

Polarizace světla

Jan Soubusta, Antonín Černoch

Společná laboratoř optiky UP a FZÚ AV ČR, v.v.i.

17. září 2017



- 1 Motivace
- 2 Popis polarizace
- 3 Transformace polarizace
- 4 Měření polarizace
- 5 Depolarizace

Obsah

- 1 Motivace
- 2 Popis polarizace
- 3 Transformace polarizace
- 4 Měření polarizace
- 5 Depolarizace

Motivace

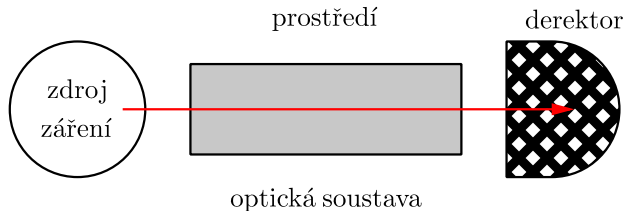
Kde potkáme polarizované světlo

- laserové záření
- odraz na optickém rozhraní
- monitory LCD
- 3D kino

Co ovlivňuje polarizace

- **interferenci** světelných svazků
- **oddělení signálu od šumu** (např. při fotografii)
- rozlišení detailů – generace speklů

Optická soustava



Zdroje polarizovaného světla

- většina laserů
- filtrace nepolarizovaného světla polarizátorem

Vliv prostředí, kterým se svazek šíří

Šířením světla volným prostorem

- polarizace se samovolně nemění
- ke změně dochází na určitých optických prvcích (dvojlomné materiály, optická rozhraní podle Fresnelových vztahů aj.)

Šíření světla optickým vláknem

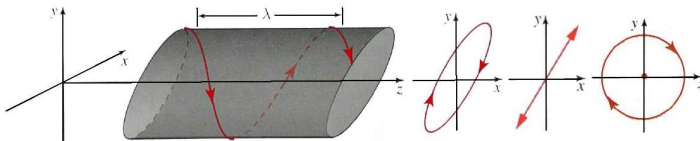
- standardní vlákna polarizaci nezachovávají, změna polarizace vlivem pnutí v místech ohybu (**dvojlom** – světlo polarizované v rovině ohybu cítí jiný index lomu, než světlo polarizované kolmo)
- smyčka vlákna o správném poloměru může sloužit jako fázová destička ($\lambda/4$, $\lambda/2$)
- vlákna zachovávající polarizaci – asymetrické jádro vlákna

Obsah

- 1 Motivace
- 2 Popis polarizace**
- 3 Transformace polarizace
- 4 Měření polarizace
- 5 Depolarizace

Rovinná monochromatická vlna

Polarizaci určuje časový vývoj polohy vektoru elektrické intenzity $\vec{E}$ v rovině kolmé ke směru šíření.



Trajektorie koncového bodu $\vec{E}$

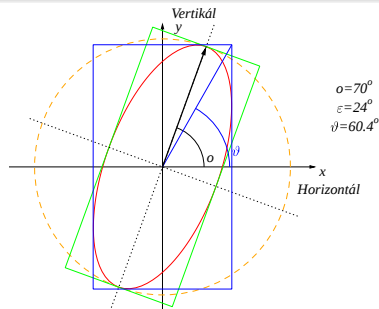
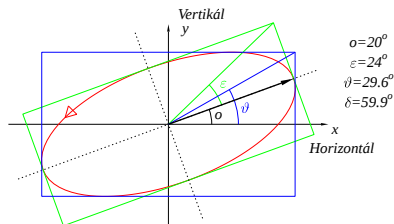
pravidelná dráha $\Rightarrow$ polarizované záření

