

EXPERIMENTÁLNÍ ÚLOHA 2

DVOJLOM VE SLÍDĚ

V tomto experimentu budete měřit dvojlom ve slídě (jde o krystal hojně používaný v polarizačních optických prvcích).

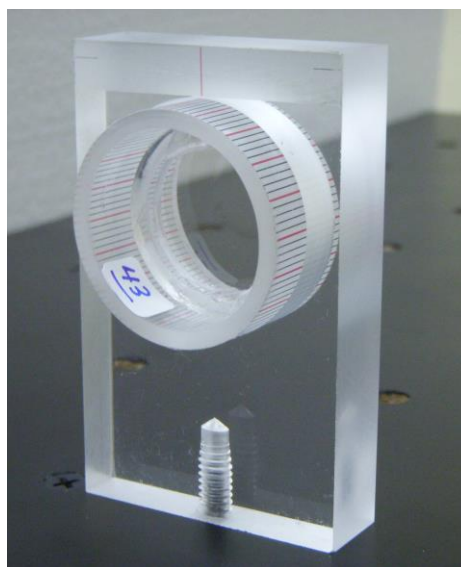
POMŮCKY

Mimo položek 1), 2) a 3) budete potřebovat:

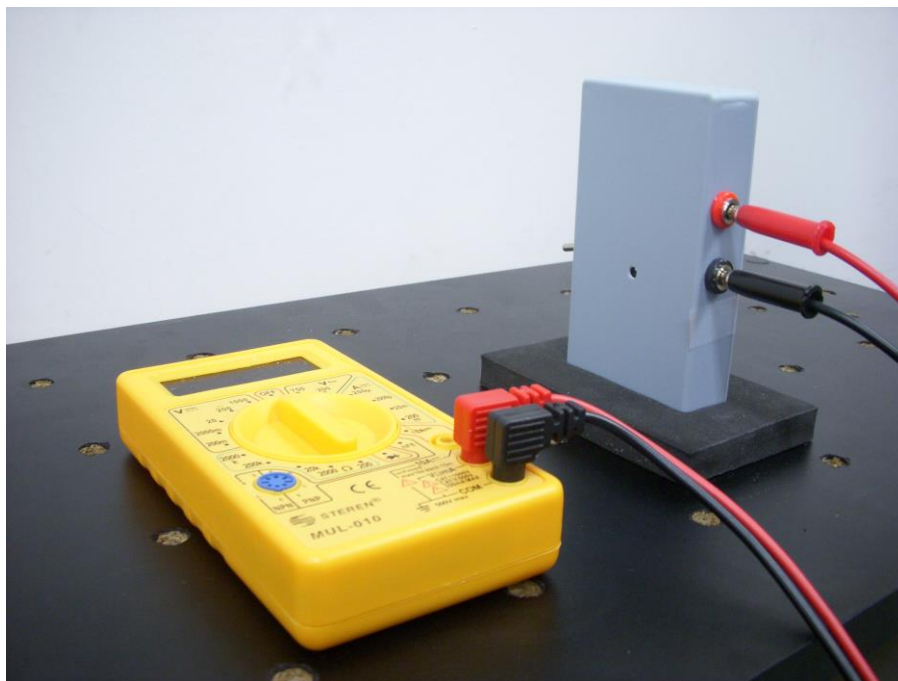
- 14) Dvě polarizační vrstvičky upevněné do rámečku na diapositivu, každý se svým akrylátovým (plexi) držákem (LABEL J), viz fotografie
- 15) Tenkou slídovou destičku, upevněnou do plastového válečku se stupnicí bez čísel; akrylátový (plexi) držák pro váleček (LABEL K), viz fotografie
- 16) Fotodetektor s příslušenstvím. Fotodetektor v plastové krabici s konektory a pěnový držák. Multimetr k měření napětí na fotodetektoru (LABEL L). Sestava a zapojení je na fotografii
- 17) Kalkulačku
- 18) Bílé papírové kartičky, lepicí pásku, samolepkový papír, nůžky, pravoúhlé trojúhelníky
- 19) Tužky, papír, grafický papír



