

Polarizace světla

Abstrakt: Cílem této úlohy je vytvořit polarizované světlo několika rozdílnými způsoby, konkrétně odrazem, lomem a pomocí různých optických komponent, a následně určit míru vytvořené polarizace u výše zmíněných metod. Mezi zkoumané míry, které je třeba proměřit, patří především Brewsterův úhel úplné polarizace, Malusův zákon nebo optická aktivita křemene.

1 Pracovní 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. Spočítejte Brewsterův úhel pro rozhraní vzduch - skleněné zrcadlo.
2. 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.
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, 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.
5. Pomocí dvou polarizačních filtrů, fotočlásku 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

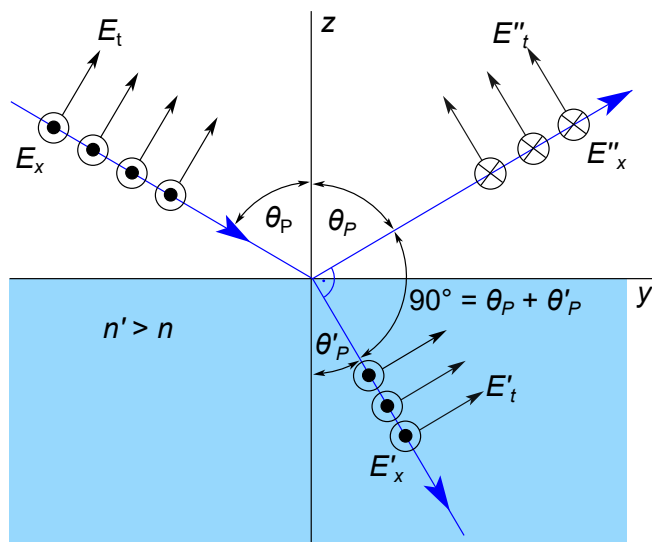
Pomůcky: Optická lavice, otočné černé zrcadlo, $2\times$ polarizační filtr, multimetr, otočný držák pro dvojlomný vzorek, čtvrtvlnná destička, světelný zdroj s matnicí, fotočlánek, 4 celofánové dvojlomné filtry, 4 barevné filtry, křemenný klín.

3 Základní pojmy a vztahy

3.1 Polarizace světla odrazem

Dopadá-li světlo šikmo na skleněnou desku, část světla se odrazí a část se láme do prostředí s jiným indexem lomu. Odražený paprsek je částečně lineárně polarizovaný a jeho vektor intenzity elektrického pole kmitá v rovině, která je kolmá na rovinu dopadu (neboli kmitá v přímce rovnoběžné s rovinou rozhraní). Tato situace je znázorněna na Obr. 1. Stupeň polarizace pak závisí na úhlu, který svírá dopadající paprsek s rovinou zrcadla. Optimální hodnota úhlu, kdy je světlo zcela polarizované, je dána Brewsterovým zákonem, který říká, že odražený a lámající se paprsek musí být na sebe kolmé. Jsou-li indexy lomu pro daná prostředí n_1 a n_2 , platí pro Brewsterův úhel θ následující vztah:

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



Obr. 1: Lom a odraz světla na rozhraní látek s různým indexem lomu.

3.2 Polarizace světla dvojlomem

Některé krystalické látky představují pro průchod světla tzv. anizotropní prostředí, kde jsou optické vlastnosti závislé na směru šíření světla v dané látce. Paprsek nepolarizovaného světla procházející takovou látkou se rozdělí na dva paprsky, z nichž jeden, tzv. paprsek řádný, se řídí Snellovým zákonem a má konstantní index lomu n_o . Druhý paprsek, tzv. paprsek mimořádný, se Snellovým zákonem neřídí a jeho index lomu n_e závisí na směru, v němž se světlo krystalem šíří.

