

Jméno: Vojtěch Fišer
Datum měření: 28.4.2017
Skupina: 2
Klasifikace:

1 ahoj

2 Úkoly

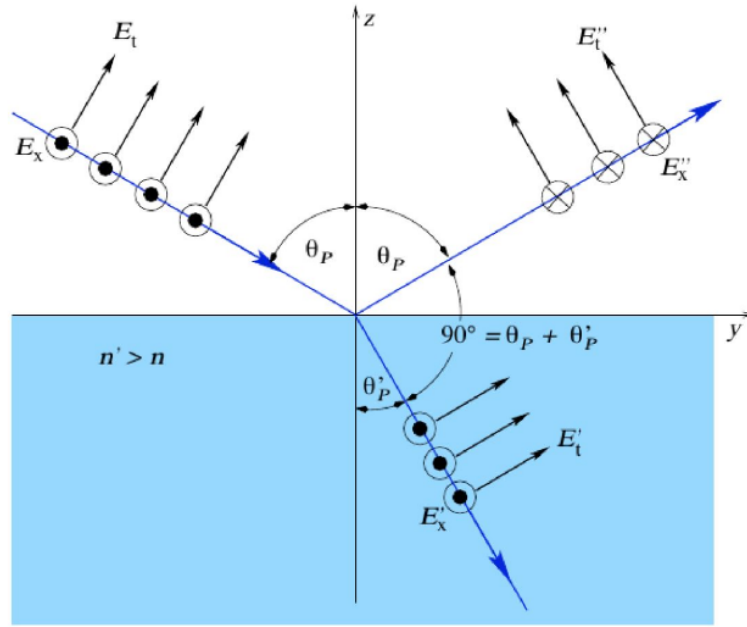
1. DŮ: Odvoďte vzorec (1) pro Brewsterův úhel úplné polarizace. Vycházejte z Obr. 1 a ze zákona lomu světla na rozhraní dvou optických prostředí. Spočtete Brewsterův úhel pro rozhraní vzduch - skleněné zrcadlo. Při měření Brewsterova úhlu se doporučuje mít připravenou tabulku v Excelu pro výpočet stupně polarizace.
2. Při polarizaci bílého světla odrazem na černé skleněné desce proměřte závislost stupně polarizace na sklonu desky a určete optimální hodnotu Brewsterova úhlu. Výsledky zanepte do grafu a porovnejte s vypočtenou hodnotou z domácího úkolu.
3. černou otočnou desku nahraďte polarizačním filtrem a proměřte závislost intenzity polarizovaného světla na úhlu otočení analyzátoru (Malusův zákon). Výsledek srovnajte s teoretickou předpovědí, znázorněte graficky a výsledek diskutujte.
4. Na optické lavici prozkoumejte vliv čtyř celofánových dvojlomných filtrů, způsobujících interferenci. Vyzkoušejte vliv otáčení analyzátoru vůči polarizátoru a vliv otáčení dvojlomného filtru mezi zkříženými i rovnoběžnými polarizátory v bílém světle. Pozorováním zjistěte, které vlnové délky (barvy) se interferencí zvýrazní. Výsledky pozorování popište.
5. Pomocí dvou polarizačních filtrů, fotočlánku a barevných filtrů změřte měrnou otáčivost křemene s tloušťkou 1 mm pro 4 vlnové délky světla. Jakou závislost pozorujete mezi vlnovou délkou světla a měrnou otáčivostí? Naměřené hodnoty porovnejte s tabulkovými. Jak se změní výsledek, když použijete křemenný vzorek s větší tloušťkou? Diskutujte naměřené výsledky.

3 Pomůcky

Pomůcky: Optická lavice, otočné černé zrcadlo, 2x polarizační filtr, multimetr, otočný držák pro dvojlomný vzorek, čtvrtvlnná destička, světelný zdroj s matnicí, fotočlánek, 4 celofánové dvojlomné filtry, 4 barevné filtry, křemenný klín.

4 Teorie

Z Maxwellových rovnic plyne, že obecně elektromagnetické vlnění (a tedy i světlo) kmitá pouze v určitých směrech. Tomu říkáme polarizace. Obecně polarizované světlo má tzv. eliptickou polarizaci. Speciálními případy je třeba lineární polarizované světlo.



Obr. 1: Lom a odraz světla na rozhraní látek. Převzato z [1]

4.1 Polarizace odrazem

Při dopadu světla na rovnou desku šikmo se část světla odrazí a část se může zlomit a projít do prostředí (Obr. 1). Odražený svazek je obecně částečně polarizovaný. Stupeň této částečné polarizace závisí na úhlu desky Θ . Brewsterův zákon popisuje, kdy bude polarizace zcela lineární.

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{\sin \Theta}{\cos \Theta} = \tan \Theta \quad (1)$$

kde n_1, n_2 jsou indexy lomů prostředí.

