Měření s polarizovaným světlem

Pomůcky: Optická lavice, otočné černé zrcadlo, polarizační filtr, multimetr, kondenzor, otočný držák pro dvojlomný vzorek; polarizační mikroskop, čtvrtvlnná destička, křemenný klín, celofánový stupňový klín, vzorky dvojlomných látek, světelný zdroj s matnicí, ruční přímohledný spektroskop, fotočlánek, kruhový polarimetr,

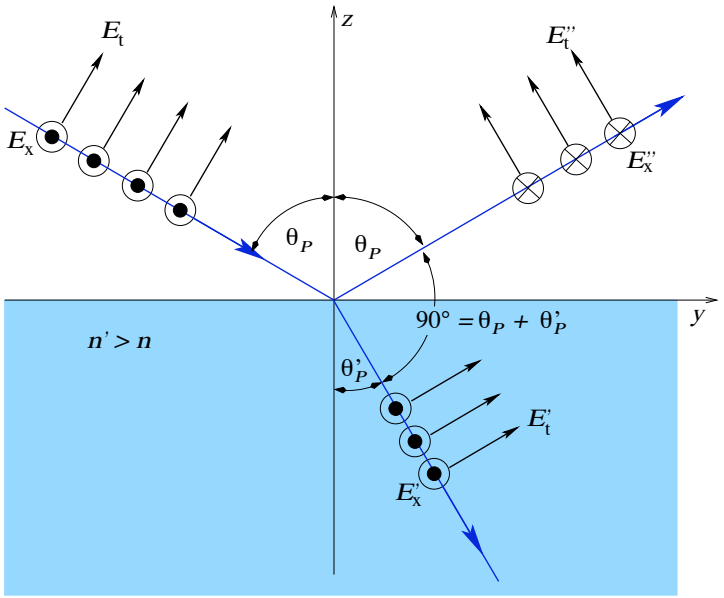
1 Základní pojmy a vztahy

1.1 Polarizace světla odrazem

Dopadá-li nepolarizované světlo (obrázek 1) na skleněnou desku o indexu lomu n', dochází při odrazu k jeho částečné až úplné polarizaci v závislosti na úhlu dopadu. Existuje jedna speciální hodnota úhlu (tento úhel nazýváme Brewsterův), kdy je odražené světlo úplně polarizované (ve směru kolmém na směr šíření, rovnoběžném s rovinou desky) a směr šíření odraženého světla svírá se směrem šíření ve skle pravý úhel. Pro Brewsterův úhel pak platí:

$$n' = \frac{\sin\theta_P}{\sin(90° - \theta_P)} = tg\theta_P. \tag{1}$$

Brewsterův úhel závisí tedy na indexu lomu rozhraní a musí tedy záviset i na vlnové délce polarizovaného světla. Z chování



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

elektrického a magnetického pole na látkovém rozhraní lze odvodit [4] tzv. Fresnelovy vzorce, které stanovují, jaká část pole se odrazí a jaká projde látkou:

$$\begin{aligned}
\rho_x &= \frac{E''_x}{E_x} = -\frac{\sin(\theta - \theta')}{\sin(\theta + \theta')} \\
\rho_t &= \frac{E''_t}{E_t} = \frac{\tan(\theta - \theta')}{\tan(\theta + \theta')} \\
\tau_x &= \frac{E'_x}{E_x} = \frac{2\sin\theta' cos\theta}{\sin(\theta + \theta')} \\
\tau_t &= \frac{E'_t}{E_t} = \frac{2\sin\theta' cos\theta}{\sin(\theta + \theta')\cos(\theta + \theta')}
\end{aligned} \tag{2}$$

Pro intenzity platí $R_x = \rho_x^2,\ R_t = \rho_t^2 \leq R_x, T_x = \tau_x^2,\ T_t = \tau_t^2$. Pro Brewsterův úhel θ_P je $R_t = 0$ a pouze malá část intenzity je odražena, neboť $\sin\theta'_P = \cos\theta_P$ a $\cos\theta_P = \sin\theta_P$, takže

$$R_{xP} = \left(\frac{\tan^2\theta_P - 1}{\tan^2\theta_P + 1}\right)^2 = \left(\frac{n'^2 - n^2}{n'^2 + n^2}\right)^2 \tag{3}$$

