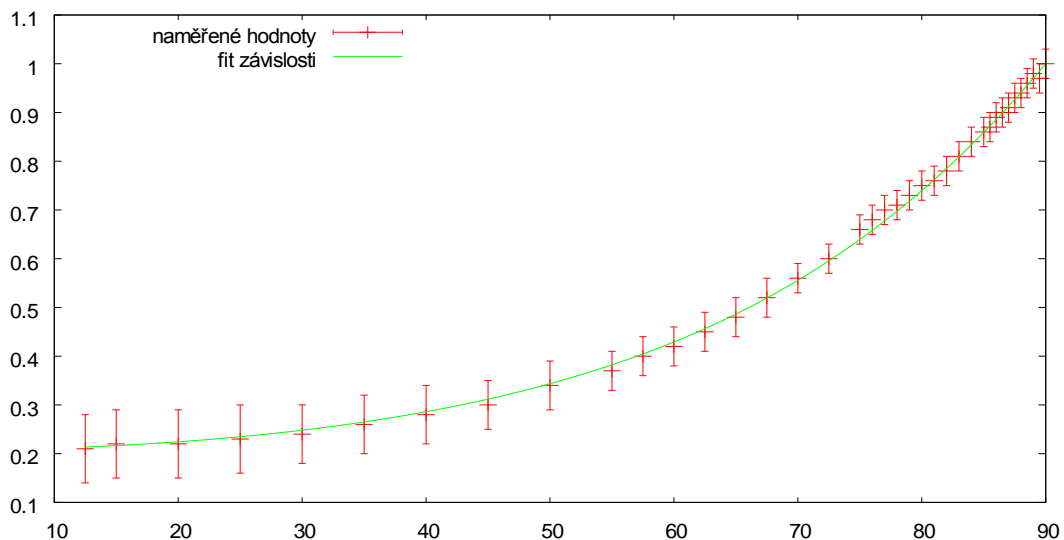
α [°]	$U_{\alpha 1}$ [V]	R	r	σ_r	r_{teor}
90	350	1,00	1,00	0,03	1,00
87,5	314	0,90	0,95	0,03	0,93
85	280	0,80	0,89	0,03	0,86
82,5	248	0,71	0,84	0,03	0,79
80	220	0,63	0,79	0,03	0,74
77,5	195	0,56	0,75	0,03	0,68
75	177	0,51	0,71	0,03	0,63
72,5	158	0,45	0,67	0,03	0,59
70	142	0,41	0,64	0,03	0,55

67,5	128	0,37	0,60	0,03	0,51
65	117	0,33	0,58	0,06	0,48
62,5	107	0,31	0,55	0,03	0,45
60	98	0,28	0,53	0,03	0,42
57,5	89	0,25	0,50	0,04	0,40
55	82	0,23	0,48	0,04	0,38
52,5	76	0,22	0,47	0,04	0,36
50	70	0,20	0,45	0,04	0,34
47,5	65	0,19	0,43	0,04	0,32
45	61	0,17	0,42	0,04	0,31
42,5	57	0,16	0,40	0,04	0,29
40	53	0,15	0,39	0,04	0,28
37,5	50	0,14	0,38	0,04	0,27
35	47	0,13	0,37	0,04	0,26
32,5	45	0,13	0,36	0,04	0,25
30	43	0,12	0,35	0,05	0,24
27,5	41	0,12	0,34	0,05	0,24
25	39	0,11	0,33	0,05	0,23
22,5	38	0,11	0,33	0,05	0,22
20	37	0,11	0,33	0,05	0,22
17,5	36	0,10	0,32	0,05	0,22
15	35	0,10	0,32	0,05	0,21
12,5	32	0,09	0,30	0,05	0,21