pravidelná dráha s odchylkami $\Rightarrow$ částečně polarizované záření

náhodná trajektorie $\Rightarrow$ nepolarizované záření

Komplexní zápis rovinné vlny

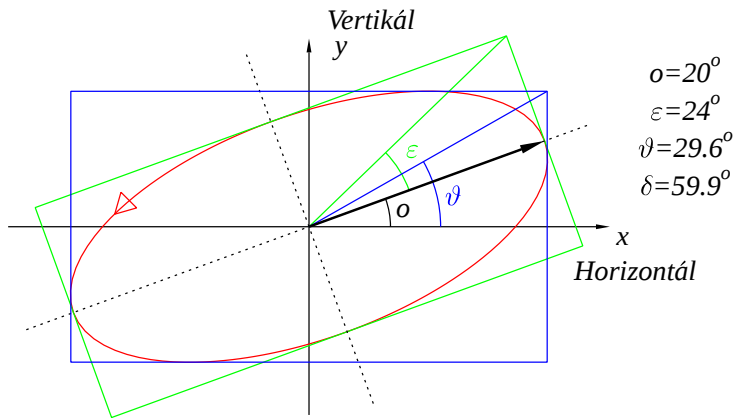
$$E_0 e^{i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)}$$



Laboratorní soustava: horizontální (x) a vertikální (y) složka pole $\Rightarrow \vartheta, \delta$

Vlastní soustava: daná osami polarizační elipsy $\Rightarrow \sigma, \varepsilon$

Směr šíření světla: osa (z), směřuje směrem z obrázku,
t.j. díváme se proti šířícímu se svazku.



Zápis elektromagnetické vlny ve složkách x, y

$$\begin{cases} E_x(t) = A_x \cos(\omega t) \\ E_y(t) = A_y \cos(\omega t - \delta) \end{cases}, \quad \tan \vartheta = \frac{A_y}{A_x}$$

Popis pomocí polarizační elipsy

Zápis elektromagnetické vlny ve složkách x, y

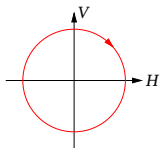
$$\begin{cases} E_x(t) = A_x \cos(\omega t) \\ E_y(t) = A_y \cos(\omega t - \delta) \end{cases}, \quad \tan \vartheta = \frac{A_y}{A_x}$$

	ϑ	δ	ϕ	ε	s_1	s_2	s_3
H	0	.	0	0	1	0	0
V	90	.	90	0	-1	0	0
45	45	0	45	0	0	1	0
135	45	180	135	0	0	-1	0
R	45	-90	.	-45	0	0	-1
L	45	90	.	45	0	0	1

úhly jsou
ve stupních

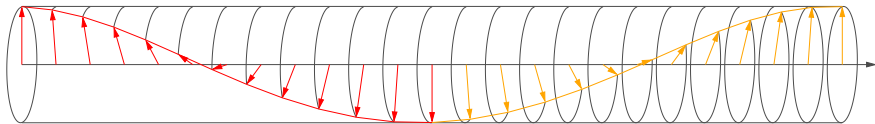
$$\begin{aligned} \vartheta &\in \langle 0, 90 \rangle \\ \delta &\in (-180, 180) \\ \phi &\in (-90, 90) \\ \varepsilon &\in \langle -45, 45 \rangle \end{aligned}$$

- Levotočivá: $\delta > 0, \varepsilon > 0$
- Pravotočivá: $\delta < 0, \varepsilon < 0$



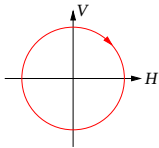
Pravotočivá kruhová polarizace R

$$\delta = -\pi/2$$



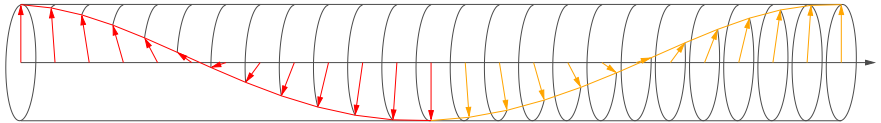
V jedné konkrétní rovině řezu opisuje koncový bod vektoru pole **kružnici ve směru hodinových ručiček**.

Prostorové rozložení vektorů pole v jednom časovém okamžiku vytváří šroubovici s pravotočivým stoupáním.



Pravotočivá kruhová polarizace R

$$\delta = -\pi/2$$



V jedné konkrétní rovině řezu opisuje koncový bod vektoru pole **kružnici ve směru hodinových ručiček**.

Prostorové rozložení vektorů pole v jednom časovém okamžiku vytváří **šroubovici s pravotočivým stoupáním**.