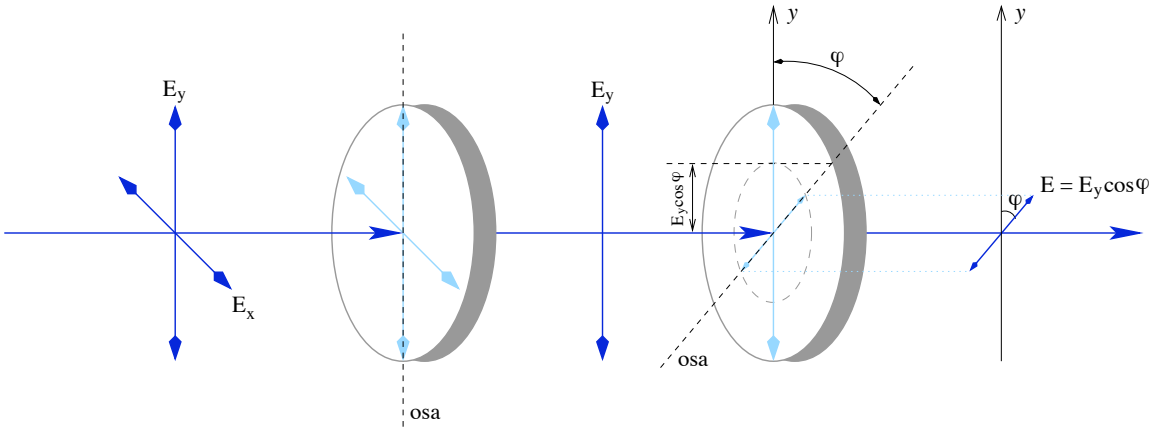
Pro rozhraní sklo-vzduch ($n'n = 1.5$) tak máme $R_{xP} = 0.148$. Pokud budeme předpokládat, že dopadající světlo se skládá z komponent E_x a E_t, každá s intenzitou $1/2I_0$ (I_0 je celková intenzita dop. světla), potom pro stupeň polarizace P odraženého světla bude platit:

$$P = \frac{R_x - R_t}{R_x + R_t} = \frac{\cos^2(\theta - \theta') - \cos^2(\theta + \theta')}{\cos^2(\theta - \theta') + \cos^2(\theta + \theta')} \tag{4}$$

1.2 Polarizace světla dvojlomem

Některé krystalické látky představují pro průchod světla anizotropní prostředí, tj. jeho optické vlastnosti závisejí na směru šíření světla v krystalu. 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 (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 tzv. optické osy krystalů a podle jejich počtu dělíme krystaly na jednoosé (soustava čtverečná a šesterečná) a dvouosé (soustava kosočtverečná, jednoklonná a trojklonná). U dvouosých krystalů se neřídí žádný z paprsků vzniklých dvojlomem Snellovým zákonem. Paprsky řádný a mimořádný jsou lineárně polarizovány v rovinách navzájem kolmých. Nejznámějším dvojlomným materiálem je islandský vápenec a kromě něj řada dalších látek krystalizujících v soustavě čtverečné, kosočtverečné, šesterečné, jednoklonné a trojklonné. Dvojlomnými se mohou stát i některé amorfní látky (sklo, plexisklo), podrobené mechanickému namáhání (tlaku, tahu).

1.3 Malusův zákon



Obrázek 2: Odvození Malusova zákona

Necháme-li procházet lineárně polarizované světlo optickým prvkem, který je schopen sám polarizovat, zjistíme, že intenzita prošlého světla je závislá na vzájemné úhlové poloze polarizační 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

$$I' = Icos^2\varphi, \tag{5}$$

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

1.4 Interference rovnoběžného 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.

Otáčíme-li vzorkem, mění se poměr intenzit interferujících paprsků, což způsobí 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)).

