

Oddělení fyzikálních praktik při Kabinetu výuky obecné fyziky MFF UK

PRAKTIKUM III

Úloha č.: 07

Název: Overenie Fresnelových vzorcov

Vypracoval: Viktor Babjak.....stud. sk. F 11 dne: 11. 04. 2006

Odevzdal dne:

Hodnocení:

Připomínky:

Žiadne J

kapitola referátu	možný počet bodů	udělený počet bodů
Teoretická část	0 - 3	3
Výsledky měření	0 - 10	10
Diskuse výsledků	0 - 4	4
Závěr	0 - 2	2
Seznam použité literatury	0 - 1	1
Celkem	max. 20	20

Posuzoval:.....

dne:.....

Pracovné úlohy:

1. Nájdite smer ľahkého prechodu polarizátora používaného v aparátúre.
2. Overte, že zdroj svetla je polarizovaný kolmo ku vodorovnej rovine.
3. Na priložených vzorkách premerajte závislosť intenzity odrazeného svetla na uhle dopadu pre *TE* i *TM* polarizáciu.
4. Namerané výsledky porovnajte s teoretickým priebehom závislosti.
5. Určite indexy lomu meraných vzoriek a ich relatívnu chybu.

Teoretická časť:

Na rozhraní dvoch optických prostredí s rôznymi indexmi lomu n_1 a n_2 dochádza k odrazu a lomu. Pre lomené lúče platí Snellov zákon, vid' [1]

$$n_1 \sin a = n_2 \sin b, \quad (1)$$

kde a je uhol dopadu a b uhol lomu meraný od normály k dopadajúcemu lúču.

Pomery amplitúd elektrického poľa dopadajúceho a odrazeného (resp. lomeného) žiarenia môžeme určiť pomocou spojitosti dotyčnicových zložiek vektorov elektrickej intenzity a magnetickej indukcie; sú tzv. Fresnelove vzorce. T.j. Fresnelove vzorce sú vzťahy pre koeficienty odrazivosti resp. transmisivity pre vlny elektrického poľa polarizovaného kolmo resp. rovnobežne s rovinou dopadu, platí

$$r^\perp = \frac{n_1 \cos a - n_2 \cos b}{n_1 \cos a + n_2 \cos b} = \frac{\cos a - \sqrt{n^2 - \sin^2 a}}{\cos a + \sqrt{n^2 - \sin^2 a}}, \quad (2)$$

$$r^\parallel = \frac{n_2 \cos a - n_1 \cos b}{n_2 \cos a + n_1 \cos b} = \frac{n^2 \cos a - \sqrt{n^2 - \sin^2 a}}{n^2 \cos a + \sqrt{n^2 - \sin^2 a}}. \quad (3)$$

Vzťahy pre r^\perp a r^\parallel som upravil pomocou Snellovho zákona (1). Ďalej som predpokladal, že index lomu vzduchu je $n_1 = 1$ a zaviedol som označenie $n_2 = n$.

Svetlo dopadá na rozhranie pod Brewsterovým uhlom α_B , keď $r^\parallel = 0$, t.j. zložka odrazeného poľa polarizovaná rovnobežne s rovinou dopadu je nulová. Pre Brewsterov uhol platí, vid' [1]

$$\tan \alpha_B = \frac{n_2}{n_1} = n. \quad (4)$$

Na meranie intenzity odrazeného svetla sa používa dióda goniometra, vid' 2. Intenzita dopadajúceho žiarenia je prevedená na napätie, ktoré sa odčíta na multimetri. Pre odrazivosť R podľa [1] platí

$$R^{\perp,\parallel} = (r^{\perp,\parallel})^2 = \frac{U_a}{U_0}, \quad (5)$$

kde U_a je hodnota napätie zodpovedajúce veľkosti odrazeného signálu pri uhle dopadu a . Goniometer zobrazuje uhol γ meraný od roviny rozhrania k lúču, t.j. platí $a = 90^\circ - \gamma$.