My budeme pracovat s aparaturou podle Obr. 2.

4.2 Určení stupně polarizace

Při měření fyzickými přístroji není možné změřit plnou informaci o polarizaci světla. Vždy můžeme změřit jen střední hodnotu. My budeme schopni určit čtyři intenzity $\langle E_x^2 \rangle_r$, $\langle E_y^2 \rangle_r$, $\langle E_x E_y \rangle_r$ a $\langle E_x(\omega t - \pi/2) E_y(\omega t) \rangle_r$. Z nich je možno spočítat tzv. Stokesovy parametry, jež tvoří vektor $(P_1, P_2, P_3) = \vec{P}$

$$P_1 = \frac{\langle E_x^2 \rangle_r + \langle E_y^2 \rangle_r}{\langle E_x^2 \rangle_r - \langle E_y^2 \rangle_r} \quad (2)$$

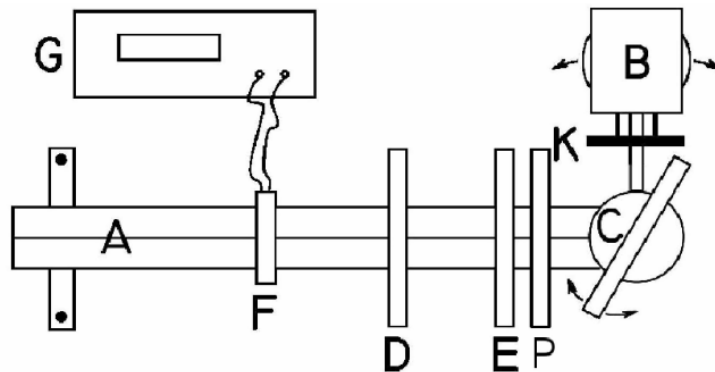
$$P_2 = \frac{2\langle E_x E_y \rangle_r}{\langle E_x^2 \rangle_r - \langle E_y^2 \rangle_r} \quad (3)$$

$$P_3 = \frac{2\langle E_x(\omega t - \pi/2) E_y(\omega t) \rangle_r}{\langle E_x^2 \rangle_r - \langle E_y^2 \rangle_r}. \quad (4)$$

Stupni polarizace pak odpovídá velikost \vec{P} .

Intenzity $E_1 = \langle E_x^2 \rangle_r$, $E_2 = \langle E_y^2 \rangle_r$ změříme přímo s měřicím polarizátorem v poloze 0, resp. 90° . Třetí dopočteme z měření s polarizátorem v poloze 45° při měření

$$E_3 = \left\langle \left(\frac{E_x + E_y}{\sqrt{2}} \right)^2 \right\rangle = \frac{1}{2} \langle E_x^2 \rangle_r + \frac{1}{2} \langle E_y^2 \rangle_r + \langle E_x E_y \rangle_r \quad (5)$$



Obr. 2: Schéma aparatury pro měření Brewsterova úhlu. A - optická lavice, B - světelný zdroj, C - otočné černé zrcadlo, E - čtvrtvlnná deska, K - matnice, D - polarizátor, F - fotočlánek, G - multimetr. Převzato z [1].

a čtvrtou z měření s polarizátorem ve shodné poloze avšak ještě s přidanou čtvrtvlnnou destičkou tedy s měřením veličiny

$$E_4 = \left\langle \left(\frac{E_x(\omega t - \pi/2) + E_y(\omega t)}{\sqrt{2}} \right)^2 \right\rangle = \frac{1}{2} \langle E_x^2 \rangle_r + \frac{1}{2} \langle E_y^2 \rangle_r + \langle E_x(\omega t - \pi/2) E_y(\omega t) \rangle \quad (6)$$

4.3 Polarizace dvojlomem

Směr šíření světla po lomu při přechodu do jiného optického prostředí nám teoreticky popisuje Snellův zákon. Jsou však jistá prostředí, ve kterých se šíří i tzv. mimořádné paprsky, typicky krystaly nebo tlakem namáhané amorfní látky. Řádné a mimořádné paprsky jsou polarizovány v kolmých směrech. Pokud splývá směr řádného a mimořádného paprsku, mluvíme o tzv. optické ose látky.

