

Polarizace

Proseminář z optiky

14.10.2021

Informace

- Harmonogram přednášek:

- 30.9.2021 - 1.přednáška: Úvod a představení semináře (Jakub Zázvorka)
Rozdělení skupin pro prezentace témat
- 7.10.2021 - 2.přednáška: Zdroje záření a vyzařování Hertzova dipólu (Jakub Zázvorka)
- **14.10.2021 - 3.přednáška: Kruhová polarizace (Jakub Zázvorka)**
- 21.10.2021 - 4.přednáška: Totální odraz a evanescentní vlna (Jakub Zázvorka)
- 4.11.2021 - 5. přednáška: Optické jevy v atmosféře (Jan Franc)
- 11.11.2021 - 6. přednáška: Barvy (Lukáš Nádvorník)
- 18.11.2021 - 7. přednáška: Interference a difrakce I - Fresnelův integrál (Jakub Zázvorka)
- 25.11.2021 - 8. přednáška: Interference a difrakce II – Babinetův princip (Jakub Zázvorka)
- 2.12.2021 - 9.přednáška: Interference a difrakce III – Interference, antireflexní vrstvy (Jakub Zázvorka)
- 9.12.2021 - 10. přednáška: Prezentace studentských témat
- 16.12.2021 - 11. přednáška: Optické experimenty historického významu pro fyziku (Jan Franc)
- 6.1.2021 - 12. přednáška: týden předtermínů - dohoda se studenty zda přednášku zrušit nebo se dá využít na dohánění restů nebo na experimenty: scintilátory, holografie, Pockelsův jev a další.

Informace

- Témata studentských prezentací a přibližné termíny prezentací:

1. *Optické filtry (21.10)*
absorpční, interferenční a dichroický
-Vojtasová, Kasáček, Mezzer, Benešová
2. *Optické vady (4.11)*
Koma, astigmatismus, aberace, zkreslení, barevná vada
- Toman, Mikloš, Doucha
3. *Bílá LED a detekce záření (11.11)*
Princip, typy, teplota, Bayerova maska, CCD
- Matúš, Kománek, Jurenka
4. *Optická aktivita (18.11)*
- Dizov, ~~Průša~~, Hale
5. *Optická vlákna a využití ke komunikaci (2.12)*
Typy, solarizace, telekomunikace
- Anderle, Plšek, Herman
6. *Princip (konfokální) mikroskopie (2.12)*
7. *3D projekce (9.12)*
Aktivní, pasivní, anaglyf
- Sanitrák, Šmál, Sitko
8. *Fotovoltaický jev (9.12)*
- Novák, Trachta, Kraus
9. *Negativní index lomu (9.12)*
materiály, vlastnosti, použití
- Kamenářová, Jesenský, Divila
10. *Princip laseru a využití (9.12)*
tiskárny a čárové kódy
- Vácha, Krátký, Šrámek
11. *LIGO a LISA - detekce gravitačních vln (9.12.)*
Michelsonův interferometr, přesnost
- Šmahlík, Krtouš
12. *Holografie jako bezpečnostní prvek (16.12)*
- Nováková, Holudička, Šrejbr

Kruhová polarizace

- Polarizační rovina homogenní vlny

$$\widetilde{E}_x = a_x e^{i(kz - \omega t - \delta_x)} \Rightarrow E_x = a_x \cos(\tau - \delta_x)$$

$$\widetilde{E}_y = a_y e^{i(kz - \omega t - \delta_y)} \Rightarrow E_y = a_y \cos(\tau - \delta_y)$$

Kruhová polarizace

- Polarizační rovina homogenní vlny

$$\widetilde{E}_x = a_x e^{i(kz - \omega t - \delta_x)} \Rightarrow E_x = a_x \cos(\tau - \delta_x)$$

$$\widetilde{E}_y = a_y e^{i(kz - \omega t - \delta_y)} \Rightarrow E_y = a_y \cos(\tau - \delta_y)$$

$$\sin(A + B) = \sin A \cos B + \cos A \sin B$$

$$\sin(A - B) = \sin A \cos B - \cos A \sin B$$

$$\cos(A + B) = \cos A \cos B - \sin A \sin B$$

$$\cos(A - B) = \cos A \cos B + \sin A \sin B$$

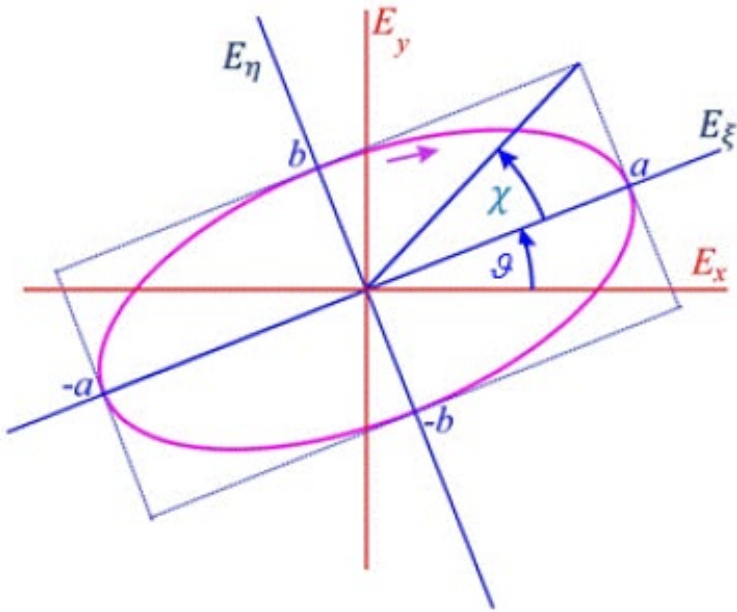
$$\tan(A + B) = \frac{\tan A + \tan B}{1 - \tan A \tan B}$$

$$\tan(A - B) = \frac{\tan A - \tan B}{1 + \tan A \tan B}$$

Kruhová polarizace

- Rovnice elipsy

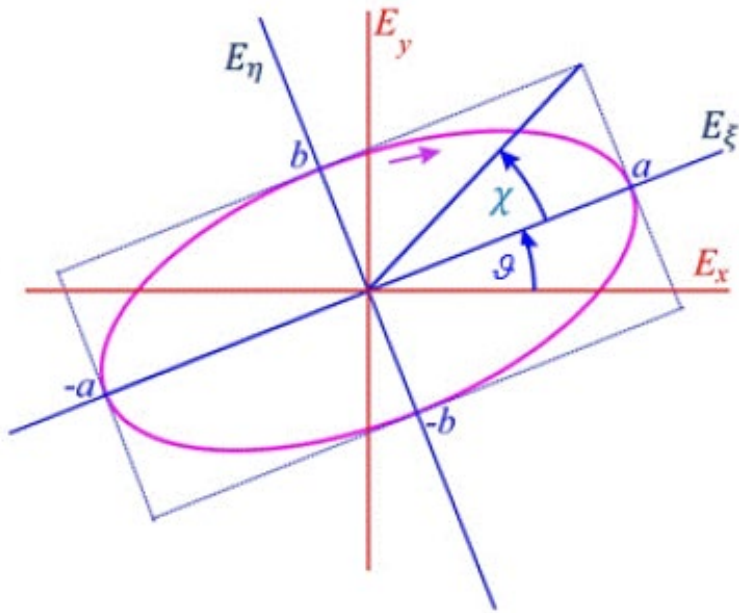
$$\left(\frac{E_x}{a_x}\right)^2 + \left(\frac{E_y}{a_y}\right)^2 - \frac{2 E_x E_y}{a_x a_y} \cos(\delta_y - \delta_x) = \sin^2(\delta_y - \delta_x)$$



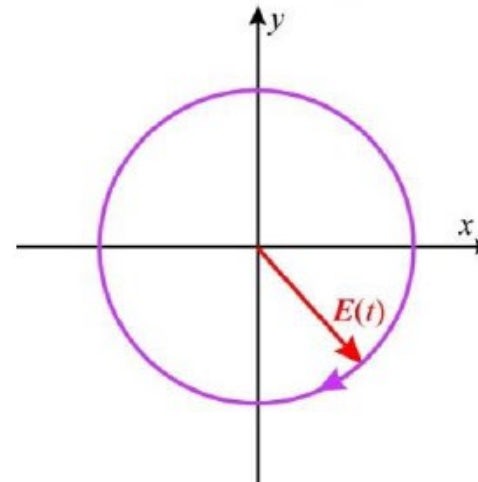
Kruhová polarizace

- Rovnice elipsy

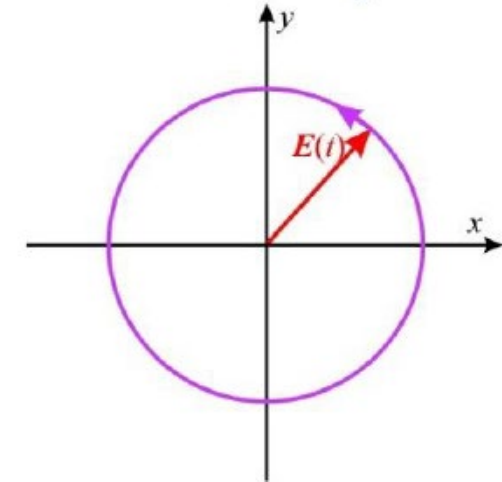
$$\left(\frac{E_x}{a_x}\right)^2 + \left(\frac{E_y}{a_y}\right)^2 - \frac{2 E_x E_y}{a_x a_y} \cos(\delta_y - \delta_x) = \sin^2(\delta_y - \delta_x)$$