Výsledky meraní:

Smer ľahkého prechodu, polarizácia lasera

Pomocou stolnej lampy a sklenenej doštičky pripevnenej na stene som určil smer ľahkého prechodu použitého polarizátora, pričom uhol dopadu som sa snažil nastaviť blízko Brewsterovmu uhlu α_B . Pri maximálnej intenzite prechádzajúceho svetla je smer ľahkého prechodu polarizátorom rovnobežný s polarizáciou odrazeného zväzku. Pre citlivejšie nastavenie som hľadal minimum prechádzajúcej intenzity, keď smer ľahkého prechodu polarizátorom je natočený kolmo k rovine polarizácie.

Pomocou tohto polarizátora som určil uhol polarizácie lasera na polarizátore. Pre citlivejšie nastavenie som takisto hľadal minimum signálu na voltmetri.

Chybu určenia smeru ľahkého prechodu odhadujem na 3° ; chybu určenia uhla polarizácie lasera odhadujem na 2° . Namerané hodnoty sú uvedené v *tabuľke 1*.

Tabuľka 1 – Určovanie roviny polarizácie dopadajúceho zväzku

polarizátor [°]	86	86	87	86	87
laser [°]	84	85	84	84	84

T.j. namerál som hodnoty:

- smer ľahkého prechodu polarizátora: $(176,4 \pm 3)^\circ$
- uhol polarizácie lasera na polarizátore: $(174,2 \pm 2)^\circ$

Rovina polarizácie dopadajúceho zväzku je otočená o 90° voči nájdenej polohe – z nameraných hodnôt vyplýva, že laser bol polarizovaný v rovine kolmej ku rovine dopadu.

Brewsterov uhol α_B

Pre obe vzorky som určil Brewsterov uhol α_B . Pri určovaní α_B som postupoval tak, že podľa (4) som určil teoretickú hodnotu Brewsterovho uhla a potom som pri rovnobežnej polarizácii hľadal uhol dopadu, pri ktorom na voltmetri bola minimálna intenzita.

Teoretická hodnota Brewsterovho uhla α_B :

- vzorka A ($n_A = 1,509$): $\alpha_{B_A} = 56,47^\circ$
- vzorka B ($n_B = 1,8051$): $\alpha_{B_B} = 61,01^\circ$

Namerané hodnoty sú uvedené v tabuľke 2.

Tabuľka 2 – Určovanie Brewsterovho uhla

vzorka A [$90^\circ - \alpha$]	34,38	34,00	34,12
vzorka B [$90^\circ - \alpha$]	29,16	28,62	29,22

Z nameraných hodnôt som určil priemernú hodnotu, pričom ako chybu α_B uvažujem smerodajnú odchýlku aritmetického priemeru hodnôt:

- vzorka A: $\alpha_{B_A} = (55,83 \pm 0,16)^\circ$
- vzorka B: $\alpha_{B_B} = (61,00 \pm 0,27)^\circ$

Závislosť intenzity odrazeného svetla na uhle dopadu

Podľa postupu v [1] som pre dve vzorky (označujem ich indexmi A a B) určil závislosť intenzity odrazeného svetla na uhle dopadu pre kolmú aj rovnobežnú polarizáciu.

Merané vzorky A a B mali uvedený index lomu:

- vzorka A: $n_A = 1,509$
- vzorka B: $n_B = 1,8051$

Z dôvodu nestabilizovaného napájania meraná intenzita lasera kolísala, a preto som jednotlivé merania napätia na voltmetri opakoval: pri kolmej polarizácii som pre každý uhol namerál štyri hodnoty napätia; pri rovnobežnej polarizácii tri hodnoty napätia. Relatívnu chybu merania napätia odhadujem na 5 %.

Z nameraných hodnôt som určil priemernú hodnotu U_s , pričom chybu U_s som určil ako smerodajnú odchýlku aritmetického priemeru hodnôt, viď [2].

Namerané hodnoty sú uvedené v tabuľkách 3 – 6. V týchto tabuľkách uvádzam aj amplitúdové koeficienty r^\perp resp. r^\parallel , pričom ich chybu som určil pomocou štandardnej teórie šírenia chýb, viď [2].