Jonesův vektor

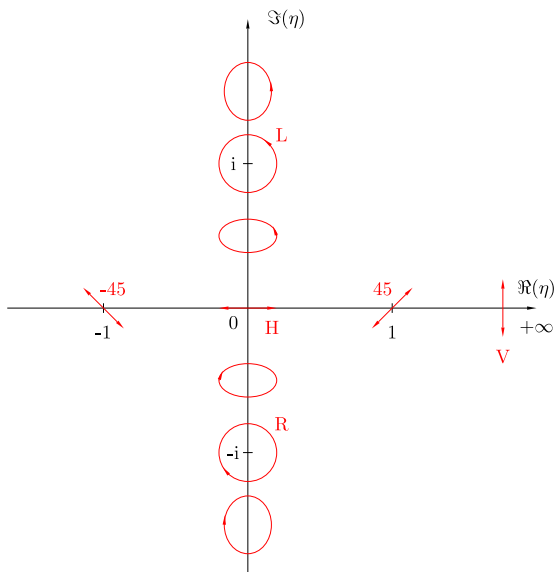
Definice Jonesova vektoru obecné eliptické polarizace

$$\vec{J}(\vartheta, \delta) = \begin{bmatrix} J_{1,x,H} \\ J_{2,y,V} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\vartheta) \\ \sin(\vartheta)e^{i\delta} \end{bmatrix}$$

Alternativně se používá také komplexní parametr polarizace

$$\eta \equiv \frac{J_2}{J_1} = \tan(\vartheta)e^{i\delta}$$

	H	V	$D(45)$	$A(135)$	R	L
J	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}$	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix}$	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ -i \end{bmatrix}$	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ i \end{bmatrix}$
η	0	∞	1	-1	-i	i



V čem je problém?

Pracuje se tu s nekonečnem.

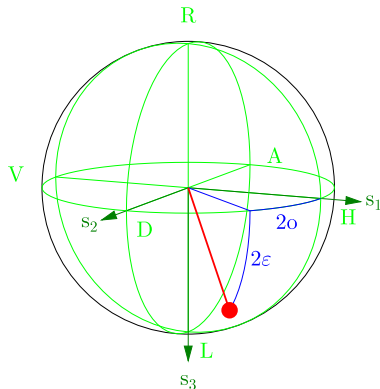
Stokesův vektor

Složky Stokesova vektoru se dají vypočítat z parametrů polarizační elipsy.

$$\mathbf{s} = \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ s_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(2\vartheta) \\ \sin(2\vartheta) \cos(\delta) \\ \sin(2\vartheta) \sin(\delta) \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \cos(2\varepsilon) \cos(2\phi) \\ \cos(2\varepsilon) \sin(2\phi) \\ \sin(2\varepsilon) \end{bmatrix}$$

Stokesův vektor 100% polarizovaného světla leží na povrchu koule –
Poincarého sféra.



Obsah

- 1 Motivace
- 2 Popis polarizace
- 3 Transformace polarizace**
- 4 Měření polarizace
- 5 Depolarizace

Popis obecné fázové destičky

Maticový popis

Polarizační stav popíšeme Jonesovým vektorem.

Průchod fázovou destičkou odpovídá násobení maticí (2×2).

$$\vec{J}_{out} = \mathbf{W}(\psi, \Gamma) \vec{J}_{in}$$

$$\mathbf{W}(\psi, \Gamma) = \begin{bmatrix} \cos(\psi) & -\sin(\psi) \\ \sin(\psi) & \cos(\psi) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} e^{+i\Gamma/2} & 0 \\ 0 & e^{-i\Gamma/2} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos(\psi) & \sin(\psi) \\ -\sin(\psi) & \cos(\psi) \end{bmatrix}$$

- Pro $\psi = 0^\circ$ je pomalá osa orientovaná horizontálně a rychlá osa vertikálně.
- Pro fázové destičky se udává Γ obvykle ve zlomcích vlnové délky, pro níž je destička určená, např. $\lambda/4$ @826 nm, $\lambda/2$ @710 nm.