Pravotočivě kruhově
polarizovaná vlna
 $a_x = a_y \quad \delta = \frac{\pi}{2}$



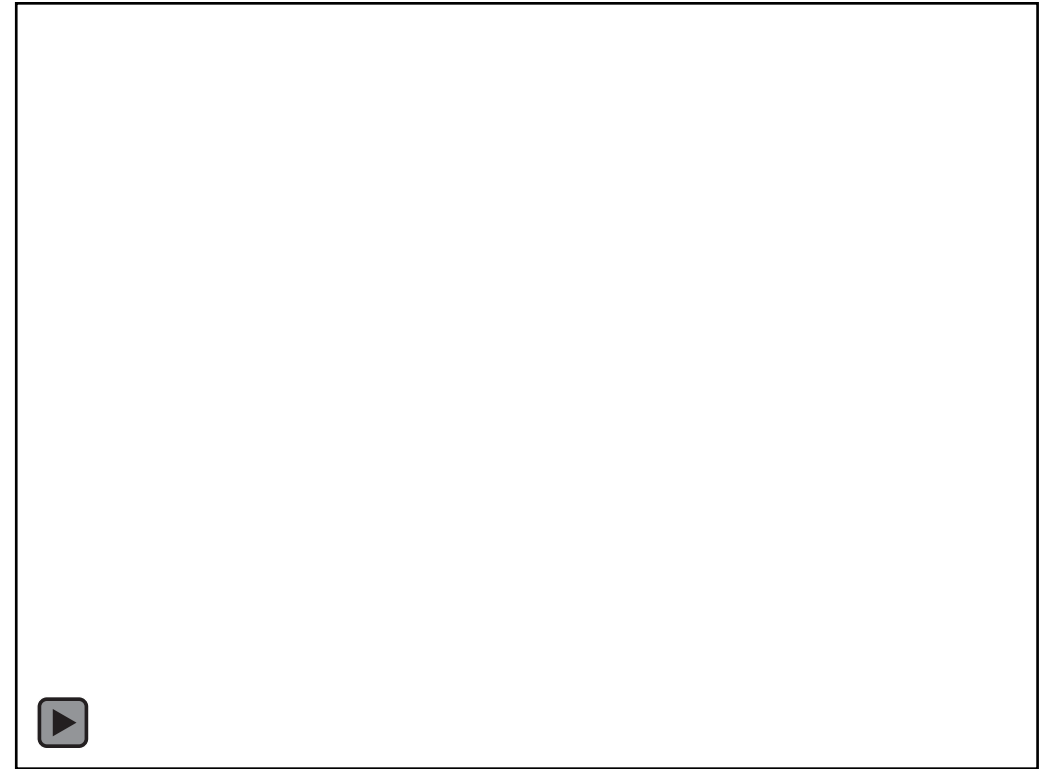
Levotočivě kruhově
polarizovaná vlna
 $a_x = a_y \quad \delta = -\frac{\pi}{2}$



Kruhová polarizace

- Obecná eliptická polarizace

$$J_{elip} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} \cos \alpha & \\ \sin \alpha & e^{-i\delta} \end{pmatrix}$$



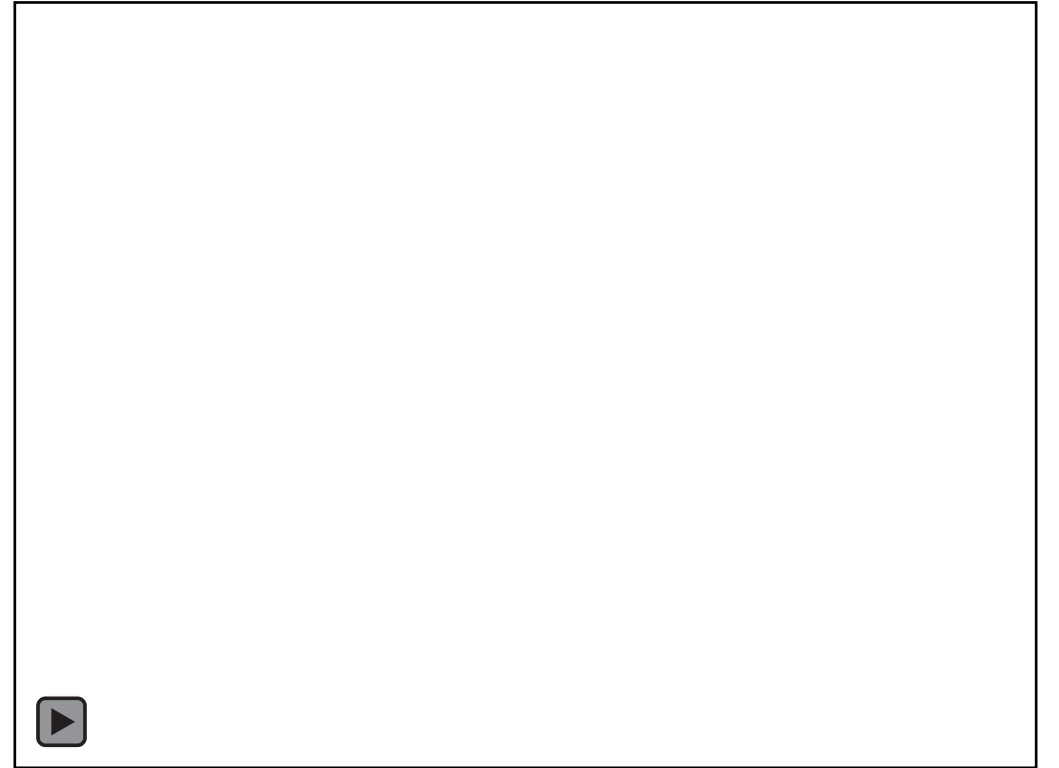
Kruhová polarizace

- Obecná eliptická polarizace

$$J_{elip} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} \cos \alpha & \\ \sin \alpha & e^{-i\delta} \end{pmatrix}$$

- Kruhová polarizace

$$J_{RCP,LCP} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & \\ \mp i & \end{pmatrix}$$



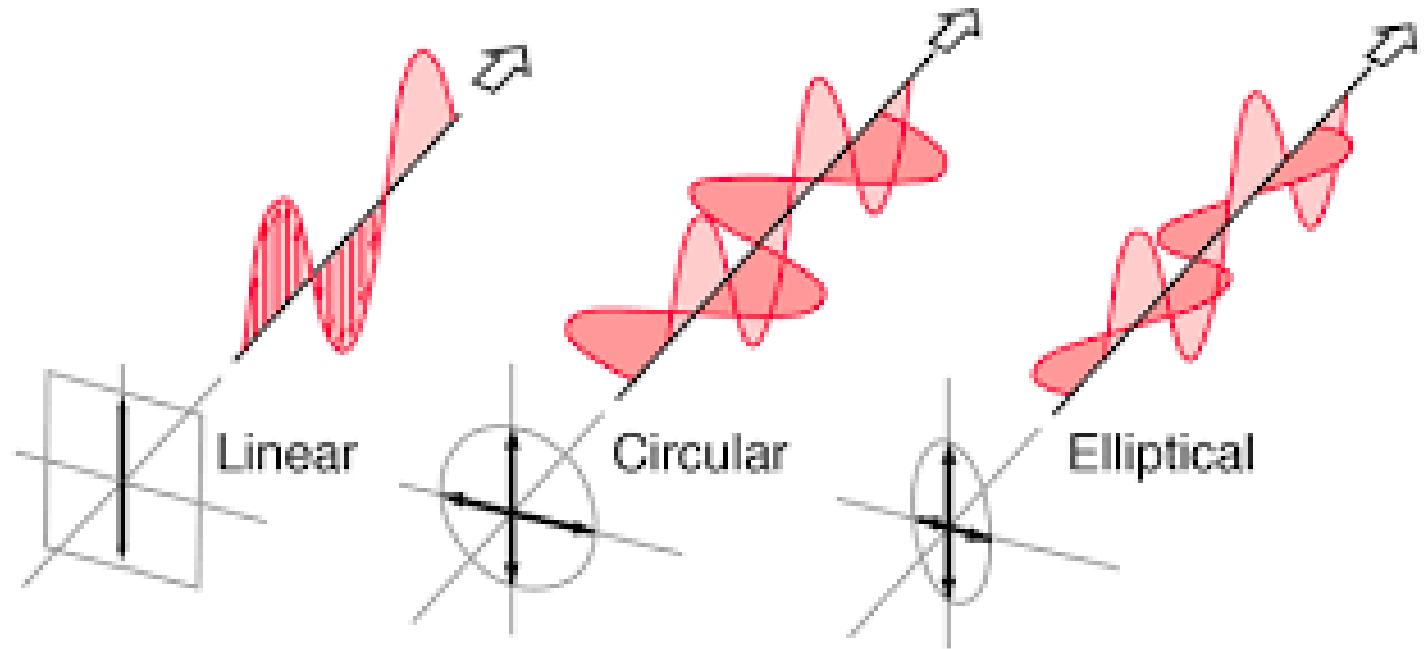
Kruhová polarizace

- Obecná eliptická polarizace

$$J_{elip} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} \cos \alpha \\ \sin \alpha e^{-i\delta} \end{pmatrix}$$

- Kruhová polarizace

$$J_{RCP,LCP} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ \mp i \end{pmatrix}$$



Kruhová polarizace

- Změna stavu polarizace?
 - Změna a_x a a_y – absorpce v jedné rovině
 - Změna δ – fázové zpoždění mezi E_x a E_y

