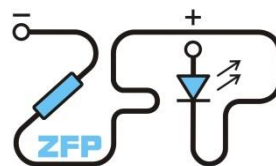


Kabinet výuky obecné fyziky, UK MFF

Fyzikální praktikum ...



Úloha č. ..7...

Název úlohy:Ověření Fresnelových vzorců.....

Jméno:Katarína Križanová..... Obor: FOF

Datum měření: 22.2.2017

Datum odevzdání: 1.3.2017

Připomínky opravujícího:

	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:

I. Pracovná úloha

1. Najdšte smer 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 závislosti. 5. Určete indexy lomů měřených vzorků a jejich relativní chybu.

II. Teoretická část

Fresnelove vzorce súvisia s intenzitami odrazeného a lomeného svetelného paprsku [1]. Presnejšie, udávajú aká časť výkonu dopadajúceho svetla sa odrazí a aká sa naopak lomí pri rôznych uhloch dopadu.

Rozlišujeme dve polarizácie svetla- tranzverzálne elektrickú a tranzverzálne magnetickú.

V prípade, že vektor elektrického poľa \vec{E} je kolmý k rovine dopadu, hovoríme o tranzverzálne elektrickej (TE) polarizácii, ak je naopak vektor magnetickej indukcie \vec{B} kolmý k rovine dopadu, hovoríme o tranzverzálne magnetickej polarizácii (TM).

Fresnelove vzorce, tj. vzťahy pre koeficienty odrazivosti r a koeficienty priepustnosti t , možno odvodiť zo spojitosti dotyčnicových zložiek elektrickej intenzity \vec{E} a magnetickej indukcie \vec{B} [1].

Pre TE platí

$$r_{\perp} = \frac{n_1 \cos \alpha_1 - n_2 \cos \alpha_2}{n_1 \cos \alpha_1 + n_2 \cos \alpha_2} \quad (1)$$

$$t_{\perp} = \frac{2n_1 \cos \alpha_1}{n_1 \cos \alpha_1 + n_2 \cos \alpha_2} \quad (2)$$

Pre TM platí

$$r_{\parallel} = \frac{n_2 \cos \alpha_1 - n_1 \cos \alpha_2}{n_2 \cos \alpha_1 + n_1 \cos \alpha_2} \quad (3)$$

$$t_{\parallel} = \frac{2n_1 \cos \alpha_1}{n_2 \cos \alpha_1 + n_1 \cos \alpha_2} \quad (4)$$

Pričom n_1 je index lomu prostredia a n_2 je index lomu dielektrika, α_1 je uhol dopadu a α_2 je uhol lomu.

Tieto vzťahy možno prepísať využitím Snellovho zákona

$$n_1 \cos \alpha_1 = n_2 \cos \alpha_2. \quad (5)$$

Naviac položíme $n = \frac{n_2}{n_1}$ a dostávame nový tvar rovníc (1) – (4), ktorý vyzerá nasledovne

$$r_{\perp} = \frac{\cos \alpha_1 - \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha_1}}{\cos \alpha_1 + \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha_1}} \quad (6)$$

$$t_{\perp} = \frac{2 \cos \alpha_1}{\cos \alpha_1 + \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha_1}} = r_{\perp} + 1 \quad (7)$$

$$r_{\parallel} = \frac{n^2 \cos \alpha_1 - \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha_1}}{n^2 \cos \alpha_1 + \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha_1}} \quad (8)$$

$$t_{\parallel} = \frac{2n \cos \alpha_1}{n^2 \cos \alpha_1 + \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha_1}} = \frac{1}{n} (r_{\parallel} + 1) \quad (9)$$

Intenzita paprsku svetla je úmerná druhej mocnine z veľkosti amplitúdy elektrického poľa. Odrazivosť R a priepustnosť T zavedieme ako [1]

$$R = (r)^2 \quad (10)$$

$$T = 1 - R \quad (11)$$

Brewsterov uhol

Špeciálny prípad nastane, keď svetelný paprsok dopadá na dielektrikum pod takzvaným Brewsterovým uhlom, pre ktorý platí, že odrazené svetlo je lineárne polarizované, keďže koeficient odrazivosti TM je nulový. Pre Brewsterov uhol α_B tiež platí

$$\alpha_B + \alpha_2 = 90^\circ \quad (12)$$

Tento uhol môžeme vďaka Snellovmu zákonu (5) dopočítať cez vzťah

$$\alpha_B = \arctan(n) \quad (13)$$

III. Výsledky merania

Laser som zapla dvadsať minút pred meraním.