V krystalu existují směry, v nichž se indexy lomu pro oba paprsky rovnají, tedy $n_o = n_e$. Tyto směry jsou dány tzv. optickými osami krystalů a podle jejich počtu dělíme krystaly na jednoosé (soustava čtverečná a šesterečná) a dvouosé (soustava kosočtverečná, jednoklonná a trojklonná). U dvouosých krystalů se žádný z paprsků vzniklých dvojlomem neřídí Snellovým

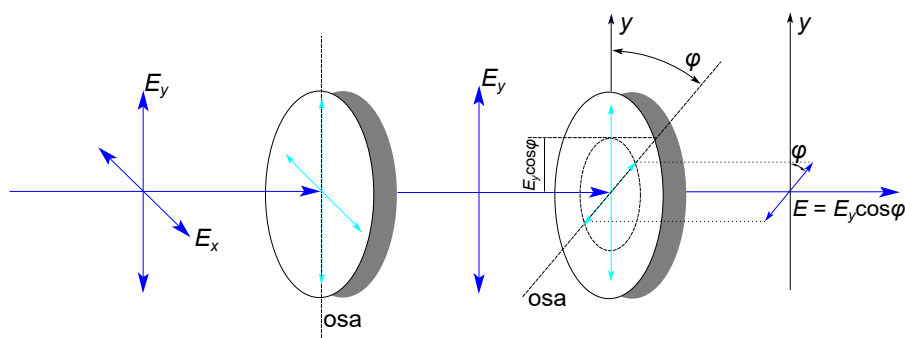
zákonem. Paprsky řádný a mimořádný jsou lineárně polarizovány v rovinách navzájem kolmých. Nejznámějším dvojlomným materiálem je islandský vápenec, existuje ale i řada dalších látek krystalizujících v soustavě, kosočtverečné, jednoklonné a trojklonné. Dvojlomnými se mohou stát i některé amorfnní látky (sklo, plexisklo) podrobené mechanickému namáhání (tlaku, tahu).

3.3 Malusův zákon

Necháme-li procházet lineárně polarizované světlo optickým prvkem, který je sám schopen polarizace, zjistíme, že intenzita prošlého světla je závislá na vzájemné úhlové poloze roviny světelného svazku a polarizátoru, jímž tento svazek prochází. Polarizátor může totiž propustit jen složku spadající do jeho polarizační roviny. Intenzita prošlého světla I se mění podle Malusova zákona, který je dán následovně:

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

kde I_0 je intenzita polarizovaného světla dopadajícího na polarizátor a φ je úhel sevřený polarizačními rovinami paprsku a polarizátoru. Situaci můžeme vidět na Obr. 2.



Obr. 2: Malusův zákon.

3.4 Interference rovnoběžně polarizovaného světla

Dva paprsky pocházející z koherentních zdrojů, polarizované ve stejné rovině, mohou interferovat jako paprsky nepolarizované. Paprsky polarizované v rovinách k sobě kolmých neinterferují, ale skládají se ve světlo elipticky polarizované. Prochází-li lineárně polarizované světlo dvojlomnou destičkou, rozdělí se na dva svazky šířící se různou rychlostí a vycházející z destičky s určitým dráhovým rozdílem.

Procházejí-li tyto dva paprsky polarizátorem, projdou jen jejich složky spadající do jeho polarizační roviny a dojde k interferenci. Dráhový rozdíl obou interferujících paprsků je dán tloušťkou destičky a rozdílem indexů lomu destičky pro oba paprsky, a je proto závislý na vlnové délce světla. Pro některé vlnové délky dostaneme interferenční maxima, pro jiné minima, což se projeví největším vyjasněním, popř. ztemněním zorného pole.

