

Úloha č.1 - Anizotropie materiálů a její využití

1 Teoretický úvod

Anizotropie

Dielektrické prostředí je definováno jako *anizotropní*, jestliže jeho optické vlastnosti obecně závisí na směru šíření vlny. *Přirozená* anizotropie je způsobená buďto anizotropií krystalické struktury dané látky nebo anizotropií přítomných molekul, nejsou-li prostorově orientovány zcela náhodně. Kromě přirozené anizotropie existuje také anizotropie *indukovaná*, vyvolaná působením vnějších sil na původně izotropní prostředí. Následující úloha je však zaměřena pouze na materiály s anizotropií přirozenou.

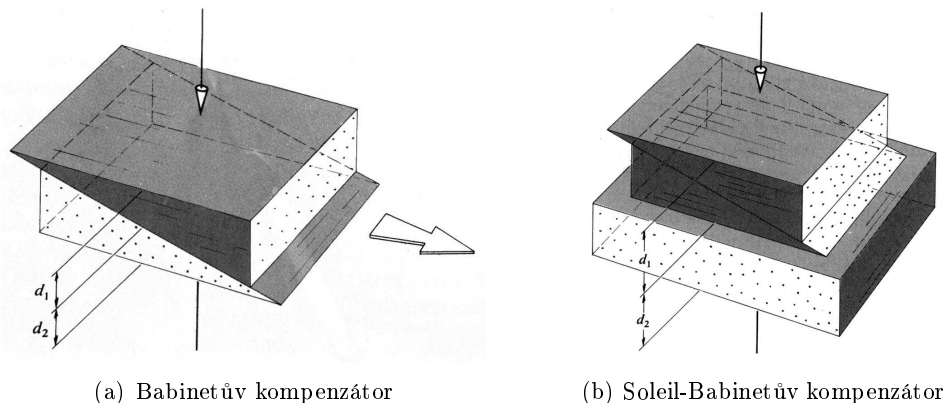
Vlastnosti anizotropních prostředí vyplývají z jejich materiálových parametrů a jsou popsány tenzorem permitivity, který může mít ve správně zvolené souřadné soustavě maximálně tři nezávislé prvky ϵ_x , ϵ_y a ϵ_z . Osy takové soustavy se nazývají hlavními osami daného prostředí, např. krystalu. Indexy lomu dané permitivitami ve směru hlavních os se nazývají hlavní indexy lomu $n_x = \sqrt{\epsilon_x/\epsilon_0}$, $n_y = \sqrt{\epsilon_y/\epsilon_0}$ a $n_z = \sqrt{\epsilon_z/\epsilon_0}$, kde ϵ_0 je permitivita vakua.

Podle počtu nezávislých hlavních indexů lomu se prostředí rozlišuje na *dvouosé* ($n_x \neq n_y \neq n_z$), *izotropní* ($n_x = n_y = n_z$) nebo *jednoosé*. V případě jednoosého prostředí se pak hlavní indexy lomu označují jako *řádný* index lomu $n_o = n_x = n_y$ a *mimořádný* index lomu $n_e = n_z$. *Optickou osou* je při daném značení nazývána osa z . Mezi jednoosé krystaly patří např. krystalický křemen, islandský vápenec, lithium niobát nebo led.

Jelikož jsou vlastnosti anizotropních prostředí v různých směrech odlišné, jeho vliv na procházející záření bude záviset na směru šíření. Bude-li se např. rovinná vlna šířit ve směru optické osy jednoosým krystalem, pak obě složky vektoru elektrické intenzity $\vec{E} = (E_x, E_y)$ budou ovlivněny stejným indexem lomu n_o . Ve všech ostatních případech bude ovšem každá ze složek pocítovat jiný index lomu, daný velikostí indexu lomu, resp. permitivity, ve směru té které složky. Bude-li se rovinná vlna šířit kolmo na optickou osu, např. ve směru osy x , bude y -ová složka vektoru \vec{E} vnímat index lomu n_o , zatímco z -ová složka index n_e . Díky odlišným indexům lomu se budou obě tyto složky v prostředí jednoosého krystalu šířit různou fázovou rychlostí a s výjimkou kolmého dopadu vlny na rozhraní krystalu také různým směrem (*dvojlom*).