Ak žiarenie dopadá na vzorku pod Brewsterovým uhlom pri polarizácii rovnobežnej s rovinou dopadu, tak od vzorky by sa nemalo odrážať žiadne žiarenie, no pri určovaní α_B som namerál určitú hodnotu napätia na voltmetri. Spôsobuje to žiarenie z okolia aparatúry, a preto hodnotu napätia nameranú pri Brewsterovom uhle pri rovnobežnej polarizácii som odčítal od U_s , a tak som získal hodnotu U'_s . Korigované hodnoty nameraného napätia U'_s sú uvedené v tabuľkách 5 – 6.

Tabuľka 3 – Namerané napätia a vypočítané hodnoty odrazivosti pre vzorku A pre kolmú polarizáciu

α [°]	U [V]	U [V]	U [V]	U [V]	U_s [V]	S_{U_s} [V]	r^\perp	S_{r^\perp}
90	9,600	9,793	9,766	9,620	9,695	0,086	1,000	0,018
85	7,273	7,010	6,999	6,870	7,038	0,146	0,852	0,025
80	5,407	5,210	5,182	5,260	5,265	0,087	0,737	0,019
75	4,409	4,100	3,845	3,903	4,064	0,220	0,647	0,041
70	3,140	3,056	2,882	2,945	3,006	0,099	0,557	0,023
65	2,467	2,320	2,227	2,263	2,319	0,092	0,489	0,024
60	1,776	1,792	1,750	1,772	1,773	0,015	0,428	0,007
55	1,396	1,330	1,420	1,413	1,390	0,036	0,379	0,013
50	1,136	1,045	1,167	1,132	1,120	0,045	0,340	0,017
45	0,946	0,899	0,972	0,862	0,920	0,042	0,308	0,017
40	0,855	0,766	0,820	0,718	0,790	0,052	0,285	0,021
35	0,728	0,666	0,709	0,650	0,688	0,031	0,266	0,015
30	0,609	0,589	0,627	0,549	0,594	0,029	0,247	0,014
25	0,510	0,533	0,544	0,502	0,522	0,017	0,232	0,010
20	0,491	0,507	0,480	0,460	0,485	0,017	0,224	0,010
15	0,461	0,474	0,445	0,432	0,453	0,016	0,216	0,009
10	0,372	0,375	0,400	0,399	0,387	0,013	0,200	0,009

Tabuľka 4 – Namerané napätia a vypočítané hodnoty odrazivosti pre vzorku B pre kolmú polarizáciu

α [°]	U [V]	U [V]	U [V]	U [V]	U_s [V]	S_{U_s} [V]	r^\perp	S_{r^\perp}
90	9,538	9,350	9,370	9,080	9,335	0,164	1,000	0,035
85	7,314	7,650	7,716	7,130	7,453	0,241	0,894	0,045
80	5,898	6,150	6,245	5,770	6,016	0,190	0,803	0,040
75	4,800	4,842	4,960	4,780	4,846	0,070	0,720	0,023
70	4,006	3,790	3,898	3,620	3,829	0,143	0,640	0,035
65	3,375	3,000	3,097	2,905	3,094	0,176	0,576	0,043
60	2,857	2,460	2,551	2,400	2,567	0,176	0,524	0,045
55	2,411	2,085	2,184	2,052	2,183	0,140	0,484	0,040
50	1,996	1,820	1,885	1,791	1,873	0,079	0,448	0,027
45	1,693	1,565	1,657	1,582	1,624	0,053	0,417	0,021
40	1,445	1,420	1,460	1,408	1,433	0,020	0,392	0,012
35	1,274	1,260	1,285	1,250	1,267	0,013	0,368	0,010
30	1,146	1,132	1,143	1,126	1,137	0,008	0,349	0,009
25	1,050	1,033	1,034	1,030	1,037	0,008	0,333	0,008
20	0,960	0,952	0,953	0,950	0,954	0,004	0,320	0,007
15	0,880	0,881	0,882	0,880	0,881	0,001	0,307	0,006
10	0,845	0,842	0,842	0,840	0,842	0,002	0,300	0,006

Hodnoty napätia v tabuľkách 5 – 6 písané kurzívou sú vo V (ostatné hodnoty sú v mV). V okolí Brewsterovho uhla ($\pm 6^\circ$) som zvolil merací krok 1° .