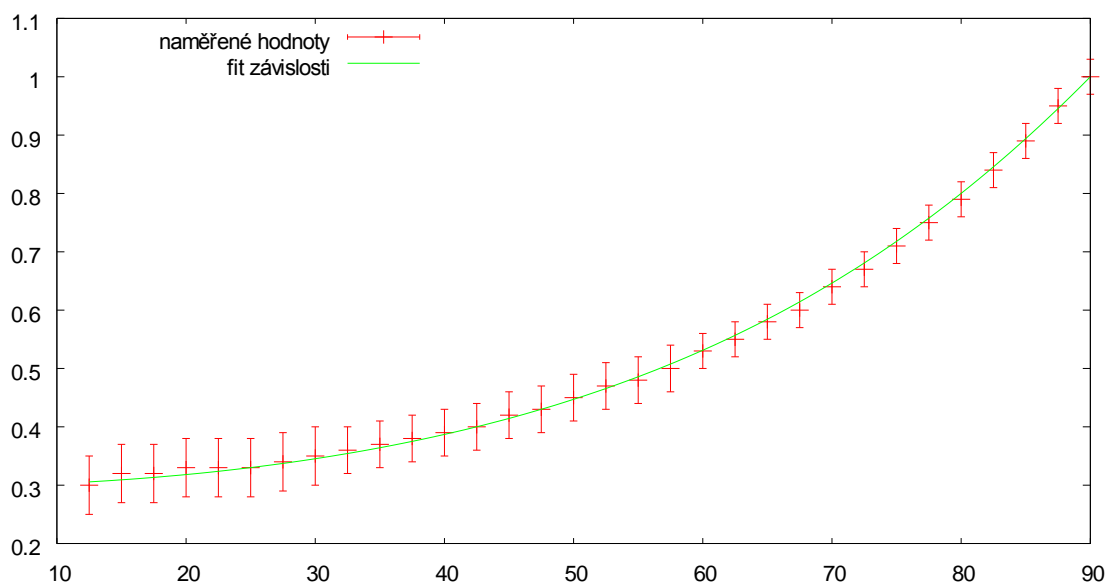
Chybu určení úhlu α uvažuji $\pm 0,05^\circ$, což je polovina nejmenšího dílku stupnice goniometru. Chybu určení napětí U uvažuji $\pm 10V$ u každého měření. Pozorovala jsem sice pouze výchylky $\pm 2V$, ale kvůli špatnému nastavení čtvrtvlnných destiček a následnému snížení intenzity světla musím uvažovat chybu větší. Chyba výsledné veličiny r je vypočítána podle vzorců pro přenos chyb.

Naměřené hodnoty jsem zpracovala do Grafu I a II. Naměřenou závislost jsem fitovala vzorcem (1). Z tohoto fitu jsem získala experimentálně naměřenou hodnotu indexu lomu vzorku n .

Graf I - kolmá polarizace, vzorek 1



Graf II - kolmá polarizace, vzorek 2



$$n_{\perp,1} = (1,52 \pm 0,05) (\delta = 0,4\%)$$

$$n_{\perp,2} = (1,85 \pm 0,05) (\delta = 0,3\%)$$

Tabulka III – rovnoběžná polarizace, vzorek 1 – n=1,509

α [°]	U_{α} [V]	R	r	σ_r	r_{teor}
90	290	1,00	1,00	0,03	1,00
85	142	0,49	0,70	0,04	0,86
80	66	0,23	0,48	0,04	0,74
75	28	0,10	0,31	0,06	0,63
70	11	0,04	0,19	0,09	0,55
69	9	0,03	0,18	0,10	0,54
68	8	0,03	0,17	0,11	0,52
67	7	0,02	0,16	0,11	0,51
66	6	0,02	0,14	0,12	0,49
65	6	0,02	0,14	0,12	0,48
64	6	0,02	0,14	0,12	0,47
63	6	0,02	0,14	0,12	0,46
62	6	0,02	0,14	0,12	0,45
61	6	0,02	0,14	0,12	0,43
60	6	0,02	0,14	0,12	0,42
59	6	0,02	0,14	0,12	0,41
58	6	0,02	0,14	0,12	0,40
57	6	0,02	0,14	0,12	0,39
56	6	0,02	0,14	0,12	0,39
55	6	0,02	0,14	0,12	0,38
54	6	0,02	0,14	0,12	0,37
53	6	0,02	0,14	0,12	0,36
52	6	0,02	0,14	0,12	0,35
51	6	0,02	0,14	0,12	0,35
50	6	0,02	0,14	0,12	0,34

49	6	0,02	0,14	0,12	0,33
48	6	0,02	0,14	0,12	0,32
47	7	0,02	0,16	0,11	0,32
46	7	0,02	0,16	0,11	0,31
45	7	0,02	0,16	0,11	0,31
44	7	0,02	0,16	0,11	0,30
43	8	0,03	0,17	0,11	0,30
40	9	0,03	0,18	0,10	0,28
37,5	10	0,03	0,19	0,10	0,27
35	10	0,03	0,19	0,10	0,26
30	12	0,04	0,20	0,09	0,24
25	14	0,05	0,22	0,08	0,23
20	15	0,05	0,23	0,08	0,22
15	16	0,06	0,23	0,08	0,21

