

Fyzikální praktikum 2

10. Polarizace světla

Úkoly k měření

Povinná část

- Měření koncentrace a stáčivosti roztoku sacharózy.

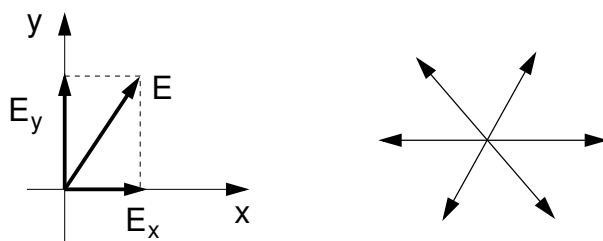
Varianty povinně volitelné části

- A. Malusův zákon, měření polarizační schopnosti reálných polaroidů.
- B. Měření optické stáčivosti levotočivé látky (fruktóza).

Povinná část

Úvod

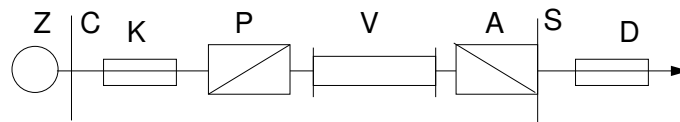
Světlo je příčné vlnění elektromagnetického pole. Pro popis světelných jevů plně postačí se zaměřit na chování periodicky proměnného vektoru elektrického pole \vec{E} . Tento vektor je vždy kolmý ke směru šíření paprsku. Je-li směr vektoru \vec{E} ve všech bodech paprsku v čase stálý, hovoříme o lineárně polarizovaném světle a rovina, v níž se kmity dějí se nazývá kmitová rovina. Lineárně polarizované světlo můžeme dostat lomem nebo odrazem. Je vhodné rozložit vektor elektrického



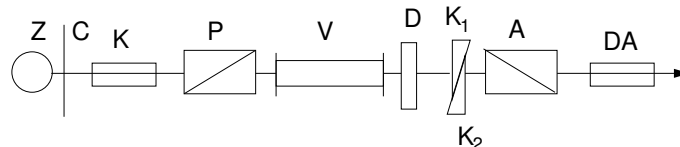
Obrázek 1: Polarizace denního světla.

pole \vec{E} do dvou navzájem kolmých směrů a vyjádřit ho ve složkách E_x a E_y (obr. 1, přičemž se světelný paprsek šíří kolmo k rovině obrázku). Je-li fázový posuv δ mezi těmito složkami stálý a je-li zároveň roven nule, dostáváme lineárně polarizované světlo. V případě, že $\delta = \pi/2$ a navíc platí $E_x = E_y$ opisuje koncový bod vektoru \vec{E} kružnici a dostáváme kruhově polarizované světlo; v obecném případě, kdy $0 < \delta < \pi/2$ jde o elipticky polarizované vlnění.

Lidské oko není citlivé na stav polarizace světla a musíme tedy vždy testovat pomocí vhodného analyzačního zařízení v jakém stavu je po této stránce detekované záření. K tomuto účelu se ve většině polarimetrických přístrojů využívá Malusova zákona.



Obrázek 2: Polarimetr.



Obrázek 3: Sacharimetr.

látká	specifická stáčivost ($^{\circ}\text{cm}^3/\text{g}\cdot\text{dm}$)
Sacharóza	+66,53
Fruktóza	−93,78
Dextróza (D-glukóza)	+52,74

Tabulka 1: Specifická stáčivost vybraných látek.