Tabuľka 5 – Namerané napätia a vypočítané hodnoty odrazivosti pre vzorku A pre rovnobežnú polarizáciu

α [°]	U [mV]	U [mV]	U [mV]	U_s' [mV]	S_{U_s} [mV]	r^{\parallel}	$S_{r^{\parallel}}$
90	3,133	3,095	3,212	3,125	0,049	1,000	0,031
85	1,556	1,520	1,579	1,530	0,024	0,700	0,022
80	0,762	0,746	0,775	0,739	0,012	0,486	0,015
75	0,356	0,352	0,365	0,336	0,005	0,328	0,010
70	0,161	0,159	0,163	0,139	0,002	0,211	0,006
65	67,1	67,6	67,7	45,7	0,262	0,121	0,003
63	49,4	49,3	49,7	27,7	0,170	0,094	0,002
62	42,0	41,7	42,6	20,3	0,374	0,081	0,003
61	34,8	34,1	34,8	12,8	0,330	0,064	0,003
60	31,9	28,9	31,8	9,1	1,391	0,054	0,009
59	28,7	27,6	27,8	6,2	0,478	0,045	0,004
58	25,7	25,3	25,9	3,8	0,249	0,035	0,003
57	23,3	22,9	23,4	1,4	0,216	0,021	0,004
56	21,9	21,9	21,8	0,1	0,047	0,000	0,000
55	22,2	21,9	22,4	0,4	0,205	0,011	0,006
54	24,5	23,6	23,6	2,1	0,424	0,026	0,006
53	25,3	24,4	24,3	2,9	0,450	0,030	0,005
52	26,9	26,6	26,6	4,9	0,141	0,040	0,002
51	29,1	29,0	29,0	7,2	0,047	0,048	0,001
50	32,0	31,6	31,6	9,9	0,189	0,056	0,002
49	34,0	34,8	35,0	12,8	0,432	0,064	0,003
45	48,0	49,4	49,8	27,3	0,772	0,093	0,004
40	68,8	70,0	72,4	48,6	1,497	0,125	0,006
35	89,0	90,7	92,6	69,0	1,470	0,149	0,005
30	103,1	105,9	106,7	83,4	1,543	0,163	0,006
25	118,0	116,7	118,5	95,9	0,759	0,175	0,004
20	122,4	124,4	124,9	102,1	1,080	0,181	0,005
15	126,7	129,4	131,4	107,4	1,926	0,185	0,006
10	127,0	130,5	132,0	108,0	2,095	0,186	0,007

Tabuľka 6 – Namerané napätia a vypočítané hodnoty odrazivosti pre vzorku B pre rovnobežnú polarizáciu

α [°]	U [mV]	U [mV]	U [mV]	U_s' [mV]	S_{U_s} [mV]	r^{\parallel}	$S_{r^{\parallel}}$
90	2,970	3,396	3,220	3,160	0,175	1,000	0,111
85	1,652	1,580	1,495	1,540	0,064	0,698	0,068
80	0,757	0,739	0,700	0,696	0,024	0,469	0,042
75	0,322	0,318	0,301	0,278	0,009	0,297	0,026
70	0,125	0,124	0,120	0,087	0,002	0,166	0,013
67	67,5	69,3	69,2	33,0	0,8	0,102	0,008
66	58,8	57,8	58,1	22,5	0,4	0,084	0,006
65	50,0	50,5	48,2	13,9	1,0	0,066	0,008
64	44,6	43,6	43,4	8,2	0,5	0,051	0,006
63	39,6	40,0	39,3	3,9	0,3	0,035	0,005
62	37,5	37,7	36,2	1,4	0,7	0,021	0,011
61	36,1	35,7	35,5	0,1	0,2	0,005	0,017
60	37,3	35,9	35,9	0,7	0,7	0,015	0,015
59	37,7	37,1	36,9	1,5	0,3	0,022	0,006
58	39,9	39,3	38,7	3,6	0,5	0,034	0,006
57	43,5	41,1	40,6	6,0	1,3	0,044	0,012
56	47,5	45,2	44,7	10,1	1,2	0,057	0,010
55	52,5	49,2	47,5	14,0	2,1	0,067	0,014

