

Úloha č.1 - Polarizace světelného záření

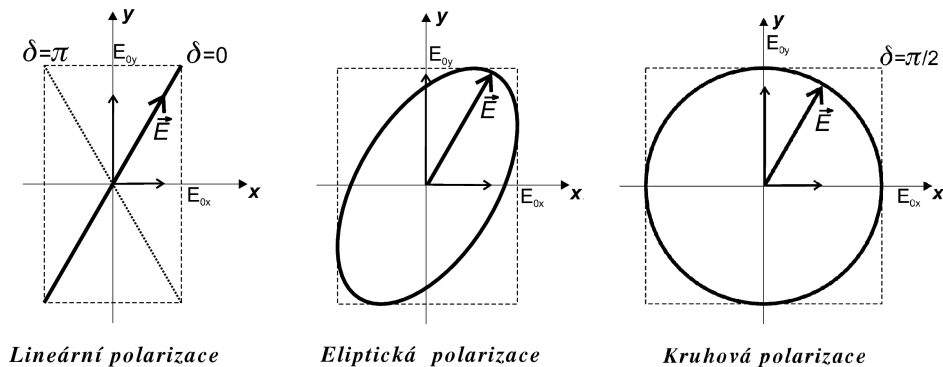
1 Teoretický úvod

Polarizace je jedna z vlastností popisujících kmitání obecné příčné vlny. V našem případě elektromagnetické vlny popisuje polarizace směr kmitání elektrického pole \vec{E} v rovině kolmé na šíření vlny. Elektromagnetické záření může být složeno z mnoha obecně nekoherentních vln a výsledný vektor \vec{E} je potom součtem vektorů jednotlivých vln. U *nepolarizovaného* světla se směr kmitání vektoru \vec{E} v této rovině chaoticky mění, zatímco u světla zcela *polarizovaného* opisuje vektor v rovině kolmé na směr šíření uzavřenou křivku, obecně elipsu. Mezi těmito krajními případy se jedná o světlo *částečně polarizované*. Lze dokázat, že částečně polarizované světlo lze vždy rozložit na součet zcela polarizované a zcela nepolarizované vlny [1].

Zaměříme-li se nyní na polarizované světlo, jedním jeho speciálním případem je světlo *lineárně polarizované*, kdy se směr kmitání vektoru \vec{E} nemění - v rovině kolmé na směr šíření se jeho koncový bod pohybuje po úsečce (viz. Obrázek 1). Rovina určená vektorem elektrického pole a směrem šíření se nazývá *rovina polarizace*.

Druhým speciálním případem je světlo *kruhově polarizované*, kdy vektor \vec{E} rotuje, ale jeho délka se nemění - v rovině kolmé na směr šíření opisuje jeho koncový bod kružnici. Otáčí-li se při pohledu proti šířící se vlně vektor \vec{E} ve směru hodinových ručiček, jedná se o pravotočivou polarizaci a naopak.

Lineárně i kruhově polarizované světlo jsou mezní případy *elipticky polarizovaného* světla.



Obrázek 1: Průmět vektoru elektrického pole \vec{E} do roviny xy , kolmé na směr šíření, pro různé případy polarizovaného světla.

Z Obrázku 1 je zřejmé, jak lze vektor elektrického pole monochromatického polarizovaného světla rozložit do dvou vzájemně kolmých složek

$$\begin{aligned} E_x &= E_{x0} \cos(\omega t - kz) \\ E_y &= E_{y0} \cos(\omega t - kz + \delta), \end{aligned} \quad (1)$$

kde vzájemný fázový posun δ určuje spolu s amplitudami jednotlivých složek E_{x0} a E_{y0} typ polarizace.

Vytváření polarizovaného světla

Zdrojem lineárně polarizovaného světla, se kterým se můžeme nejnázve setkat, je např. laser nebo laserová dioda. Takto polarizované světlo však není generováno přímo uvnitř aktivního prostředí, ale vzniká např. při průchodu šikmými čely aktivního krystalu laseru, případně při odrazu na rozhraních tenké vrstvy aktivního prostředí laserové diody.

Všechny přirozené, nekoherentní zdroje (žárovka, zářivka, Slunce atp.) generují světlo nepolarizované. K jeho, alespoň částečné, polarizaci lze využít některého ze čtyř procesů: *dichroismus*, *dvojlom*, *odraz* a *rozptyl*. Prvek vytvářející polarizované světlo se nazývá *polarizátor* neboli *polarizační filtr*.