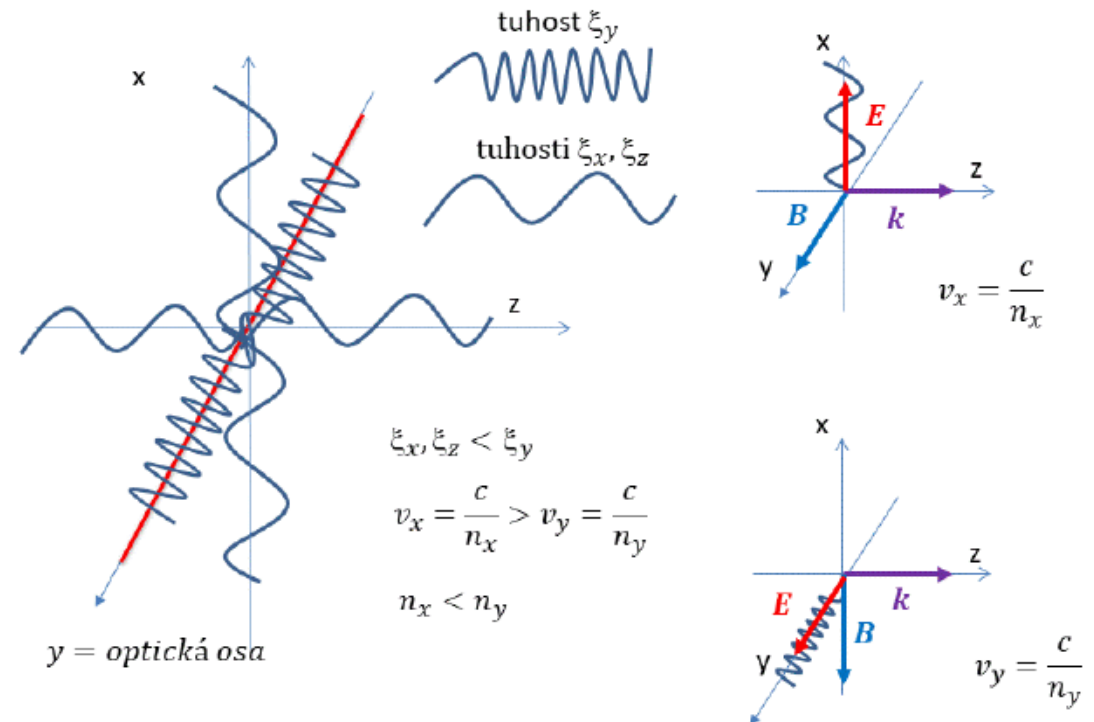
$$E(z, t) = \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_x \cos(kz - \omega t) \\ a_y \cos(kz - \omega t - (\delta_y - \delta_x)) \end{pmatrix}$$

- Potřeba aby E_x a E_y sebrali při průchodu materiálem jinou fázi:
 - Dvojloonné materiály

Kruhová polarizace

Dvojlohm

- Závislost indexu lomu na směru polarizace a směru šíření světla
- Kruhový a lineární
- Může být vyvolán vnějšími poli a jejich gradienty
- Přirozená optická aktivita může být důsledkem anizotropie materiálů



Kruhová polarizace

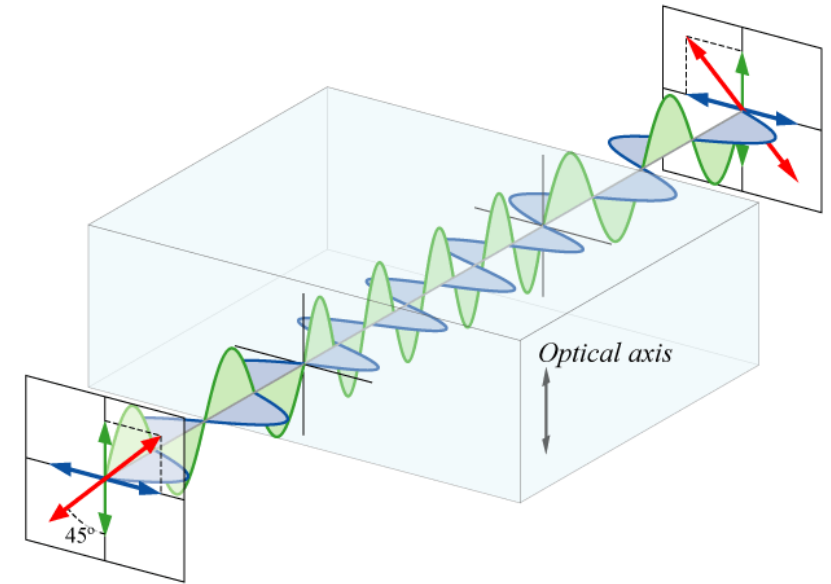
→ Vlnová destička

- Půlvlnná

- Rozdíl po průchodu materiálu je $\frac{\lambda}{2} \rightarrow \delta = \pi$

- Stáčí rovinu polarizace lineárně polarizovaného světla o 2α

- Jak bude vypadat Jonesova matice takové destičky?



$$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \cdot e^{-i\pi} \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} a \cdot 1 + b \cdot -1 \\ c \cdot 1 + d \cdot -1 \end{pmatrix}$$

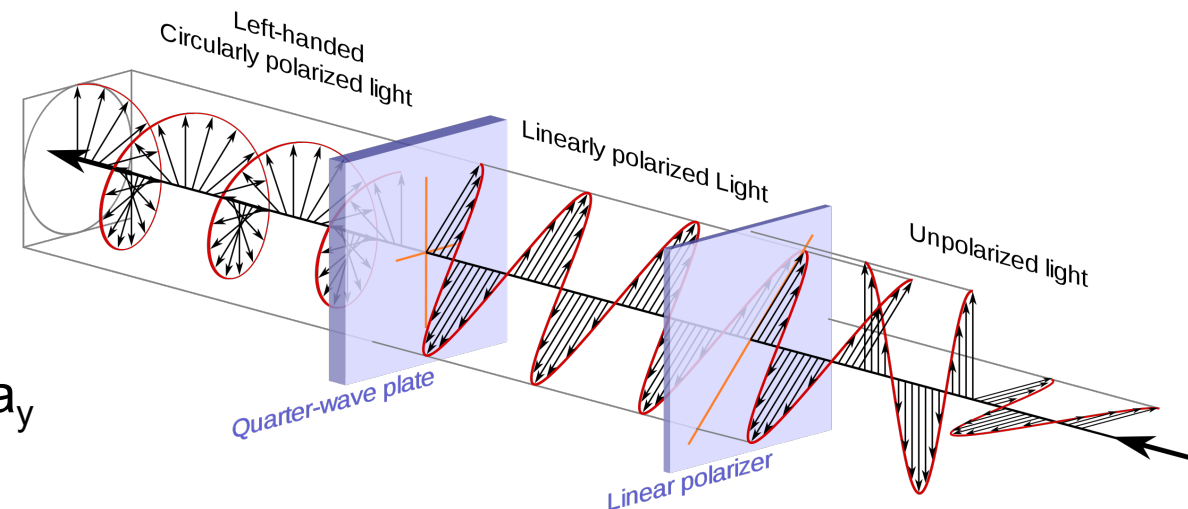
$$a = 1, b = 0, c = 0, d = -1$$

Kruhová polarizace

→ Vlnová destička

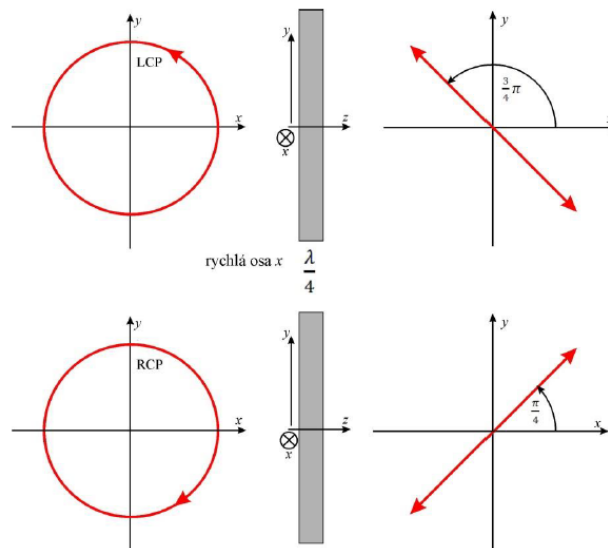
- Čtvrtvlnná

- Rozdíl po průchodu materiálu je $\frac{\lambda}{4} \Rightarrow \delta = \frac{\pi}{2}$
- Přetváří lineárně polarizované světlo s $a_x = a_y$ na kruhově polarizované světlo
- Jak bude vypadat Jonesova matice takové destičky?



$$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ -i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} a+b \\ c+d \end{pmatrix}$$

$$a = 1, b = 0, c = 0, d = -i$$



Kruhová polarizace

Rozložení do báze

polarizační stavy mohou být
brány jako báze, do kterých
se mohou další polarizační stavy
rozkládat

Podmínka báze v prostoru dimenze 2?

kolmost a jednotková velikost

Rozložení do báze

polarizační stavy mohou být
brány jako báze, do kterých
se mohou další polarizační stavy
rozkládat

Podmínka báze v prostoru dimenze 2?

kolmost a jednotková velikost

Stavy $X = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}, Y = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$?

$R = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ -i \end{pmatrix}, L = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ i \end{pmatrix}$?

$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}, \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \end{pmatrix}$?

Stavy $X = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}, Y = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$?

$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}, \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \end{pmatrix}$?

$R = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ -i \end{pmatrix}, L = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ i \end{pmatrix}$?