Lze dokázat, že největší světelný kontrast mezi maximem a minimem nastane tehdy, je-li rovina kmitů použitého monochromatického polarizovaného světla rovnoběžná nebo kolmá na rovinu kmitu polarizátoru a přitom směry kmitů paprsku v destičce svírají s těmito směry úhel

45°. Použijeme-li bílého světla, dojde interferencí ke zrušení, nebo zesílení určité vlnové délky ve spektru a zorné pole se nám jeví v barvě vzniklé smíšením prošlých barev. Otočíme-li polarizátor o 90°, budou se zesilovat barvy, které se předtím zeslabovaly (a naopak) a barva zorného pole se změní na doplňkovou. S rostoucí tloušťkou destičky se zvětšuje počet barev, které jsou ve spektru potlačeny nebo zesíleny a výsledná barva se blíží bílé.

Při otáčení vzorkem se mění poměr intenzit interferujících paprsků, což způsobuje změnu výsledné barvy vzniklé interferencí. Tato skutečnost (tj. změna barvy způsobená otáčením vzorku) je kritériem, podle něhož lze určit dvojlomnost látky (na rozdíl od optické aktivity látky, při níž v bílém světle otáčení analyzátoru způsobuje změnu barvy, ale otáčení vzorku nemá na barvu vliv (viz dále)).

3.5 Optická aktivita

Některé látky (např. křemenná destička vyříznutá kolmo k optické ose, roztok třtinového cukru, kyseliny vinné atd.) mají tu vlastnost, že pokud jimi prochází lineárně polarizované světlo, dochází ke stáčení roviny polarizace tohoto světla. Říkáme, že takové látky jsou opticky aktivní. Dochází-li ke stáčení po směru hodinových ručiček (při pohledu ve směru šíření paprsku), mluvíme o látce pravotočivé. (Pokud palec pravé ruky namíříme ve směru paprsku, ukazují nám zbylé prsty směr stočení roviny polarizace.) V opačném případě je daná látka levotočivá.

Úhel, o který se rovina polarizace stočí, je přímo úměrný tloušťce vrstvy materiálu, kterou světlo prochází. Optická aktivita dané látky se tak může popsat pomocí takzvané měrné otáčivosti, která udává úhlové otočení, například ve stupních na 1 milimetr tloušťky vzorku. Optická aktivita však také závisí na vlnové délce světla (kratším vlnovým délkám přísluší větší otočení). Je-li polarizované světlo bílé, jsou tedy jednotlivé barvy stáčeny různě. Mluvíme o tzv. rotační disperzi. Pokud za opticky aktivní vzorek vložíme polarizační filtr (analyzátor), bude nejvíce propouštět paprsky polarizované ve své vlastní polarizační rovině. Proto způsobí otáčení polarizátoru i změnu barvy zorného pole. Otáčení vzorkem aktivní látky nemá na barvu zorného pole vliv na rozdíl od dvojlomnosti (viz výše).

Měření optické aktivity se využívá při diagnostice roztoků různých opticky aktivních látek (například při výrobě cukru). Optická aktivita roztoku aktivní látky je totiž také úměrná koncentraci této látky. Křemenné destičky se pak často používají ke kalibraci přístrojů pro tato měření.

3.6 Určení stupně polarizace měřením souboru intenzit

Polarizační stav monochromatické rovinné elektromagnetické vlny postupující ve směru kladné osy z (při daných pevně zvolených osách x, y) je dán následovně:

$$\vec{E}(z, t) = \vec{x}_0 E_x(z, t) + \vec{y}_0 E_y(z, t) = \vec{x}_0 E_1 \cos(\omega t - kz + \varphi_1) + \vec{y}_0 E_2 \cos(\omega t - kz + \varphi_2), \quad (3)$$

je tedy určen hodnotami parametrů E_1, E_2 a φ , kde $\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$ nazveme fázovým rozdílem. Obecná polarizace je eliptická, pokud $E_1 \neq E_2$. Dále říkáme, že je kruhová levotočivá (+), resp. kruhová pravotočivá (−), pokud $\varphi = \pm\pi/2$. A nakonec, je-li $\varphi = 0$ nebo $\varphi = \pi$, pak je polarizace lineární.