První, velmi rozšířená skupina polarizátorů využívajících dichroismus je založena na vlastnostech anizotropních materiálů, ze kterých jsou polarizátory vyrobeny. V jejich objemu dochází k selektivní absorpci jedné ze složek vektoru elektrického pole, zatímco složka k ní kolmá filtrem prochází. Z nepolarizovaného světla lze tímto způsobem vytvořit světlo lineárně polarizované. Směr kmitání prošlé vlny je vždy shodný se směrem tzv. *propustné osy* polarizátoru.

Při dopadu světla na rozhraní dvou dielektrických prostředí s různými indexy lomu n_1 , n_2 dochází k silnějšímu odrazu složky elektrického pole E_s , kmitající ve směru paralelním s rozhraním (kolmo na rovinu dopadu). Při tzv. *Brewsterově* úhlu dopadu $\theta_B = \arctan(n_2/n_1)$ se pak odráží pouze složka E_s , zatímco složka E_p , kmitající v dopadové rovině, se láme do druhého prostředí (pro sklo/vzduch je $\theta_B = 56^\circ$). Opět tak získáváme lineárně polarizované světlo.

Také k dvojlomu dochází v anizotropním prostředí. Zde však anizotropie spočívá v rozdílném indexu lomu, který v závislosti na orientaci materiálu, resp. jeho optické osy, vůči směru šíření procházející vlny, může každá ze složek vektoru elektrického pole cítit. Procházející světlo tak lze rozdělit na dvě lineárně polarizované vlny, šířící se různou rychlostí, případně také různým směrem. Směry kmitání těchto dvou vln jsou vzájemně kolmé a například s využitím totálního odrazu je lze od sebe oddělit. Vznikají pak tzv. *polarizační hranoly* jako např. *Nikolův* nebo *Glan-Thompsonův* hranol, které plní funkci lineárních polarizačních filtrů nebo polarizačních děličů.

Poslední z efektů, při kterém dochází k separaci lineárně polarizovaného světla je rozptyl. Světlo procházející prostředím rozkmitává přítomné elektrony, které se tímto chovají jako dipólový zářič. Prochází-li rozptylujícím prostředím nepolarizované světlo, rozkmitává elektrony zcela náhodně v rovině kolmé na směr šíření. Ve směru šíření původní vlny se stav rozptýleného světla nemění, neboť každý dipól vytváří vlastní lineárně polarizovanou vlnu. Ve směru kolmém však k rozptýlenému světlu přispívají pouze dipóly kmitající v jednom směru. Takové světlo je pak lineárně polarizované. V přírodě dochází k danému jevu např. na ozónové vrstvě v atmosféře.

Vložíme-li do cesty lineárně polarizovanému světlu další polarizátor (označován jako *analyzátor*), výsledná intenzita bude záviset na úhlu θ mezi rovinou polarizace vstupujícího svazku a propustnou osou analyzátoru

$$I = I_0 \cos^2 \theta, \quad (2)$$

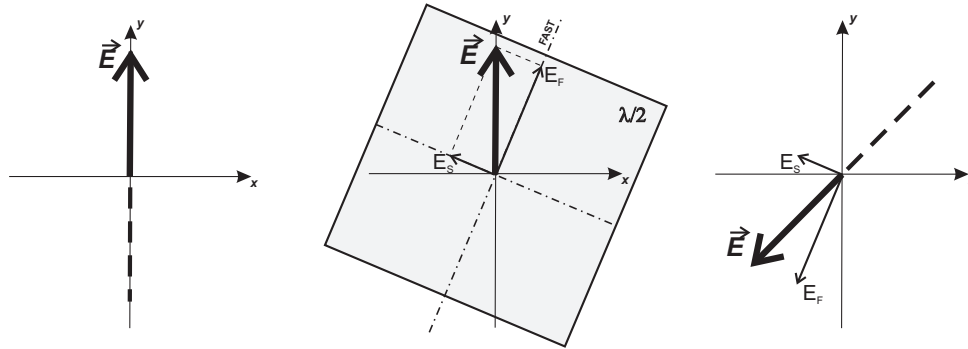
kde intenzita vstupního svazku je I_0 (předpokládá se zde zidealizovaný případ nulové absorpce uvnitř analyzátoru). Tento vztah je znám jako **Malusův zákon**.