1.5 Interference sbíhavého polarizovaného světla

Prochází-li při interferenci dvojlomnou destičkou svazek sbíhavých paprsků, je jejich dráha v destičce různě velká a i polarizační roviny obou propuštěných paprsků mají různou polohu. Interferenční podmínky jsou potom splněny jen pro určitá místa destičky, takže v zorném poli se objeví systém tmavých a světlých míst. Svírají-li polarizační roviny použitého světla a polarizátoru úhel 90° a je-li dvojlomná destička vyříznuta z jednoosého krystalu kolmo k optické ose, objeví se v zorném poli tmavý kříž (tzv. inkolora), prostoupený systémem soustředných kružnic (tzv. izochromáty). U desky vyříznuté z dvojosého krystalu kolmo k optické ose mají inkolory tvar dvou ramen rovnoramenné hyperboly, jejíž asymptoty souhlasí s rovinami kmitu použitého světla a polarizátoru. Izochromáty mají tvar Cassiniho křivek (brýlí), jejichž středy leží ve vrcholech hyperbolických inkolor a určují polohu optických os. V bílém světle jsou izochromáty barevné. Souhlasí-li polarizační roviny použitého světla a polarizátoru, je celý jev doplňkový, tj. inkolory jsou světlé a izochromáty mají doplňkovou barvu.

1.6 Rotační polarizace

Některé látky (např. křemenná destička vyříznutá kolmo k optické ose, roztok třtinového cukru, kyseliny vinné atd.) mají schopnost stáčet rovinu polarizace. Mluvíme o látkách opticky činných (aktivních). Vložíme-li vzorek aktivní látky mezi zkřížený polarizátor a analyzátor, zorné pole se vyjasní. Aby světlo opět zhaslo, je nutno analyzátorem otočit o určitý úhel. Otáčíme-li ve směru hodinových ručiček, mluvíme o látce pravotočivé, otáčíme-li proti směru hodinových ručiček, látka je levotočivá.

Otočení je závislé na barvě světla (kratším vlnovým délkám přísluší větší otočení) a je úměrné tloušťce aktivní vrstvy. Je-li polarizované světlo bílé, jsou tedy jednotlivé barvy stáčeny různě. Mluvíme o tzv. rotační disperzi. Protože analyzátor propouští nejvíce paprsky polarizované v jeho vlastní polarizační rovině, způsobí otáčení polarizátoru i změnu barvy zorného pole. Otáčení vzorkem aktivní látky nemá na barvu zorného pole vliv na rozdíl od dvojlomnosti (viz výše).

Optickou aktivitu látky určujeme obvykle pomocí tzv. měrné otáčivosti, která je určena úhlovým otočením polarizační roviny, způsobeným vrstvou aktivní látky 1 mm silné.

Určování polarizace světla měřením souboru intenzit

Polarizační stav monochromatické rovinné elektromagnetické vlny postupující ve směru kladné osy z

$$\vec{E}(z,t) = \vec{x}_0 E_x(z,t) + \vec{y}_0 E_y(z,t) = \vec{x}_0 E_1 \cos(\omega t - kz + \varphi_1) + \vec{y}_0 E_2 \cos(\omega t - kz + \varphi_2) \tag{6}$$

je určen hodnotami parametrů E_1, E_2, φ ($\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$) při daných pevně zvolených osách x, y.

Obecná polarizace je eliptická, při $E_1 = E_2$, $\varphi = \pm \ \pi/2$ levotočivá (+), resp. pravotočivá (–) kruhová a při $\varphi = 0$ nebo π lineární.

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

$$\begin{array}{l} \langle E_x^2 \rangle_T = \frac{1}{2} E_1^2, \langle E_y^2 \rangle_T = \frac{1}{2} E_2^2, \\ \langle E_x E_y \rangle_T = \frac{1}{2} E_1 E_2 cos\varphi, \langle E_x \left(\omega t - \pi/2\right) E_y(\omega t) \rangle_T = \frac{1}{2} E_1 E_2 sin\varphi \end{array} \tag{7}$$

(středování je 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:

$$\langle E_x^2 \rangle_r, \langle E_y^2 \rangle_r, \langle E_x E_y \rangle_r, \langle E_x \left(\omega t - \pi/2\right) E_y(\omega t) \rangle_r . \tag{8}$$

Takový přístroj již obecně neposkytuje úplnou informaci o polarizačním stavu a proto ke středním hodnotám (8) již obecně neexistují parametry E_1, E_2, φ takové, aby platilo (7). Proto byly zavedeny tzv. Stokesovy parametry

$$P_1 = \frac{\langle E_x^2 \rangle_r - \langle E_y^2 \rangle_r}{\langle E_x^2 \rangle_r + \langle E_y^2 \rangle_r}, P_2 = \frac{\langle 2E_x E_y \rangle_r}{\langle E_x^2 \rangle_r + \langle E_y^2 \rangle_r}, P_3 = \frac{\langle 2E_x \left(\omega t - \pi/2\right) E_y(\omega t) \rangle_r}{\langle E_x^2 \rangle_r + \langle E_y^2 \rangle_r}, \tag{9}$$