Anizotropních materiálů lze využít ke konstrukci různých typů polarizačních optických prvků, tj. polarizačních filtrů, polarizačních děličů svazku nebo retardátorů a to nejen fixních (půlvlnných nebo čtvrtvlnných destiček), ale také spojitě nastavitelných, tzv. *kompensátorů*.

Nejběžnějšími typy kompensátorů je Babinetův kompensátor a jeho modifikovaná verze, kompensátor Soleil-Babinetův. Rozdíl mezi oběma kompensátory je patrný z Obr 1. V případě Babi-



Obrázek 1: Složení dvou nejpoužívanějších typů kompensátorů.

netova kompenzátoru je kompenzátoru složen z dvojice klínů z dvojlomného materiálu (křemen), jejichž optické osy jsou paralelní s podstavami klínů a současně navzájem kolmé. Světlo procházející oběma klíny se v nich dělí na dvě složky, které v obou prostředích získávají protichůdné fázové zpoždění v závislosti na uražených drahách d_1 a d_2

$$\Delta\varphi_1 = \frac{2\pi}{\lambda_0}(n_o - n_e)d_1, \quad \Delta\varphi_2 = \frac{2\pi}{\lambda_0}(n_e - n_o)d_2 \quad (1)$$

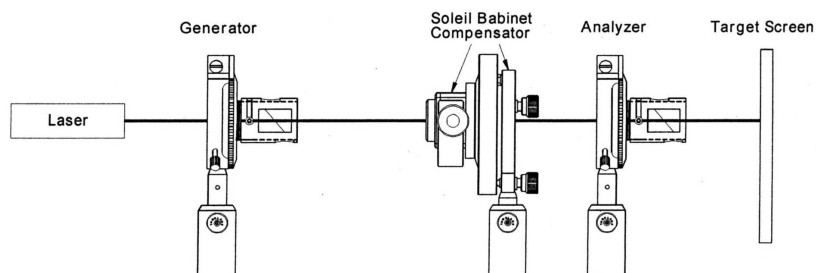
$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda_0}(n_o - n_e)(d_1 - d_2)$$

Je zřejmé, že výsledné fázové zpoždění je závislé na rozdílu obou drah, který je možno vzájemným posunem klínů měnit. Pro $d_1 = d_2$ nastává nulové fázové zpoždění a to pro všechny vlnové délky (nezáleží totiž na hodnotách indexů lomu).

V případě Babinetova kompenzátoru je výsledné fázové zpoždění proměnlivé ve směru gradientu obou klínů, právě díky proměnlivému rozdílu drah v obou krystalech. Tento nedostatek je odstraněn v případě Soleil-Babinetova kompenzátoru, kde je jeden klín nahrazen hranolem s pevnou tloušťkou a k druhému klínu je přidán další se stejně orientovanou optickou osou. Výsledná hodnota fázového zpoždění je tudíž ovládána pouze změnou dráhy d_1 prostřednictvím posuvu jednoho z klínů.

