

Číslo úlohy: **9** Skupina: **4**
 Kruh: **Středa** Jméno: **Denis Krapivin**
 Datum měření: **6.4.2022** Kolega: **Kseniia Politskovaia**
 Klasifikace:

1 Pracovní úkoly

- DŮ:** Odvoďte vzorec (1) pro Brewsterův úhel úplné polarizace. Vycházejte z Obr. (1) a ze zákona lomu světla na rozhraní dvou optických prostředí. Spočítejte Brewsterův úhel pro rozhraní vzduch - skleněné zrcadlo.
- Proměřte závislost stupně polarizace bílého světla na sklonu černé skleněné desky a určete optimální hodnotu Brewsterova úhlu. Výsledky zanepte do grafu a porovnejte s vypočtenou hodnotou z domácího úkolu.
- 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.
- Na optické lavici prozkoumejte, jak působí na světelný paprsek celofánové dvojlomné filtry, které způsobují 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.
- Pomocí dvou polarizačních filtrů, fotočlátku 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.

2 Pomůcky

Optická lavice, držáky pro optickou lavici, tyč s hrotem, tyč s výřezem, otočné černé zrcadlo, dva polarizační filtry, multimetr, kabely, otočný držák pro dvojlomný vzorek, čtvrtvlnná destička, světelný zdroj s matnicí, dva fotočlátky, 4 celofánové dvojlomné filtry, 4 barevné filtry, tři křemenné klíny, hadřík pro výměnu horkých filtrů.

3 Teorie

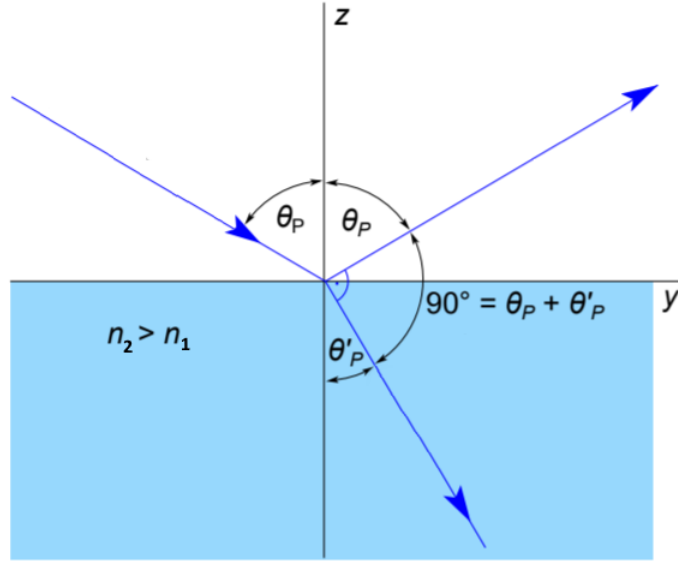
3.1 Polarizace

Při dopadu světla na rozhraní dvou prostředí s indexy lomu n_1 a n_2 vzniká vlna odrazená a proslá (Obr. (1)).

Stupeň polarizace odrazené vlny závisí na uhlu, který svírá dopadající vlna s rovinou rozhraní. Úhel ϕ , pro který stupeň polarizace je maximální nazýváme Brewsterův úhel [1]. Teoretický by mělo při dopadu světla na rozhraní pod Brewsterovým úhlem platit:

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{\sin(\phi)}{\sin(90^\circ - \phi)} = \operatorname{tg}(\phi). \quad (1)$$

Brewsterův úhel lze najít jako uhel dopadu, při kterém stupeň polarizace, t.j. velikost vektoru $\vec{P} = (P_1, P_2, P_3)$ odrazené vlny nabývá maximální hodnoty.



Obr. 1: Lom a odraz světla na rozhraní látek s indexy lomu n_1 a n_2 . θ_p je uhel pod kterým světlo dopadá na rozhraní dvou prostředí, θ'_p je uhel pod kterým světlo prochází druhým prostředím.