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

$$0 \leq |\vec{P}| \leq 1. \tag{10}$$

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

$$\left\langle \left(\frac{E_x + E_y}{\sqrt{2}} \right)^2 \right\rangle_r = \frac{1}{2} \left\langle E_x^2 \right\rangle_r + \frac{1}{2} \left\langle E_y^2 \right\rangle_r + \langle E_x E_y \rangle_r . \tag{11}$$

Z ní a z předchozích dvou vypočteme $\langle E_x E_y \rangle_r$. Ke změření čtvrté intenzity $\langle E_x (\omega t - \pi/2) E_y(\omega t) \rangle_r$ je třeba před polarizátor orientovaný pod úhlem 45 $^\circ$ 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

$$\left\langle \left(\frac{\langle E_x (\omega t - \pi/2) + E_y(\omega t) \rangle}{\sqrt{2}} \right)^2 \right\rangle_r = \frac{1}{2} \left\langle E_x^2 \right\rangle_r + \frac{1}{2} \left\langle E_y^2 \right\rangle_r + \langle E_x (\omega t - \pi/2) E_y(\omega t) \rangle_r . \tag{12}$$

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

Nutno podotknout, že stačí měřit relativní intenzity, protože Stokesovy parametry (9) jsou normalizovány vydělením celkovou intenzitou $\left\langle E_x^2 \right\rangle_r + \left\langle E_y^2 \right\rangle_r$.

Intenzity pro částečně polarizované světlo lze jednoznačně rozložit na část nepolarizovanou a část úplně polarizovanou. Označíme-li celkovou intenzitu $I = \left\langle E_x^2 \right\rangle_r + \left\langle E_y^2 \right\rangle_r$a $\vec{P} = P\vec{P}_0$ kde $|\vec{P}_0| = 1$, $P = |\vec{P}|$, pak odpovídající intenzity jsou

$$I^{(n)} = (1 - P)I, I^{(p)} = PI, I^{(n)} + I^{(p)} = I \tag{13}$$

a rozklad souboru intenzit má tvar

$$\begin{array}{l} \left\langle E_x^2 \right\rangle_r = \frac{1}{2} I^{(n)} + \frac{1}{2} I^{(p)} (1 + P_{01}), \left\langle E_y^2 \right\rangle_r = \frac{1}{2} I^{(n)} + \frac{1}{2} I^{(p)} (1 - P_{01}), \\ \langle E_x E_y \rangle_r = \frac{1}{2} I^{(p)} P_{02}, \langle E_x (\omega t - \pi/2) E_y(\omega t) \rangle_r = \frac{1}{2} I^{(p)} P_{03}. \end{array} \tag{14}$$

Protože nejde o superpozici amplitud, ale o skládání intenzit, rozklad (11) se nazývá nekoherentní superpozice nepolarizovaného a úplně polarizovaného světla s intenzitami $I^{(n)}$ a $I^{(p)}$

$I^{(n)} = I - I^{(p)}$,

$$I^{(p)} = \sqrt{\left(\left\langle E_x^2 \right\rangle_r - \left\langle E_y^2 \right\rangle_r \right)^2 + \langle 2E_x E_y \rangle_r^2 + \langle 2E_x (\omega t - \pi/2) E_y(\omega t) \rangle_r^2}. \tag{15}$$

Polarizační přístroje

K polarizaci světla a k jeho zkoumání se používá tzv. polarizátorů. Jsou to optické prvky, které ze svazku obyčejného světla vytvoří svazek lineárně polarizovaný. Mohou pracovat na principu odrazu světla pod Brewsterovým úhlem od plochy, která lomený paprsek úplně pohlcuje. Velmi často se využívá polarizátorů 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. Je to normální optický mikroskop, v němž je součástí osvětlovací soustavy polarizátor (obvykle polaroidová destička) 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 zpožďovací destičku pro barevné purpurové pole.

Čtvrtvlnná destička je obvykle slídový lístek takové tloušky, 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. kruhové. Čtvrtvlnná destička se obvykle zařazuje mezi polarizátor a analyzátor otočený vzájemně o 90 ° („zkřížený“), a to tak, aby její osa půlila úhel mezi polarizátorem a analyzátorem.