Parametry E_1, E_2, φ lze zjistit změřením souboru čtyř intenzit

$$\begin{aligned} \langle E_x^2 \rangle_T &= \frac{1}{2} E_1^2, & \langle E_y^2 \rangle_T &= \frac{1}{2} E_2^2, \\ \langle E_x E_y \rangle_T &= \frac{1}{2} E_1 E_2 \cos \varphi, & \langle E_x(\omega t - \pi/2) E_y(\omega t) \rangle_T &= \frac{1}{2} E_1 E_2 \sin \varphi, \end{aligned} \quad (4)$$

kde je středování provedeno přes periodu $T = 2\pi/\omega$.

Skutečné světlo není úplně koherentní, a proto jeho parametry E_1 , E_2 , φ se v obecném případě nekontrolovatelně mění s časem s koherenčními dobami τ_1, τ_2, τ_3 . Přístroj registrující intenzitu světla je charakterizován časovou rozlišovací schopností $\Delta(t)_r$, a měří tedy soubor intenzit středovaných nikoliv přes periodu T řádu 10^{-15} s, ale přes rozlišovací dobu přístroje:

$$\langle E_x^2 \rangle_r, \quad \langle E_y^2 \rangle_r, \quad \langle E_x E_y \rangle_r, \quad \langle E_x(\omega t - \pi/2) E_y(\omega t) \rangle_r. \quad (5)$$

Takový přístroj již obecně neposkytuje úplnou informaci o polarizačním stavu, a proto ke středným hodnotám (5) již obecně neexistují parametry E_1 , E_2 , φ takové, aby platilo (4). Proto byly zavedeny tzv. Stokesovy parametry

$$P_1 = \frac{\langle E_x^2 \rangle_r - \langle E_y^2 \rangle_r}{\langle E_x^2 \rangle_r + \langle E_y^2 \rangle_r}, \quad P_2 = \frac{\langle 2E_x E_y \rangle_r}{\langle E_x^2 \rangle_r + \langle E_y^2 \rangle_r}, \quad P_3 = \frac{\langle 2E_x(\omega t - \pi/2) E_y(\omega t) \rangle_r}{\langle E_x^2 \rangle_r + \langle E_y^2 \rangle_r}, \quad (6)$$

kteří charakterizují tzv. částečně polarizované světlo. Velikost vektoru $\vec{P} = (P_1, P_2, P_3)$ značí stupeň polarizace světla a platí

$$0 \leq |\vec{P}| \leq 1. \quad (7)$$

Speciálně $|\vec{P}| = 0$ odpovídá tzv. nepolarizovanému světlu a $|\vec{P}| = 1$ značí světlo úplně polarizované, tj. takové, které lze charakterizovat konstantními parametry E_1 , E_2 , φ .

Ke změření intenzit $\langle E_x^2 \rangle_r, \langle E_y^2 \rangle_r, \langle E_x E_y \rangle_r$ je potřeba jeden polarizátor. Jeho osa je orientována po řadě ve směru osy x , osy y a pod úhlem 45° k osám x , y . V posledním případě se měří ve skutečnosti intenzita

$$\left\langle \left(\frac{E_x + E_y}{\sqrt{2}} \right)^2 \right\rangle_r = \frac{1}{2} \langle E_x^2 \rangle_r + \frac{1}{2} \langle E_y^2 \rangle_r + \langle E_x E_y \rangle_r. \quad (8)$$

Z této intenzity a z předchozích dvou intenzit vypočteme $\langle E_x E_y \rangle_r$. Ke změření čtvrté intenzity $\langle 2E_x(\omega t - \pi/2) E_y(\omega t) \rangle_r$ je třeba před polarizátor orientovaný pod úhlem 45° k osám x , y zařadit ještě čtvrtvlnovou destičku pro danou vlnovou délku s osami orientovanými ve směrech x , y tak, aby složku E_x zpozdila proti E_y o čtvrt vlny; měří se tedy intenzita

$$\left\langle \left(\frac{\langle E_x(\omega t - \pi/2) + E_y(\omega t) \rangle_r}{\sqrt{2}} \right)^2 \right\rangle_r = \frac{1}{2} \langle E_x^2 \rangle_r + \frac{1}{2} \langle E_y^2 \rangle_r + \langle E_x(\omega t - \pi/2) E_y(\omega t) \rangle_r. \quad (9)$$

Z této naměřené hodnoty a prvních dvou se určí poslední člen na pravé straně.