Jednotlivé složky vektoru \vec{P} nazýváme Stokesovy parametry:

$$P_1 = \frac{\langle E_x^2 \rangle_r - \langle E_y^2 \rangle_r}{\langle E_x^2 \rangle_r + \langle E_y^2 \rangle_r}, \quad P_2 = \frac{\langle 2E_x E_y \rangle_r}{\langle E_x^2 \rangle_r + \langle E_y^2 \rangle_r}, \quad P_3 = \frac{\langle 2E_x(\omega t - \frac{\pi}{2})E_y(\omega t) \rangle_r}{\langle E_x^2 \rangle_r + \langle E_y^2 \rangle_r}, \quad (2)$$

kde $\langle E_x^2 \rangle_r$, $\langle E_y^2 \rangle_r$, $\langle 2E_x E_y \rangle_r$, $\langle 2E_x(\omega t - \frac{\pi}{2})E_y(\omega t) \rangle_r$ jsou střední časové hodnoty intenzit středované přes rozlišovací dobu měřicího přístroje.

Ke změření intenzit $\langle E_x^2 \rangle_r$, $\langle E_y^2 \rangle_r$, $\langle 2E_x E_y \rangle_r$ potřebujeme jeden polarizátor. Jeho osa je orientována ve směru osy x nebo ve směru osy y .

Pokud nastavíme osu polarizátoru pod úhlem 45° k osám x , y dostaneme následující intenzitu:

$$\left\langle \left(\frac{E_x^2 + E_y^2}{\sqrt{2}} \right)^2 \right\rangle_r = \frac{1}{2} \langle E_x^2 \rangle_r + \frac{1}{2} \langle E_y^2 \rangle_r + \langle E_x E_y \rangle_r,$$

odkud s ze znalostí hodnot intenzit $\langle E_x^2 \rangle_r$ a $\langle E_y^2 \rangle_r$ lze snadno najít $\langle 2E_x E_y \rangle_r$:

$$\langle 2E_x E_y \rangle_r = 2 \left\langle \left(\frac{E_x^2 + E_y^2}{\sqrt{2}} \right)^2 \right\rangle_r - \langle E_x^2 \rangle_r - \langle E_y^2 \rangle_r. \quad (3)$$

Obdobně při přidání před polarizátor orientovaný pod úhlem 45° k osám x , y čtvrtvlnné destičky dostaneme následující intenzitu:

$$\left\langle \left(\frac{\langle E_x(\omega t - \frac{\pi}{2}) + E_y(\omega t) \rangle_r}{\sqrt{2}} \right)^2 \right\rangle_r = \langle E_x(\omega t - \frac{\pi}{2})E_y(\omega t) \rangle_r + \frac{1}{2} \langle E_x^2 \rangle_r + \frac{1}{2} \langle E_y^2 \rangle_r,$$

odkud s ze znalostí hodnot intenzit $\langle E_x^2 \rangle_r$ a $\langle E_y^2 \rangle_r$ lze snadno najít $\langle 2E_x(\omega t - \frac{\pi}{2})E_y(\omega t) \rangle_r$:

$$\langle 2E_x(\omega t - \frac{\pi}{2})E_y(\omega t) \rangle_r = 2 \left\langle \left(\frac{\langle E_x(\omega t - \frac{\pi}{2}) + E_y(\omega t) \rangle_r}{\sqrt{2}} \right)^2 \right\rangle_r - \langle E_x^2 \rangle_r - \langle E_y^2 \rangle_r, \quad (4)$$

3.2 Malusův zákon

Pro intenzitu I lineárně polarizovaného záření po průchodu polarizátorem platí Malusův zákon:

$$I = I_0 \cos^2(\varphi), \quad (5)$$

kde I_0 intenzita polarizovaného světla dopadajícího na polarizátor a φ je úhel sevřený polarizačními rovinami paprsku a polarizátoru.

Prochází-li lineárně polarizované světlo opticky aktivními látkami dochází ke stáčení roviny polarizace tohoto světla. Úhel, o který se rovina polarizace stočí, je přímo úměrný tloušťce vrstvy materiálu, kterou světlo prochází. Optickou aktivitu látky popisujeme pomocí měrné otáčivosti, která udává úhel otočení ve stupních na 1 mm tloušťky vzorku. Optická aktivita závisí také na vlnové délce světla, kdy kratším vlnovým délkám přísluší větší otočení.

4 Postup měření

Před samotným měřením umístíme na jeden konec optické lavice vedle otočného stolku tyčku s výřezem a na druhý konec optické lavice umístíme tyčku s hrotem. Pak otočný stolek nastavíme na uhel 0° a zaaretujeme. Hledáme polohu stolku tak, aby při pohledu přes hrot a výřez obou tyček hrot a jeho obraz v černé destičce kryly.