Zpožďovací destička pro barevné purpurové pole je křemenná nebo slídová destička takové tloušky, 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 diference 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 tlouška 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.

Polostínový polarimetr

Základní sestava polarizačního přístroje, skládající se ze dvou polarizačních filtrů, umožňuje nastavení jejich vzájemného úhlu na 90° pouze podle subjektivního odhadu maximálního ztemnění celého zorného pole. To je zatíženo velkou subjektivní chybou. Zmenšení této chyby umožňuje polostínový polarimetr. U něj je zorné pole rozděleno na dvě poloviny s vzájemně mírně pootočenými polarizačními rovinami. To má za následek, že nelze dosáhnout úplného zatemnění celého zorného pole, ale pouze rovnoměrného polostínu. Malé pootočení analyzátoru způsobí ztemnění jedné poloviny zorného pole a rozjasnění druhé poloviny. Opětné dosažení rovnoměrného polostínu v celém zorném poli je potom v podstatě fotometrický problém a je zatíženo mnohem menší subjektivní chybou.

2 Pokyny pro měření

1. **Měření Brewsterova úhlu** - uspořádání A na obrázku (3)

   Překontrolujte, že při nastavení otočného černého zrcadla na úhel 0° se kryjí rysky na hlavici pod otočným stolkem. Světelný zdroj B spojte spojovacím ramenem s otočným zrcadlem C. Zdroj B při otáčení zrcadla C stavte do takové polohy, aby byl splněn zákon o rovnosti úhlu dopadu a odrazu (viz Poznámka 1). Index na spojovacím rameni musí být nastaven na úhel $270° - \alpha$, kde α je úhel natočení zrcadla.

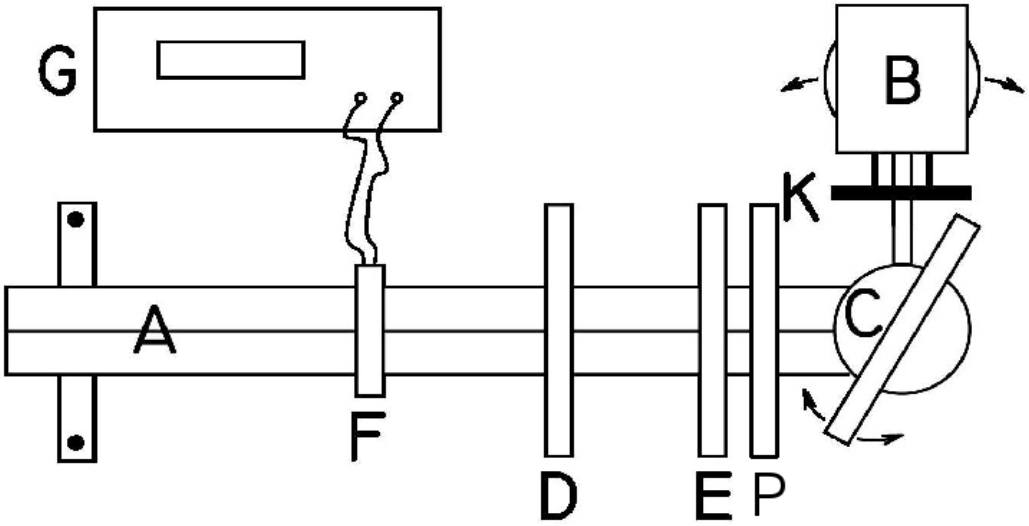
   uspořádání A

A	...	Optická lavice	E	...	Čtvrtvlnná deska
B	...	Světelný zdroj	F	...	Fotočlánek
C	...	Otočné černé zrcadlo	G	...	Multimetr
D	...	Polarizační filtr	K	...	Matnice
P	...	Irisová clona			

   Prvky sestavy C,D,E,F,P umístěte co nejblíže k sobě a irisovou clonu P nastavte tak, aby se do analyzátoru D dostalo co nejméně rozptýleného světla, nepolarizovaného odrazem na desce C. Multimetr G přepněte na rozsah 200 mV nebo 2 V.