Manipulace s polarizovaným světlem

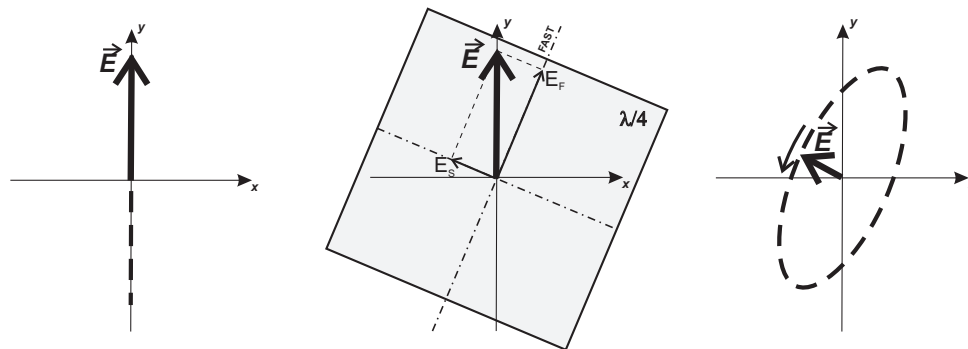
Z polarizačních prvků, nás kromě lineárního polarizátoru bude dále zajímat *čtvrtvlnná* a *půlvlnná destička*, označované souhrnně jako *retardátory*.

Retardátory jsou založeny na dvojlomu v anizotropních materiálech. Při vhodném nastavení se každá ze složek vektoru \vec{E} šíří stejným směrem ale s odlišnou rychlostí, takže jejich vzájemný fázový posun se na výstupu změní o $\Delta\delta$. V případě $\Delta\delta = \pi$ se jedná o půlvlnnou neboli $\lambda/2$ destičku, která způsobuje změnu směru rotace vektoru \vec{E} a zrcadlové překlopení opisované elipsy, resp. úsečky, podél jedné ze složek. Dá se tedy použít například ke změně směru rotace kruhově polarizovaného světla nebo k natočení roviny lineárně polarizovaného světla (viz. Obrázek 2).

Dojde-li uvnitř retardátoru ke zpoždění jedné ze složek vůči druhé o $\Delta\delta = \pi/2$ jedná se o čtvrtvlnnou neboli $\lambda/4$ destičku. Ta umožňuje měnit polarizaci procházejícího světla z eliptické, resp. kruhové, na lineární a naopak. Závisí přitom ovšem na vzájemné orientaci polarizační roviny vstupujícího světla a optické osy prvku (viz. Obrázek 3).



Obrázek 2: Manipulace s lineárně polarizovaným světlem pomocí půlvlnné destičky. Složka vektoru \vec{E} kmitající ve směru osy retardátoru označené jako FAST je po průchodu destičkou posunuta o $\Delta\delta = \pi$ vpřed.



Obrázek 3: Transformace lineárně polarizovaného světla na světlo s obecnou eliptickou polarizací. Podobně jako u půlvlnné destičky je složka kmitající ve směru osy FAST posunuta vpřed. Zde však pouze o $\Delta\delta = \frac{\pi}{2}$.

Kombinací lineárního polarizačního filtru a čtvrtvlnné destičky lze získat z nepolarizovaného světla světlo s kruhovou polarizací - *kruhový polarizační filtr*. Propustná osa lineárního polarizátoru musí být orientována pod úhlem 45° , resp. -45° , vůči osám retardátoru s tím, že každá ze dvou variant nastavení vede k jinak orientované kruhové polarizaci. Z tohoto důvodu je osa retardátoru v jejímž směru dochází k posunu fáze odpovídající složky vpřed označena jako FAST.

Z uvedeného principu je zřejmé, že správná funkce retardátorů vyžaduje použití světla o vlnové délce, pro kterou jsou navrženy.

Na principu dvojlomu jsou založeny i prvky zvané *depolarizátory*, které vytvářejí pseudo-depolarizované světlo. V rámci praktika je k dispozici depolarizátor klínový (wedge depolarizer), který je tvořen dvěma klíny v optickém kontaktu. V prvním klínu, tvořeném dvojlomným krystalickým křemenem, dochází k rozkladu vstupujícího svazku na dva svazky. Jeden z nich je na výstupu lineárně polarizován ve směru optické osy krystalu, druhý ve směru kolmém. Protože se každý ze svazků láme vlivem odlišného indexu lomu pod mírně odlišným úhlem, následuje druhý klín, který srovnává směr šíření obou svazků. “Depolarizované” světlo na výstupu z depolarizátoru je tedy tvořeno dvěma svazky se vzájemně kolmou lineární polarizací. Výsledný efekt závisí na typu polarizace vstupujícího světla a orientaci optické osy dvojlomného klínu vůči vstupujícímu svazku. Optická osa dvojlomného klínu je orientovaná tak, že svírá úhel 45° s gradientem tloušťky klínu.