Polarimetrické přístroje

Polarimetr je znázorněn na obr. 2. Světlo z monochromatického zdroje (Z) je kolimátorem (K) zpracováno na rovnoběžný svazek paprsků. Průchodem přes polarizátor (P) se vlnění lineárně polarizuje a buď prochází přes měřený vzorek (V) nebo jde přímo na analyzátor (A), kterým lze otáčet kolem optické osy přístroje. Výsledná intenzita prošlého světla se pozoruje dalekohledem (D). Polarizátor a analyzátor jsou zpravidla realizovány pomocí speciálních hranolů z opticky anizotropních krystalů. Zkřížíme-li kmitové roviny polarizátoru a analyzátoru, bude intenzita osvětlení zorného pole minimální. Naše oči pozorují minimum osvětlení dosti nepřesně a nespolehlivě, naopak jsou citlivé na kontrast v osvětlení dvou sousedních ploch. Tohoto poznatku se využívá při konstrukci tzv. polostínového zařízení analyzátoru [1, 2], kde se snažíme dosáhnout otáčením analyzátoru takového stavu, při kterém jsou obě poloviny zorného pole osvětleny stejně (málo). Úhel stočení analyzátoru vůči polarizátoru se měří na stupnici (S). Sacharimetr (obr. 3) je konstrukčně proveden obdobně jako polarimetr s tím rozdílem, že analyzátor a polarizátor jsou nastaveny napevno ve skřížené poloze a kompenzace případných změn kmitové roviny se provádí dvojicí křemenných klínů (K1, K2), přístroj je navíc opatřen křemennou destičkou (D). Křemen stáčí kmitovou rovinu lineárně polarizovaného světla a změnou tloušťky křemenných destiček lze vykompenzovat stočení kmitové roviny způsobené měřeným vzorkem. Tento přístroj je také opatřen polostínovým zařízením.

Optická aktivita látek

Látky jsou opticky aktivní, mají-li schopnost stáčet rovinu lineárně polarizovaného světla. Tuto vlastnost mají jak některé látky pevné tak i některé roztoky obsahující v molekule např. asymetricky umístěný uhlík (vodný roztok sacharozy). Podle směru stočení kmitové roviny se opticky aktivní látky dělí na pravo- a levotočivé vzhledem k pozorovateli hledícímu proti směru šíření světla. Biot stanovil empirický vztah pro úhel stočení kmitové roviny po průchodu aktivní látkou,

$$\alpha = [\alpha]d \quad (1)$$

kde $[\alpha]$ je specifická stáčivost zkoumané látky a d je tloušťka této látky. Veličina $[\alpha]$ závisí na teplotě a vlnové délce světla. Jde-li o roztoky, pak

$$\alpha = [\alpha]cd \quad (2)$$

kde c označuje koncentraci opticky aktivní látky. Specifickou stáčívost roztoku lze stanovit ze vztahu (2) polarimetrem:

$$[\alpha] = \frac{100\alpha}{dq}, \quad (3)$$

kde q je počet gramů látky ve 100 cm^3 roztoku. Koncentraci roztoku je vhodné experimentálně stanovit sacharimetrem. Stupnice kompenzátoru tohoto přístroje je cejchována tak, že 50 dílkům na stupnici odpovídá 26 % roztok sacharozy v destilované vodě (26 g sacharozy ve 100 cm^3 roztoku). Užijeme-li při měření sodíkové čáry ($\lambda = 589,3 \text{ nm}$), znamenají dílky na stupnici mezinárodní stupně cukrnatosti a objemovou koncentraci v procentech zjistíme ze vztahu

$$c = \frac{26}{50}(n - n_0), \quad (4)$$

kde n_0 je nulová poloha kompenzátoru a n poloha kompenzátoru, odpovídající vykompenzování stočení kmitové roviny lineárně polarizovaného světla vlivem opticky aktivního roztoku v kyvetě délky 0.1 m .

Měření

Připravíme asi 25 cm^3 15 % roztoku sacharozy a nalijeme do kyvety. Zbytek roztoku zředíme tak, abychom získali 10 % roztok sacharozy a znovu odlejeme do druhé kyvety. Postup ještě jednou zopakujeme tak, aby ve třetí kyvetě byl 5 % roztok sacharozy.

Nastavíme sodíkovou výbojku před sacharimetr tak, aby bylo zorné pole správně osvětleno. Vykompenzujeme osvětlení zorného pole na polostín a odečteme na stupnici nulovou polohu. Do kyvetového prostoru přístroje vložíme kyvetu s roztokem sacharozy a znovu vykompenzujeme osvětlení zorného pole na polostín, na stupnici opět přečteme údaj. Ze vztahu (4) pak určíme objemovou koncentraci roztoku. Toto opakuje alespoň 5×. Výbojku přemístíme před polarimetr. Otáčením analyzátoru nastavíme polostín a odečteme na stupnici nulovou polohu (pozor na správnou stupnici). Kyvetu s roztokem vložíme do přístroje a opět najdeme polostín a na stupnici odečteme úhel stočení. Ze vztahu (3) určíme specifickou stáčívost, měření opakuje alespoň 5×.