Určenie ľahkého priechodu polarizátoru

Pre určenie smeru jednoduchého priechodu polarizátoru som na sklenenú doštičku na nepriehľadnej podložke sietila lampou približne pod Brewstrovým uhlom, ktorý som pre index lomu skla zistila podľa vzťahu (13), $\alpha_B \approx 60^\circ$. Odrážalo se teda iba svetlo polarizované kolmo k rovine dopadu. Odraz z doštičky som pozorovala očami cez polarizátor, ktorým som otáčala a hľadala najtmavšie miesta. Tieto uhly natočenia polarizátoru sú prepočítané na uhly α , údaje sú zaznamenané v tabuľke T1.

Najmenší dielik stupnice, z ktorej sa odčítali uhly boli 2° , avšak chyba môjho merania bola väčšia vzhľadom na to, že som využívala svoje oči. Aritmetickým priemerom dostávam priemernú hodnotu uhlu natočenia polarizátoru $\alpha = (64 \pm 6)^\circ$. Chyba bola vypočítaná ako odmocnina zo súčtu druhých mocnín smerodajnej odchýlky nameraných hodnôt a chybou spôsobenou meraním mojimi očami odhadnutou na 5° .

T1: Natočenie polarizátoru pri tmavých miestach

α [°]
70
64
62
62
64
62
66

Overenie smeru polarizácie zdroja

Na overenie polarizácie zdroju svetla som za zdroj umiestnila polarizátor, ktorým som otáčala a odčítala som napätie na fotodióde, na ktorú dopadalo svetlo. V tabuľke T2 sú uhly natočenia polarizátoru β , pre ktoré bolo zaznamenaná minimálna intenzita. Priemerná hodnota je teda $\beta=(162\pm 2)^\circ$, pričom chyba je odhadnutá, vzhľadom k tomu, že hodnoty zaznamenatej intenzity sa mierne menili i pre ten istý uhol natočenia polarizátoru.

Teoreticky by malo platiť: $\beta-\alpha=90^\circ$, čo v rámci chyby i platí. Druhým meraním som teda zistila presnejšiu hodnotu natočenia polarizátoru v smere jednoduchého priechodu, $\alpha=(72\pm 2)^\circ$.

T2: Uhly pre minimálnu intenzitu

β [°]
162
162
162

TE polarizácia

Meranie som prevádzkala pre dve vzorky s udávanými indexami lomu $n_1 = 1,509$ a $n_2 = 1,8051$. Následne som polarizátor natočený o uhol $\alpha=72^\circ$ upevnila za zdroj svetla (laser) do goniometra, schéma goniometra dostupná v [2]. Postupne som menila uhol dopadu paprsku θ na vzorku a zaznamenávala uhol dopadu (hodnotu som musela prepočítať, najmenší dielik stupnice pre odčítanie uhlu natočenia experimentu bol $0,01^\circ$) veličinu úmernú intenzite zaznamenanú snímačom. Túto veličinu som normovala zistenou hodnotou, ktorú ukazoval snímač, keď v nastavení ešte nebola vzorka ($I_0 = (1863 \pm 20)$), chyba odhadnutá na základe premennosti posledných dvoch cifier). Údaje sú zaznamenané v tabuľke T3 a T4. V grafoch 1 a 2 vidno závislosť odrazivosti R na uhle dopadu pre danú vzorku.