Polarizátor upevněný v rámečku na diapositivu s akrylátovým držákem (LABEL J)



Tenká slídová destička upevněná ve válečku se stupnicí bez čísel a akrylátový držák (LABEL K)

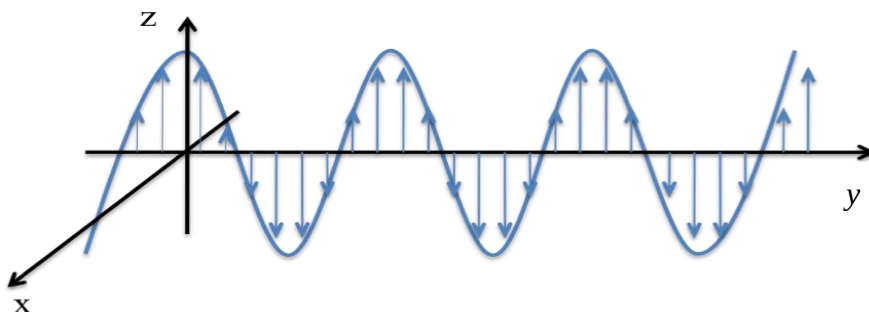


Fotodetektor v plastové krabici s konektory a pěnový držák. Multimetr k měření napětí na fotodetektoru (LABEL L). Zapojte podle obrázku

POPIS JEVU

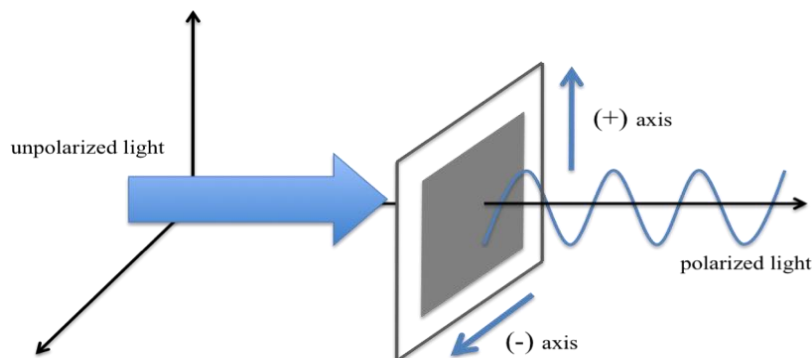
Světlo je příčná elektromagnetická vlna, jejíž elektrické pole leží v rovině kolmé na směr šíření a osciluje v čase.

Pokud směr elektrického pole zůstává během časových oscilací ve *stejně přímce*, říkáme, že vlna je lineárně polarizovaná, zkráceně polarizovaná, viz obr. 2.1.



Obr. 2.1: Vlna šířící se ve směru osy y a polarizovaná ve směru osy z .

Polarizační vrstvička (nebo jednoduše polarizátor) je materiál s význačnou osou rovnoběžnou se svým povrchem tak, že světlo, které polarizátorem projde, je polarizováno ve směru osy polarizátoru. Označme (+) význačnou osu a (–) osu na ní kolmou.



Obr. 2.2: Nepolarizované světlo kolmo dopadá na polarizátor. Prošlé světlo je polarizované ve směru (+) polarizátoru

Při průchodu světla běžnými průhlednými materiály (např. okenním sklem) se nemění polarizace, tj. prošlé světlo má stejnou polarizaci jako světlo dopadající, jelikož index lomu těchto materiálů nezávisí na směru a polarizaci dopadající vlny. Mnohé krystaly, včetně slídy, jsou však citlivé na směr elektrického pole vlny. Při průchodu světla kolmo na svůj povrch má slída dvě vzájemně kolmé charakteristické osy, které budeme nazývat Osa 1 a Osa 2. Toto vede k jevu známému jako *dvojlom*.