Obsah

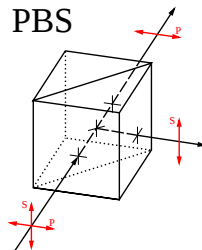
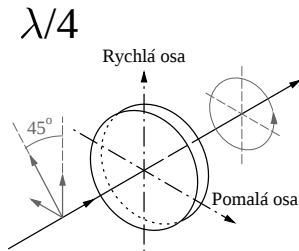
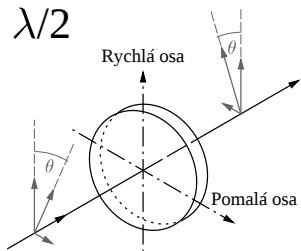
- 1 Motivace
- 2 Popis polarizace
- 3 Transformace polarizace
- 4 Měření polarizace**
- 5 Depolarizace

Měření 6-ti báзовých projekcí

- 2 fázové destičky
- polarizační dělič
- detektor

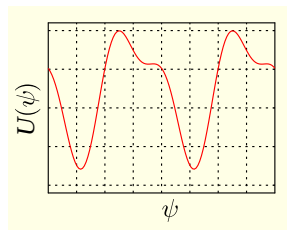
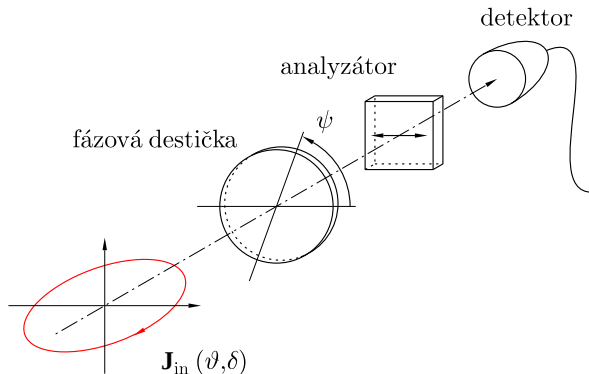
Nastavení úhlů pro polarizační analýzu

	H	V	D	A	L	R
$\lambda/4$	0	0	45	-45	0	0
$\lambda/2$	0	45	22.5	-22.5	-22.5	22.5



Měření polarimetrem

Polarimetr PA450 Thorlabs

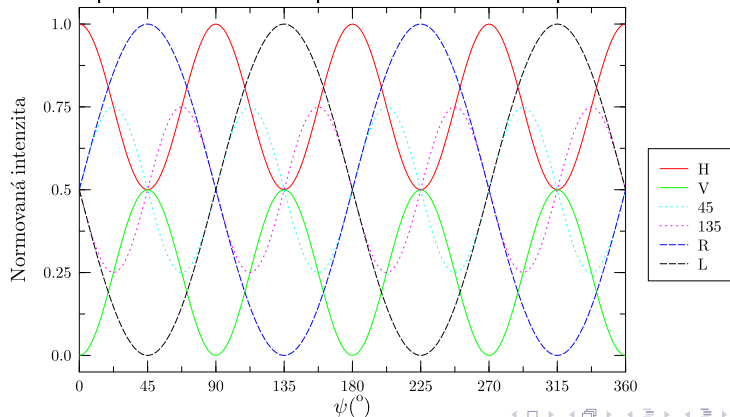


Závislost měřeného fotonapětí na úhlu otočení $\lambda/4$ destičky je funkce, kterou lze **jednoznačně přiřadit** k vstupní polarizaci.

Analýza fotonapětí

$$I_{\vartheta,\delta}(\psi) = \frac{1}{2} \left[s_0 + \frac{1}{2} s_1 \right] - \frac{1}{2} \left[s_3 \right] \sin(2\psi) + \frac{1}{4} \left[s_2 \right] \sin(4\psi) + \frac{1}{4} \left[s_1 \right] \cos(4\psi)$$

Závislost napětí na detektoru pro šest základních polarizačních stavů.