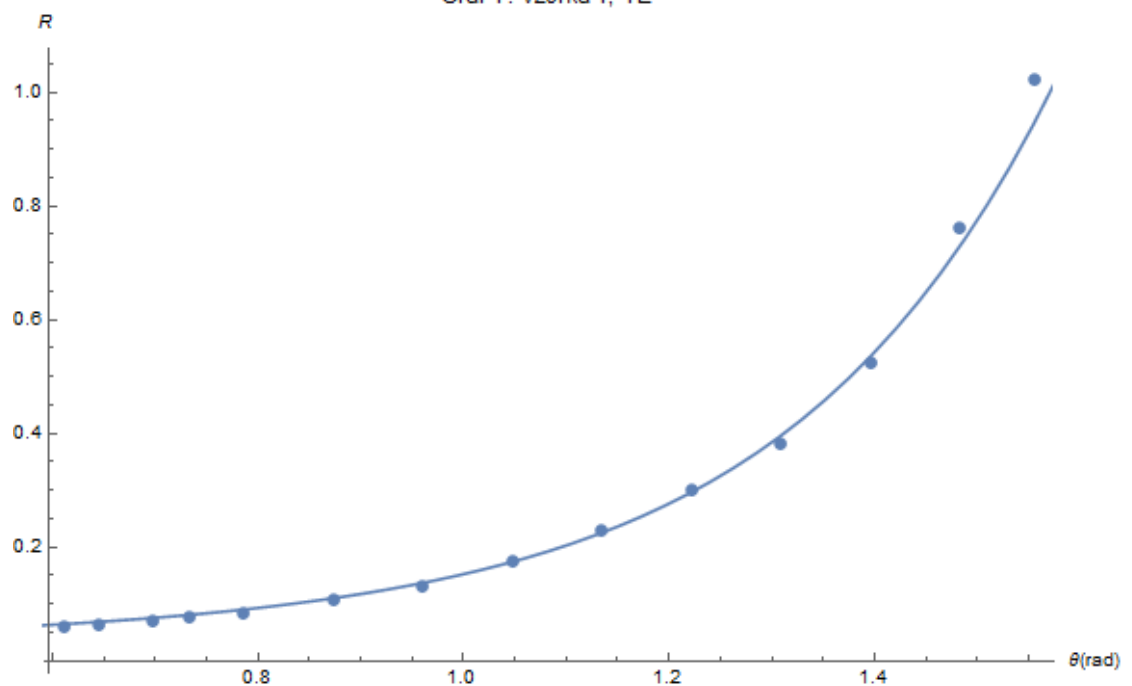
Využitím vzťahov (1) a (10) som v programe Wolfram Mathematica zistila fitovaním (funkcia NonLinearModelFit) hodnotu indexov lomu pre vzorku 1 a 2, $n_1 = (1,493 \pm 0,021)$ a $n_2 = (1,374 \pm 0,056)$. Chyby som určila ako odmocninu zo súčtu kvadrátov chyby merania uhlu (braná ako najmenší dielik stupnice, tj. $0,01^\circ$) a chybu fitu, ktorú som zistila z programu Wolfram

Mathematica. Relatívne chyby nameraných indexov lomu pre vzorky pri TE polarizácii sú teda 1,4% a 4,1%. V grafe 1 a 2 sú nanesené experimentálne hodnoty a krivka odpovedajúca zistenému fitu.

T3: Vzorka 1, TE

θ [°]	R
89,09	1,022
85,00	0,762
80,00	0,524
75,00	0,382
70,00	0,300
65,00	0,231
60,00	0,177
55,00	0,133
50,00	0,106
45,00	0,085
42,00	0,076
40,00	0,071
37,00	0,065
35,00	0,061