4.4 Malusův zákon

Přechod polarizovaného světla dalším polarizátorem kvantitativně popisuje Malusův zákon; pro intenzitu prošlého světla platí

$$I = I_0 \cdot \cos^2 \Theta \quad (7)$$

kde I_0 je původní intenzita a Θ je úhel mezi rovinou polarizace a orientací polarizátoru. My budeme pracovat s aparaturou podle Obr. 3. Budeme pracovat se svazkem předem polarizovaným pod úhlem 45° . Nebudeme pracovat s kalibrovaným luxmetrem, ale s fotočlánekem, u kterého budeme předpokládat napětí přímo úměrné intenzitě světla, uvádím tedy napětí. Proto by naší aparatuře měla odpovídat křivka

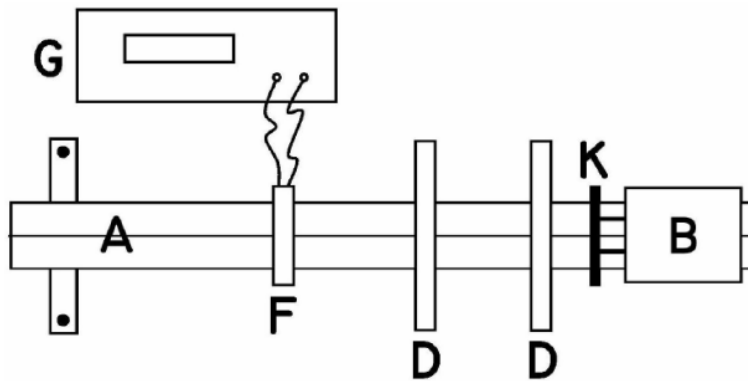
$$I \approx U = \alpha \cdot \cos^2(\Theta + 45^\circ) \quad (8)$$

kde parametr α závisí na citlivosti fotočláneku a intenzitě I_0 . Pro naši práci není důležitý.

4.5 Optická aktivita křemene

Existují látky, které dokáží stočit rovinu lineárně polarizovaného světla. U těchto látek pak úhel stočení odpovídá tloušťce destičky. My budeme provádět podobné měření jako v případě ověřování Malusova zákona, jen mezi polarizátory bude vložena ještě destička z optického křemene. Do závislosti intenzity na úhlu mezi rovinami polarizátorů budu prokládat vztah

$$I = A \cdot \cos^2(x + C) + B \quad (9)$$



Obr. 3: Schéma aparatury pro ověření Malusova zákona. A - optická lavice, B - světelný zdroj, K - matnice, D - polarizátor, F - fotočlánek, G - multimetr. Převzato z [1]

kde parametr A odpovídá celkové velikosti závislé křivky (a zahrnuje tedy citlivost fotočlásku, propustnost filtru...) a B odpovídá posunutí o konstantu (a tedy zahrne např. světlo přišlé mimo naši optickou dráhu). Pro nás bude nejzajímavější parametr C - ten odpovídá bodu maxima a tedy úhlu změny polarizace.

4.6 Postup měření

Před měřením jsme nejdříve za pomoci rysek srovnali optickou lavici a připravili si zdroj světla. Nejprve jsme postavili aparaturu podle Obr. 2. Po deseti stupních natočení v rozmezí 20° až 60° jsme vždy měřili napětí na fotočlásku pro polohu analyzátoru:

- 0°
- 90°
- 45°
- 45° + nasazená čtvrtvlnná destička.

Pro ověření Malusova zákona jsme poskládali aparaturu podle Obr. 3. V rozmezí úhlu analyzátoru 0° až 90° jsme po 10° měřili napětí na fotočlásku.

Pro měření optické aktivity křemene jsme do aparatury přidali křemennou destičku mezi dva polarizátory. Stejně měření jako u ověření Malusova zákona jsme provedli čtyřikrát - pokaždé s jiným barevným filtrem nasazeným na zdroji světla. Nakonec jsme vyměnili tenkou křemennou destičku za tlustší (3,8 mm) a pro modrý filtr jsme měření opakovali.

Pro měření dvojlomných filtrů jsme mezi polarizátory umístili na otočném držáku jeden z celofánových dvojlomných filtrů. Pak jsme měnili natočení filtrů a pozorovali prošlé světlo.

5 Vypracování

5.1 Určení Brewsterova úhlu

Naměřená data uvádím v Tab. 1.