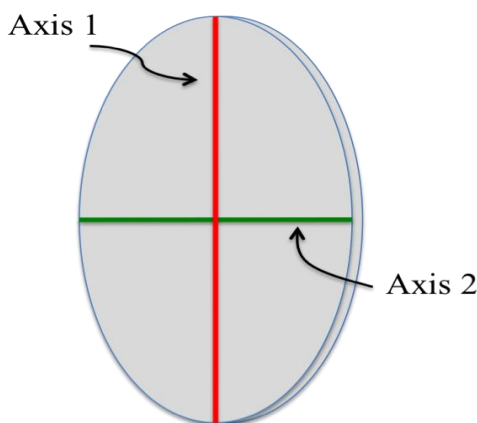
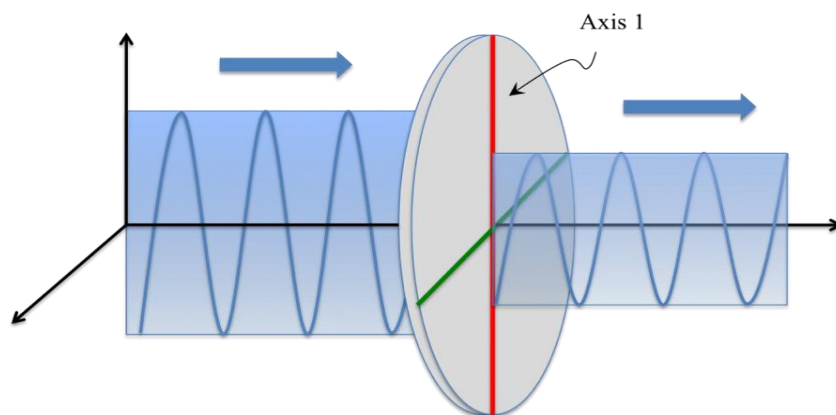


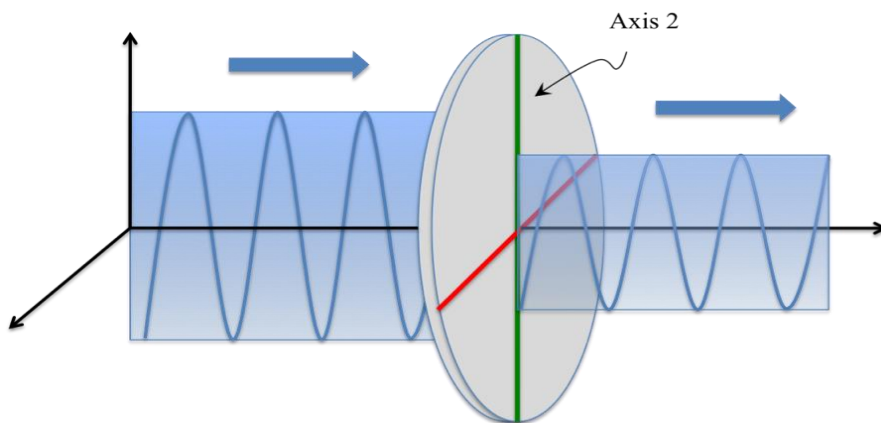
Figure 2.3 Tenká destička slídy se svými dvěma optickými osami, Osou 1 (červenou) a Osou 2 (zelenou).

Analyzujeme dva jednoduché případy, abychom ilustrovali dvojlom. Předpokládejme, že vlna **polarizovaná ve svislém směru** dopadá kolmo na jeden z povrchů tenké slídové destičky.

Případ 1) Osa 1 nebo Osa 2 je rovnoběžná se směrem polarizace dopadající vlny. Vlna projde slídou beze změny své polarizace, avšak průchod materiálem je takový, jako kdyby měl materiál index lomu n_1 nebo n_2 , viz obr. 2.4 a 2.5.