Úkoly

1. Připravte tři roztoky sacharozy o různé koncentraci (15 %, 10 %, 5 %).
2. Stanovte sacharimetrem koncentraci těchto roztoků. Měření všech kyvet opakujte 5×, vždy ve schématu: nulová poloha – první kyveta – druhá kyveta – třetí kyveta.
3. Určete polarimetrem úhel stočení kmitové roviny připravených roztoků, postupem obdobným měření sacharimetrem.
4. Vypočítejte specifickou stáčívost sacharozy a porovnejte ji s tabelovanou hodnotou, kterou najdete např. v [2], str. 571 nebo v tabulce 1.

Varianta A: Malusův zákon, měření polarizační schopnosti reálných polaroidů

Úvod

Zdroje světla si lze představit jako soubor velkého množství vzájemně nezávislých zdrojů elektromagnetického záření (atomy, molekuly). Světlo vyzařované např. jedním atomem je lineárně polarizované tzn. že vektor intenzity elektrického pole \vec{E} se v čase mění v přesně definované rovině

– rovině kmitové. V daném okamžiku se ale ve směru šířícího se paprsku světla šíří energie vyzařovaná mnoha elementárními zdroji. V tomto případě jsou v postupující vlně zastoupeny všechny možné kmitové roviny, hovoříme o přirozeném světle.

Z přirozeného světla můžeme dostat lineárně polarizovanou vlnu pomocí polarizačních přístrojů – polarizátorů a to buď odrazem nebo lomem. Pro další výklad je potřeba zavést pojem roviny dopadu, která je dána kolmicí k ploše na niž světlo dopadá a dopadajícím paprskem světla. Každý kmit přirozeného světla lze rozložit na složku ležící v rovině dopadu (p-složka) a kolmou k rovině dopadu (s-složka).

Polarizace odrazem

Při odrazu přirozeného světla na dielektrickém zrcadle při proměnném úhlu dopadu začínají v odraženém světle převládat kmity vektoru \vec{E} kolmé k rovině dopadu, světlo se stává částečně polarizovaným. Pro jednotlivé složky amplitudy odraženého světla na dielektriku platí

$$r_p = \frac{\tan(\varphi_0 - \varphi_1)}{\tan(\varphi_0 + \varphi_1)} \quad r_s = -\frac{\sin(\varphi_0 - \varphi_1)}{\sin(\varphi_0 + \varphi_1)} \quad (5)$$

kde φ_0 je úhel dopadu, φ_1 úhel lomu na rozhraní vzduch-dielektrikum.

Lze dosáhnout situace, kdy $r_p = 0$, tj. tehdy, když se $\tan(\varphi_0 + \varphi_1)$ blíží k nekonečnu, pak $\varphi_0 + \varphi_1 = \pi/2$ a paprsek odražený a lomený jsou na sebe kolmé. Je-li ale $r_p = 0$, dostáváme v odraženém světle pouze s-složku, tedy odražené světlo je úplně lineárně polarizované a tento úhel se nazývá polarizační (Brewsterův) úhel.

Ze Snellova zákona plyne v našem případě

$$n = \frac{\sin \varphi_0}{\sin \varphi_1} \quad (6)$$

kde n je index lomu dielektrika. Pak, položíme-li $\varphi_0 \equiv \varphi_B$ a tedy $\varphi_1 = \pi/2 - \varphi_B$, platí

$$n = \frac{\sin \varphi_B}{\sin(\pi/2 - \varphi_B)} = \frac{\sin \varphi_B}{\cos \varphi_B} = \tan \varphi_B \quad (7)$$

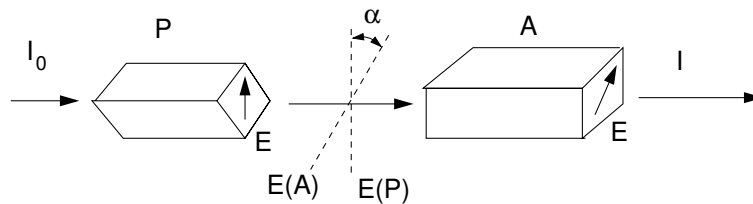
Intenzita přirozeného světla odraženého na rozhraní dvou prostředí je dána vztahem

$$I^{(r)} = \frac{I_s^{(r)} + I_p^{(r)}}{2} \quad (8)$$

Obdobný vztah platí pro intenzitu světla prošlého.