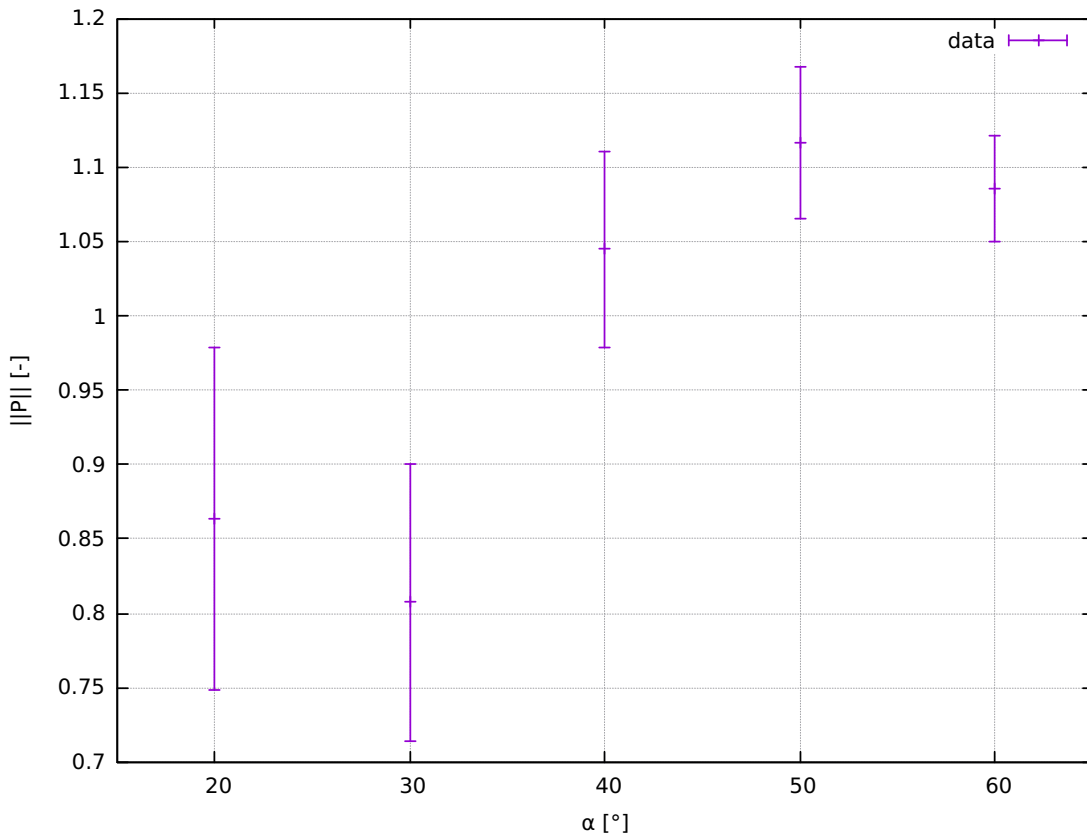
Z těchto dat jsem dopočetl teoretické intenzity $\langle E_x E_y \rangle_r$ a $\langle E_x(\omega t - \pi/2) E_y(\omega t) \rangle$ podle (5) a (6). Z těchto hodnot jsem následně dle (2), (3) a (4) spočetl Stokesovy parametry a z vektoru \vec{P} následně klasickou euklidovskou

$\alpha [^\circ]$	$E_1 [\text{mV}]$	$E_2 [\text{mV}]$	$E_3 [\text{mV}]$	$E_4 [\text{mV}]$
20	14	12	08	03
30	20	07	09	06
40	32	06	10	07
50	43	03	15	09
60	60	02	25	15

Tab. 1: Hodnoty z experimentu určování Brewsterova úhlu. Napětí odpovídá intenzitě světla. Chyba měření $\sigma_E = 1 \text{ mV}$.

normu. Vypočítané hodnoty lze nalézt v Tab. 2. Dále jsem je vynesl do grafu - Obr. 4. Na proložení teoretickou závislostí nebyl počet bodů a jejich přesnost dostačující. Opticky jsem tedy odhadl

$$\Theta = (50 \pm 5)^\circ. \quad (10)$$



Obr. 4: Spočtený stupeň polarizace z měření Brewsterova úhlu.

5.2 Ověření Malusova zákona

Naměřené hodnoty uvádím v Tab. 3. Data jsem zpracoval do grafu, pomocí programu gnuplot proložil funkcí (8), příkládám na Obr. 5