Stupeň polarizace

K přesnému určení stupně polarizace je potřeba naměřit tzv. *Stokesovy parametry* [1]. Bude k tomu zapotřebí lineárního polarizačního filtru a $\lambda/4$ destičky. Tyto dva prvky použijeme tak, abychom z měřeného svazku propustili vždy pouze jeho část o určité polarizaci. Abychom mohli určit zastoupení jednotlivých typů polarizace v neznámém záření, potřebujeme pro každý světelný zdroj změřit následující intenzity:

1) I_{0° pro lineárně polarizované světlo s rovinou polarizace svírající úhel 0° s osou x (viz. Obrázek č.1).

2) I_{90° , I_{45° a I_{135° pro lineárně polarizované světlo s rovinou polarizace svírající s osou x úhly 90° , 45° a 135° .

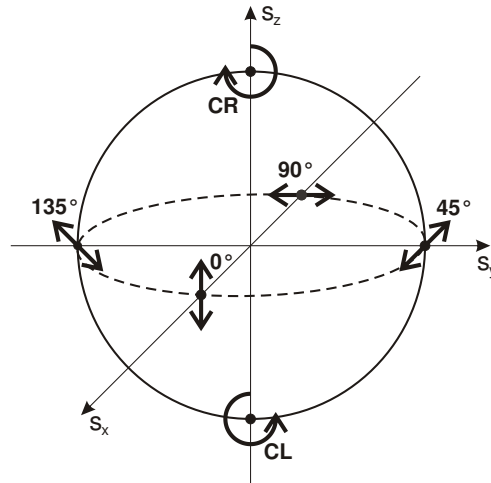
3) I_{CR} a I_{CL} pro světlo s kruhovou polarizací pravotočivou a levotočivou. Zde je potřeba sestavit kruhový polarizační filtr tak, aby ze vstupního svazku s neznámou polarizací propustil vždy pouze jednu z obou kruhových polarizací a druhou zachytil.

Hledané Stokesovy parametry určíme z následujících vztahů

$$\begin{aligned} s_0 &= I_{0^\circ} + I_{90^\circ}, \\ s_1 &= I_{0^\circ} - I_{90^\circ}, \\ s_2 &= I_{45^\circ} - I_{135^\circ}, \\ s_3 &= I_{CR} - I_{CL}. \end{aligned} \quad (3)$$

S jejich pomocí je stupeň polarizace definován jako

$$P = \frac{\sqrt{s_1^2 + s_2^2 + s_3^2}}{s_0}. \quad (4)$$



Obrázek 4: Poincarého koule, s jejíž pomocí lze určit typ polarizace na základě normalizovaných Stokesových parametrů. Naznačené směry kmitajícího vektoru elektrického pole \vec{E} odpovídají pohledu proti směru šíření světla.

Užitečný způsob grafické reprezentace naměřených hodnot nabízí tzv. *Poincarého koule* (viz. Obrázek 4). S pomocí normovaných Stokesových parametrů lze definovat vektor

$$\vec{S} = (s_x, s_y, s_z) = \frac{1}{s_0}(s_1, s_2, s_3). \quad (5)$$

Vektor \vec{S} je v případě zcela nepolarizovaného světla nulový, v případě zcela polarizovaného světla leží na jednotkové kulové ploše a podle jeho umístění lze určit typ polarizace. V průniku kulové plochy s rovinou xy , tj. pro $s_z = 0$, leží světlo s lineární polarizací, jejíž orientace je zřejmá z Obrázku 4 nebo ji lze odvodit ze vztahů (3) definujících Stokesovy parametry. Podobně na vrcholech kulové plochy, tj. pro $s_x = s_y = 0$, leží světlo s kruhovou polarizací, jejíž orientace opět plyne např. ze vztahů (3). Mimo tyto oblasti reprezentuje povrch Poincarého koule světlo s obecnou eliptickou polarizací.

V případě nepolarizovaného světla pak lze prodloužením vektoru \vec{S} určit, jaký typ polarizace má jeho zcela polarizovaná část¹.

2 Zadání úlohy

Cíle úlohy

Získání praktických zkušeností s polarizací, jako s jednou z vlastností elektromagnetického záření. Zvládnutí manipulace s polarizovaným světlem pomocí základních polarizačních prvků.