4.1 Určení Brewsterova úhlu

Umístíme na optické lavici co nejbližší k sobě jeden z fotočlánků, polarizační filtr, clonu a černou destičku připevněnou na nedotačném stolku. Fotočlánek připojíme na multimetr, kterým budeme měřit napětí na článku v rozsahu 2000 mV.

Světelný zdroj umístíme pod pravým uhem k otočnému stolku s destičkou a irisovou clonu nastavíme tak, aby se do polarizátoru dostalo co nejméně rozptýleného světla.

Zapojíme zdroj světla a na polarizátoru nastavíme uhel otočení na 0° . Měříme závislost hodnoty napětí na multimetru při změně uhlu otočení stolku s destičkou v rozmezí od 0° do 90° s krokem 5° . Pak postup opakujeme pro otočení polarizátoru na 90° a 45° .

Pro poslední měření potřebujeme mezi polarizátor a clonu vložit čtvrtvlnnou destičku. Polohu čtvrtvlnné destičky nastavte takto: analyzátor nastavíme do polohy 0° , čtvrtvlnnou destičku natočíme tak, aby napětí na multimetru bylo maximální. Potom na polarizátoru nastavíme uhel otočení na 45° a naměříme závislost napětí na uhlu otočení stolku stejně jako v minulých úlohách.

4.2 Ověření Malusova zákona

Umístíme na optické lavici co nejbližší k sobě jeden z fotočlánků, dva polarizační filtry a zdroj světla. V daném měření polarizátor, který se nachází vedle fotočlánku hraje roli analyzátoru. Zapneme zdroj světla a postupně měříme závislost napětí změně uhlu natočení analyzátoru vůči polarizátoru. Měření provádíme pro natočení od -90° do 90° v krocích po 5° .

4.3 Interference v rovnoběžném polarizovaném světle

Umístíme na optické lavici co nejbližší k sobě jeden z fotočlánků, první polarizační filtr (analyzátor), celofánový dvojlomný filtr, druhý polarizační filtr a zdroj světla.

Otáčením analyzátoru vůči polarizátoru a následně otáčením dvojlomného filtru mezi zkříženými i rovnoběžnými polarizátory pozorujeme změny ve světelném spektru pro příslušné dvojlomné filtry.

4.4 Optická aktivita křemene

Umístíme na optické lavici co nejbližší k sobě jeden z fotočlánků, první polarizační filtr (analyzátor), jeden ze vzorků křemene, druhý polarizační filtr a zdroj světla. Na matnici světelného zdroje umístíme jeden z 4 barevných filtrů.

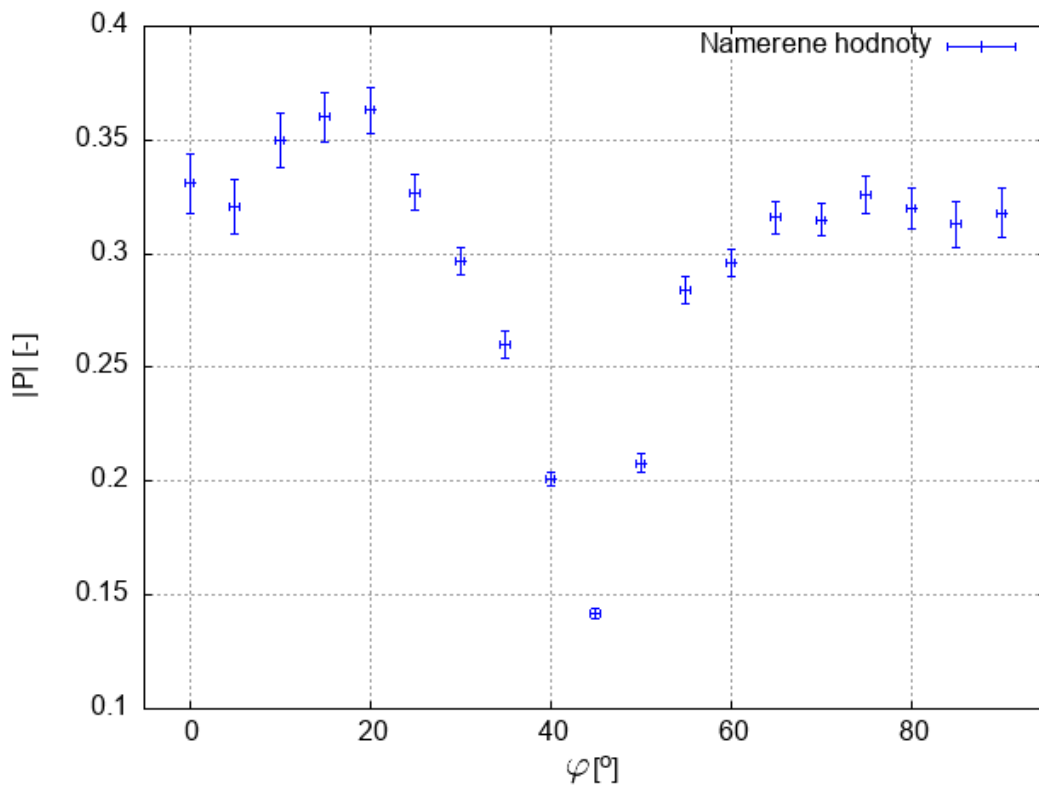
Otáčením analyzátoru vůči polarizátoru najdeme přibližnou hodnotu úhlu s maximální intenzitou propouštěného světla. Pak měříme intenzitu světla v okolí tohoto úhlu v rozmezí $\pm 50^\circ$ s krokem 5° . Měření opakujeme pro každý z 4 filtrů pro vzorek křemene tloušťky 1 mm a pro jeden filtr pro vzorky křemene tloušťky 1, 7 a 3, 5 mm.