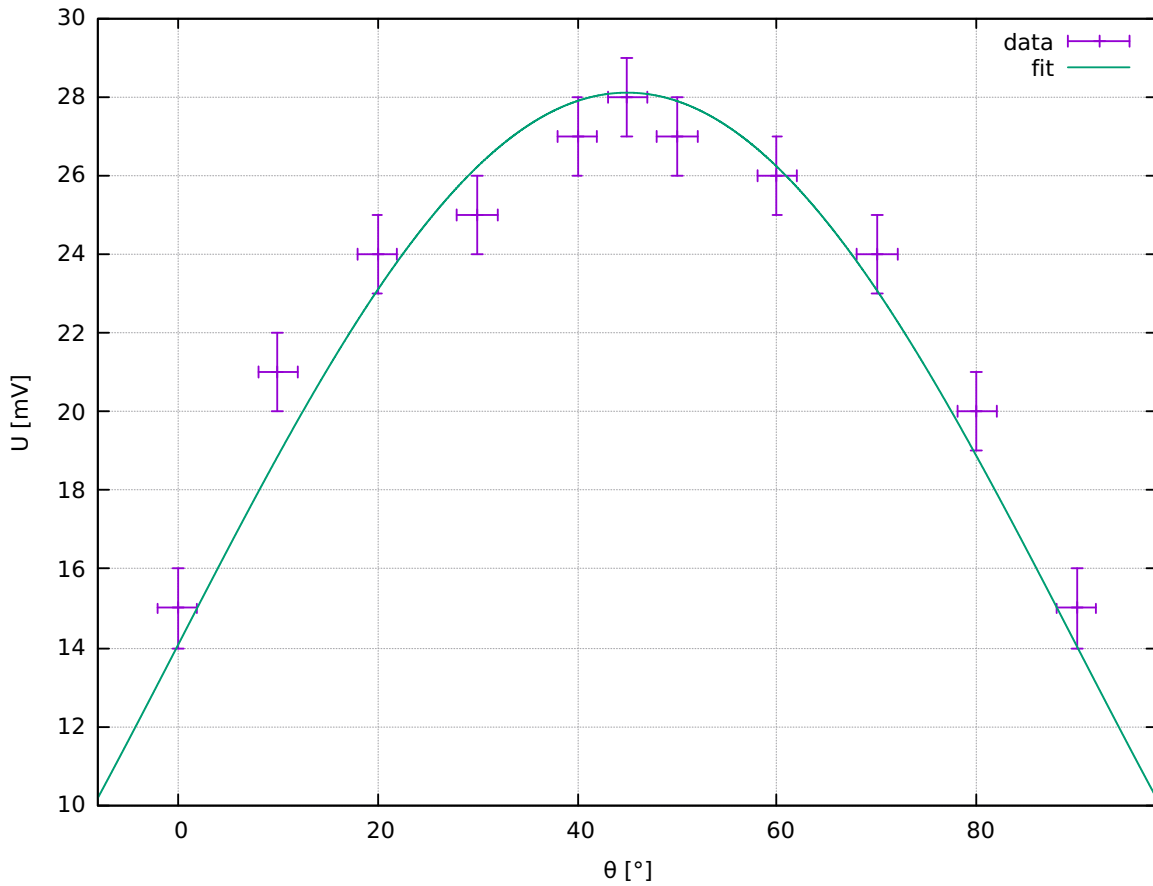
Podle grafu jsem usoudil, že Malusův zákon není vyvrácen.

$\alpha [^\circ]$	$ \vec{P} $	$\sigma_{ \vec{P} }$
20	0.9	0.1
30	0.81	0.09
40	1.04	0.07
50	1.12	0.05
60	1.09	0.04

Tab. 2: Vypočtený stupeň polarizace $||\vec{P}||$. Odchylka $\sigma_{||\vec{P}||}$ je spočtena jako chyba nepřímého měření.

$\Theta [^\circ]$	0	10	20	30	40	45	50	60	70	80	90
$I [\beta \cdot \text{lx}] \approx U [\text{mV}]$	15	21	24	25	27	28	27	26	24	20	15

Tab. 3: Hodnoty z ověření Malusova zákona. $\beta \cdot \text{lx}$ znamená přímou úměru s jednotkou lux, konkrétní hodnotu β jsme neurčovali.



Obr. 5: Změřené napětí na fotočlátku, fit (8). Koeficient fitu: $\alpha = (28,1 \pm 0,4)$