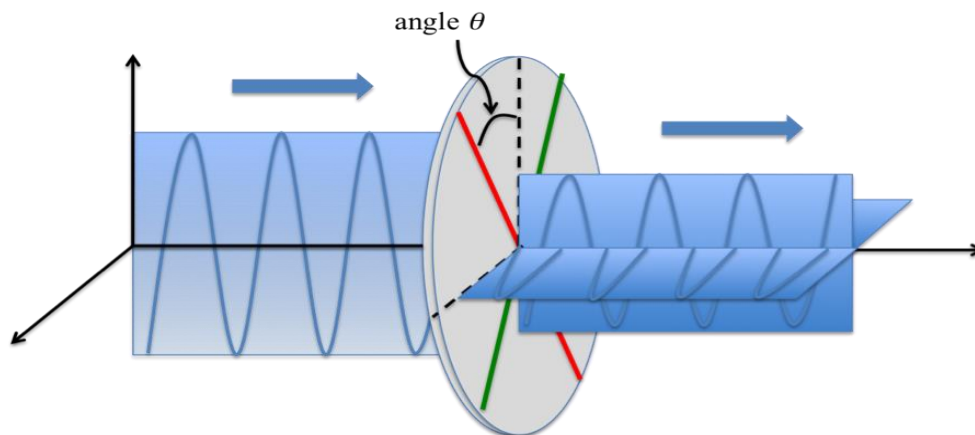


Obr. 2.4: Osa 1 je rovnoběžná s polarizací dopadajícího světla. Index lomu je n_1 .



Obr. 2.5: Osa 2 je rovnoběžná s polarizací dopadajícího světla. Index lomu je n_2 .

Případ 2) Osa 1 svírá se směrem polarizace dopadající vlny úhel θ . Prošlé světlo má nyní složitější polarizaci. Tuto vlnu lze chápat jako *superpozici* dvou vln s různými fázemi, jedna je polarizována **rovnoběžně** s dopadající vlnou (tj. ve svislém směru) a druhá je polarizována ve směru **kolmém** na polarizaci dopadající vlny (tzn. ve vodorovném směru).



Obr. 2.6: Osa 1 svírá s polarizací dopadajícího světla úhel θ .

Označme I_p intenzitu vlny prošlé *rovnoběžně* se směrem polarizace dopadající vlny a I_o intenzitu vlny prošlé *kolmo* na směr polarizace dopadající vlny. Tyto intenzity závisí na úhlu θ , na vlnové délce λ světelného zdroje, na tloušťce L tenké destičky a na absolutní hodnotě rozdílu indexů lomu $|n_1 - n_2|$. Tato poslední veličina se nazývá *dvojlomnost* materiálu. Cílem této úlohy je změřit tuto veličinu. Dvojlomové materiály jsou společně s polarizátory užitečné při zjišťování polarizačních stavů světla.

Zdůrazněme zde, že fotodetektor měří intenzitu na něj dopadajícího světla nezávisle na jeho polarizaci.

Závislost $I_p(\theta)$ a $I_o(\theta)$ na úhlu θ je složitá díky dalším jevům, které zde neuvažujeme, jako je např. absorpce dopadajícího záření slídou. Je možné nicméně získat velmi jednoduché výrazy, které dobře aproximují tzv. normalizované intenzity $\bar{I}_p(\theta)$ a $\bar{I}_o(\theta)$ definované vztahy

$$\bar{I}_p(\theta) = \frac{I_p(\theta)}{I_p(\theta) + I_o(\theta)} \quad (2.1)$$

a

$$\bar{I}_o(\theta) = \frac{I_o(\theta)}{I_p(\theta) + I_o(\theta)} \quad (2.2)$$

Je možné ukázat, že normalizované intenzity jsou (přibližně) dány výrazy

$$\bar{I}_p(\theta) = 1 - \frac{1}{2}(1 - \cos \Delta\phi) \sin^2(2\theta) \quad (2.3)$$

a

$$\bar{I}_o(\theta) = \frac{1}{2}(1 - \cos \Delta\phi) \sin^2(2\theta) \quad (2.4)$$

kde $\Delta\phi$ je fázový rozdíl rovnoběžně a kolmo polarizovaných prošlých vln. Tato veličina je dána výrazem

$$\Delta\phi = \frac{2\pi L}{\lambda} |n_1 - n_2| \quad (2.5)$$

kde L je tloušťka tenké slídové destičky, λ vlnová délka dopadajícího světla a $|n_1 - n_2|$ je veličina, kterou jsme nazvali *dvojlomnost*.