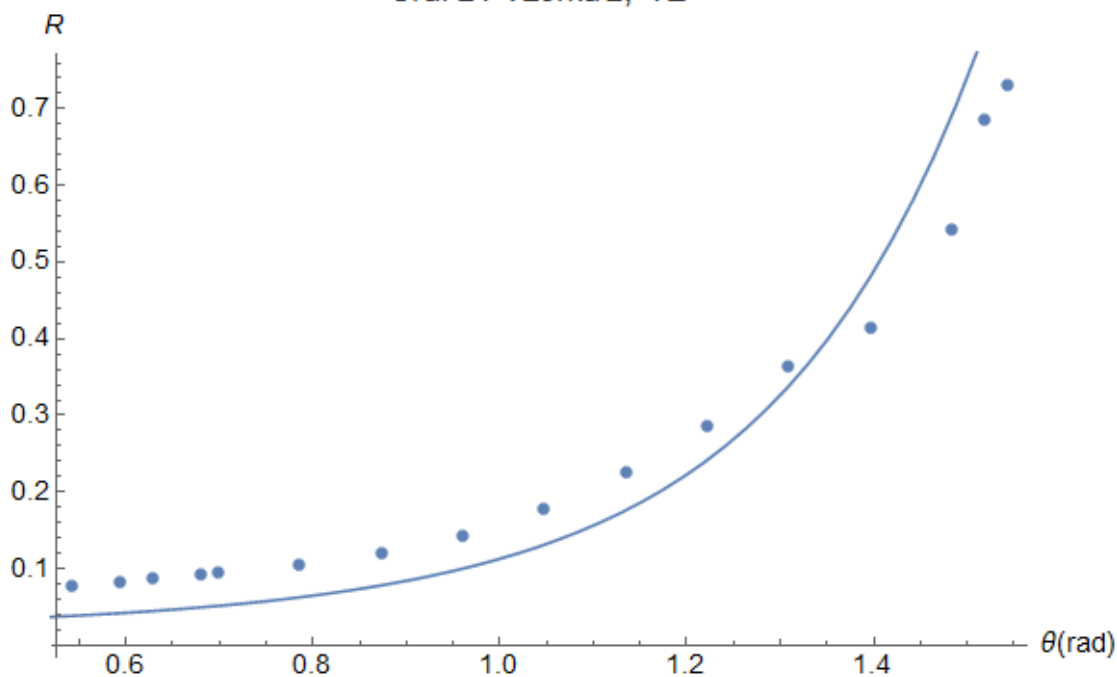
Graf 1: Vzorka 1, TE



T4: Vzorka 2, TE

θ [°]	R
88,40	0,732
87,00	0,687
85,00	0,543
80,00	0,414
75,00	0,364
70,00	0,286
65,00	0,227
60,00	0,179
55,00	0,142
50,00	0,119
45,00	0,106
40,00	0,096
39,00	0,093
36,00	0,087
34,00	0,083
31,00	0,078

Graf 2 : Vzorka 2, TE



TM polarizácia

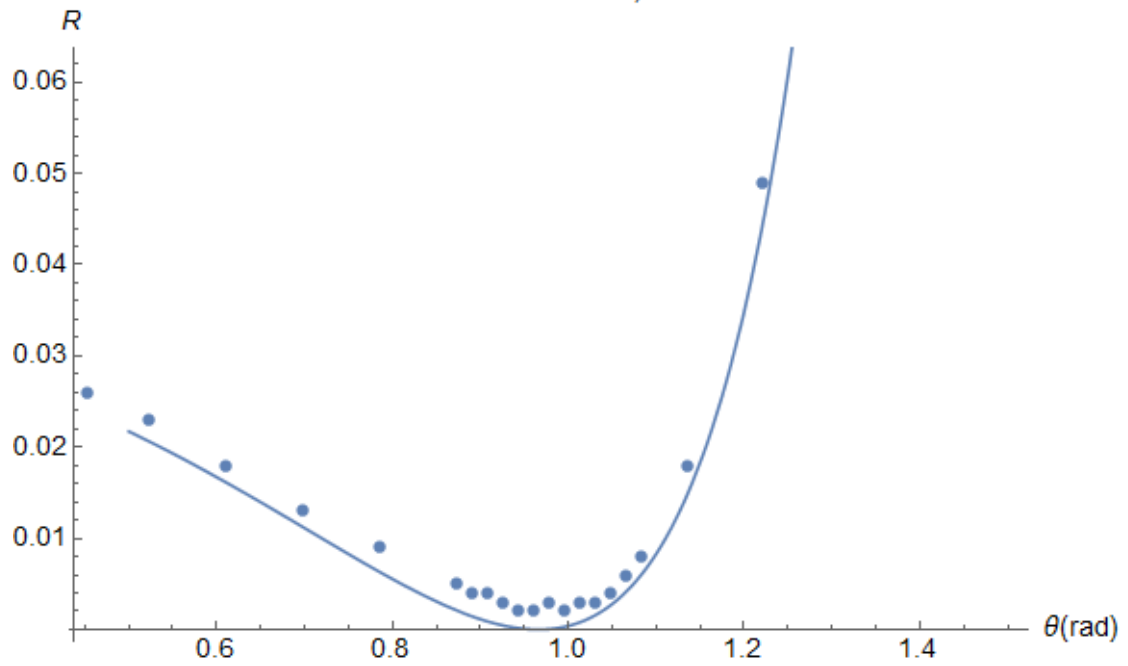
Pre meranie s TM polarizáciou som medzi zdroj svetla a polarizátor vložila 2 štvrtvlnové doštičky tak, aby bolo svetlo polarizované rovnobežne s vodorovným smerom. Polarizátor bol pootočený o 90° ($\alpha=162^\circ$), aby bol signál na fotodióde maximálny. Následne som zopakovala meranie ako pri TE polarizácii pre obe vzorky, avšak najprv som si zistila, kde sa nachádza približne Brewsterov uhol (intenzita pri tomto uhle dopadu bola minimálna) a pri meraní som v okolí tejto hodnoty merala s menšími krokmi. Výsledky