5 Zpracování dat

Vypracování DÚ je uvedeno v Příloze (Obr. 5).

5.1 Určení Brewsterova úhlu

Naměřili jsme závislost intenzity světla na uhlu otočení černé destičky a podle vztahů (2), (3) a (4) jsme našli hodnoty Stokesových parametrů P_1 , P_2 a P_3 pro každý úhel otočení. Vypočtené hodnoty stupňů polarizace $|\vec{P}|$ v závislosti na úhlu natočení destičky φ jsou zobrazeny na Obr. 2.

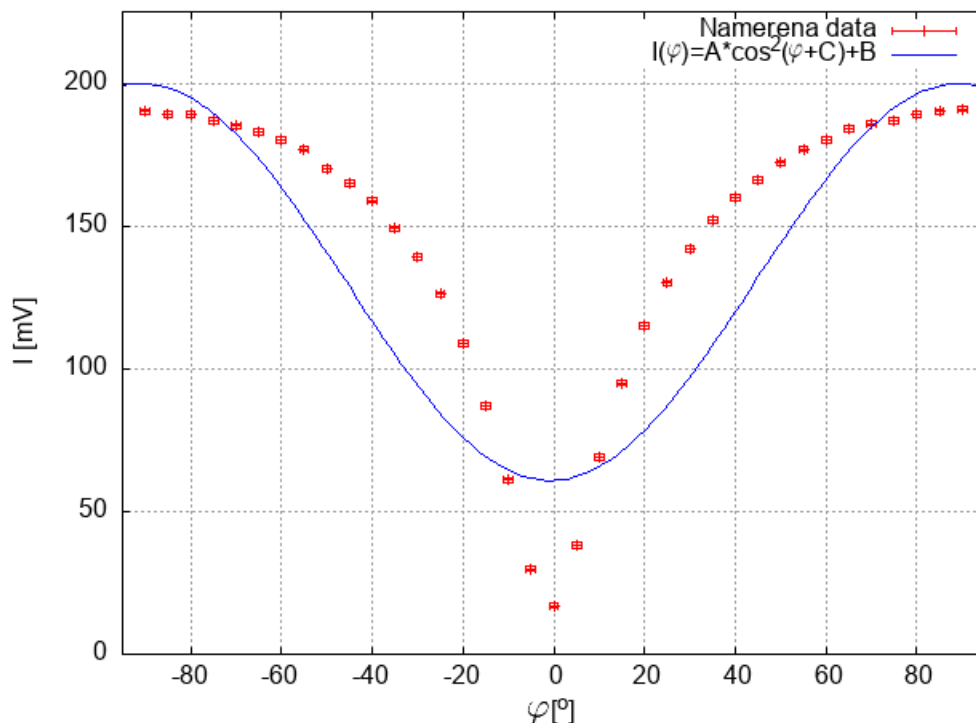


Obr. 2: Vypočtené hodnoty stupňů polarizace $|\vec{P}|$ v závislosti na úhlu natočení destičky φ .