54	57,7	53,0	52,5	18,7	2,3	0,077	0,014
53	63,1	59,2	57,5	24,2	2,3	0,088	0,013
50	85,7	79,0	75,9	44,5	4,1	0,119	0,017
45	0,126	0,120	0,114	0,084	0,005	0,163	0,019
40	0,170	0,162	0,156	0,127	0,006	0,200	0,020
35	0,208	0,196	0,190	0,162	0,007	0,227	0,023
30	0,240	0,225	0,215	0,191	0,010	0,246	0,027
25	0,263	0,256	0,240	0,217	0,010	0,262	0,026
20	0,282	0,270	0,260	0,235	0,009	0,273	0,026
15	0,306	0,285	0,281	0,255	0,011	0,284	0,028
10	0,329	0,309	0,300	0,277	0,012	0,296	0,029

Závislosť amplitúdovej odrazivosti na uhle dopadu je pre vzorku A znázornená v grafe 1 a pre vzorku B v grafe 2. Nameranými hodnotami r^\perp a r^\parallel som pomocou programu *Origin* preložil krivky zodpovedajúce teoretickým závislostiam (2) a (3).

V grafoch 1 – 2 sú zobrazené teoretické závislosti (2), (3) a takisto aj preložené krivky, ktoré sú v súlade s (2) a (3).

Z týchto preložení som určil index lomu použitých vzoriek A a B, viď tabuľka 7. Výslednú hodnotu zmeraného indexu lomu som určil ako aritmetický priemer dvoch hodnôt určených pri polarizácii kolmej a rovnobežnej s rovinou dopadu.

Tabuľka 7 – Index lomu meraných vzoriek

	vzorka A	vzorka B
hodnota n určená z r^\perp	$1,53 \pm 0,01$	$1,83 \pm 0,02$
hodnota n určená z r^\parallel	$1,48 \pm 0,03$	$1,79 \pm 0,02$
výsledná hodnota n	$1,51 \pm 0,03$	$1,81 \pm 0,02$
uvedená hodnota n	1,509	1,8051

Diskusia:

Smer ľahkého prechodu, polarizácia lasera

Pomocou polarizátora som overil, že smer polarizácie lasera bol kolmý k rovine dopadu s presnosťou približne 2° . Najväčšia chyba vznikla pri určovaní smeru ľahkého prechodu polarizátora, pretože polarizátor som musel držať v ruke – potreboval som nastaviť, aby polarizátor bol rovnobežne s vodorovnou rovinou. Ďalšia chyba mohla vzniknúť pri nastavení lampy tak, aby na sklenenú dosičku svetlo dopadalo pod Brewsterovým uhlom.

Brewsterov uhol

Nameraná hodnota Brewsterovho uhla α_{B_B} pre vzorku B sa v rámci chyby zhoduje s teoretickou hodnotou. Pre vzorku A sa nameraná hodnota α_{B_A} odlišuje od teoretickej asi o 1,1 % (nameraná a teoretická hodnota sa zhodujú na hladine 3σ). Táto odchýlka je pravdepodobne spôsobená kolísaním intenzity lasera a takisto tvarom závislosti intenzity odrazeného svetla na uhle dopadu.

Závislosť intenzity odrazeného svetla na uhle dopadu, index lomu

Namerané závislosti odrazivosti na uhle dopadu pre obe vzorky a pre obe polarizácie sú znázornené v grafoch 1 a 2. Tieto závislosti sa dobre zhodujú s teoretickými závislosťami (2) a (3). Vplyv kolísania intenzity lasera som sa snažil odstrániť tak, že pre každý uhol som nameral 3 až 4 hodnoty napätia, z ktorých som určil priemernú hodnotu.

Pri polarizácii rovnobežnej s rovinou dopadu som od nameraných hodnôt odčítal hodnotu pozadia (najnižšia hodnota napätia nameraná pri Brewsterovom uhle α_B).

