

## Teoretický úvod

Elektromagnetická vlna - v oboru vlnových délek viditelného světla lze hovořit i o vlně světelné - je příčné vlnění vzájemně kolmých vektorů intenzity elektrického pole  $\vec{E}$  a magnetické indukce  $\vec{B}$  které se řídí Maxwellovými rovnicemi. Rovina, ve které kmitá vektor  $\vec{E}$ , se nazývá rovina kmitů elektromagnetické vlny. Popis kmitů vektoru  $\vec{E}$  v prostoru je ve fyzice významný pro vysvětlení velkého množství jevů chování a interakcí šířícího se vlnění. V případě studia jevu polarizace je směr vektoru elektrické složky  $\vec{E}$  totožný se směrem polarizace. U přirozeného světla (sluneční světlo, světlo žárovek a výbojek aj.) se rovina kmitů vektoru  $\vec{E}$  chaoticky mění a světlo se nazývá **nepolarizovaným** (přirozeným). Jestliže průmět koncového bodu vektoru  $\vec{E}$  do roviny kolmé ke směru šíření vlny (označme jako rovinu yz, směr šíření přísluší ose x) opisuje uzavřenou křivku nebo úsečku, hovoříme o **světle polarizovaném**. Je-li touto projekcí kruh, případně elipsa, nazýváme světlo **kruhově** nebo **elipticky polarizované**, je-li touto projekcí úsečka, jde o světlo **lineárně polarizované**.

Obecně lze polarizované světlo popsat dvěma vzájemně kolmými složkami vektoru  $\vec{E}$  v rovině yz:

$$\begin{aligned} E_y &= E_{0y} \cos(\omega t - kx) \\ E_z &= E_{0z} \cos(\omega t - kx - \delta), \end{aligned}$$

kde  $E_{0y}$  a  $E_{0z}$  jsou amplitudy komponent elektrických složek příslušných os a  $\delta$  je fázový posuv vln obou komponent. Na základě těchto rovnic lze podmínky polarizace vlny popsat z hlediska fázového posuvu takto:

$\delta = 0$	lineárně polarizované světlo
$\delta \neq 0$	elipticky polarizované světlo
$\delta = \delta(t)$	nepolarizované světlo
$\delta = \pi/2, E_{0y} = E_{0z}$	kruhově polarizované světlo
$\delta = \pi/2, E_{0y} \neq E_{0z}$	elipticky polarizované světlo, kdy hlavní a vedlejší osa elipsy je totožná s osami y, z

Lidské oko ani běžné optické přístroje nejsou schopny zaznamenat polarizaci světelné vlny, k tomu je třeba speciálního vybavení.

Změnit nepolarizované světlo na světlo polarizované lze vhodnou interakcí světla s látkou. Obecně platí, že při téměř všech interakcích světla s látkou dochází k určité změně polarizace. Rozlišujeme čtyři hlavní způsoby polarizace světla: **selektivní absorpce, odraz a lom, průchod anizotropním prostředím a rozptyl**. Účinnost polarizace se kvantitativně popisuje veličinou **stupeň polarizace**, která je definována jako poměr intenzity světla polarizovaného a celkové intenzity světla před polarizací.

Jako selektivní absorpci označujeme schopnost látky rozdílně absorbovat světlo v závislosti na jeho polarizaci. Tuto vlastnost mají zejména některé organické látky s orientovanou vláknitou strukturou. Selektivní filtr jako skleněná destička potažená tenkou vrstvou takového materiálu propouští pouze složku elektrického pole rovnoběžnou se směrem orientace struktury. To znamená, že přirozené světlo je po průchodu filtrem lineárně polarizováno, směr kmitů vektoru  $\vec{E}$  odpovídá směru orientace struktury materiálu tenké vrstvy. Ostatní směry  $\vec{E}$  jsou materiálem pohlceny. Z praktického života známe selektivní filtry jako povlaky speciálních slunečních brýlí nebo polarizační filtry ve fotografii.