EXPERIMENTÁLNÍ USPOŘÁDÁNÍ

Úloha 2.1 Experimentální uspořádání pro měření intenzit. Navrhněte experimentální uspořádání pro měření intenzit I_p a I_o prošlé vlny jako funkcí úhlu θ . Přitom θ je úhel, který svírá směr polarizované vlny s jakoukoli z optických os, jak je zobrazeno na obr. 2.6. *Do obrázku optického stolku napište velká písmena (LABEL) označující jednotlivá zařízení.* Používejte konvenci (+) a (−) pro směr polarizátorů. Můžete nakreslit dodatečné jednoduché obrázky, které pomohou vyjasnit váš návrh.

Úloha 2.1 a) Uspořádání pro I_p **(0,5 bodu).**

Úloha 2.1 b) Uspořádání pro I_o **(0,5 bodu).**

Nasměrování (seřízení) laserového paprsku. Nasměrujte laserový paprsek tak, aby byl rovnoběžný se stolkem a vstupoval do středu válcové objímky (dutého válečku), v níž je upevněna slída. Ke sledování dráhy paprsku a jeho nasměrování můžete použít jednu z bílých papírových kartiček. Jemná doladění lze udělat pohyblivým zrcátkem.

Fotodetektor a multimetr. Pokud na fotodetektor dopadá světlo, objeví se na něm elektrické napětí. Měřte toto napětí multimetrem, který vám byl poskytnut. Toto napětí je lineárně úměrné intenzitě dopadajícího světla. Tedy naměřená napětí můžeme (při vhodné volbě jednotek) přímo považovat za intenzity. Pokud nedopadá na fotodetektor laserový paprsek, můžete změřit intenzitu světelného pozadí. Tato hodnota by měla být menší než 1 mV. Při měření intenzit *neopravujte* výsledek na toto pozadí.

UPOZORNĚNÍ: Laserový paprsek je částečně polarizován, ale není známo v jakém směru. Tedy, abyste dostali polarizované světlo s dobrou intenzitou pro měření, umístěte polarizátor s buď (+) nebo (−) osou ve svislém směru tak, abyste dostali maximální prošlou intenzitu při absenci všech dalších optických zařízení. Tohoto stavu můžeme např. dosáhnout tak, že pouzdem laseru budeme zlehka pootáčet do vhodné polohy.

MĚŘENÍ INTENZIT

Úloha 2.2 Kalibrace stupnice pro nastavení úhlu. Válcové pouzdro, ve kterém je upevněna slída, má pravidelnou stupnici pro nastavení úhlu. Napište hodnotu nejmenšího intervalu na této stupnici ve stupních (tj. mezi dvěma po sobě následujícími černými čárkami) **(0,25 bodu).**

Nalezení (přibližně) nulového úhlu θ a zjištění optických os slídy. Pro usnadnění analýzy je velmi důležité nalézt příslušný nulový úhel. Navrhujeme, abyste nejprve našli jednu z optických os slídy a nazvali ji Osa 1. Je téměř jisté, že se tato osa nebude shodovat s nějakou čárkou na stupnici válečku. Tedy, považujte nejbližší čárku stupnice na válečku se

slídou za provizorní počátek úhlu. Označte $\bar{\theta}$ úhly měřené od tohoto počátku. Níže budete vyzváni k přenějším určení nuly úhlu θ .