Chyba měření uhlu natočení $\sigma_\varphi = 30'$ je přímo chybou měření měřícího přístroje. Intenzitu světla jsme měřili multimetrem s přesností 1 mV, pak chyba měření stupňů polarizace $|\vec{P}|$ je chybou nepřímého měření [2].

5.2 Ověření Malusova zákona

Naměřené hodnoty intenzity I v závislosti na uhlu pootočení analyzátoru φ a předpokládaná závislost podle Malusova zákona (5) jsou na Obr. (3).



Obr. 3: Naměřené hodnoty intenzity I v závislosti na uhlu pootočení analyzátoru φ a předpokládaná závislost podle Malusova zákona ve tvaru $I(\varphi)$ s koeficienty $A = 140 \pm 9$, $B = 61 \pm 7$, $C = 1,6 \pm 0,1$.

5.3 Interference v rovnoběžném polarizovaném světle

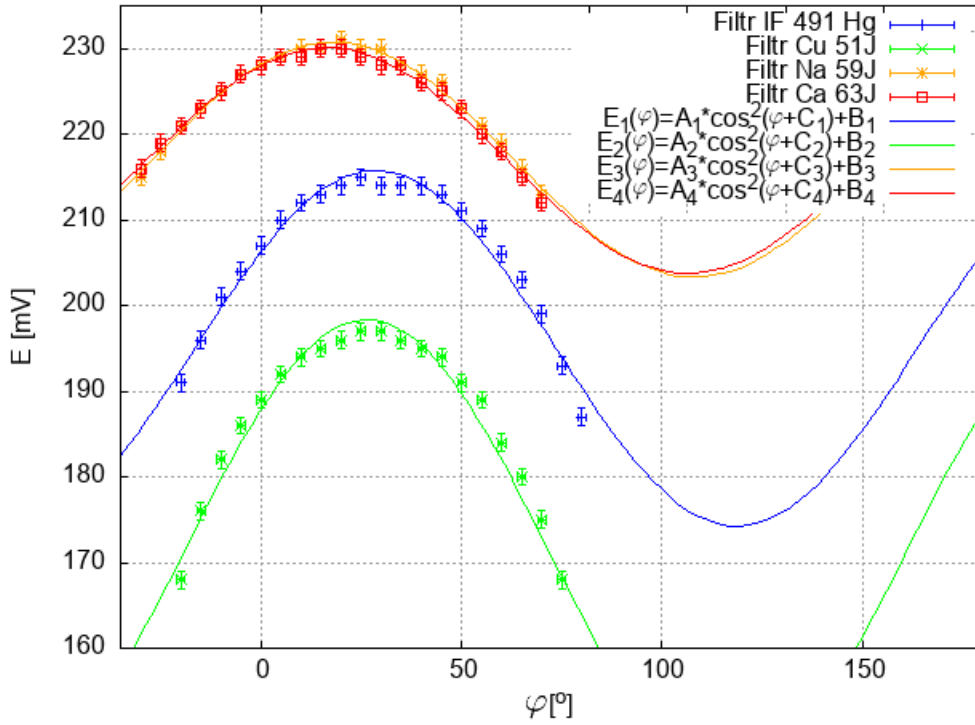
Pozorované barvy při natočení na úhel φ analyzátoru vůči polarizátoru pro 4 celofánové filtry jsou v Tab. 1.

filtr [–]	φ [°]	barva [–]
1	90	malinová
	45	světlo-zelená
	0	bílá
2	90	fialová
	45	růžova
	0	bílá
3	90	modrá
	45	žlutá
	0	bílá
4	90	světlo-modrá
	45	zelená
	0	žluto-zelená

Tab. 1: Interference v rovnoběžném polarizovaném světle. Pozorované barvy při nastavení úhlu φ natočení analyzátoru vůči polarizátoru pro 4 různé celofánové filtry.

5.4 Optická aktivita křemene

Naměřené hodnoty intenzity E v závislosti na uhlu pootočení analyzátoru φ pro tloušťku křemene 1 mm při měření s 4 různými filtry a proložení dat příslušnou funkcí ve tvaru $E(\varphi) = A \cos^2(\varphi + B) + C$ jsou na Obr. 4.