Nameranými hodnotami som preložil krivky zodpovedajúce teoretickým závislostiam (2) a (3), a tak som určil index lomu použitých vzoriek. Zistené priemerné hodnoty indexu lomu sa

zhodujú s hodnotami uvedenými na vzorkách. Pri kolmej polarizácii som nameril vyšší index lomu ako pri rovnobežnej polarizácii, pri ktorej som od nameraných hodnôt odčítal hodnotu pozadia.

Záver:

Určil som smer ľahkého prechodu polarizátora používaného v aparátúre a uhol polarizácie lasera, a tak som overil, že smer polarizácie lasera bol kolmý k rovine dopadu:

- smer ľahkého prechodu polarizátora: $(176,4 \pm 3)^\circ$
- uhol polarizácie lasera na polarizátore: $(174,2 \pm 2)^\circ$

Určil som Brewsterov uhol α_B dvoch použitých vzoriek *A* a *B*:

- vzorka *A*: $\alpha_{B_A} = (55,83 \pm 0,16)^\circ$
- vzorka *B*: $\alpha_{B_B} = (61,00 \pm 0,27)^\circ$

Určil som závislosť intenzity odrazeného svetla na uhle dopadu pre kolmú aj rovnobežnú polarizáciu a z tejto závislosti som určil index lomu použitých vzoriek:

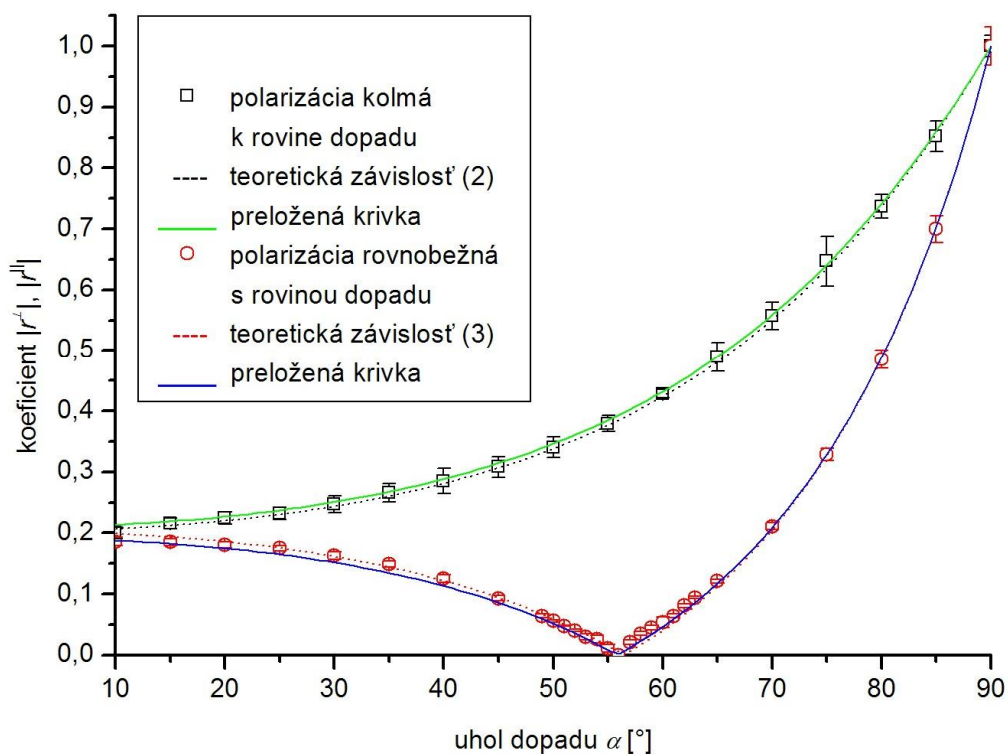
- vzorka *A*: $n_A = 1,51 \pm 0,03$
- vzorka *B*: $n_A = 1,81 \pm 0,02$

Literatúra:

[1] Ivan Pelant a kol.; Fyzikální praktikum III, Praha, 2001

[2] English, J.; Zpracování výsledků fyzikálních měření, Praha, 1999

Graf 1 - Závislosť amplitúdovej odrazivosti na uhle dopadu pre vzorku A



Graf 2 - Závislosť amplitúdovej odrazivosti na uhle dopadu pre vzorku B