Energetické poměry při odrazu a lomu elektromagnetické vlny na rozhraní dvou prostředí obecně řeší Fresnelovy vztahy. Z těchto vztahů mj. vyplývá, že světlo odražené na rozhraní je částečně polarizované, přičemž stupeň polarizace závisí na úhlu dopadu a poměru indexů lomu  $n_1, n_2$ . Zvláštním případem je dopad světla pod mezním úhlem  $\vartheta_B$ , který je dán relací

$$\tan \vartheta_B = \frac{n_2}{n_1}$$

V tomto případě svírají lomený a odražený paprsek úhel  $\pi/2$  a odražený paprsek je plně polarizován tak, že vektor  $E$  kmitá ve směru kolmém na rovinu dopadu. Úhel  $\vartheta_B$  se nazývá Brewsterův úhel. V technické praxi se často o Brewsterově úhlu hovoří jako o polarizačním úhlu materiálu. Polarizační úhel materiálu lze stanovit i experimentálně. Na měřený materiál necháme dopadat nepolarizované světlo pod různými úhly dopadu a pomocí polarizačního filtru sledujeme odraženou složku pod různými úhly odrazu. Podmínkou je, aby směr polarizace použitého filtru byl právě kolmo vůči rovině polarizace odražené vlny. V tomto uspořádání odražená vlna při určitém úhlu odrazu vymizí. Tento úhel odpovídá polarizačnímu úhlu materiálu.

Další možnost polarizace světla je průchod anizotropním prostředím. Existují krystaly (vápenec, křemen a další), které vykazují tzv. **dvojlom**. Dvojlomné krystaly s optickou kvalitou jsou relativně drahé a uplatňují se především v náročnější přístrojové optice. Příkladem takového krystalu je Glan-Taylorův dvojlomný hranol použitý v následující úloze. Jde o polarizační hranol složený ze dvou kalcitových krystalů, mezi kterými je vzduchová mezera. Kalcit je anizotropní krystal vykazující dvojlom, při kterém vznikají na rozhraní s krystalem dva paprsky - **řádný** ( $o$  = ordinary), který splňuje Snellův zákon odrazu a lomu, a **mimořádný** ( $e$  = extraordinary), který vzniká v důsledku anizotropie materiálu. Oba tyto paprsky jsou lineárně polarizovány, avšak ve vzájemně kolmých rovinách. Paprsky lze od sebe oddělit využitím totálního odrazu, čehož lze dosáhnout šikmým rozříznutím krystalu a ponecháním tenké vzduchové mezery mezi oběma částmi. Řádný paprsek je na takovém rozhraní úplně odražen, zatímco mimořádný paprsek prochází. Takto lze získat za polarizačním hranolem lineárně polarizované světlo. V technické praxi lze využít nejen osový mimořádný paprsek, ale i odražený paprsek řádný.

Praktické využití má zejména sestava dvou polarizačních filtrů (případně polarizačních hranolů) za sebou. První filtr funguje jako **polarizátor** (mění nepolarizovanou vlnu na vlnu lineárně polarizovanou), druhý jako **analyzátor** polarizované vlny. Pozorováním světelné vlny za analyzátozem zjistíme, že natáčením analyzátozem se mění intenzita procházející vlny. Na tomto principu byl například založen postup stmívání obrazu v klasických televizních kamerách, nastavení jasu klasických televizorů, podobného principu se využívá i ve 3D kinech. Je třeba si uvědomit, že za analyzátozem je vlna vždy lineárně polarizovaná. Intenzitu vlny  $I$  za systémem dvou polarizačních filtrů popisuje Malusův zákon definovaný jako

$$I = I_0 \cos^2 \theta,$$

kde  $\theta$  je úhel mezi směry polarizace obou filtrů a  $I_0$  je maximální intenzita za systémem filtrů, která odpovídá souhlasnému směru polarizace obou filtrů. Otáčením analyzátozem zjistíme, že maximální a minimální intenzita procházející světelné vlny se souladu s Malusovým zákonem pravidelně střídá po  $90^\circ$ .