Kalibrace Soleil-Babinetova kompenzátoru

1. Umístěte za sebou do svazku dva lineární polarizační filtry tak, aby první z nich, polarizátor, propouštěl maximum intenzity vstupního svazku a druhý, analyzátor, naopak minimum. V tomto nastavení budou propustné osy obou polarizačních filtrů zkřížené. Dbejte na to, aby svazek dopadal na oba polarizátory co nejvíce kolmo.
2. Mezi polarizátor a analyzátor vložte Soleil-Babinetův kompenzátor tak, aby jeho čelní rovina byla opět kolmá na dopadající svazek (schéma viz. Obr 2). Obecné fázové zpoždění kompenzátoru by mělo způsobit vzrůst intenzity za analyzátozem. Při povoleném aretačním šroubu otáčejte objímkou kompenzátoru dokud výstupní intenzita nebude opět minimální. Utáhněte aretační šroub. Kompenzátor je nyní zorientován, tzn. jeho rychlá osa je rovnoběžná z propustnou osou jednoho z polarizátorů. Fázové zpoždění kompenzátoru nyní nemá na dopadající lineárně polarizované světlo vliv.
3. S utaženým aretačním šroubem otočte objímku kompenzátoru o 45° , což je umožněno stavěcími zářázkami. Není-li kompenzátor náhodou nastaven na fázové zpoždění 0 nebo π , dojde opět k nárůstu výstupní intenzity za analyzátozem. Otáčejte mikrometrovým šroubem směrem k nule dokud opět nedostanete minimální výstupní intenzitu. Fázové zpoždění kompenzátoru by nyní mělo být $\Delta\varphi = 0$. Stiskem tlačítka ZERO/ABS vynulujte displej.



Obrázek 2: Schéma pro kalibraci Soleil-Babinetova kompenzátoru.

4. Otáčením mikrometrového šroubu opačným směrem získáte při dalším minimu výstupní intenzity hodnotu kalibrační vzdálenosti X_{cal} , která při dané vlnové délce odpovídá fázovému zpoždění $\Delta\varphi = 2\pi$.

Měření fázového zpoždění pomocí Soleil-Babinetova kompenzátoru

1. S dostatečným rozstupem umístěte do svazku dva polarizační filtry tak, aby jejich propustné osy byly vzájemně zkřížené.
2. Mezi polarizátory vložte materiál s neznámým fázovým zpožděním, připevněný na otočné objímce se stupnicí. Zorientujte rychlou osu tohoto materiálu s propustnou osou jednoho z polarizačních filtrů, tzn. natočte materiál tak, aby byla intenzita svazku za analyzátozem minimální.
3. Mezi polarizátory vložte dále zkalibrovaný S-B kompenzátor a opět zorientujte jeho rychlou osu.
4. Natočte testovaný materiál i kompenzátor o 45° a otáčením mikrometrického šroubu kompenzátoru opět nastavte intenzitu svazku na výstupu na minimum. Hodnotu na displeji mikrometrického posuvu označte jako X_k .
5. Celkové fázové zpoždění materiálu a kompenzátoru je nyní $\Delta\varphi = \Delta\varphi_n + \Delta\varphi_k = 2\pi$. Díky lineární závislosti na posunu kompenzátoru lze odvodit jeho fázové zpoždění jako

$$\Delta\varphi_k = 2\pi \frac{X_k}{X_{cal}} \quad (2)$$

Fázové zpoždění měřeného materiálu je pak dáno vztahem

$$\Delta\varphi_n = 2\pi \left(1 - \frac{X_k}{X_{cal}}\right) \quad (3)$$

Optická aktivita

Existuje skupina látek, které jsou izotropní a zároveň ovlivňují procházející záření tím, že stáčí rovinu polarizace. Tyto látky se nazývají *opticky aktivní* a může se jednat jak o krystalické látky s určitou krystalografickou strukturou (např. křemen) tak o kapaliny či roztoky (např. terpentýn či cukerný roztok). Narozdíl od anizotropních materiálů zde dochází k rozdělení lineárně polarizovaného světla na dvě kruhově polarizované vlny s opačným smyslem rotace. Každá z těchto vln se prostředím šíří s jinou rychlostí, takže po jejich složení na výstupu je výsledná rovina polarizace natočená o úhel