5.3 Interference celofánových filtrů

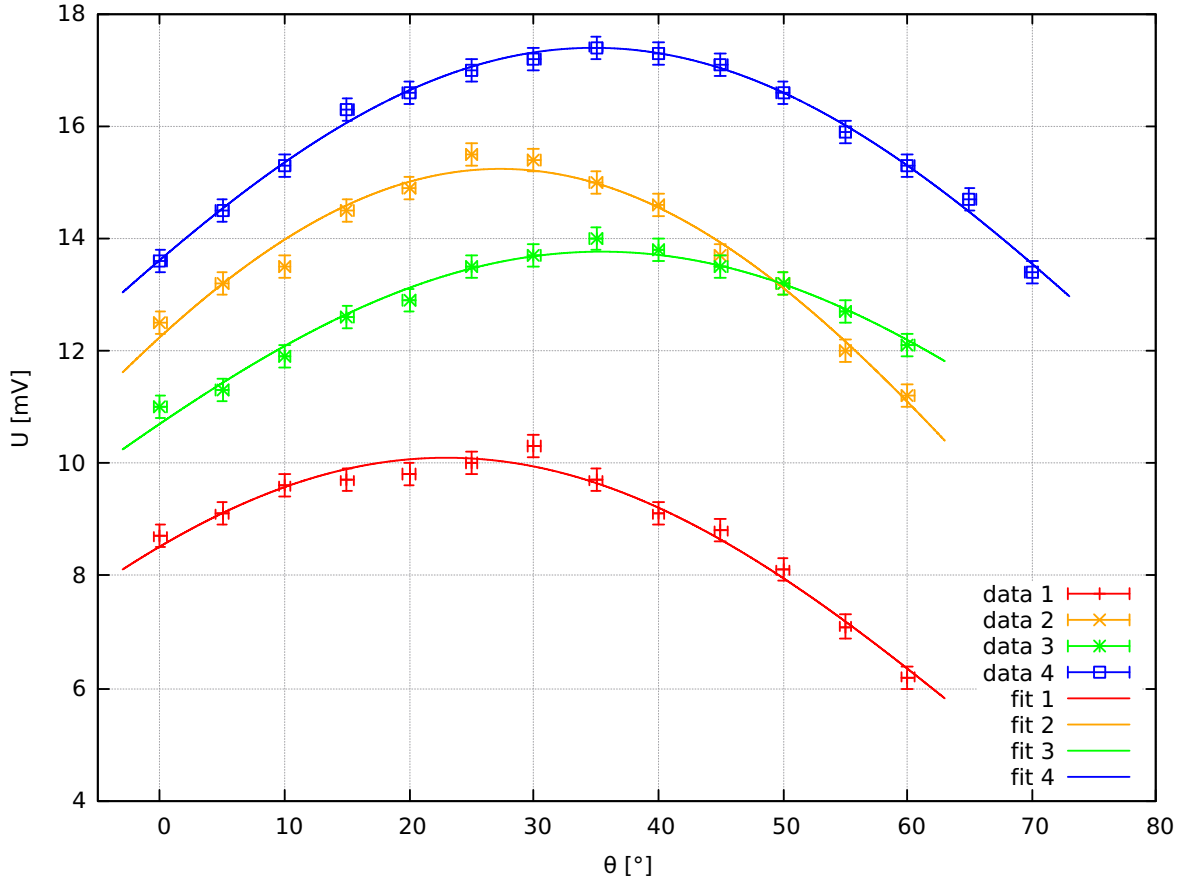
Popisují zde pozorování pro každý z celofánových filtrů.

1. Při kolmé orientaci polarizátorů bylo výsledné světlo zbarveno do fialova, při shodné orientaci do zelena. Síla tohoto jevu byla silně závislá na orientaci celofánového filtru ku polarizátoru: při úhlu 45° byl jev maximální, při shodné či kolmé orientaci minimální.

2. Byly pozorovatelné podstatně menší rozdíly v barevnosti, než u prvního. Kolmá orientace opět barvila do fialova, rovnoběžná do zelena. Intenzita prošlého světla byla nižší.
3. Při kolmé orientaci bylo světlo opět zabarveno do fialova. Při postupné změně orientace přecházela barva k červené. Při shodné orientaci bylo světlo znatelně zeslabeno a zabarveno opět do fialova.
4. Barví světlo na růžovou při všech úhlech. Při kolmé konfiguraci byl znatelný pokles intenzity světla.

5.4 Optická aktivita křemene

Naměřené hodnoty prezentuji graficky na Obr. 6. Dále jsem ze záporně vzatých koeficientů C vykreslil závislost změny polarizace na vlnové délce světla, Obr. 7.