Obr. 4: Naměřené hodnoty intenzity E v závislosti na uhlu pootočení analyzátoru φ pro tloušťku křemene 1 mm při měření s 4 různými filtry. Proložení závislostí funkcemi ve tvaru $E_i(\varphi)$ s koeficienty $A_1 = 42 \pm 2$, $A_2 = 53 \pm 2$, $A_3 = 27,4 \pm 0,5$, $A_4 = 26,3 \pm 0,6$, $B_1 = 174 \pm 1$, $B_2 = 145 \pm 2$, $B_3 = 203,3 \pm 0,4$, $B_4 = 203,8 \pm 0,5$, $C_1 = -0,50 \pm 0,01$, $C_2 = -0,46 \pm 0,02$, $C_3 = -0,31 \pm 0,01$, $C_4 = -0,29 \pm 0,01$.

Proložení dat jsme určili hodnoty parametrů C_i , který určuje polohu vrcholu, tj. úhel, o který se rovina polarizace světla stočila. Pak pro každý filtr jsme spočítali hodnotu měrné otáčivosti křemene $\frac{\varphi}{d}$. Vypočtené hodnoty měrné otáčivosti křemene $\frac{\varphi}{d}$ v závislosti na vlnové délce světla λ a proložení závislostí funkcí ve tvaru $\frac{\varphi}{d}(\lambda)$ jsou na Obr. 6.

Naměřené hodnoty intenzity E v závislosti na uhlu pootočení analyzátoru φ pro tloušťky křemene 1, 1,7 a 3 mm při měření s modrým filtrem ($\lambda = 491$ nm) a proložení závislostí funkcemi ve tvaru $E(\varphi) = A \cos^2(\varphi + B) + C$ jsou na Obr. 7.

Pak měrnou otáčivost pro vzorek s tloušťkou 1 mm jsme určili na $\frac{\varphi}{d_1} = (0,50 \pm 0,01) \text{ mm}^{-1}$, pro vzorek s tloušťkou 1,7 mm na $\frac{\varphi}{d_{1,7}} = (0,51 \pm 0,02) \text{ mm}^{-1}$ a pro vzorek s tloušťkou 3,8 mm na $\frac{\varphi}{d_{3,8}} = (0,53 \pm 0,02) \text{ mm}^{-1}$. Chyby jsou nalezeny jako chyby nepřímého měření.

6 Diskuze

V prvním a druhém pokusu jsme používali fotočlánek, který pravděpodobně měl nějakou vadu nebo byl částečně nefunkční. Podle teoretických představ [1] hodnota stupně polarizací se by měla přibližovat k 1 pro Brewsterův úhel, který jsme v domácí přípravě odvodili na cca 62° . Na Obr. (6) je vidět, že naměřená data se chovají úplně jinak.

Při ověřování Malusova zákona lze z Obr. (6) stanovit, že naměřené hodnoty intenzity neodpovídá teoretickému předpokladu, ale zkusili jsme tato data proložit očekávanou funkcí. Každopádně podle naměřených hodnot jsme ověřili, že polarizátor opravdu má určitý úhel polarizace.

Při zkoumání interference v rovnoběžném polarizovaném světle jsme určili, že při změně uhlu natočení analyzátoru vůči polarizátoru se mění výsledná barva světla. Při otočení polarizátorů o 90° pozorujeme úplně jiné barvy, které se předtím zeslabovaly a barva zorného pole se mění na doplňkovou. Při otáčení vzorkem se mění poměr intenzit interferujících paprsků, což způsobuje změnu výsledné barvy.

Zkusili jsme proložit závislost měrné otáčivosti křemene na vlnové délce světla různými funkcemi, jedna z nich je na Obr. 7. Kvůli malému počtu měření těžko přesně určit typ závislosti, ale určitě jde o klesající funkci, což odpovídá našim představám. Zvětšením počtu měření a zvětšením počtu filtru s různými vlnovými délkami šlo by tuto závislost prozkoumat lip.

Při použití vzorků s větší tloušťkou jsme zjistili, že hodnota měrné otáčivosti pro jednu zvolenou vlnovou délku se nemění, ale roste hodnota uhlu otáčení.

