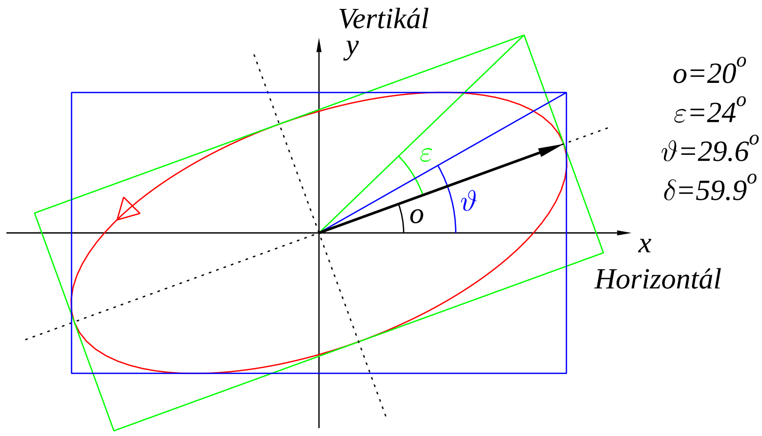
4. Polarizace světla

Polarizace světla nás bude zajímat např. tehdy, pokud budeme stavět nějaké optické zařízení, kde dochází k interferencí světelných svazků. Pro dosažení vysokého stupně vizibility, je třeba mít pod kontrolou nejen intenzitu interferujících svazků, ale také polarizaci. Práce s polarizací nám také může umožnit oddělení požadovaného signálu od okolního šumu.

Zdroj: Kdy pracujeme s polarizovaným světlem? Buď máme zdroj, který vyzařuje polarizované světlo, nebo můžeme použít polarizátor a původně nepolarizované světlo zpolarizovat.

Prostředí: Budeme se zabývat dvěma případy,

- šířením světla volným prostorem Zde se polarizace samovolně nemění, ke změně může dojít pouze na vestavěných optických prvcích.
- šíření světla optickým vláknem Standardní vlákna polarizaci nezachovávají, polarizační stav se mění během šíření ve vlákně. Pokud je vlákno ohnuté, dochází v ohybu k pnutí a indukuje se v něm dvojlom. Díky tomu světlo polarizované v rovině ohybu cítí jiný index lomu, než světlo polarizované kolmo. Smyčka vlákna o správném poloměru může sloužit jako fázová destička ($\lambda/4$, $\lambda/2$).



Obrázek 1: Polarizační elipsa pro levotočivou polarizaci.

Polarizační stav světla popíšeme tak, jak ukazuje obr. 1. V laboratorní soustavě máme definovanou horizontální (x) a vertikální (y) rovinu. Směr šíření světla je osa (z), která směřuje směrem z obrázku. T.j. díváme se proti šířícímu se svazku. Nyní je třeba si definovat komplexní zápis rovinné vlny. Zvolíme jednu možnou definici

$$Ae^{\imath(\mathbf{k}.\mathbf{r}-\omega t)}. \tag{1}$$

Pokud zvolíme znaménko v exponenciele obráceně, budeme muset změnit tyto hodnoty:
znaménko označení pravotočivá / levotočivá polarizace;
Fourierovu transformaci pro přechod ke spektru;
imaginární hodnotu komplexního indexu lomu, popis absorpce;

Tabulka 1: Parametry elipsy pro různé polarizace (úhly jsou ve stupních).

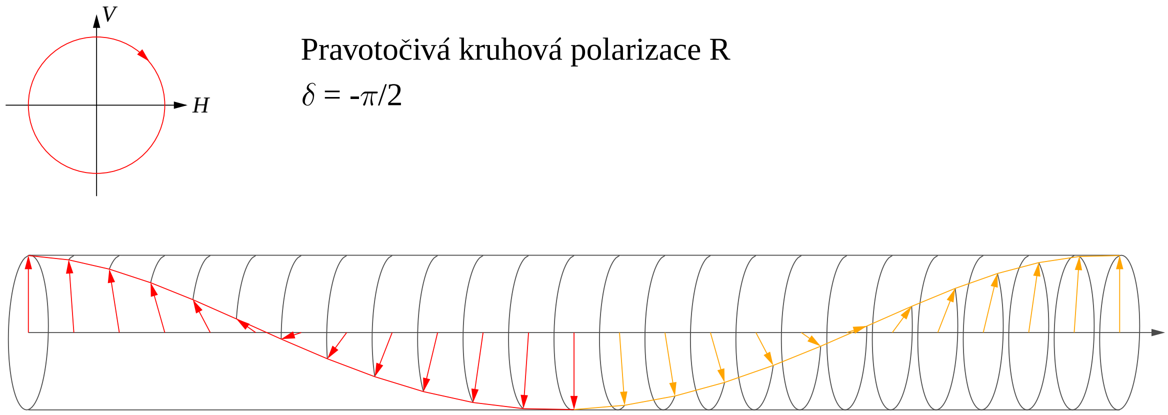
	ϑ	δ	o	ε	s_1	s_2	s_3
H	0	.	0	0	1	0	0
V	90	.	90	0	-1	0	0
D(45)	45	0	45	0	0	1	0
A(135)	45	180	135	0	0	-1	0
R	45	-90	.	-45	0	0	-1
L	45	90	.	45	0	0	1