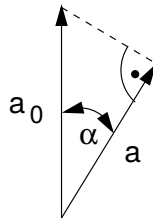
Polarizace lomem

Při průchodu paprsku přirozeného světla opticky anizotropním prostředím dochází k dvojlomu a mimořádný paprsek je lineárně polarizován, zatímco řádný paprsek je polarizován částečně. Na

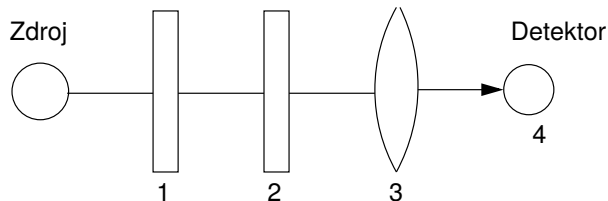


Obrázek 4: Schéma Malusova pokusu.

obrázku 4 P označuje polarizátor, A analyzátor, I_0 je intenzita přirozeného světla dopadajícího na polarizátor, I_0' je intenzita světla po průchodu polarizátorem. Dále je I intenzita svazku, který



Obrázek 5: Stočení roviny polarizovaného světla.



Obrázek 6: Uspořádání pro ověření Malusova zákona a měření Brewsterova úhlu. 1 – první polarizátor, 2 – druhý polarizátor, 3 – fokusační čočka, 4 – detektor.

prošel analyzátozem A a α je úhel mezi kmitovými rovinami vektoru \vec{E} před a po průchodu analyzátozem. Označíme-li amplitudu vektoru \vec{E} před průchodem analyzátozem a_0 a po průchodu a , pak podle předchozího obrázku platí

$$a = a_0 \cos \alpha \quad (9)$$

Intenzita světla je úměrná druhé mocnině amplitudy, tedy intenzita prošlého světla analyzátozem je dána vztahem

$$I = I'_0 \cos^2 \alpha \quad (10)$$

což je matematický zápis Malusova zákona.

Ověření platnosti Malusova zákona

Využijeme uspořádání jak je na obr. 6 s tím rozdílem, že dielektrické zrcadlo nahradíme dalším Nikolovým hranolem a světelný zdroj umístíme tak, aby světlo procházelo oběma polarizátory. Platnost Malusova zákona ověříme tak, že jeden z polarizátorů necháme v libovolné, ale stále stejné poloze a druhým budeme otáčet. Závislost fotoproudu na úhlu stočení obou polarizátorů by měla odpovídat závislosti dle vztahu (10). Tuto závislost můžeme ještě dále využít ke stanovení stupně polarizace světla. Částečně polarizované světlo si lze představit složeno z části polarizované (intenzita I_p) a části nepolarizované (I_n). Stupeň polarizace V částečně polarizovaného světla je dán vztahem

$$V = \frac{I_p}{I_p + I_n} \quad (11)$$

Mějme dva polarizátory stejné kvality. Po průchodu polarizátorem č. 1 jsou intenzity polarizovaného světla $I_p^{(1)}$ a $I_n^{(1)}$. Jsou-li kmitové roviny obou polarizátorů rovnoběžné, dostaneme po průchodu světla intenzitu

$$I_{\max} = I_p^{(1)} + \frac{I_n^{(1)}}{2} + I_p^{(2)} \quad (12)$$

Naopak, jsou-li kmitové roviny navzájem kolmé, pak platí

$$I_{\min} = \frac{I_n^{(1)}}{2} + I_p^{(2)} \quad (13)$$

Testujeme např. polarizátor č. 1. Lze předpokládat, že $I_n^{(2)}$ se blíží k nule; pak dosadíme-li $I_p^{(1)}$ a $I_n^{(1)}$ do vztahu (11), dostaneme pro stupeň polarizace vztah