Kruhová polarizace

Rozložení do báze

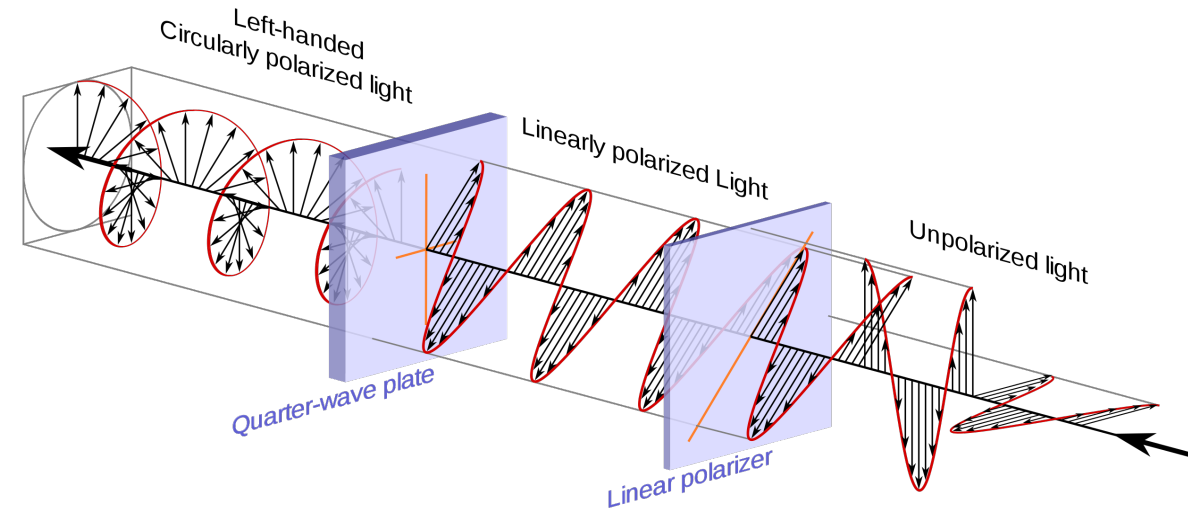
výpočet vah pro rozklad do báze

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ -i \end{pmatrix} = \alpha_1 \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} + \alpha_2 \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \rightarrow \text{EASY}$$

$$\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \alpha_1 \begin{pmatrix} 1 \\ -i \end{pmatrix} + \alpha_2 \begin{pmatrix} 1 \\ i \end{pmatrix} \rightarrow \text{EASY}$$

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ -i \end{pmatrix} = \alpha_2 \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} + \alpha_2 \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \end{pmatrix} \rightarrow \text{maybe not that easy}$$

$$\alpha_i = (J, J_b^*)$$



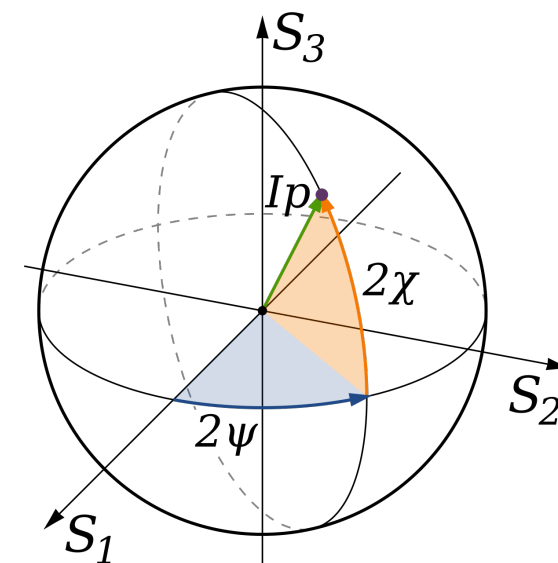
Kruhová polarizace

Jonesův popis platí pro absolutně polarizované světlo

V reálném případě můžeme mít do určité míry světlo polarizované, ale částečně ne

K takovému popisu slouží Stokesův vektor

$$S = \begin{pmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \langle a_x^2 \rangle + \langle a_y^2 \rangle \\ \langle a_x^2 \rangle - \langle a_y^2 \rangle \\ \langle 2a_x a_y \cos \delta \rangle \\ \langle -2a_x a_y \sin \delta \rangle \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \text{celková intenzita} \\ I_0 - I_{90} \\ I_{45} - I_{-45} \\ I_{RCP} - I_{LCP} \end{pmatrix}$$



Namísto amplitud pole používá intenzity a rozdíl dvou na sebe kolmých polarizačních stavů

Kruhová polarizace

Platí:

Pro úplně polarizované světlo $I^2 = Q^2 + U^2 + V^2$

Pro částečně polarizované světlo $I^2 > Q^2 + U^2 + V^2 > 0$

Příklady:

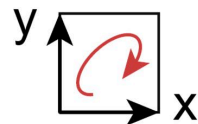
$$\begin{pmatrix} \text{celková intenzita} \\ I_0 - I_{90} \\ I_{45} - I_{-45} \\ I_{RCP} - I_{LCP} \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix}$$
$$\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$S_0 = I = E_x^2 + E_y^2$$

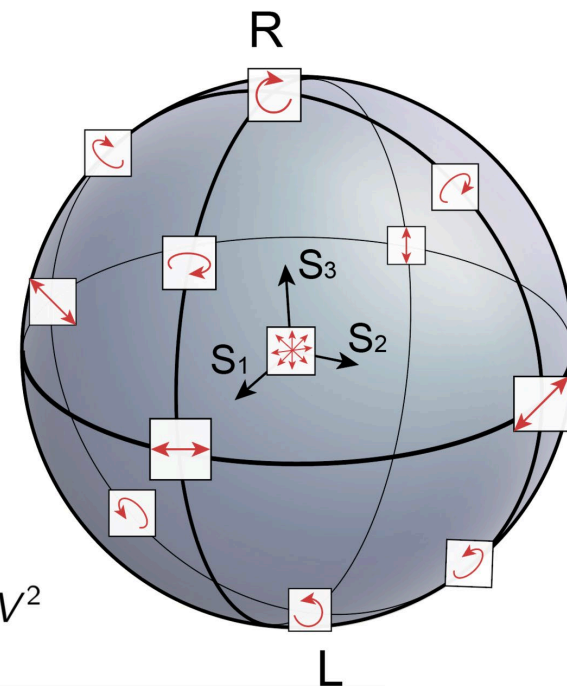
$$S_1 = Q = E_x^2 - E_y^2$$

$$S_2 = U = 2E_x E_y \cos \delta$$

$$S_3 = V = 2E_x E_y \sin \delta$$



$$\text{radius} = I^2 \geq Q^2 + U^2 + V^2$$



Kruhová polarizace

Platí:

Pro úplně polarizované světlo $I^2 = Q^2 + U^2 + V^2$

Pro částečně polarizované světlo $I^2 > Q^2 + U^2 + V^2 > 0$

Příklady:

$$\begin{pmatrix} \text{celková intenzita} \\ I_0 - I_{90} \\ I_{45} - I_{-45} \\ I_{RCP} - I_{LCP} \end{pmatrix}$$

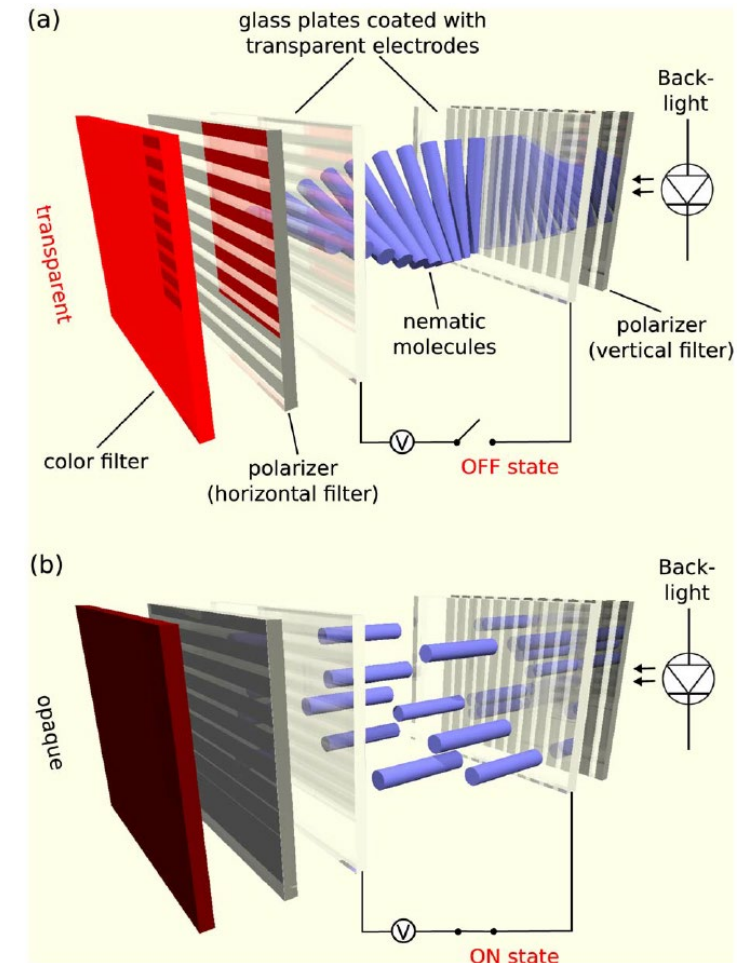
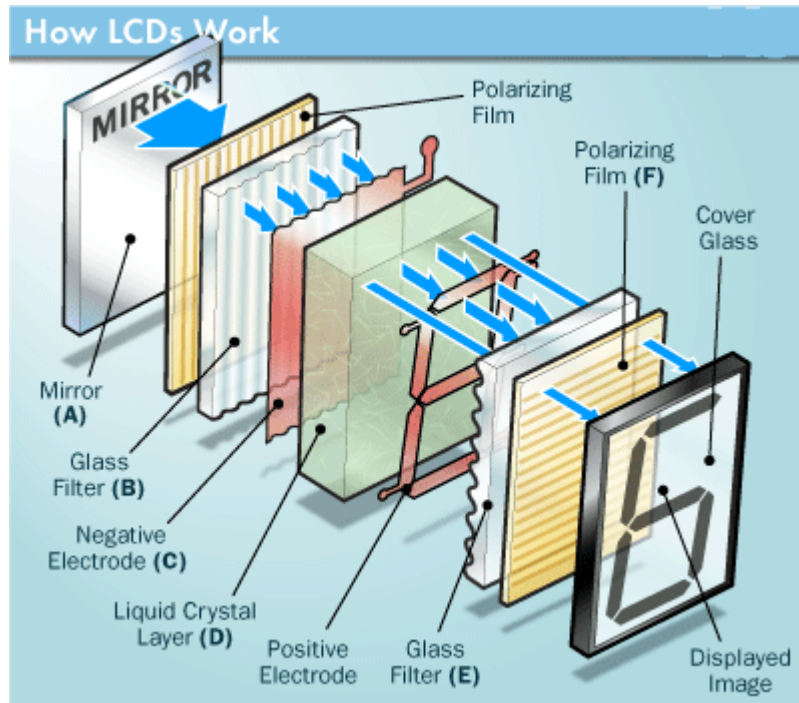
pro transformaci potřebujeme matici 4×4