Úloha 2.3 Měření I_p a I_o . Změřte intenzity I_p a I_o pro tolik úhlů $\bar{\theta}$, kolik považujete za potřebné. Zapište svá měření do tabulky I. Snažte se provést měření I_p and I_o pro *stejně* nastavení válečky se slídou, tedy pro *fixní* úhel $\bar{\theta}$. **(3,0 bodů).**

Úloha 2.4 Nalezení skutečné nuly úhlu θ . Poloha Osy 1 definuje nulu úhlu θ . Jak jsme uvedli výše, je téměř jisté, že se poloha Osy 1 neshoduje s celým dílkem na stupnici válečky se slídou. Abyste našli nulový úhel, můžete použít grafickou nebo numerickou metodu. Připusťte, že závislost intenzity na úhlu může být blízko maxima nebo minima aproximována parabolou,

$$I(\bar{\theta}) \approx a\bar{\theta}^2 + b\bar{\theta} + c$$

a minimum nebo maximum paraboly je dáno,

$$\bar{\theta}_m = -\frac{b}{2a}.$$

Obě z výše uvedených možností vedou k nalezení posunutí (korekce) $\delta\bar{\theta}$ všech vašich hodnot úhlu $\bar{\theta}$ uvedených v tabulce I úlohy 2.3. Takže můžete nyní napsat úhly θ od skutečné nulz (0), tedy $\theta = \bar{\theta} + \delta\bar{\theta}$. Napište hodnotu posunutí $\delta\bar{\theta}$ ve stupních **(1,0 bodu).**

ANALÝZA DAT

Úloha 2.5 Volba vhodných proměnných. Zvolte závislost $\bar{I}_p(\theta)$ nebo $\bar{I}_o(\theta)$ vhodnou pro analýzu vedoucí k nalezení fázového posunu $\Delta\phi$. Zvolte si a označte vhodné proměnné, které bude k analýze používat. **(0,5 bodu).**

Úloha 2.6 Analýza dat a fázový posun

- Do tabulky II zapište hodnoty proměnných potřebných k analýze. Ujistěte se, že používáte opravené hodnoty úhlu θ od skutečné nuly. Na grafický papír vynesete závislost vašich proměnných. **(1,0 bodu).**
- Udělejte potřebnou analýzu dat, abyste dostali fázový rozdíl $\Delta\phi$. Zapište výsledek včetně chyby. Napište všechny rovnice a vzorce použité při analýze. Své výsledky vynesete do grafu. **(1,75 bodu).**
- Vypočtete hodnotu fázového rozdílu $\Delta\phi$ v radiánech včetně jeho chyby. Hodnotu fázového rozdílu uveďte v intervalu $[0, \pi]$. **(0,5 bodu).**

Úloha 2.7 Výpočet dvojlomnosti $|n_1 - n_2|$. Všimněte si, že přidáním $2N\pi$ k fázovému rozdílu $\Delta\phi$ s celočíselným N , nebo změnou znaménka fáze, zůstanou hodnoty intenzit nezměněny. Ale hodnota dvojlomnosti $|n_1 - n_2|$ se změní. Abyste tedy užitím hodnoty $\Delta\phi$, nalezené v úloze 2.6, dostali správnou hodnotu dvojlomnosti, uvažujte následující vztahy:

$$\Delta\phi = \frac{2\pi L}{\lambda} |n_1 - n_2| \quad \text{pokud} \quad L < 82 \cdot 10^{-6} \text{ m}$$

nebo

$$2\pi - \Delta\phi = \frac{2\pi L}{\lambda} |n_1 - n_2| \quad \text{pokud} \quad L > 82 \cdot 10^{-6} \text{ m} ,$$

kde hodnota L tloušťky destičky slídy, kterou jste používali, je napsaná na válečku, ve kterém je upevněna. Toto číslo je uvedeno v mikrometrech (1 mikrometr = 10^{-6} m). Uvažujte chybu měření L ve v hodnotě $1 \cdot 10^{-6}$ m. Pro vlnovou délku laseru můžete použít hodnotu, kterou jste našli v úloze 1 nebo průměrnou hodnotu mezi $620 \cdot 10^{-9}$ m a $750 \cdot 10^{-9}$ m, červené oblasti ve viditelném spektru. Napište hodnoty L a λ a hodnotu $|n_1 - n_2|$ s její chybou. Napište také vzorce, které jste použili **k výpočtu chyb. (1,0 bodu)**