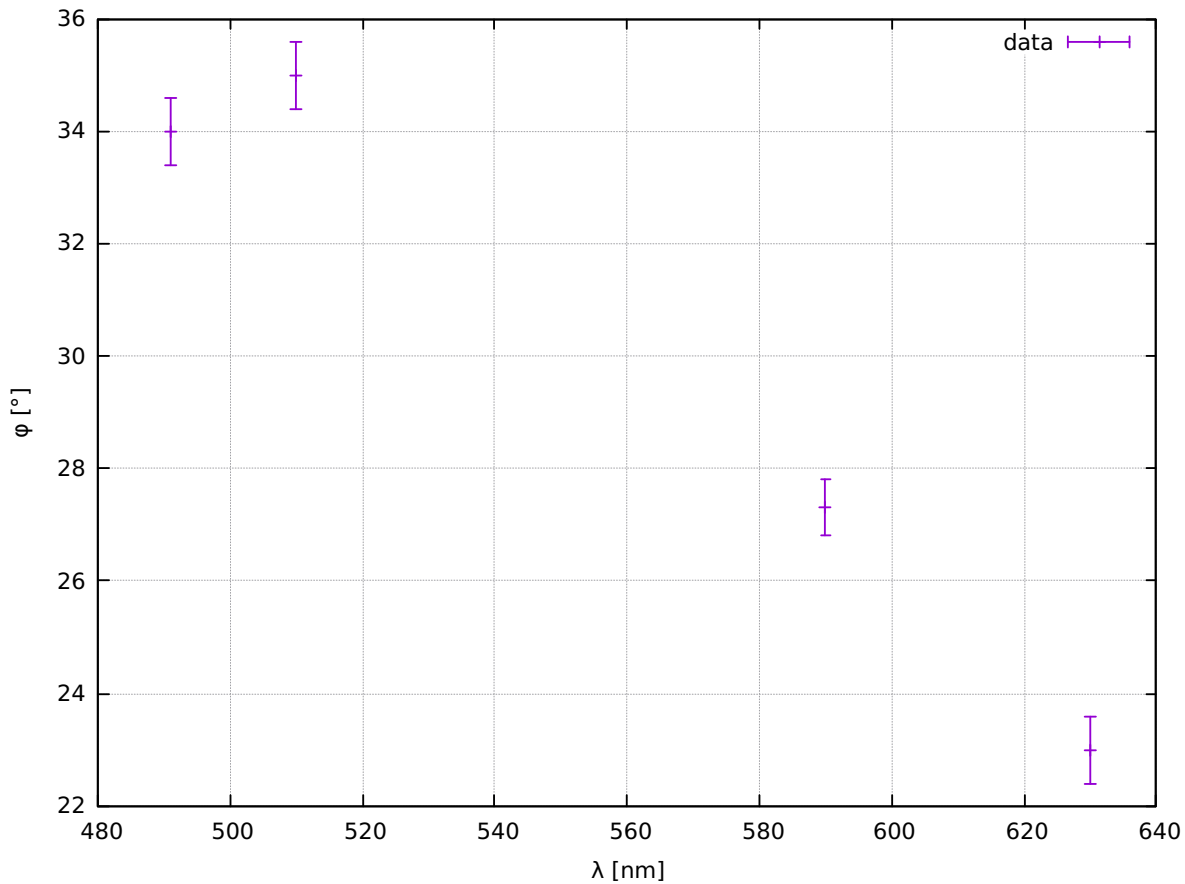


Obr. 6: Naměřené hodnoty napětí na fotočlátku U v závislosti na úhlu otočení polarizátoru Θ , fity (9). Koeficienty fitů jsou uvedeny v Tab. 4.

fit	$\lambda[\text{nm}]$	A	B	C
1	630	$(10,3 \pm 0,6)$	$(-0,3 \pm 0,6)$	$(-23,0 \pm 0,6)$
2	590	$(14,2 \pm 0,7)$	$(1,0 \pm 0,7)$	$(-27,3 \pm 0,5)$
3	510	$(9,1 \pm 0,5)$	$(4 \pm 0,5)$	$(-35,0 \pm 0,6)$
4	491	$(10,3 \pm 0,6)$	$(5,8 \pm 0,2)$	$(-34,0 \pm 0,6)$

Tab. 4: Koeficienty fitů.

Dále uvádím na Obr. 8 měření tlustší destičky s modrým filtrem. Podle hodnot z Tab. 4 jsem očekával koeficient $C = (-129 \pm 2)$. Výsledná hodnota $C = (-124 \pm 2)$ je téměř v toleranci.



Obr. 7: Úhel změny polarizace φ v závislosti na vlnové délce pro 1 mm destičku křemene. Jednotlivé soubory dat odpovídají měřením s jedním filtrem.