→ Muellerova matice

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos^2(2\theta) + \sin^2(2\theta) \cos \delta & \cos(2\theta) \sin(2\theta) (1 - \cos \delta) & \sin(2\theta) \sin \delta \\ 0 & \cos(2\theta) \sin(2\theta) (1 - \cos \delta) & \cos^2(2\theta) \cos \delta + \sin^2(2\theta) & -\cos(2\theta) \sin \delta \\ 0 & -\sin(2\theta) \sin \delta & \cos(2\theta) \sin \delta & \cos \delta \end{pmatrix}$$

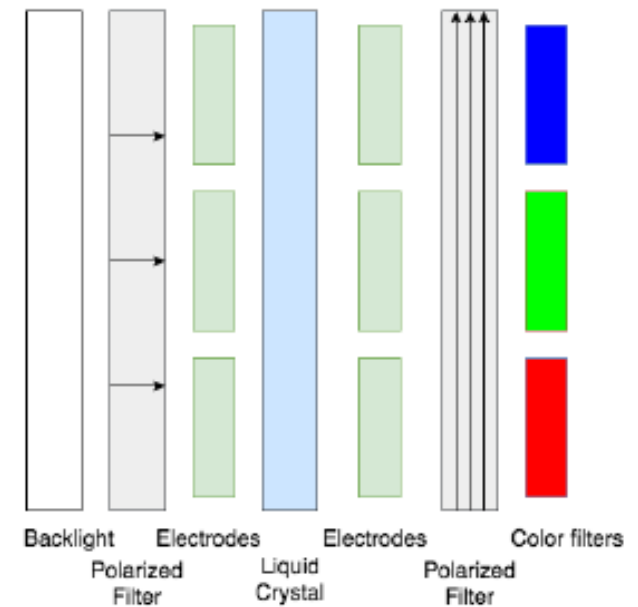
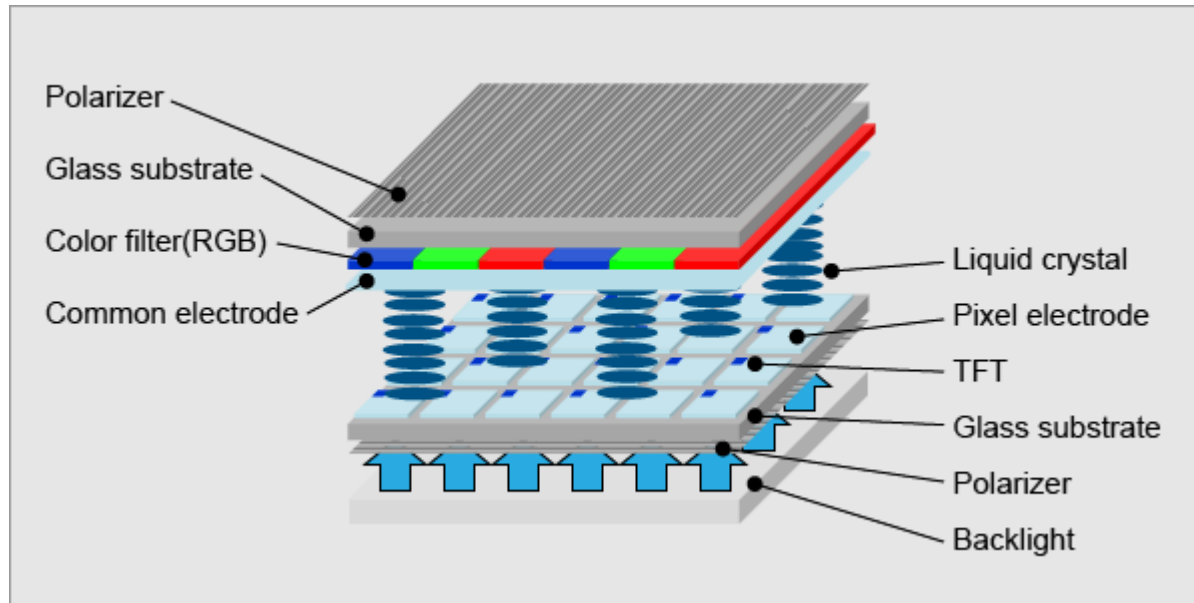
Použití a využití polarizace

Princip činnosti LCD monitoru



Použití a využití polarizace

Princip činnosti LCD monitoru



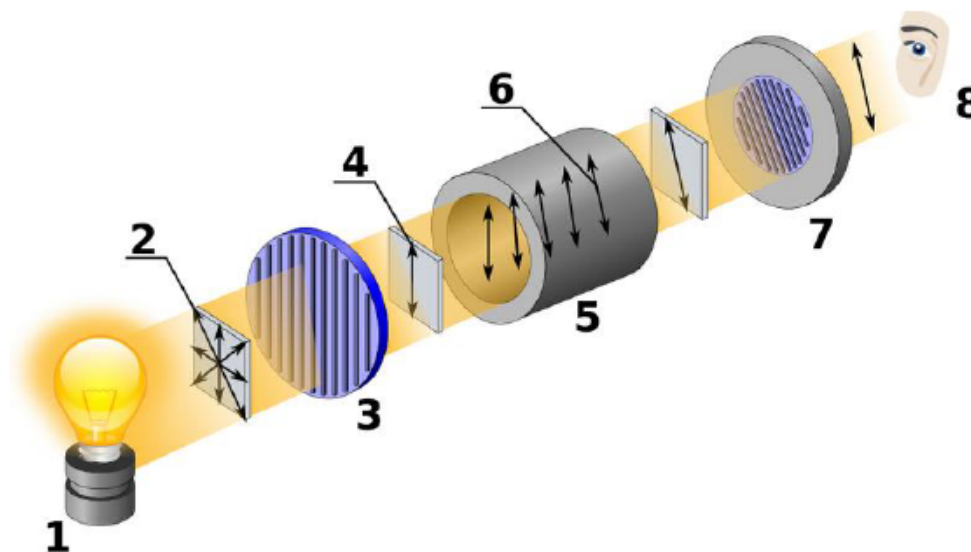
Použití a využití polarizace

Polarimetrie

Analytická metoda založená na měření úhlu otočení roviny polarizovaného světla přes roztok opticky aktivní látky

$$[\alpha]_D^{20} = \frac{1000 \cdot \alpha}{l \cdot c}$$

$[\alpha]_D^{20}$ - specifická optická otáčivost, α - úhel otočení roviny polarizovaného světla [°], l - délka kyvety [dm], c - koncentrace měřeného roztoku [g/l]



1 – Zdroj nepolarizovaného světla, 2 – zobrazení náhodné polarizace světla vystupujícího ze zdroje, 3 – Polarizátor, 4 - Lineárně polarizované světlo na výstupu z polarizátoru, 5,6 – opticky aktivní prostředí, 7 – Lineárně polarizované světlo se stočenou rovinou polarizace, 7 – Analyzátor, 8- Pozorovatel (detektor)

Použití a využití polarizace

Optická aktivita látek:

→ studentská prezentace

Vnímání 3D obrazu:

anaglyf

pasivní 3D projekce

aktivní 3D projekce

→ studentská prezentace

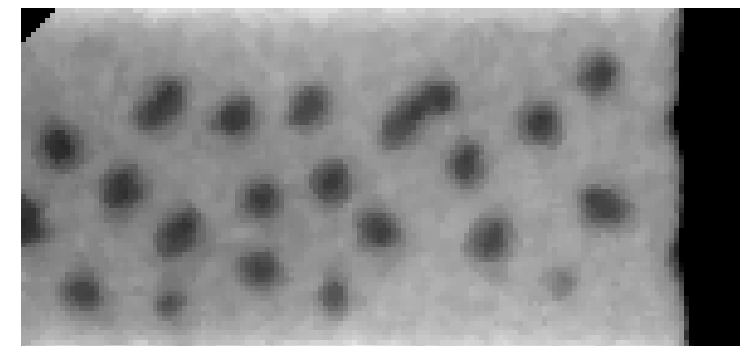
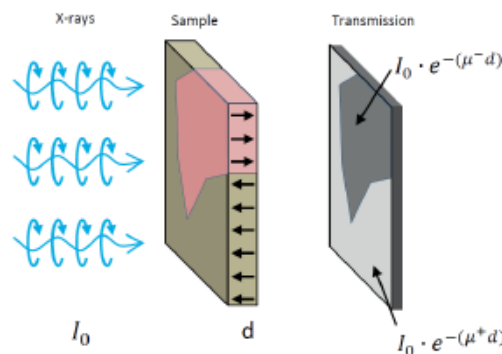
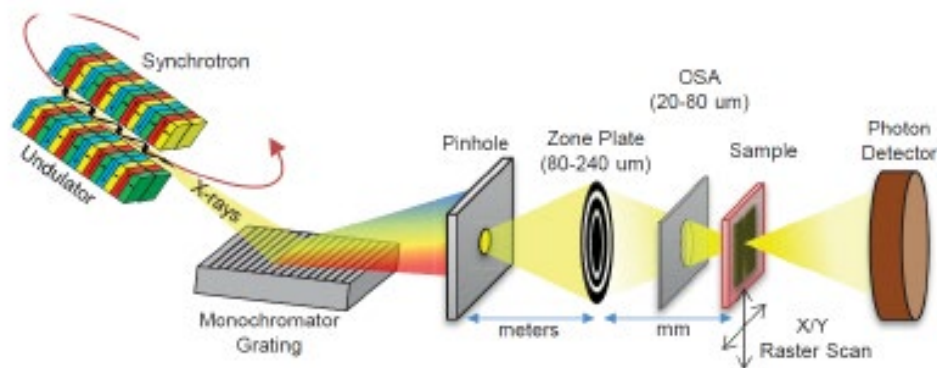