$$\Delta\theta = c\rho d, \quad (4)$$

kde c je koncentrace látky v roztoku (uvádí se v g/ml, tj. hmotnost rozpuštěné látky ku objemu výsledného roztoku), d je dráha uražená vlnou v prostředí (zde v decimetrech) a ρ je materiálová konstanta zvaná *měrná optická stáčivost*, běžně uváděná pouze ve stupních a je definovaná jako úhel, o který se stočí rovina polarizace při průchodu opticky aktivním materiálem po dráze o délce 10 cm. Optickou stáčivost lze vyjádřit pomocí indexu lomu pravotočivě kruhově polarizované vlny n_+ a levotočivě kruhově polarizované vlny n_- jako

$$\rho = \frac{\pi(n_- - n_+)}{\lambda_0} \quad (5)$$

Optická stáčivost je závislá nejen na vlnové délce procházejícího světla, ale také na teplotě roztoku. Jestliže při pohledu proti směru šíření dojde o natočení roviny polarizace ve směru hodinových ručiček, jedná se o *pravotočivou* látku (*dextro*-izomer) a měrná stáčivost má kladné

znaménko, v opačném případě jde o látku *levotočivou* (*levo-izomer*) a měrná stáčivost bude záporná. Hodnota měrné optické stáčivosti cukru pro teplotu 20°C a vlnovou délku $\lambda = 633 \text{ nm}$ je $\rho = 57,2^{\circ}$ [4].

Optickou aktivitu lze rovněž vyvolat uměle v magnetickém poli, kdy se jedná o *Faradayův jev*. Optická aktivita se využívá např. při měření koncentrace roztoku látek vykazujících stáčivost (nejčastěji cukru) nebo jako polarizačních rotátorů či magnetooptických modulátorů.

2 Zadání úlohy

Cíle úlohy

Získání praktických zkušeností s vlastnostmi anizotropních dvojlomných materiálů a opticky aktivních látek. Práce s prvky, které tohoto jevu využívají.

Pomůcky

Během úlohy budou k dispozici následující pomůcky: lineárně polarizovaný He-Ne laser ($632nm$), zdroj bílého světla, 2 zrcátka, dichroický polarizační filtr (polarizační fólie), Glan-Thompsonův polarizační hranol, Soleil-Babinetův kompenzátor, zkřížený polarizátor (polarizační analyzátor), kyvety s opticky aktivním materiálem, lepicí páska, detektor optického výkonu, stojánky na uchycení prvků, odměrný válec, míchačka roztoků.

Postup měření

1. Funkce Soleil-Babinetova kompenzátoru

Zkalibrujte S-B pro $\lambda = 633nm$. Pomocí S-B nastavte pro tuto vlnovou délku postupně fázová zpoždění $\Delta\varphi = \pi$ (vzdálenost $X_{\lambda/2}$) a $\Delta\varphi = \pi/2$ (vzdálenost $X_{\lambda/4}$) a ověřte správnost nastavení pomocí analyzátoru.

2. Určování neznámého fázového zpoždění

S pomocí S-B a zkřížených polarizátorů určete fázové zpoždění předloženého materiálu (průsvitná lepicí páska).

3. Závislost fázového zpoždění na vlnové délce

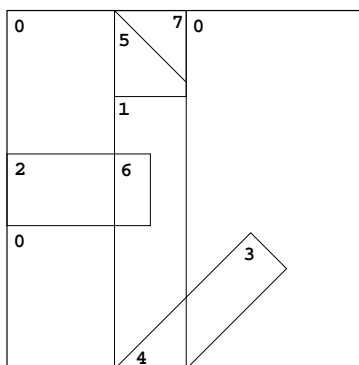
Mezi dva zkřížené polarizátory vložte S-B kompenzátor nastavený na $\Delta\varphi = 0$. Použijte zdroj bílého světla (např. difúzní plochu osvětlenou lampičkou) a pozorujte změnu barvy světla prošlého všemi třemi prvky při otáčení mikrometrického posuvu kompenzátoru.