   Výsledky měření intenzit si napište na papír a pak zadávejte do programu Famulus na PC v tomto pořadí:

   - polarizátor i analyzátor jsou na 0°
   - analyzátor je otočen o 90°



Obrázek 3: Optická lavice k měření Brewsterova úhlu

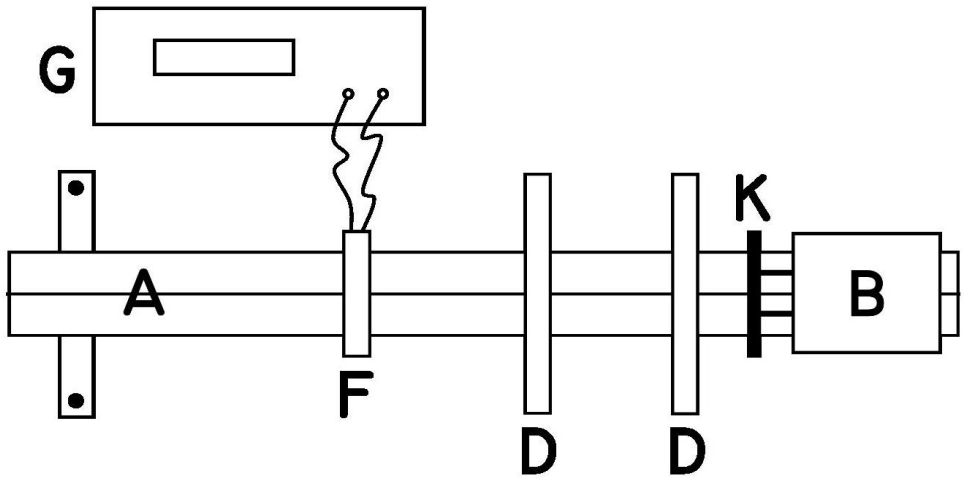
- analyzátor je otočen o 45°
- analyzátor je otočen o 45° a mezi ním a polarizátorem je zařazena čtvrtvlnná destička

Program vypočítá stupně polarizace a zároveň vykreslí graf závislosti stupně polarizace na úhlu α.

2. **Malusův zákon** - uspořádání B na obrázku (4)

   Světelný zdroj B odpojte od spojovacího ramene zrcadla C a postavte jej na konec optické lavice A. Přiložte další polarizační filtr. První filtr teď bude sloužit jako polarizátor a druhý jako analyzátor. Proměřte intenzitu dopadajícího světla v závislosti na úhlu natočení analyzátoru vůči polarizátoru.

Uspořádání B



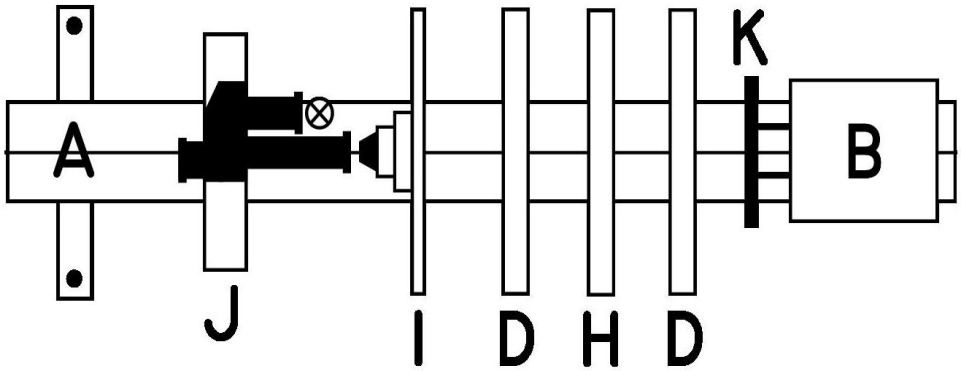
Obrázek 4: Malusův zákon

A	...	Optická lavice	G	...	Multimetr
B	...	Světelný zdroj	D	...	Polarizační filtr
K	...	Matnice	F	...	Fotočlánek

3. **Interference v rovnoběžném polarizovaném světle** - uspořádání C na obrázku (5).

Přímohledný spektroskop potřebuje co největší intenzitu analyzovaného světla, proto volte vzdálenosti jednotlivých prvků sestavy co nejmenší. Pomocnou žárovičku, osvětlující na spektroskopu stupnici vlnových délek napájejte 10 V z prostředních svorek zdroje pro lampu B.