Použití a využití polarizace

Cirkulární dichroismus

rozdílná absorpce levo- a pravo-točivého kruhově polarizovaného světla

Použití např. k určování struktury biomakromolekul, teploty tání apod.
nebo k zobrazení magnetických struktur.



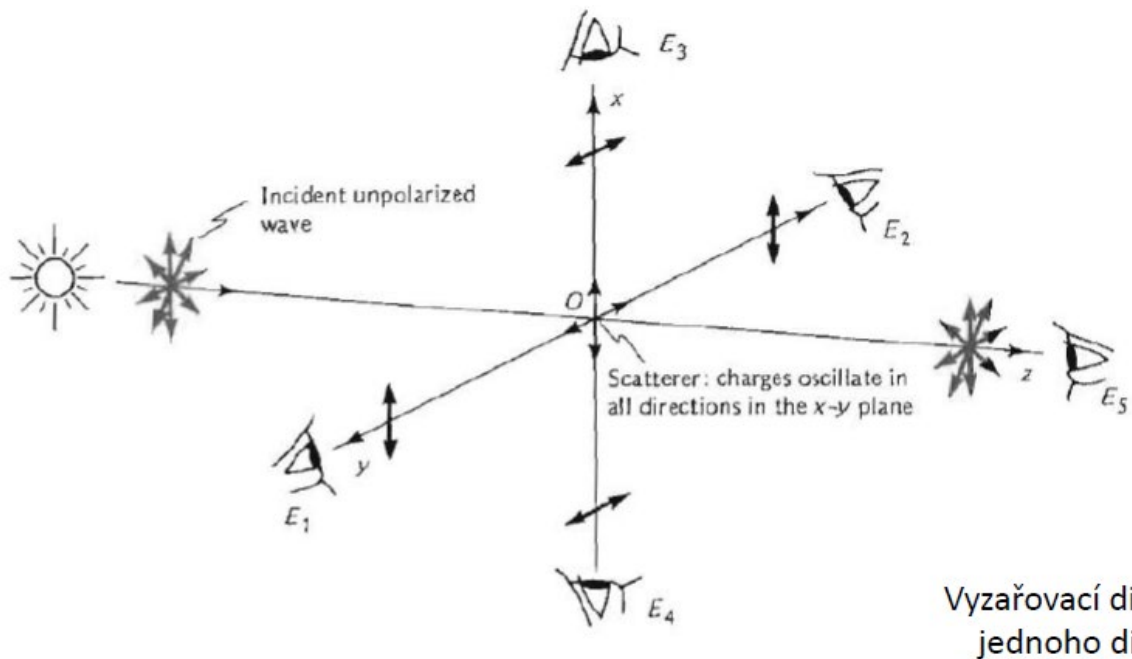
Použití a využití polarizace

Polarizace oblohy – polarizace rozptylem

interakce s částicemi mnohem menšími, než je vlnová délka světla

→ Rayleighiho rozptyl

Vyzařování dipólu

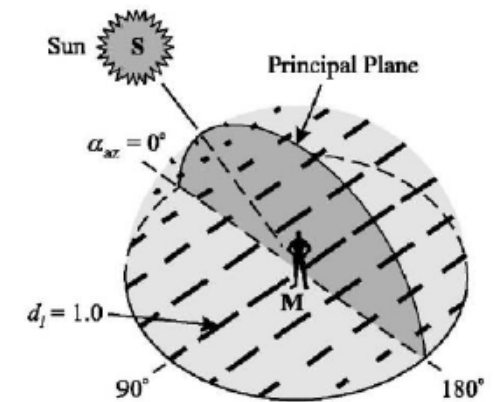
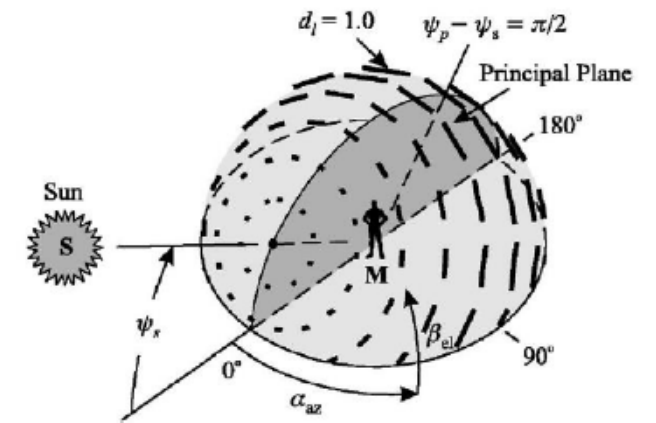
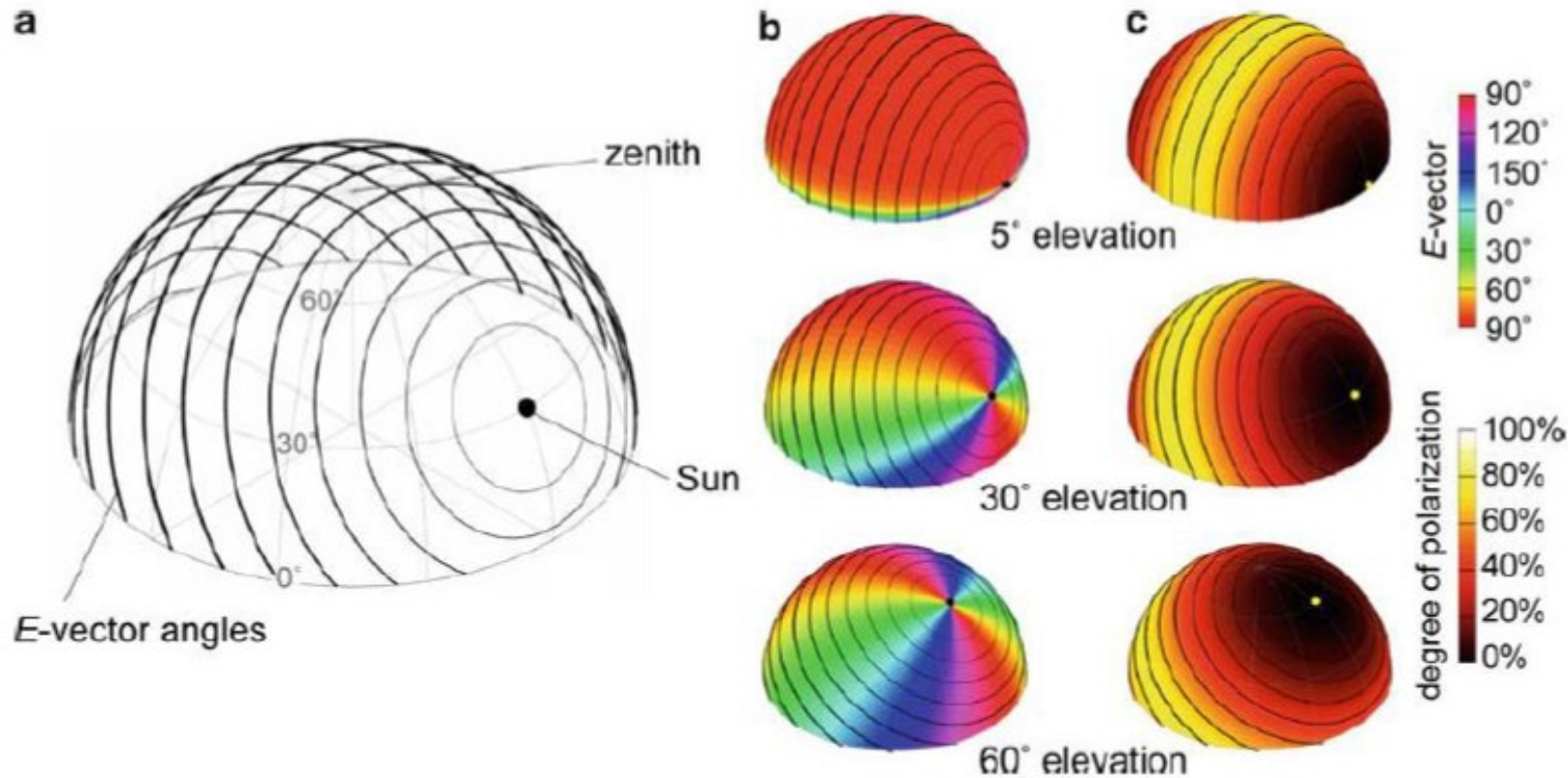


V objemu jsou dipóly všech orientací.
Dopadající nepolarizované světlo rozkmitá dipóly ve všech směrech v rovině xy .