$\vartheta \in \langle 0, 90\rangle$

$\delta \in (-180, 180\rangle$

$o \in (-90, 90\rangle$

$\varepsilon \in \langle -45, 45\rangle$



Obrázek 2: Stopa koncového bodu vektoru intenzity elektrického pole pro případ pravotočivé kruhové polarizace: v konstantním bodě (nahoře), v konstantním čase (dole).

4.1. Popis pomocí polarizační elipsy

Pro popis polarizace elektromagnetické vlny používáme vektor elektrické intenzity **E**, nebo elektrické indukce **D**. Indukce se používá v anizotropních prostředích, neboť vektor elektrické indukce **D** je vždy kolmý na vektor **k**. V izotropních materiálech, kde je $\mathbf{D} \parallel \mathbf{E}$ se často používá k popisu elektrická intenzita. Složky tohoto vektoru se ve zvoleném počátku souřadnic vyvíjí podle

$$\begin{cases} E_x(t) = A_x \cos(\omega t) \\ E_y(t) = A_y \cos(\omega t - \delta) \end{cases} , \qquad \tan\vartheta = \frac{A_y}{A_x} \tag{2}$$

Pro obecnou eliptickou polarizaci koncový bod vektoru **E** opisuje elipsu, viz obr. 1. Lineární polarizace má $\delta = 0$, levotočivá $\delta > 0$ a pravotočivá $\delta < 0$. Polarizační stav lze popsat také pomocí směru hlavní poloosy elipsy o a úhlu charakterizujícím elipticitu ε. Lineární polarizace má $\varepsilon = 0$, levotočivá $\varepsilon > 0$ a pravotočivá $\varepsilon < 0$. Tyto úhly jsou pro základní druhy polarizace uvedeny v tab. 1.

Obrázek 2 znázornění směru vektoru elektrického pole v různých místech podél osy šíření svazku. Pravotočivá polarizace odpovídá tomu, že v jedné konkrétní rovině opisuje koncový bod vektoru pole kružnici ve směru hodinových ručiček. Pokud se podíváme na prostorové rozložení vektorů pole v prostoru v jednom časovém okamžiky, vytváří tyto body šroubovici s pravotočivým stoupáním.

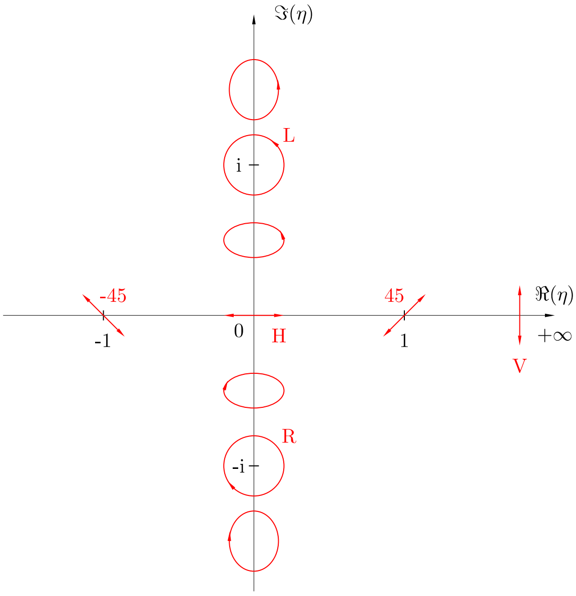
4.2. Jonesův vektor, komplexní parametr polarizace

Definice Jonesova vektoru obecné eliptické polarizace:

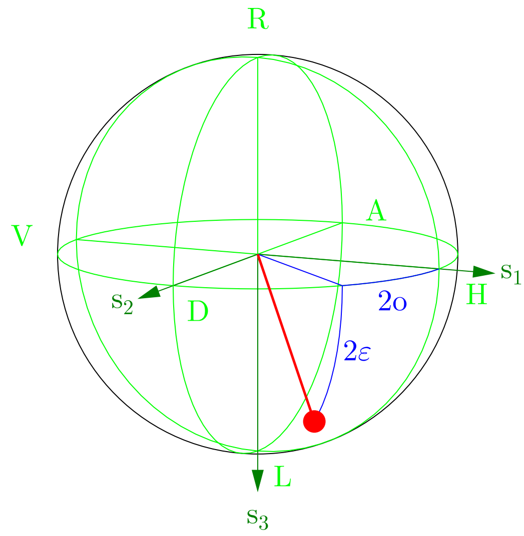
$$\mathbf{J}(\vartheta, \delta) = \begin{bmatrix} J_{1,x,H} \\ J_{2,y,V} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\vartheta) \\ \sin(\vartheta)\mathrm{e}^{\imath\delta} \end{bmatrix} \tag{3}$$

Někdy se pro popis polarizace používá také komplexní parametr polarizace η. Jak ukazuje následující obrázek, je v počátku horizontální lineární polarizace, na vodorovné ose jsou lineární polarizace, v horní polorovině levotočivé, v dolní polorovině pravotočivé. Vertikální polarizace je limitou v nekonečnu. η je definovaný pomocí vztahu:

$$\eta \equiv \frac{J_2}{J_1} = \tan(\vartheta)\mathrm{e}^{\imath\delta} \tag{4}$$



Komplexní parametr polarizace η.



Stokesův vektor na Poincarého sféře.

Tabulka 2: Parametry polarizace.

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

4.3. Výpočet vlivu fázové destičky

Při šíření svazku systémem fázových destiček je vhodné použít maticový přístup, kdy polarizační stav popíšeme Jonesovou maticí a průchod fázovou destičkou reprezentujeme matematicky transformací Jonesova vektoru, násobením maticí odpovídající příslušné destičce. Jonesova matice fázové destičky se zpožděním Γ otočené o úhel ψ je:

$$\mathbf{W}(\psi,\Gamma) = \begin{bmatrix} \cos(\psi) & -\sin(\psi) \\ \sin(\psi) & \cos(\psi) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} e^{+\imath\Gamma/2} & 0 \\ 0 & e^{-\imath\Gamma/2} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos(\psi) & \sin(\psi) \\ -\sin(\psi) & \cos(\psi) \end{bmatrix} \tag{5}$$

Pro $\psi = 0^o$ 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. $\lambda/4$, $\lambda/2$. Výslednou polarizaci za touto fázovou destičkou lze spočítat jako $\mathbf{J}_{out} = \mathbf{W}(\psi,\Gamma)\mathbf{J}_{in}$

4.4. Popis polarizace pomocí Stokesova vektoru

Složky Stokesova vektoru se dají vypočítat z obou druhů parametrů polarizační elipsy.

$$\mathbf{s} = \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ s_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(2\vartheta) \\ \sin(2\vartheta)\cos(\delta) \\ \sin(2\vartheta)\sin(\delta) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(2\varepsilon)\cos(2o) \\ \cos(2\varepsilon)\sin(2o) \\ \sin(2\varepsilon) \end{bmatrix} \tag{6}$$

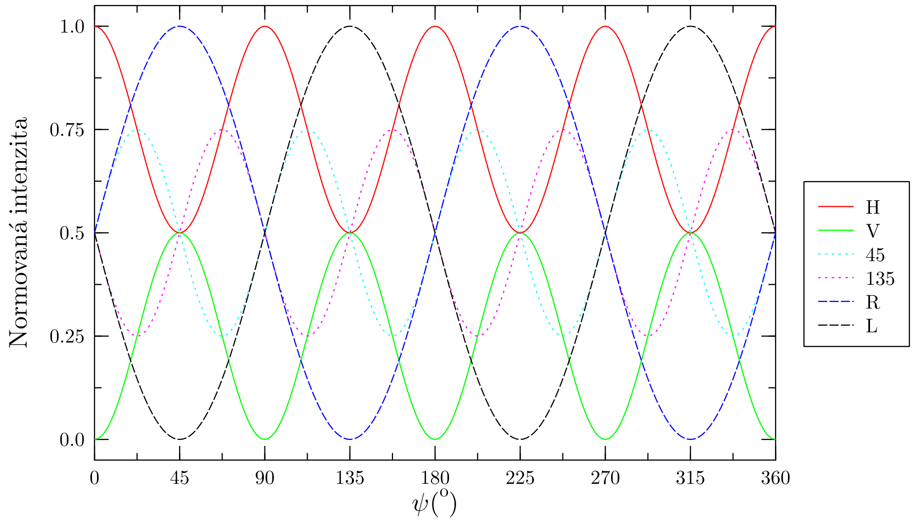
Stokesův vektor 100% polarizovaného světla leží na povrchu koule (Poincarého sféra). Světlo s nižším stupněm polarizace leží uvnitř této koule. Nepolarizované světlo má nulový vektor.