4. Vliv anizotropního prostředí na procházející bílé polarizované světlo

Zkřížený polarizátor postavte před zdroj bílého světla tak, aby jste mohli jím prošlé světlo pozorovat. Mezi jeho stěny vložte sklo s nalepenými kousky lepicí pásky s naměřeným fázovým zpožděním a pozorujte jak se bude měnit barva jednotlivých políček popsanych na Obr 3 během otáčení skla. Pověšimněte si především chování políček 4 a 6. Zamyslete se nad příčinami pozorovaných změn.

5. Měření optické aktivity terpentýnu

Jako zdroj záření použijte He-Ne laser. Mezi dva zkřížené polarizátory vložte skleněnou kyvetu s terpentýnem. Na výstupu zaznamenáte nárůst intenzity, který je zapříčiněn



Obrázek 3: Testovací skleněná destička s označenými oblastmi s různými fázovými zpožděními.

stočením roviny polarizace uvnitř látky. Změřte co nejpřesněji o jaký úhel se rovina natočila. Poté umístěte za kyvetu kolmo na svazek zrcátko tak, aby odrazilo svazek zpět po stejné dráze skrz opticky aktivní prostředí. Mezi první polarizátor a opticky aktivní prostředí vložte dělič svazku (např. skleněnou destičku) a nasměrujte odražený svazek na stínítko. Pomocí polarizátoru určete, o jaký úhel se natočí rovina polarizace světla, které prošlo opticky aktivním prostředím tam a zase zpátky.

6. Vliv koncentrace cukerného roztoku na stočení roviny polarizace

Ve skleněné nádobě rozpustěte v 50ml destilované vody postupně 30g, 60g a 90g cukru a pokaždé změřte stejně jako v předchozí úloze pro získaný roztok úhel $\Delta\theta$. Koncentraci počítejte jako podíl hmotnosti rozpuštěného cukru ku objemu výsledného roztoku v g/ml. Pomocí naměřených hodnot koncentrace určete měrnou optickou stáčívost ρ cukru pro danou teplotu a vlnovou délku (stěny kyvety mají rozměry 34×44 mm).

3 Požadované výsledky

1. Určete kalibrační vzdálenost X_{cal} Soleil-Babinetova kompenzátoru pro He-Ne laser.
2. Určete $X_{\lambda/2}$ a $X_{\lambda/4}$ pro He-Ne laser. Popište způsob ověření správnosti nastavení obou typů retardátorů.
3. Určete hodnotu fázového zpoždění předloženého materiálu a orientaci jeho optické osy.
4. Popište a vysvětlete závislost barvy prošlého světla na posuvu kompenzátoru.
5. Pro každé políčko očíslované na Obr 3 popište a barevné změny, ke kterým dochází během otáčení testovacího skla uvnitř polarizačního analyzátoru. Vysvětlete proč k pozorovaným změnám v jednotlivých oblastech dochází. Určete orientaci propustných os polarizačních filtrů, tvořících stěny analyzátoru.
6. Určete měrnou stáčívost ρ terpentýnu (délka kyvety je $d = 10$ cm, koncentraci, resp. hustotu, uvažujte $c = 0.85\text{g/cm}^3$). Určete o jaký úhel se natočila rovina polarizace po dvojím průchodu opticky aktivním prostředím a vysvětlete zjištěnou hodnotu.
7. Určete závislost $\Delta\theta$ na koncentraci cukerného roztoku a vynesete vaše měření do grafu. Uveďte vypočtenou hodnotu měrné optické stáčívosti cukru.

Reference

- [1] Born M., Wolf E. *Principles Of Optics*, Pergamon Press, 1964, p.554-555
- [2] Fiala P., Richter I. *Fyzikální optika*, Vydavatelství ČVUT, 2005
- [3] Hecht E. *Optics*, Second Ed., Addison-Wesley Publishing, 1987
- [4] http://www.kayelaby.npl.co.uk/general_physics/2_5/2_5_10.html