7 Závěr

1. DŮ: V přípravě (Obr. 5) jsme odvodili vzorec (1) pro Brewsterův úhel úplné polarizace. Spočítali jsme Brewsterův úhel pro rozhraní vzduch - skleněné zrcadlo.
2. Proměřili jsme závislost stupně polarizace bílého světla na sklonu černé skleněné desky (Obr. 2), optimální hodnotu Brewsterova úhlu se nám najít nepodařilo.
3. Proměřili jsme závislost intenzity polarizovaného světla na úhlu otočení analyzátoru (Malusův zákon). Výsledek jsme srovnali s teoretickou předpovědí, znázorňovali graficky (Obr. 3) a výsledek diskutovali.
4. Na optické lavici jsme prozkoumali, jak působí na světelný paprsek celofánové dvojločné filtry, které způsobují interferenci. Vyzkoušeli jsme vliv otáčení analyzátoru vůči polarizátoru a vliv otáčení dvojločného filtru mezi zkříženými i rovnoběžnými polarizátory v bílém světle (Tab. 1).
5. Pomocí dvou polarizačních filtrů, fotočlánku a barevných filtrů změřili jsme měrnou otáčivost křemene s tloušťkou 1 mm pro 4 vlnové délky světla (Obr. 4). Předpokládanou závislost mezi vlnovou délkou světla a měrnou otáčivostí jsme znázorňovali graficky (Obr. 6).

Literatura

- [1] Kolektiv praktika, *Polarizace světla*, [online, cit.12.4.2022] - [https://moodle-vyuka.cvut.cz/pluginfile.php/435619/mod_resource/content/9/Návod%20-%20měření%20s%20polarizovaným%20světlem.pdf](https://moodle-vyuka.cvut.cz/pluginfile.php/435619/mod_resource/content/9/N%C3%ADvod%20-%20m%C3%A9ření%20s%20polarizovan%C3%BDm%20sv%C4%9Btlem.pdf)
- [2] Petr Chaloupka, *Základy fyzikálních měření*, prezentace [online, cit.12.4.2022] - <https://people.fjfi.cvut.cz/chalopet/ZFM/ZFM.pdf>

Příloha

8 Domácí příprava

DU: Odvodit vzorec: $\frac{n_2}{n_1} = \frac{\sin(\theta)}{\sin(90^\circ - \theta)} = \tan(\theta)$

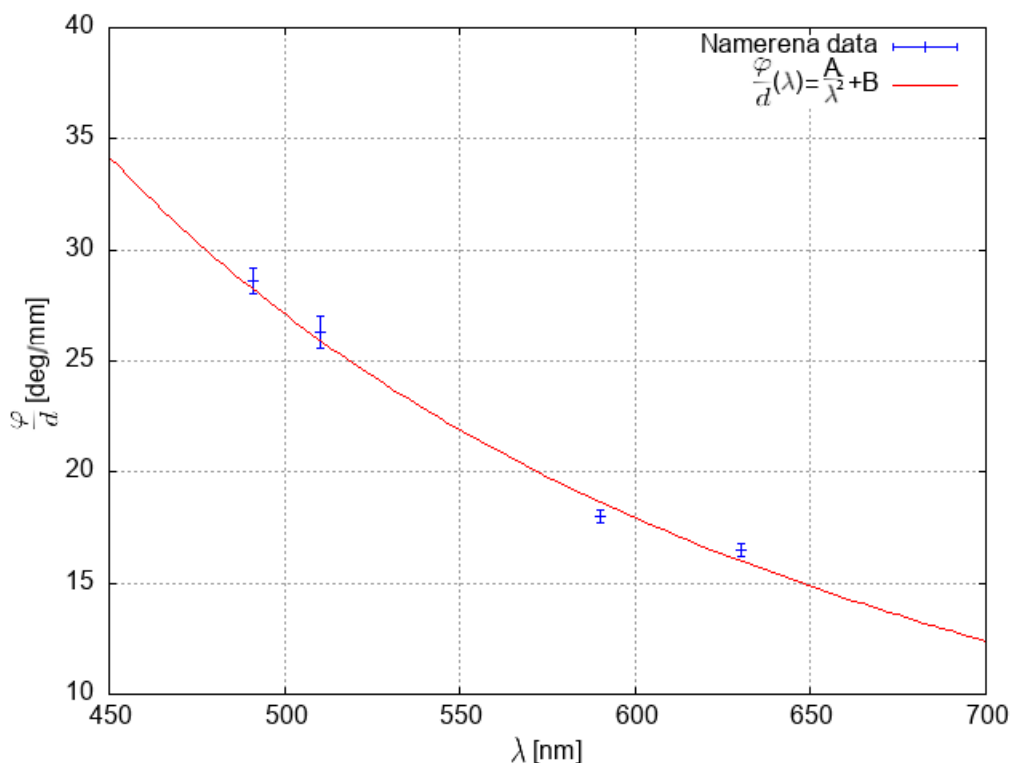
$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{\sin \theta}{\sin \theta'} \cdot \tan(\theta + \theta') = +\infty \Rightarrow \frac{n_2}{n_1} = \frac{\sin(\theta)}{\sin(90^\circ - \theta)} = \tan \theta.$$

$$\theta = \arctan(n_2) = 1,075 \text{ rad} = \underline{\underline{61,8^\circ}}$$