merania sú v tabuľke T5 a T6. Hodnoty sú vynesené do grafov 3 a 4 pre danú vzorku. Pomocou program Wolfram Mathematica som zistila fitovaním hodnoty indexov lomu pre obe vzorky. V grafoch 3 a 4 sú nanesené experimentálne data spolu s krivkami fitov. Výsledné indexy lomu pri TM polarizácii sú $n_1 = (1,447 \pm 0,020)$, $n_2 = (1,97 \pm 0,13)$. Pričom chyby som vypočítala ako odmocninu súčtu kvadrátov chyby fitu určeného programom Wolfram Mathematica a chybou merania uhlu, ktorú odhadujem na $0,01^\circ$. Relatívne chyby pre indexy lomu vzorky 1 a 2 sú teda 1,4% a 6,6%.

T5: Vzorka 1, TM

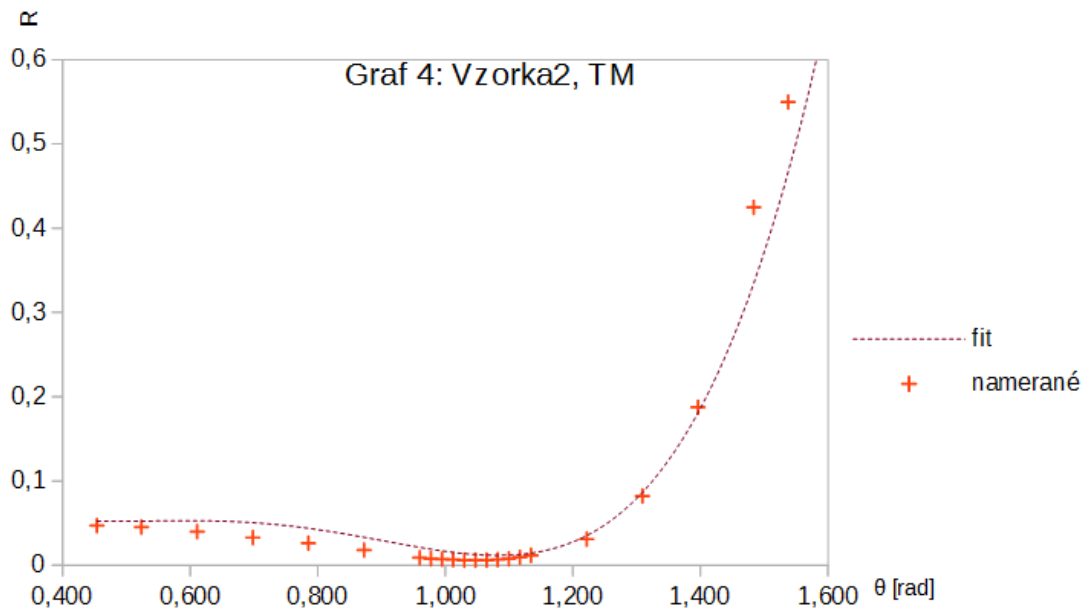
θ [°]	R
86,00	0,579
80,00	0,244
75,00	0,113
70,00	0,049
65,00	0,018
62,00	0,008
61,00	0,006
60,00	0,004
59,00	0,003
58,00	0,003
57,00	0,002
56,00	0,003
55,00	0,002
54,00	0,002
53,00	0,003
52,00	0,004
51,00	0,004
50,00	0,005
45,00	0,009
40,00	0,013
35,00	0,018
30,00	0,023
26,00	0,026