Polarimetr je zařízení, které je schopné určit polarizaci vstupního světla. Měření provádí tak, že ve svazku otáčí $\lambda/4$ destičkou, za ní je polarizátor propouštějící pouze horizontální složku a detektor. Závislost měřené intenzity na úhlu otočení $\lambda/4$ destičky je funkce, kterou lze jednoznačně přiřadit k vstupní polarizaci. Tato funkce má tvar daný výrazem:

$$\begin{aligned} I_{\vartheta,\delta}(\psi) &= \frac{1}{2}\left[1+\frac{1}{2}\cos(2\vartheta)\right] - \frac{1}{2}\left[\sin(2\vartheta)\sin(\delta)\right]\sin(2\psi) + \frac{1}{4}\left[\sin(2\vartheta)\cos(\delta)\right]\sin(4\psi) + \\ &+ \frac{1}{4}\left[\cos(2\vartheta)\right]\cos(4\psi). \end{aligned} \tag{7}$$

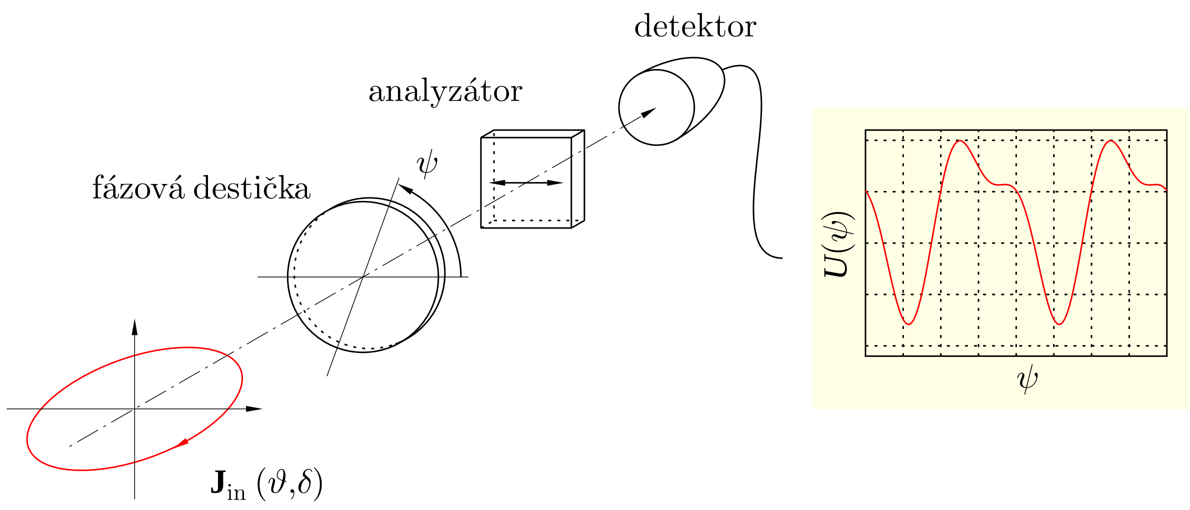
$$I_{\vartheta,\delta}(\psi) = \frac{1}{2}\left[s_0 + \frac{1}{2}s_1\right] - \frac{1}{2}\left[s_3\right]\sin(2\psi) + \frac{1}{4}\left[s_2\right]\sin(4\psi) + \frac{1}{4}\left[s_1\right]\cos(4\psi). \tag{8}$$

Tato funkce je zakreslená v obr. 3 pro šest základních polarizací.



Obrázek 3: Průběh funkce měřené polarimetrem pro šest základních polarizací.

Komerční zařízení, které provádí měření polarizace výše uvedeným způsobem, nabízí např. Thorlabs pod označením PA450. Jeho funkce na zakreslena v obr. 4.



Obrázek 4: Schéma znázorňující funkci polarimetru PA450 Thorlabs.