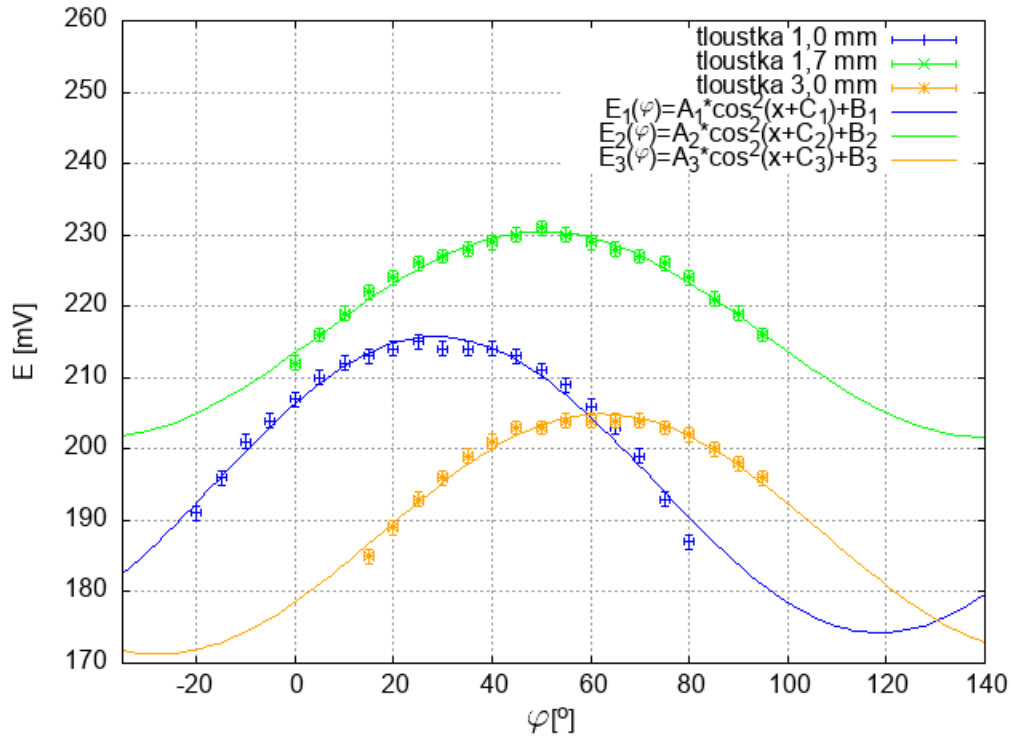
Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská
Fyzikální praktikum II – letní semestr
Zabradil

Obr. 5: Domácí příprava. Odvození vzorce (1) pro Brewsterův úhel úplné polarizace.

9 Grafy



Obr. 6: Vypočtené hodnoty měrné otáčivosti křemene $\frac{\varphi}{d}$ v závislosti na vlnové délce světla λ a proložení závislostí funkcí ve tvaru $\frac{\varphi}{d}(\lambda)$ s koeficienty $A = 7,52 \pm 0,02$, $B = -2 \pm 1$.



Obr. 7: Naměřené hodnoty intenzity E v závislosti na uhlu pootočení analyzátoru φ pro tloušťky křemene 1, 1,7 a 3 mm při měření s modrým filtrem ($\lambda = 491$ nm). Proložení závislostí funkcemi ve tvaru $E_i(\varphi)$ s koeficienty $A_1 = 42 \pm 2$, $A_2 = 29 \pm 1$, $A_3 = 33,6 \pm 1,5$, $B_1 = 174 \pm 1$, $B_2 = 202 \pm 1$, $B_3 = 171,3 \pm 1,3$, $C_1 = -0,50 \pm 0,01$, $C_2 = -0,86 \pm 0,01$, $C_3 = 2,05 \pm 0,01$.