# STUDIUM POLARIZACE SVĚTELNÉ VLNY

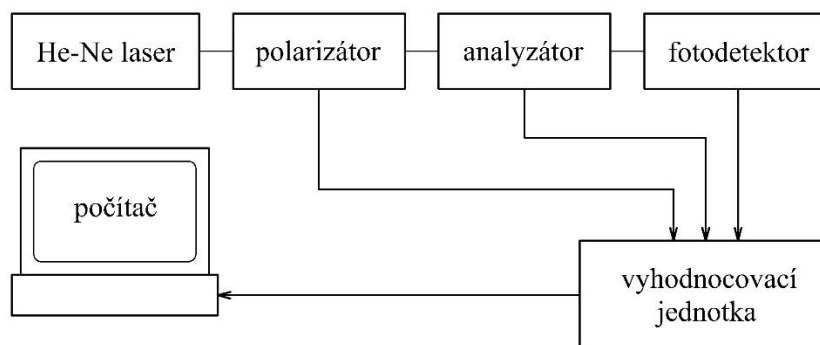
## ÚLOHA č. 58

**Úkol:** Ověřte na systému dvou polarizačních filtrů platnost Malusova zákona.

- Dílní úkoly:**
1. Korigujte vliv intenzity pozadí na odezvu fotodetektoru.
  2. Stanovte absolutní hodnotu intenzity laserového svazku za polarizátorem.
  3. Pro úhel natočení analyzátoru  $0 - 360^\circ$  proměřte průběh intenzity laserového svazku za analyzátozem.
  4. Označte úhel minimální intenzity a nastavte jeho hodnotu na  $0^\circ$ .
  5. Převed'te absolutní hodnoty intenzit na relativní vztažené k maximální hodnotě  $I_0$ . Závislost znázorněte graficky.
  6. Ověřte platnost Malusova zákona pomocí lineární regrese.

### Způsob měření:

Schéma měření:



Použitý laserový zdroj vysílá monochromatické koherentní polarizované světlo o vlnové délce 633 nm. Zdroj je pro potřeby měření jevu polarizace upraven tak, aby vysílaná světelná vlna byla plně lineárně polarizovaná, čehož je dosaženo polarizační destičkou skloněnou vůči ose svazku o úhel odpovídající polarizačnímu úhlu materiálu destičky. Tento systém je součástí těla laserového zdroje. Funkci polarizátoru i analyzátoru plní v obou případech Glan-Taylorovy hranoly, které lze natáčet okolo optické osy pomocí krokových motorů. Aktuální úhlové výchylky hranolů snímá měřicí zařízení. Intenzitu světelné vlny za analyzátozem snímáme pomocí fotodetektoru, jehož odezva je zpracovávána počítačem.

Použitím polarizátoru na lineárně polarizovaný svazek získáváme sestavu, za níž je světlo opět lineárně polarizované. Natáčením polarizátoru snížíme intenzitu procházející vlny tak, aby její intenzita měřená fotodetektorem nepřekročila maximální možnou hodnotu, kterou fotodetektor zaznamená.

Před měřením provedeme kompenzaci pozadí, během měření se snažíme zachovat v místnosti konstantní podmínky z hlediska intenzity pozadí. Vlastní měření probíhá při pevně nastaveném úhlu polarizátoru, kdy zaznamenáváme hodnoty intenzity prošlé vlny v závislosti na úhlovém natočení analyzátoru, a to pro úhly  $0 - 360^\circ$ . V záznamu vyhledáme polohu libovolného minima a úhlu, při kterém minimum nastává, přiřadíme hodnotu nulové výchylky. Takto získaný

záznam by měl vykázat přibližně nulovou intenzitu při nulovém úhlu. Naměřená data uložíme a provedeme import do programu MS Excel, kde je zpracujeme jako závislost

$$\frac{I}{I_0} = a \cos^2 \theta,$$

kde  $a$  je směrnice přímky závislosti  $y = ax+b$ , která je v ideálním případě rovna -1.

#### **Připomínky k měření a vyhodnocení**

Měření proveďte pomocí programu LEOI-40A. Návod k nastavení programu a provedení vlastního měření naleznete na kartě k úloze.