$$V = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (14)$$

který určíme ze závislosti fotoproudu na úhlu stočení polarizátoru.¹

Úkoly

1. Jeden z polarizátorů nechejte v pevné poloze, druhým otáčejte.
2. Zaznamenávejte hodnoty fotoproudu na měřidle odpovídající nastaveným úhlům.
3. Vyneste závislost fotoproudu na úhlu otočení polarizátoru.
4. Ze vztahu (14) určete stupeň polarizace druhého polarizátoru.

Varianta B: Měření optické stáčivosti levotočivé látky

Postup měření

Měření úhlu stočení levostáčivé látky se v principu neliší od měření pravostáčivé látky. Podstatný rozdíl spočívá ve faktu, že přístroje používané v praxi jsou cejchovány pro měření pravostáčivých roztoků. Úhel stočení levostáčivé látky proto můžeme provést měřením kombinace levostáčivého a pravostáčivého roztoku. Pak platí, že celkový úhel stočení je součtem úhlu stočení v jednotlivých kyvetách

$$\alpha = \alpha_1 + \alpha_2, \quad (15)$$

kde α_j je úhel stočení v j -té kyvetě. Pro pravotočivou látku je úhel stočení kladný, pro levostáčivou záporný. Je však třeba použít roztoky o takových koncentracích, aby celkový úhel stočení byl kladný. S ohledem na specifické stáčivosti uvedené v tabulce 1 je ke kompenzaci úhlu stočení roztoku fruktózy třeba použít roztok sacharózy o koncentraci přibližně $1,5\times$ vyšší než je koncentrace roztoku fruktózy za předpokladu, že pro každý z těchto roztoků použijeme kyvetu stejné délky.

Úkoly

1. Namíchejte dva roztoky fruktózy o různých koncentracích (5 %, 10 %). Koncentraci určete z hmotnosti fruktózy a objemu výsledného roztoku. Jako pravostáčivý roztok použijte kyvetu s 15 % roztokem sacharózy.
2. Určete polarimetrem úhel stočení připravených roztoků. Měřte v pořadí referenční roztok sacharózy, a obě kombinace sacharózy s roztoky fruktózy. Měření opakujte nejméně $5\times$.
3. Vypočítejte specifickou stáčivost fruktózy a porovnejte s tabulkovými hodnotami.

Užití v praxi: Stáčení roviny polarizace je prakticky využitelné právě v relativně velmi přesné metodě měření koncentrace látek v roztoku (pokud jsou opticky aktivní). Aplikace polarizátorů jsou ovšem mnohem širší - od polarizačních brýlí (včetně těch používaných při stereoskopických 3D projekcích) přes zobrazování pomocí LCD (opticky aktivní krystaly v elektrickém poli mezi dvěma zkříženými polarizátory) až po

¹Ze světelného zdroje vychází přirozené světlo a dopadá na polarizátor č. 1, jehož stupeň polarizace chceme určit. Za ním je umístěn polarizátor č. 2 o němž předpokládáme, že je dokonalý tzn., že jeho hlavní propustnosti jsou rovny 1 resp. 0. Nepolarizované světlo je po průchodu polarizátorem č. 1 částečně nepolarizované a jeho polarizační vlastnosti jsou dle předchozího testovány.

defektoskopii (opět zkoumání stáčení polarizace tentokrát vlivem pnutí v průhledném materiálu). Přímé užití Malusova zákona lze nalézt ve spojitě ztmavovatelných brýlích, nebo u rychlých elektricky ovládaných optických závěrek (podobně jako u tekutých krystalů zde se řídí stáčení polarizace pomocí elektrického pole). Laboratorní zkoumání změn polarizace při odrazu na materiálech pak umožňuje určovat dielektrické funkce (i vícevrstevných vzorků) technikou zvanou elipsometrie.

Literatura:

- [1] A.Kučírková, K. Navrátil, *Fyzikální měření I*, SPN Praha 1986.
- [2] Z. Horák, *Praktická fyzika*, SNTL Praha 1958.