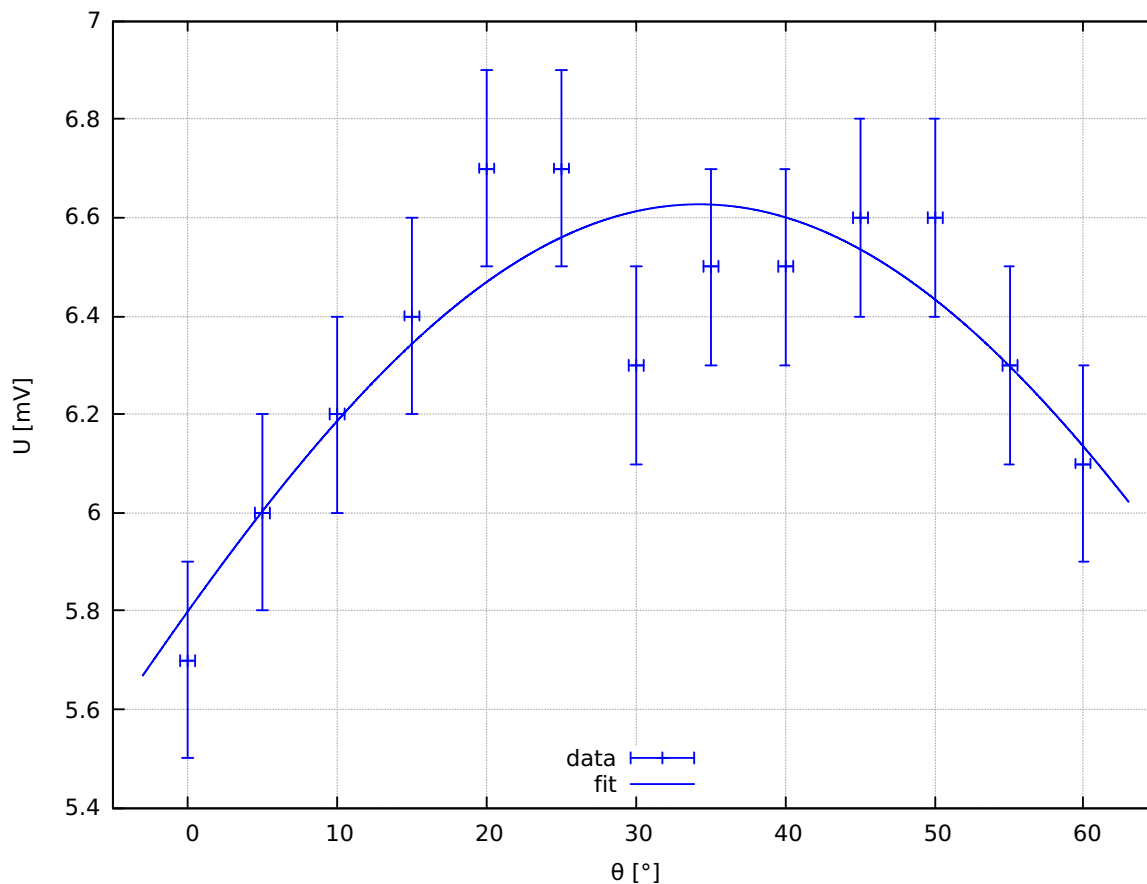
6 Diskuze

Podle tabulek [2] má korunové sklo (nejčastěji používané pro optické přístroje) index lomu v oblasti viditelného světla v rozmezí 1,51 až 1,53. Budu-li uvažovat hodnotu $n_2 = 1,52$, pak podle (1) získávám teoretickou hodnotu $\Theta_{BT} = 56^\circ$. Námi naměřená hodnota $\Theta_{BE} = (50 \pm 5)^\circ$ odpovídá docela dobře. Přesto však měření neproběhlo zcela v souladu s teorií. Podle teorie [1] by mělo platit pro stupeň polarizace $0 \leq ||\vec{P}|| \leq 1$. Dle Obr. 4 však očividně poblíž maximální hodnoty byla spočtená velikost vektoru o skoro 2σ větší než 1. Usuzuji tedy, že naše měření je zatíženo systematickou chybou. Ta mohla být způsobena třeba vnikem světla do fotočlánku mimo naši optickou dráhu. Navíc jsme měřili na bílém světle. Pokud bychom pracovali již s monochromatickým světlem, tak bychom měli dojít k jedné hodnotě o menším rozptylu.

Ověření Malusova zákona považuji v rámci chyby za úspěšné. Naše naměřená data graficky odpovídají trochu méně strmému vrcholu, než teoretickému. Opět v tom shledávám systematickou chybu, tentokrát však na hranici měřitelnosti. Pokud bych nepředpokládal nulovou intenzitu na nule a přidal do proložení ještě jeden parametr, tak bych možná mohl být schopný tímto určit průnik světla do fotočlánku.

Na kvalitativním popisu pozorovaných jevů při dvojlomu na celofánovém filtru nedovedu asi nic diskutovat.

Při určování optické aktivity vyšly všechny fity rozumně. Očekávaná hodnota aktivity pro tlustší destičku byla téměř v toleranci s hodnotou určenou fitem. Pěkné by bylo, kdybych dokázal odhadnout nějakou funkci, která by popisovala závislost optické aktivity na vlnové délce. Vynechal-li bych hodnotu získanou měřením s modrým filtrem, tak bych si dovedl odhadnout, že odpovídá přibližně lineárně. Takto však nemám dost bodů na to, abych učinil rozumný odhad.



Obr. 8: Naměřené hodnoty napětí na fotočlátku U v závislosti na úhlu otočení polarizátoru θ pro 3,8 mm destičku křemene, modrý filtr. Koeficienty fitu: $A = (-2,6 \pm 0,5)$, $B = (6,63 \pm 0,07)$, $C = (-124 \pm 2)$.

7 Závěr

Podařilo se splnit všechny úkoly. Naměřili jsme Brewsterův úhel pro sklo θ_{BT}

$$\theta_{BE} = (50 \pm 5)^\circ. \quad (11)$$

Opticky jsem podle Obr. 5 prohlásil Malusův zákon za ověřený.

Závislost optické aktivity je graficky na Obr. 7. Chyby jsou diskutovány.

Literatura

- [1] Návod - *Polarizace světla* - online <http://praktikum.fjfi.cvut.cz/mod/resource/view.php?id=342> [cit.14.3.2017]
- [2] J. Mikulčák a kol. *matematické, fyzikální, chemické tabulky*, státní pedagogické nakladatelství Praha, 1966