Nutno podotknout, že stačí měřit relativní intenzity, protože Stokesovy parametry (6) jsou normalizovány vydělením celkovou intenzitou $\langle E_x^2 \rangle_r + \langle E_y^2 \rangle_r$.

3.7 Polarizační přístroje

K polarizaci světla a k jeho zkoumání se používá tzv. polarizátor. Je to optický prvek, který ze svazku obyčejného světla vytvoří svazek lineárně polarizovaný. Může pracovat na principu odrazu světla pod Brewsterovým úhlem od plochy, která lomený paprsek úplně pohlcuje. Velmi

často se využívají polarizátory na bázi přírodních dvojlomných krystalů, hlavně islandského vápence (např. „Nicolovy hranoly“). K polarizaci lze využít i tzv. dichroismu. Je to schopnost některých přírodních nebo synteticky připravených látek v poměrně tenkých vrstvách polarizovat dvojlomem a současně pohltit mimořádný paprsek, takže po průchodu dichroitickým polarizátorem (tzv. polaroidem) dostaneme lineárně polarizované světlo.

Pro zkoumání dvojlomnosti látek a jejich polarizačních vlastností se používá obvykle dvou polarizačních elementů zařazených za sebou. První z nich, polarizující obyčejné světlo, se nazývá polarizátor, druhý, jímž se určují vlastnosti polarizovaného světla, je tzv. analyzátor. Takovým polarizačním přístrojem s rozsáhlými možnostmi využití je polarizační mikroskop. Jedná se o normální optický mikroskop, v němž je polarizátor (obvykle polaroidová destička) součástí osvětlovací soustavy a před okulár je zařazen další polaroid jako analyzátor. Polarizátor i analyzátor jsou otočné a jejich úhlové otočení lze měřit. Mezi objektiv a analyzátor je možno vřadit některá pomocná zařízení, např. čtvrtvlnnou destičku a zpoždovací destičku pro barevné purpurové pole.

Čtvrtvlnná destička je obvykle slídový lístek takové tloušťky, aby v něm při průchodu polarizovaného světla došlo k vytvoření dráhového rozdílu mezi řádným a mimořádným paprskem o $1/4$ vlnové délky sodíkového světla, tj. o 147 nm. Pomocí čtvrtvlnné destičky lze z lineárně polarizovaného svazku dostat svazek polarizovaný elipticky, popř. kruhově. Čtvrtvlnná destička se zařazuje mezi polarizátor a analyzátor otočený vzájemně o 90° („zkřížený“), a to tak, aby její osa půlila úhel mezi polarizátorem a analyzátozem.

Zpoždovací destička pro barevné purpurové pole je křemenná nebo slídová destička takové tloušťky, aby způsobila při interferenci polarizovaného světla dráhový rozdíl 565 nm, a tím i vymizení vlnové délky 565 nm (zelená barva), takže zbylé barvy se složí v purpurovou. Zařadíme-li tuto destičku mezi zkřížené polarizátory spolu s mírně dvojlomným vzorkem, sčítají se dráhové difference destičky a vzorku a citlivě se mění barva zorného pole.

Křemenný klín je podlouhlá křemenná destička, přilepená na skleněné podložce, vybroušená tak, aby se její tloušťka lineárně zvětšovala od nuly do určité hodnoty. Průchodem polarizovaného světla křemenným klínem je možno dosáhnout dráhového rozdílu paprsků v intervalu 158-1652 nm v závislosti na posuvu klínu.