Graf 3: Vzorka 1, TM



T6: Vzorka 2, TM

θ [°]	R
88,10	0,550
85,00	0,425
80,00	0,187
75,00	0,082
70,00	0,031
65,00	0,012
64,00	0,010
63,00	0,008
62,00	0,007
61,00	0,006
60,00	0,006
59,00	0,006
58,00	0,007
57,00	0,007
56,00	0,008
55,00	0,009
50,00	0,018
45,00	0,026
40,00	0,033
35,00	0,040
30,00	0,045
26,00	0,047



IV. Diskusia výsledkov

Pri úlohe číslo 1, kedy som určovala ľahký priechod polarizátoru, mohlo dojsť k pomerne veľkej nepresnosti, keďže som polarizátor držala v ruke a tak z neho odčítala hodnoty uhlu, ďalšou nepresnosťou mohlo byť i spôsob zisťovania ľahkého priechodu-vlastnými očami. Navyše, svetlo na neprehľadný sklenený vzorok dopadalo len približne pod Brewsterovým uhlom.

Úloha číslo 2 bola presnejším spôsobom, ako zistiť ľahký priechod polarizátoru. Hodnoty tohto uhlu, ktoré som zistila v týchto úlohách sú síce rôzne, no v rámci chyby sa zhodujú.

Pri zvyšných úlohách snímač mohol vnímať i intenzitu svetla v miestnosti, nielen svetla z lasera. Túto nepresnosť merania som snažila eliminovať použitím choppru, na ktorého frekvenciu bol nastavený i snímač intenzity. Napriek tomu však pravdepodobne snímač vnímal i intenzitu okolitého svetla- ako vidieť i po normovaní vychádzajú najväčšie hodnoty odrazivosti R mierne väčšie ako 1, čo znamená, že by bolo treba danú hodnotu odčítať od nameraného R . Hodnota indexu lomu pre vzorku 1 pri TE polarizácii, ktorú som zistila fitovaním, sa zásadne neodlišuje od udávanej hodnoty. Pre druhú vzorku je však zásadne odlišná a pravdepodobne došlo k chybe merania. Mohlo to napríklad spôsobiť už spomínaná intenzita svetla v miestnosti, ktorá bola detekovaná snímačom, alebo tiež to, že hodnoty zobrazované snímačom sa na posledných dvoch cifrách pri niektorých uhloch striedavo menili a ja som zaznamenávala približne ich strednú hodnotu.

Pri TM polarizácii sú indexy lomu zistené fitovaním v programe Wolfram Mathematica blízke udávaným hodnotám pre vzorku 1 a 2, pri vzorke 2 je však pomerne vysoká relatívna chyba, až 6,6%.

Pri meraniach s TE a TM polarizáciou som naniesla namerané hodnoty R závislé na uhle dopadu θ do grafov 1-2, kde sa taktiež nachádzajú krivky fitov zistené programom Wolfram Mathematica.

V. Záver

Zistila som smer jednoduchého priechodu polarizátoru $\alpha=(72\pm 2)^\circ$.

Namerané výsledky závislosti odrazeného svetla na uhle dopadu pre TE aj TM som porovnala s teoretickými priebehmi závislostí.

Následné boli v programe Mathematica fitovaním určené indexy lomov oboch meraných vzorkov s relatívnou chybou: $n_1^{TE} = (1,447 \pm 0,020)$ 1,4%, $n_2^{TE} = (1,374 \pm 0,056)$ 4,1%, $n_1^{TM} = (1,447 \pm 0,020)$ 1,4%, $n_2^{TM} = (1,97 \pm 0,13)$ 6,6%.

VI. Zoznam použitej literatúry

[1] P. Malý: Optika, Nakladatelství Karolinum, Praha 2008

[2] Študijný text dostupný z webových stránok Základní fyzikální praktikum:

http://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/_media/zadani/pokyny/mereni_307.pdf