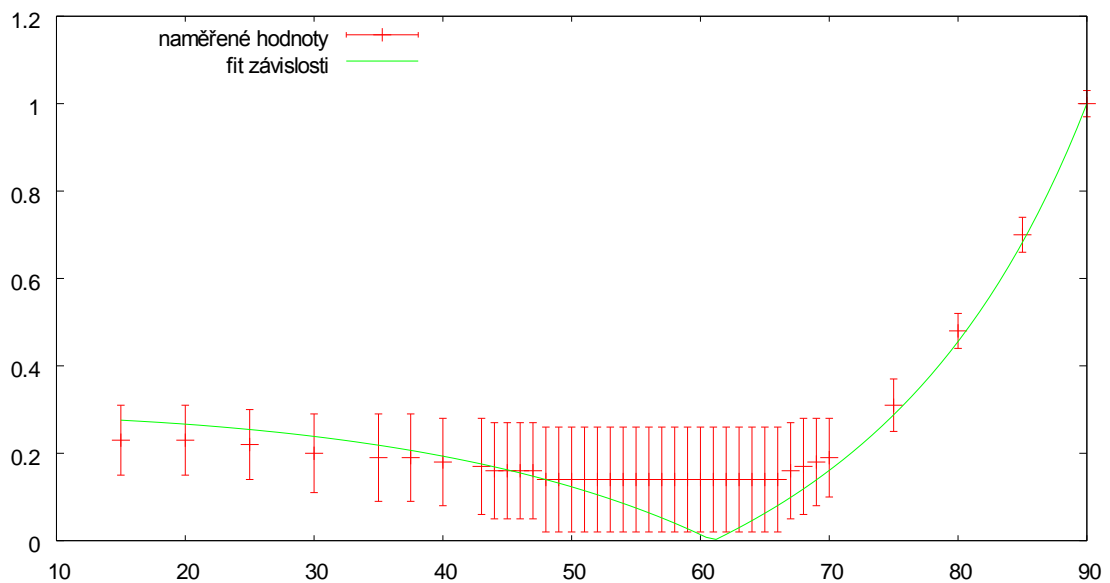
Tabulka IV – rovnoběžná polarizace, vzorek 2 – n=1,8051

α [°]	$U_{\alpha 1}$ [V]	R	r	σ_r	r_{teor}
90	315	1,00	1,00	0,03	1,00
89,5	295	0,94	0,97	0,03	0,98
89	278	0,88	0,94	0,03	0,97
88,5	255	0,81	0,90	0,03	0,95
88	242	0,77	0,88	0,03	0,94
87,5	223	0,71	0,84	0,03	0,93
87	205	0,65	0,81	0,03	0,91
86,5	190	0,60	0,78	0,03	0,90
86	175	0,56	0,75	0,03	0,88
85,5	162	0,51	0,72	0,03	0,87
85	150	0,48	0,69	0,03	0,86
84	123	0,39	0,62	0,04	0,83
83	105	0,33	0,58	0,04	0,81
82	87	0,28	0,53	0,04	0,78
81	73	0,23	0,48	0,04	0,76
80	62	0,20	0,44	0,04	0,74
77,5	38	0,12	0,35	0,05	0,68
75	24	0,08	0,28	0,06	0,63
72,5	15	0,05	0,22	0,08	0,59
70	9	0,03	0,17	0,10	0,55
69	8	0,03	0,16	0,10	0,54
68	7	0,02	0,15	0,11	0,52
67	6	0,02	0,14	0,12	0,51
66	6	0,02	0,14	0,12	0,49
65	6	0,02	0,14	0,12	0,48
64	6	0,02	0,14	0,12	0,47
63	6	0,02	0,14	0,12	0,46
62	6	0,02	0,14	0,12	0,45
61	6	0,02	0,14	0,12	0,43

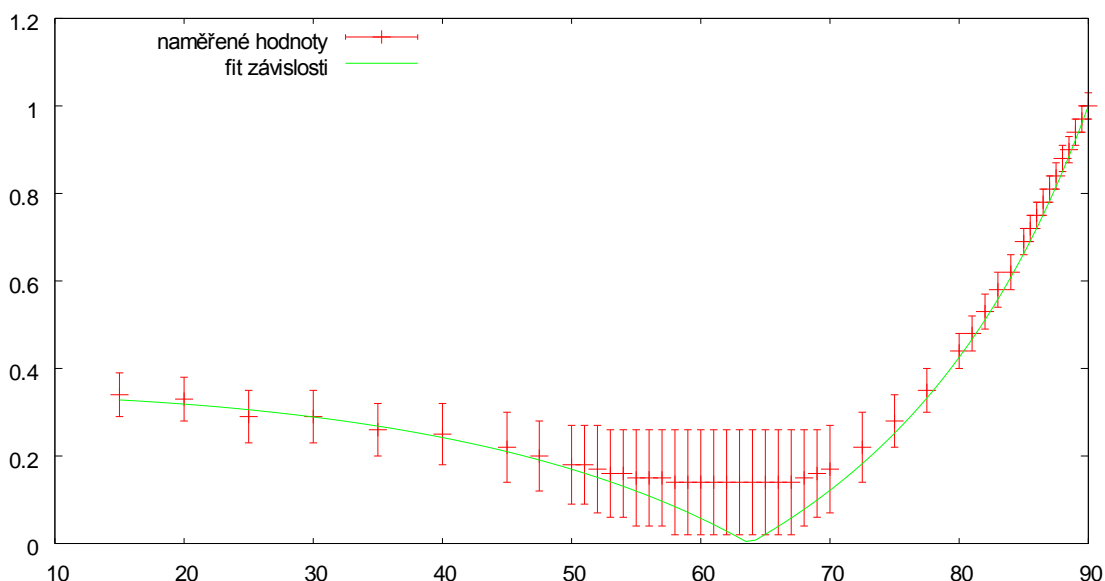
60	6	0,02	0,14	0,12	0,42
59	6	0,02	0,14	0,12	0,41
58	6	0,02	0,14	0,12	0,40
57	7	0,02	0,15	0,11	0,39
56	7	0,02	0,15	0,11	0,39
55	7	0,02	0,15	0,11	0,38
54	8	0,03	0,16	0,10	0,37
53	8	0,03	0,16	0,10	0,36
52	9	0,03	0,17	0,10	0,35
51	10	0,03	0,18	0,09	0,35
50	10	0,03	0,18	0,09	0,34
47,5	12	0,04	0,20	0,08	0,32
45	15	0,05	0,22	0,08	0,31
40	19	0,06	0,25	0,07	0,28
35	22	0,07	0,26	0,06	0,26
30	26	0,08	0,29	0,06	0,24
25	27	0,09	0,29	0,06	0,23
20	34	0,11	0,33	0,05	0,22
15	37	0,12	0,34	0,05	0,21