4 Postup měření

Před měřením překontrolujte (případně opravte) základní natočení otočného držáku odrazové černé desky následujícím způsobem:

1. na optickou lavici umístěte co nejdále od sebe tyčky s výřezem a hrotem,
2. otočný stolek nastavte na hodnotu 0° a zaaretujte,
3. celý stolek natočte tak, aby se při pohledu přes výřez a hrot obou výše uvedených tyček hrot a jeho odraz v černé desce kryly, a polohu držáku zaaretujte.

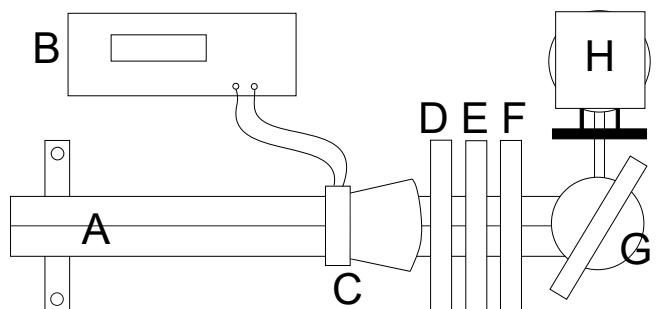
Pro měření pracovních úkolů použijte sestav optických prvků na optické lavici.

4.1 Určení Brewsterova úhlu

Překontrolujte, zda se při nastavení otočného černého zrcadla na úhel 0° kryjí rysky na hlavici pod otočným stolem. Světelný zdroj postavte tak, aby s optickou lavicí svíral úhel 90° , a tedy

A	Optická lavice	F	Clona
B	Multimetr	G	Otočné černé zrcadlo
C	Fotočlánek	H	Světelný zdroj
D	Polarizační filtr	I	Matnice
E	Čtvrtvlnná deska		

Tab. 1: Popis k sestavám A a B.



Obr. 3: Sestava A – Brewsterův úhel. Popis optických prvků se nachází v Tab. 1.

naměřený úhel pootočení zrcadla odpovídal úhlu, pod kterým na něj světlo dopadá ze zdroje. Fotočlánek, polarizátor, čtvrtvlnnou desku a clonu umístěte co nejblíže k sobě a irisovou clonu nastavte tak, aby se do analyzátoru dostalo co nejméně rozptýleného světla. Multimetr přepněte na rozsah 200 mV nebo 2000 V (Obr. 3, Tab. 1).

Postupně měřte intenzity pro:

- analyzátor je otočený na 0° ,
- analyzátor je otočený na 90° ,
- analyzátor je otočený na 45° ,
- analyzátor je otočený na 45° , přičemž analyzátor a clonu je vložena čtvrtvlnná destička.

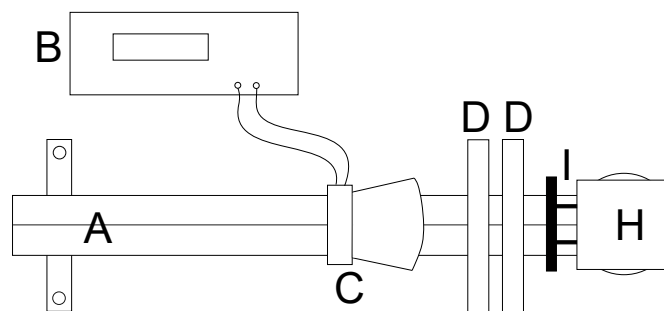
z těchto hodnot vypočtete stupeň polarizace v závislosti na úhlu α a určete Brewsterův úhel.

4.2 Ověření Malusova zákona

Světelný zdroj postavte na konec optické lavice, černé zrcadlo odložte mimo experiment. Použijte další polarizační filtr. První filtr slouží jako polarizátor a druhý jako analyzátor (Obr. 4, Tab. 1). Proměřte intenzitu dopadajícího světla v závislosti na úhlu natočení analyzátoru vůči polarizátoru.