Pozorovatel v závislosti na úhlu pohledu vůči rozptylovému objemu vidí světlo nepolarizované (směr z), lineárně polarizované (v libovolném směru v rovině xy) nebo částečně polarizované (v obecném směru)

Použití a využití polarizace

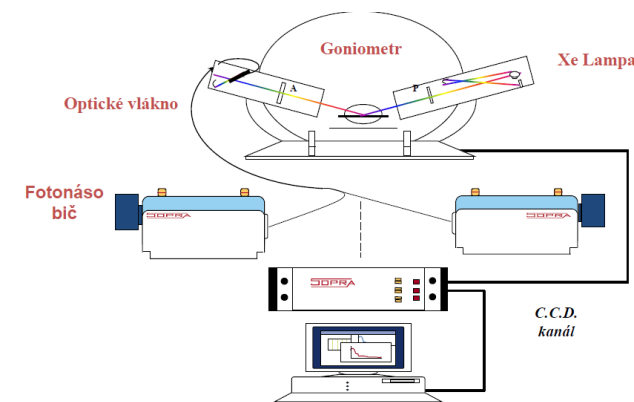
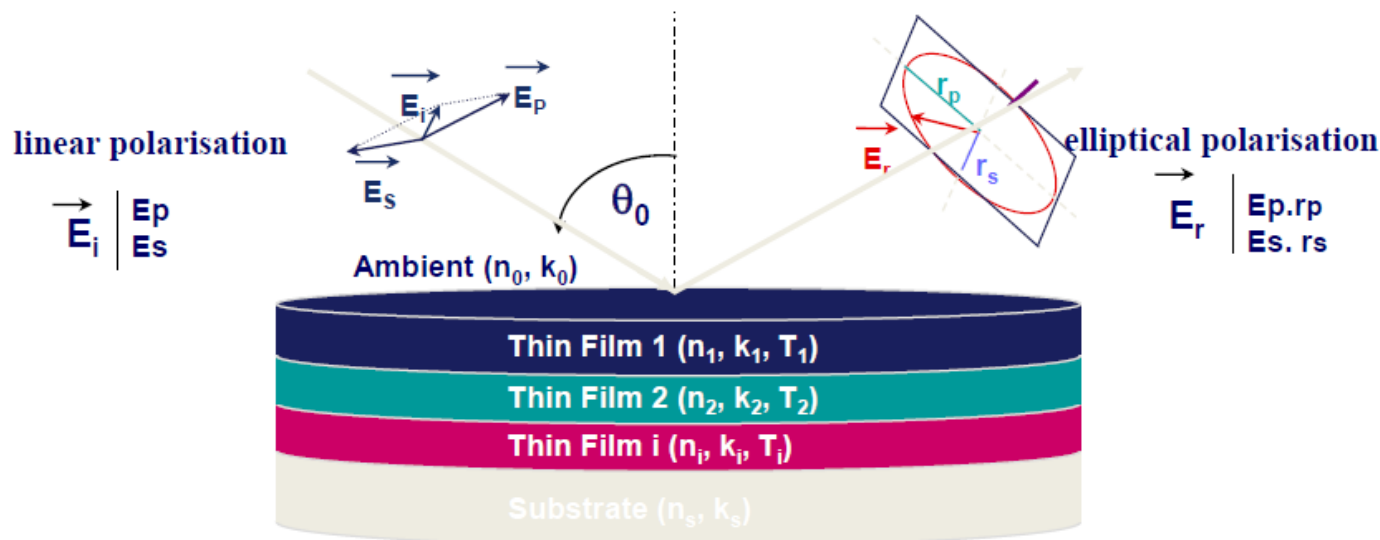
Polarizace oblohy



Použití a využití polarizace

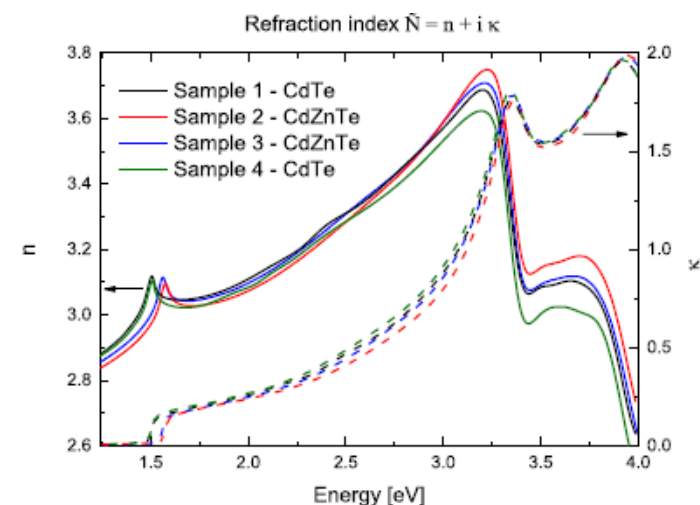
Elipsometrie

Metoda měření poměru Fresnelových koeficientů s- a p-polarizace



Elipsometrie měří poměr Fresnelových koeficientů odrazu p a s-polarizace :

$$\rho = \frac{r_p}{r_s} = \tan \Psi \cdot e^{j\Delta} = f(n_i, k_i, T_i)$$



Použití a využití polarizace

Pockelsův jev

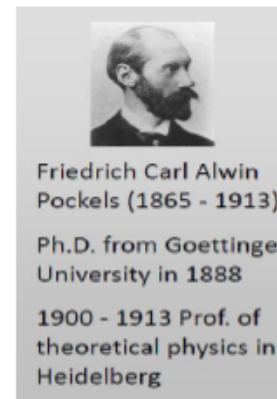
Lineární elektro-optický jev – Pockelsův jev



Objev

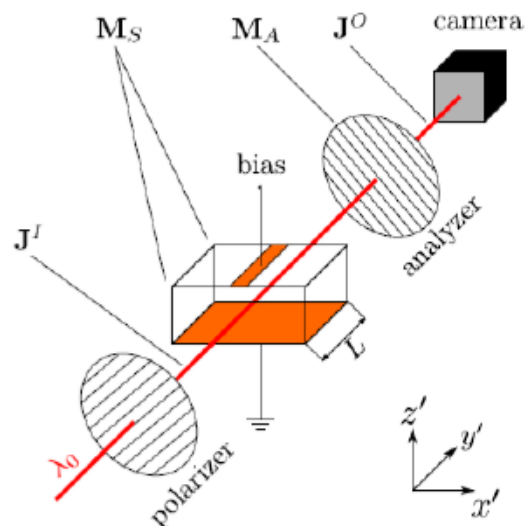
W.C.Röntgen, Ann.Phys.
18, 213 (1883)

Aplikované elektrické pole E změní index lomu v materiálu tak, že se v něm šíří dvě lineárně polarizované vlny s navzájem kolmými polarizacemi různou rychlostí. Vzorek se chová jako fázová destička, jejíž fázový posun závisí lineárně na přiloženém elektrickém poli.



Vysvětlení

F. Pockels, Abh. Gött.
39, 1 (1894)

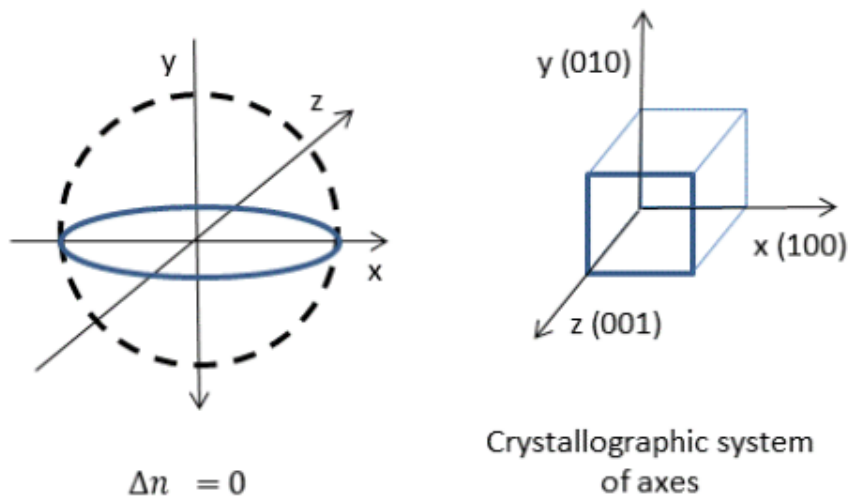


Vzorek vykazující Pockelsův jev, tzv. Pockelsova cela se využívá ke změně polarizačního stavu světla (známe E , měníme polarizaci) nebo ke studiu E (známe polarizační stav světla na vstupu a výstupu, vyhodnotíme E).