Pomůcky

Během úlohy budou k dispozici následující pomůcky: lineárně polarizovaný He-Ne laser (632 nm), laserové ukazovátko (632 nm), 2 zrcátka, dichroický polarizační filtr (polarizační fólie), Glan-Thompsonův polarizační hranol, čtvrtvlnná destička pro $\lambda = 632$ nm, půlvlnná destička pro $\lambda = 632$ nm, klínový depolarizátor, plastová fólie, detektor optického výkonu, stojánky k uchycení prvků.

Postup měření

1. Zjištění polarizace laseru

Jako zdroj světla bude v úloze použit He-Ne laser, jehož svazek je lineárně polarizovaný. Máte k dispozici lineární polarizační filtr (dichroický) s neznámou osou propustnosti. S využitím některého z jevů uvedených v teoretické části úlohy nejprve přibližně určete směr této osy. Poté zjistěte, je-li rovina polarizace laserového svazku orientovaná vertikálně nebo horizontálně.

2. Ověření Malusova zákona

S pomocí lineárně polarizovaného svazku He-Ne laseru ověřte platnost Malusova zákona. Jako analyzátor použijte Glan-Thompsonův hranol jehož osa propustnosti prochází na otočné stupnici hodnotami 0° a 180° . Určete vlastní absorpci analyzátoru.

3. Změna lineární polarizace na kruhovou

Pomocí polarizačního retardátoru změňte lineární polarizaci laserového svazku na kruhovou pravotočivou. Výsledek ověřte vložení analyzátoru do kruhově polarizovaného svazku a proměření výstupní intenzity během jeho natáčení. Určete vlastní absorpci retardátoru.

4. Natočení roviny polarizace

Pomocí polarizačního retardátoru natočte rovinu polarizace laserového svazku o $+40^\circ$.

5. Depolarizace svazku

Do svazku s lineární polarizací vložte lineární polarizační filtr tak, aby jeho propustná osa byla kolmá na rovinu polarizace svazku. Poté před něj zařaďte klínový depolarizátor a sledujte změnu intenzity svazku za polarizačním filtrem, budete-li s depolarizátorem natáčet. Při maximální hodnotě prošlé intenzity zkuste otáčet polarizačním filtrem a opět pozorujte změnu intenzity prošlého svazku. Stejný proces opakujte i pro svazek s kruhovou polarizací.

6. Určení stupně polarizace

S pomocí Stokesových parametrů určete stupeň polarizace používaného He-Ne laserového svazku a laserového ukazovátko. Stejným způsobem určete vliv depolarizátoru (při jeho

¹V prvním odstavci bylo zmíněno, že každé světlo lze rozdělit na zcela polarizovanou a zcela nepolarizovanou část

optimálním natočení) a fólie na stupeň a typ polarizace laserového svazku. Rozmyslete si předem uspořádání $\lambda/4$ destičky a lineárního polarizátoru pro naměření intenzit I_{CR} a I_{CL} .

3 Požadované výsledky

1. Popište metodu určení neznámého směru osy propustnosti lineárního polarizačního filtru a určete orientaci roviny polarizace laserového svazku.
2. Uveďte hodnoty intenzity světla naměřené za analyzátozem pro úhly $\theta \in \langle -\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2} \rangle$ (viz. vztah (2)). Naměřené hodnoty vynesete do grafu a proložte křivkou podle Malusova zákona. Uveďte vlastní absorpci analyzátozu. Pokuste se vysvětlit případné odchylky naměřených dat od teoretických hodnot.
3. Popište funkci a nastavení zvoleného retardátoru. Znázorněte funkci retardátoru graficky. Uveďte hodnoty maxima a minima intenzity za analyzátozem a orientaci kruhové polarizace. Uveďte vlastní absorpci zvoleného retardátoru.
4. Popište funkci zvoleného retardátoru. Popište proces jeho nastavení a výsledné uspořádání opět doprovodte obrázkem.
5. Popište a pokuste se vysvětlit svá pozorování týkající se vlivu rotace depolarizátoru na vstupující svazek s lineární a s kruhovou polarizací.
6. Popište uspořádání prvků pro měření intenzit I_{CR} a I_{CL} . Uveďte typ a stupeň polarizace příslušející He-Ne laseru a laserovému ukazovátku. Uveďte jak se změní vlastnosti svazku He-Ne laseru vložem depolarizátoru a poté vložem fólie. (Pro vyhodnocování výsledků a vykreslení daného zdroje na Poincarého kouli můžete využít funkci `poincaresphere.m.`)

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