Uspořádání C



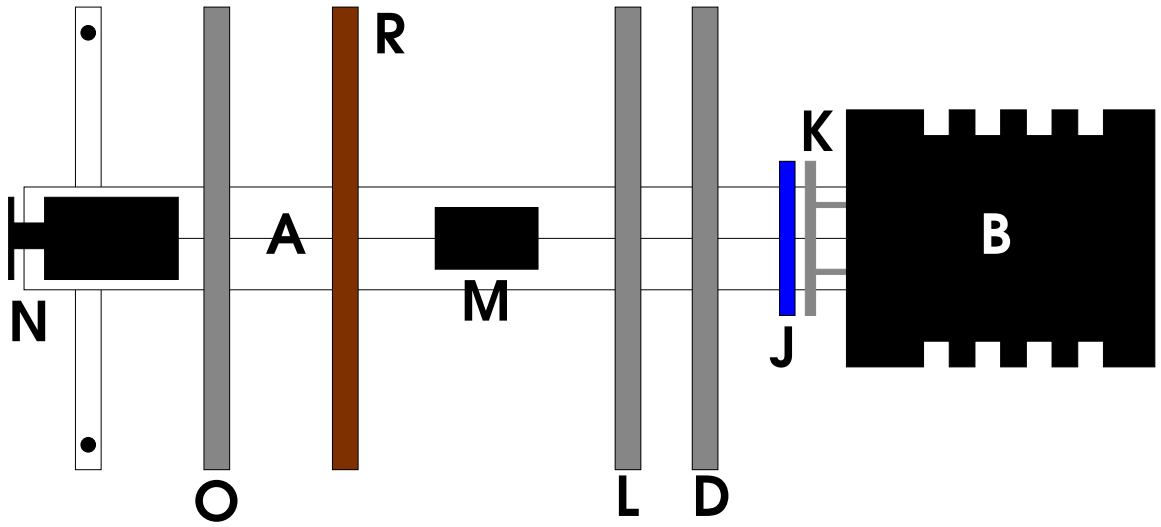
Obrázek 5: Interference v rovnoběžném světle

A	...	Optická lavice	B	...	Světelný zdroj
D	...	Polarizační filtr	H	...	Otočný držák pro dvojlomný vzorek
F	...	Fotočlánek	J	...	Přímohledný spektroskop
E	...	Čtvrtvlnná deska	K	...	Matnice

4. **Optická aktivita křemíku**

Uspořádání podle obrázku 6 se spojkou M a dalekohledem N je potřebné v případě, že zkoumaný vzorek je dlouhý a vzdálenost mezi mezi polarizačními filtry L,D a O musí být velká. V případě, že nám stačí tato vzdálenost malá, je možno vynechat dalekohled N a místo něj umístit pouze spojku M a její vzdálenost od polarizačních filtrů L,D nastavit tak, abychom viděli ostře dělicí hranu polovičního filtru L.

Uspořádání D



Obrázek 6: Optická aktivita

Jako prvek D použijte polarizační filtr s hrubým úhlovým dělením, jako prvek L polarizační filtr překrývající pouze polovinu zorného pole. Dalekohled N má být zaostřený na ∞ - ověřte si to pohledem na vzdálený předmět. Spojnou čočku +60 mm M postavte do takové polohy, aby v dalekohledu N byla ostře vidět hrana filtru L, půlící zorné pole. Polarizační filtr O (analyzátor) nastavte na úhel 0°, filtry L a D na úhel 90° tak, aby zorné pole bylo co nejtemnější.

A	...	Optická lavice	B	...	Světelný zdroj
N	...	Dalekohled zaostřený na ∞	0	...	Polarizační filtr s jemně dělenou stupnicí a noniem
R	...	Zkoumaný vzorek	M	...	Spojka +60 nebo +100
L	...	Poloviční polarizační filtr	K	...	Matnice
J	...	Barevný filtr	D	...	Polarizační filtr

Potom pootočte filtry L a D o malé úhly (max.10°) v opačných směrech. Zorné pole se mírně rozjasní - jas obou jeho polovin musí být stejný. Malé pootočení analyzátoru O musí způsobit rozjasnění jedné poloviny a pohasnutí druhé poloviny zorného pole. Čím je úhel mezi filtry L a D menší, tím je uspořádání citlivější na malá pootočení analyzátoru O, ale méně světelné.