Obsah

- 1 Motivace
- 2 Popis polarizace
- 3 Transformace polarizace
- 4 Měření polarizace
- 5 Depolarizace**

Popis částečné polarizace

Poincarého parametry:

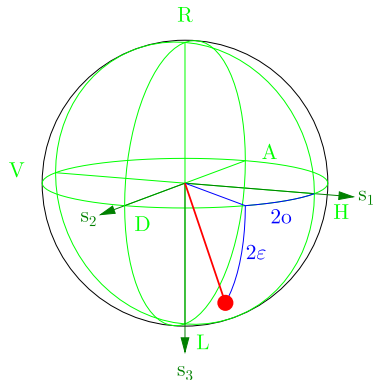
$$P_0 = I_H + I_V, \quad P_1 = I_H - I_V,$$

$$P_2 = I_D - I_A, \quad P_3 = I_L - I_R$$

Stokesovy parametry: $S_i = \frac{P_i}{P_0}$

Stupeň polarizace:

$$p = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^3 P_i^2}}{P_0} = \sqrt{\sum_{i=1}^3 S_i^2}$$

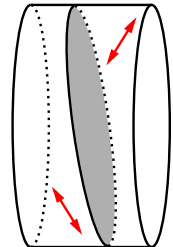
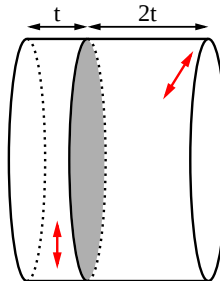
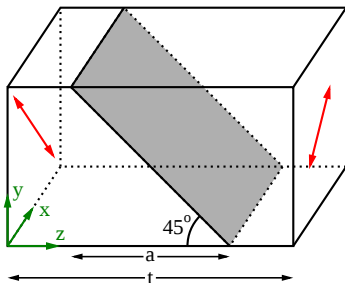


- úplně polarizované záření: $p = 1$
- částečně polarizované záření: $0 < p < 1$
- nepolarizované záření: $p = 0$

Metody pasivní depolarizace

Různá polarizace v různých místech profilu svazku

- Cornuův depolarizátor - posuv fáze $\delta(y) = \frac{2\pi}{\lambda}(n_2 - n_1)(2y - a)$
- Lyotův depolarizátor - jen pro polychromatické záření
- Klínové depolarizátory: quartz-silica, quartz-quartz (quartz - krystalický křemen, silica - křemenné sklo)



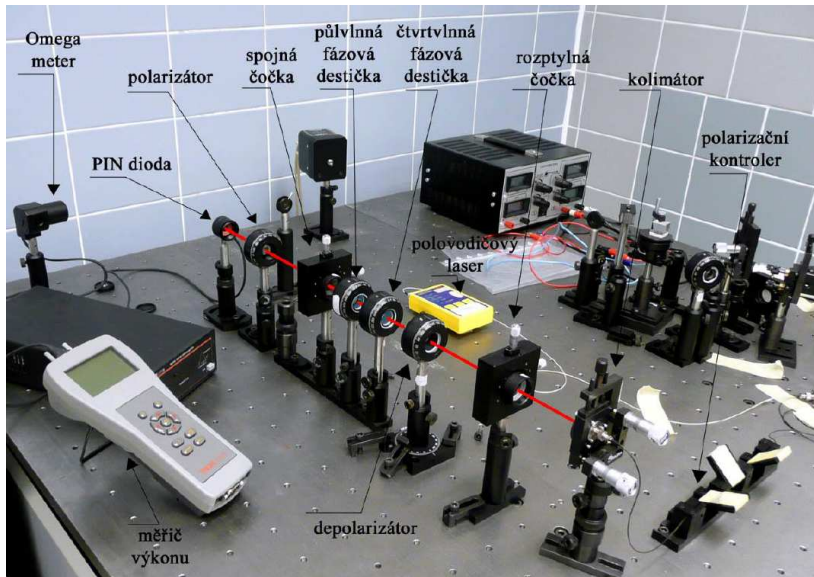
Metody aktivní depolarizace

Prostředí, které mění polarizační stav s rychlostí větší, než je rozlišovací schopnost detektoru.

Platformy

- Fázová destička - rotace popř. náklon
- Pockelsova cela - změna přikládaného napětí
- Elektrický polarizační vláknový kontroler - změna přikládaných napětí
- Optické vlákno - zavěšené na oscilující kyvadla
- LCD
- Nematické krystaly
- a mnoho dalších ...

Fotografie měřicí aparatury



Závěr

- máme polarizované světlo, potřebujeme nepolarizované
- máme nepolarizované, potřebujeme polarizované

Využití polarizovaného světla

- přenos informace
- kvantová informatika
- 3D kino
- a mnoho dalších ...