4.3 Interference v rovnoběžném polarizovaném světle

Na optické lavici sestavte experiment stejně jako při ověřování Malusova zákona, akorát mezi analyzátor a polarizátor vložte celofánový dvojklmý filtr. Otáčením analyzátoru vůči polarizátoru



Obr. 4: Sestava B – Malusův zákon. Popis optických prvků se nachází v Tab. 1.

a následně otáčením dvojlomného filtru mezi zkříženými i rovnoběžnými polarizátory pozorujte změny ve světelném spektru pro příslušné dvojlomné filtry.

4.4 Optická aktivita křemene

Měření proveďte podobně jako ověřování Malusova zákona a pozorování interference v rovnoběžném polarizovaném světle s tím rozdílem, že mezi polarizátor a analyzátor umístíte vzorek křemene a na matnici světelného zdroje umístíte 4 barevné filtry. Otáčením analyzátoru si nejdříve přibližně najdete hodnotu úhlu s maximální intenzitou propouštěného světla a pak okolí tohoto úhlu důkladně proměřte. Pro zjištění hodnoty měrné otáčivosti křemene nařídíte naměřené závislosti následující funkci:

$$y = A \cos^2(x + C) + B, \quad (10)$$

kde konstanty A , B a C jsou parametry fitu – parametr A udává amplitudu, parametr B udává posun naměřených dat a parametr C určuje polohu vrcholu, tj. úhel, o který se rovina polarizace světla stočila. Podobně pro jeden barevný filtr změřte optickou aktivitu pro křemenný vzorek s tloušťkou větší než 1 mm (např. 1,7 mm nebo 3,5 mm). Vlnové délky jednotlivých barevných filtrů jsou: červená – 630 nm (Ca 63J), oranžová – 590 nm (Na 59J), zeleno-tyrkysová – 510 nm (Cu 51J) a modrá – 491 nm (IF 491 Hg).

5 Otázky

1. Co je to polarizace? Jak ji měříme? (Vyjmenujte alespoň 3 metody.)
2. Jak měříme Brewsterův úhel?
3. Co je to optická osa krystalu?
4. Jak souvisí vlnová délka světla s interferenčními minimy, resp. maximy?
5. Co vyjadřuje optická aktivita látky?

6 Poznámky

1. **Upozornění:** Barevné filtry vyjímejte z držáku u světelného zdroje pomocí hadříku. Jsou velmi horké!
2. Nezapomeňte uvést chyby jednotlivých přístrojů.
3. Stupeň polarizace počítejte pomocí rovnic (6), (8) a (9).
4. Intenzitu prošlého polarizovaného světla měřte hradlovým fotočlánkem a multimetrem nastaveným v módu mV.
5. Polohu čtvrtvlnné destičky nastavte takto: analyzátor nastavte do polohy 0° , čtvrtvlnnou destičku natočte tak, abyste dostali maximální údaj multimetru. Potom otočte analyzátor do polohy 45° a proveďte vlastní měření.
6. Charakteristika fotočlánku (tj. závislost hodnoty multimetru na intenzitě světla) je lineární.
7. V úlohách 2 a 5 měřte s intervalem aspoň 5° .
8. Je možné, že používaný fotočlánek vždy naměří nějaké světlo i v absolutní tmě – v případě potřeby modifikujte Malusův zákon (2) na $I = I_0 \cdot \cos^2 \varphi + I_1$,

References

- [1] Tolar: *Vlnění, optika a atomová fyzika*, kap. 6 str. 73-96,
URL: <http://physics.fjfi.cvut.cz/files/predmety/02VOAF/VOAF2014.pdf>
- [2] Friš, Timoreva: *Kurs fyziky*, díl III, kap. 24, NCSAV, Praha, 1954.
- [3] Petržílka: *Fyzikální optika*, Přírodovědecké nakladatelství, Praha, 1952, str. 118-187.
- [4] Brož: *Základy fyzikálních měření I*, SPN, Praha, 1983, str. 566-568.