Chyby uvažují stejné jako u měření kolmé polarizace. Chyby veličiny r jsou opět vypočítány ze vzorců pro přenos chyb.

Graf III - rovnoběžná polarizace, vzorek 1



Graf IV - rovnoběžná polarizace, vzorek 2



$$n_{II,1} = (1,8 \pm 0,5) \quad (\delta = 2,7\%)$$

$$n_{II,2} = (2,0 \pm 0,5) \quad (\delta = 2,3\%)$$

Z naměřených hodnot pro rovnoběžnou polarizaci lze podle vztahu (4) určit hodnotu Brewsterova úhlu. Tyto hodnoty porovnáme s teoreticky vypočtenými.

$$\alpha_{B,1teor} = 56,5^\circ$$

$$\alpha_{B,2teor} = 61,0^\circ$$

$$\alpha_{B,\perp 1} = (56,7 \pm 0,2)^\circ$$

$$\alpha_{B,\perp 2} = (61,6 \pm 0,3)^\circ$$

$$\alpha_{B,II 1} = (60,9 \pm 1,6)^\circ$$

$$\alpha_{B,II 2} = (63,4 \pm 1,5)^\circ$$

Diskuze

Při určování směru snadného průchodu polarizátoru bylo obtížné přesně najít místo, kdy je pole nejtmaší. Pole se totiž ztmavovalo kontinuálně. Chybu tohoto měření uvažuji $\pm 4^\circ$.

Při měření závislosti intenzity odraženého světla na úhlu dopadu jsem měla nastavenou aparaturu ne příliš optimálně. Snížila jsem si tím celkovou intenzitu světla. Z toho důvodu je nutné uvažovat větší chybu při odečtu z voltmetru. byla pozorována výchylka $\pm 2V$, já tuto chybu uvažuji $\pm 10V$. Jak je vidět z Grafu I a II, při měření kolmé polarizace se mnou naměřené hodnoty shodují s ověřovanou teoretickou závislostí. Při měření rovnoběžné polarizace taktéž. Avšak pravděpodobně díky zmiňované malé intenzitě světla nebylo možné změřit s větší přesností minimum závislosti – tedy Brewsterův úhel.

Z naměřených závislostí jsem dále určila indexy lomu měřených vzorků. Naměřené hodnoty se v rámci chyby shodují s hodnotami danými výrobcem.

Závěr

V tomto praktiku jsem se seznámila s experimentem ověřujícím platnost Fresnelových vzorců. Naměřila jsem směr snadného průchodu polarizátoru $(54 \pm 4)^\circ$.

Naměřila jsem závislost intenzity odraženého světla na úhlu dopadu pro kolmou i rovnoběžnou polarizaci. Závislosti jsou znázorněny v Grafech I-IV.

Z těchto hodnot jsem určila indexy lomu měřených vzorků:

$$n_1 = (1,66 \pm 0,05)$$

$$n_2 = (1,93 \pm 0,05)$$

Dále jsem určila hodnoty Brewsterova úhlu: $\alpha_{B,1} = (59 \pm 2)^\circ$

$$\alpha_{B,2} = (63 \pm 2)^\circ$$

Použitá literatura

[1] I. Pelant a kolektiv – Fyzikální praktikum III, Optika; matfyzpress; 2005