Monochromatické světlo získáme vložením odpovídajícího interferenčního filtru J do korýtka před matnicí K na světelném zdroji B. Na kovové obrubě filtru je udána propouštěná vlnová délka a značka prvku, kterému patří daná spektrální čára.

3 Pracovní úkoly

1. Při polarizaci bílého světla odrazem na černé skleněné desce proměřte závislost stupně polarizace na sklonu desky a určete optimální hodnotu Brewsterova úhlu a znázorněte graficky Uspořádání A.

2. Černou otočnou desku nahraďte polarizačním filtrem a proměřte závislost intenzity polarizovaného světla na úhlu otočení analyzátoru (Malusův zákon).Uspořádání B. Výsledek srovnejte s teoretickou předpovědí - vztah (5) - a znázorněte graficky.

3. Na optické lavici osazené podle Uspořádání C prozkoumejte vliv čtyř celofánových dvojlomných filtrů, způsobujících interferenci. Vyzkoušejte vliv otáčení polarizátoru, analyzátoru a vliv otáčení dvojlomného filtru mezi zkříženými i rovnoběžnými polarizátory v bílém světle. Zjišujte přímohledným spektroskopem, které vlnové délky z bílého světlase interferencí ruší a jaký to má vliv na barvu zorného pole, pozorovaném pouhým okem. Výsledky pozorování popište.

4. Vybrané vzorky (vápenec, křemen, slída, aragonit) krystalů prozkoumejte na polarizačním mikroskopu ve sbíhavém světle bílém a monochromatickém. Výsledky pozorování popište popř. nakreslete.

5. Na optické lavici sestavte polostínový polarimetr - Uspořádání D. Ověřte vliv vzájemného pootočení polarizačních filtrů D a L na citlivost měření úhlu natočení analyzátoru. Při optimálně nastavených filtrech D a L změřte měrnou otáčivost křemíku pro 4 spektrální barvy.

4 Poznámky

1. Pro měření pracovního úkolu 1), 2), 3), 5) použijte sestav optických prvků na optické lavici.

2. Intenzitu prošlého polarizovaného světla měřte v úkolech 1) a 2) hradlovým fotočlánkem a multimetrem.

3. Před měřením v úkolu 1) překontrolujte (případně opravte) základní natočení otočného držáku odrazové černé desky takto:

   a) na optickou lavici umístěte co nejdále od sebe tyčky s výřezem a hrotem;

   b) otočný stolek nastavte na hodnotu 0° a zaaretujte;

   c) celý stolek natočte tak, aby při pohledu přes výřez a hrot obou výše uvedených tyček se hrot a jeho odraz v černé desce kryly a polohu držáku zaaretujte.

   Polohu čtvrtvlnné destičky nastavíme takto: analyzátor nastavíme do polohy 0°, čtvrtvlnnou destičku natočíme tak, abychom dostali maximální údaj mikroampérmetru. Potom otočíme analyzátor do polohy 45° a provedeme vlastní měření. Charakteristika fotočlánku (tj. závislost výchylky galvanometru na intenzitě světla) je lineární. Stupeň polarizace počítejte pomocí rovnic (11), (12), (15).

4. Pro měření ve sbíhavém světle (úkol 4)) zkontrolujte, zde je zařazen kondenzor, který je nutno zaostřit tak, abychom dosáhli optimálního osvětlení zorného pole. Dále je použit silnější objektiv (20x) a zařazena Amici-Bertrandovova čočka. Přibližně monochromatické světlo získáme vložením červeného nebo modrého filtru do rámečku pod kondenzorem.

   Osní obrazec obsahuje tím více čar, čím větší je zvětšení objektivu mikroskopu. Použijeme-li objektivu s malým zvětšením, vidíme osní obrázek lineárně větší, a proto se jej do zorného pole vejde pouze malá část. Silným objektivem vidíme osní obrázek celý, ale lineárně menší.

Reference

[1] Friš, Timoreva: Kurs fyziky, díl III, kap. 24, NČSAV, Praha, 1954.

[2] Petržílka: Fyzikální optika, Přírodovědecké nakladatelství, Praha, 1952, str. 118 až 187.

[3] Brož: Základy fyzikálních měření I, SPN, Praha, 1983, str. 566 až 568.

[4] Blum, Roller: Physics - Volume 2 - Electricity Magnetism and Light, Holden-Day, San Fransisco, 1982