Použití a využití polarizace

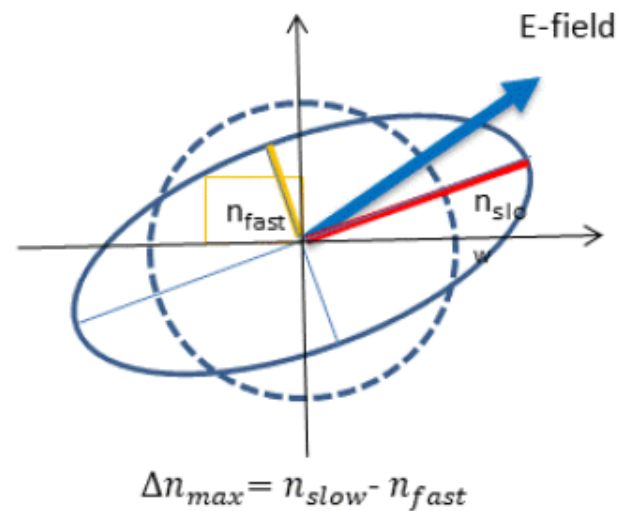
Pockelsův jev

Před aplikací elektrického pole



Index lomu nezávisí na směru.
Krystalem se šíří vlny navzájem
kolmých lineárních polarizací stejnou
rychlostí všemi směry

Po aplikaci elektrického pole

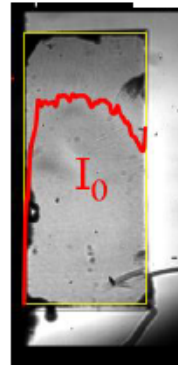
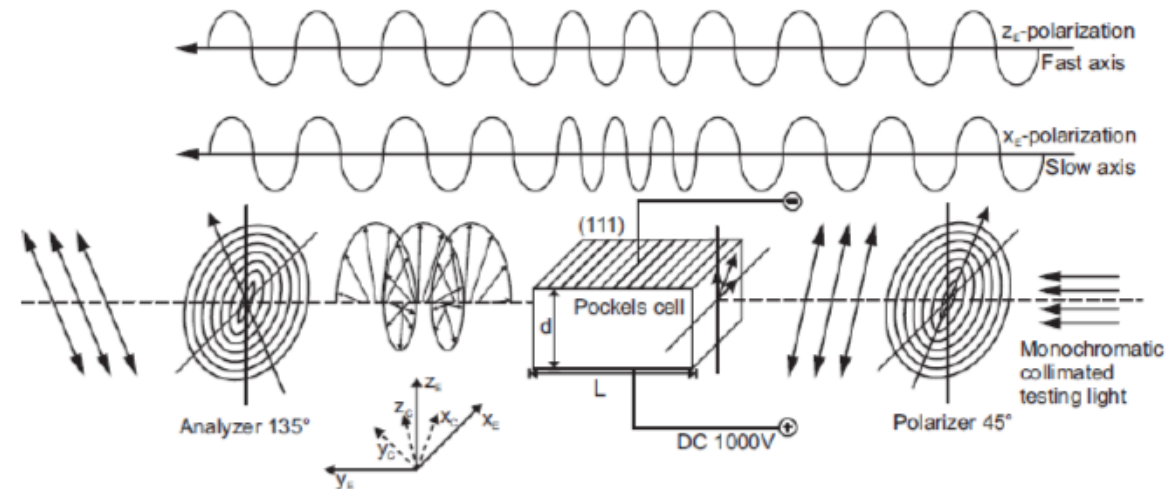


Index lomu závisí na směru.
Krystalem se šíří vlny navzájem
kolmých lineárních různými rychlostmi
danými směrem šíření vlny

Použití a využití polarizace

Pockelsův jev

Pockelsův jev – příklad experimentu (CdTe)



Paralelní
polarizátory



Zkřížené
polarizátory

Fázové zpoždění

$$\Gamma = \frac{2\pi}{\lambda_0} \Delta n(E) L$$

Propustnost

$$T = \sin^2 \frac{\Gamma}{2}$$

Profil elektrického pole může být spočítán
z měření optické propustnosti.

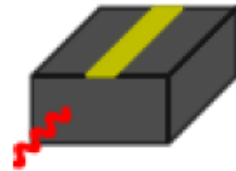
Použití a využití polarizace

Pockelsův jev

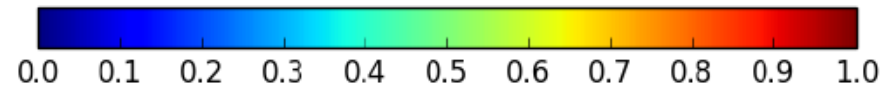
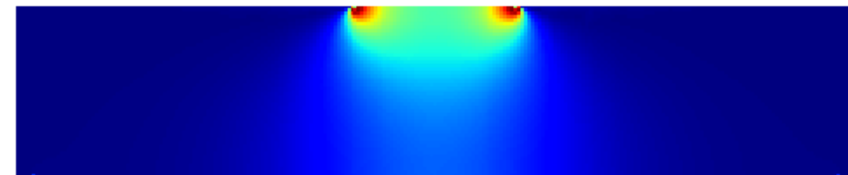
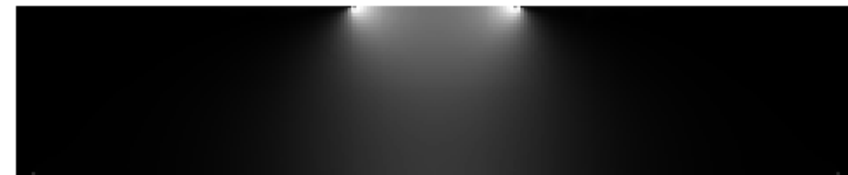
Pockelsův jev – stanovení průběhu elektrického pole - experiment

U=500V

Katoda – proužek
Anode – planární kontakt



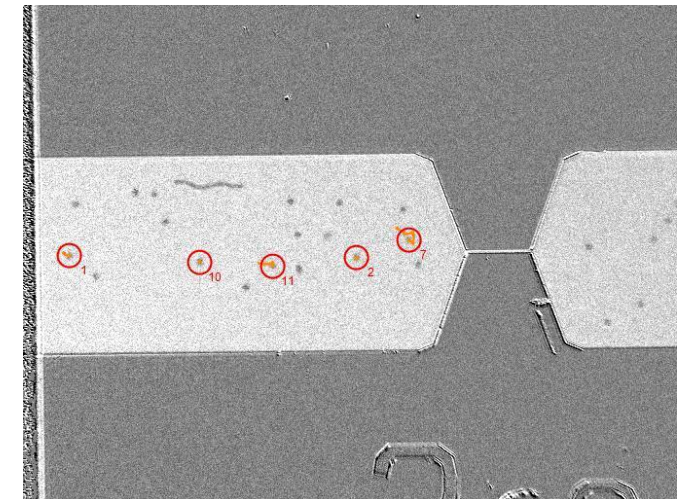
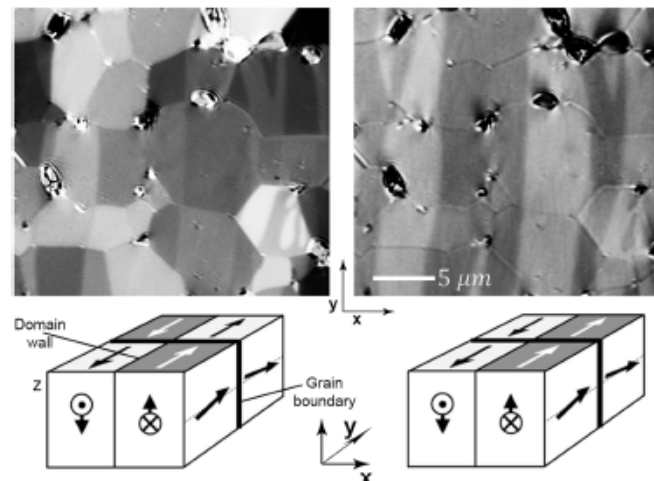
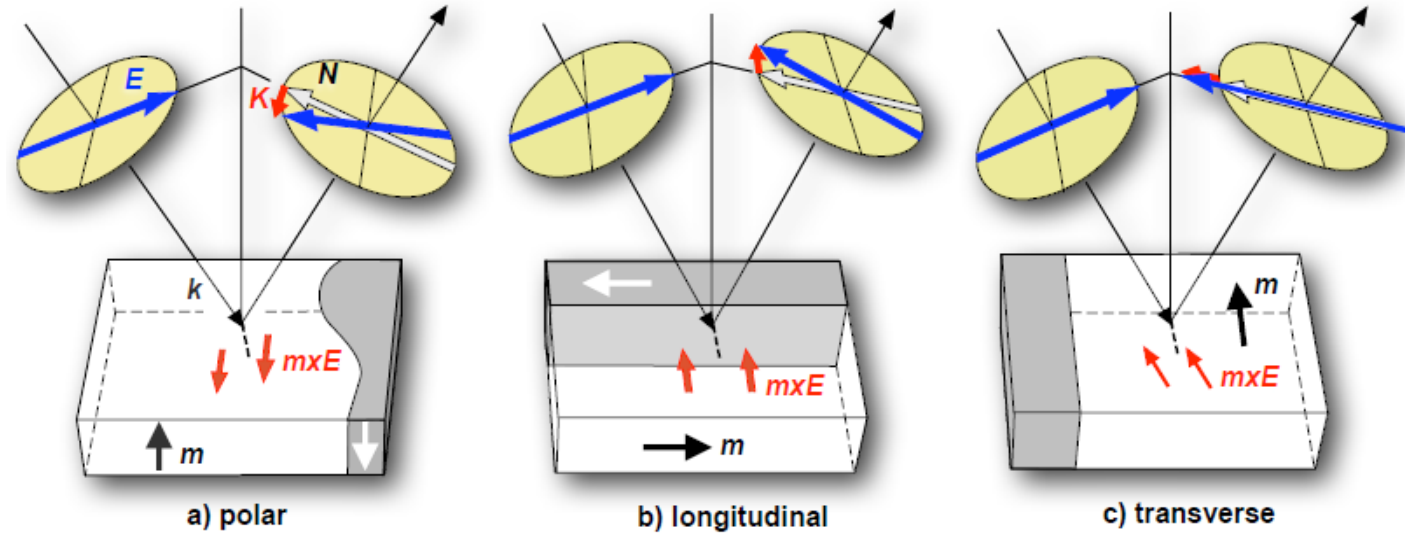
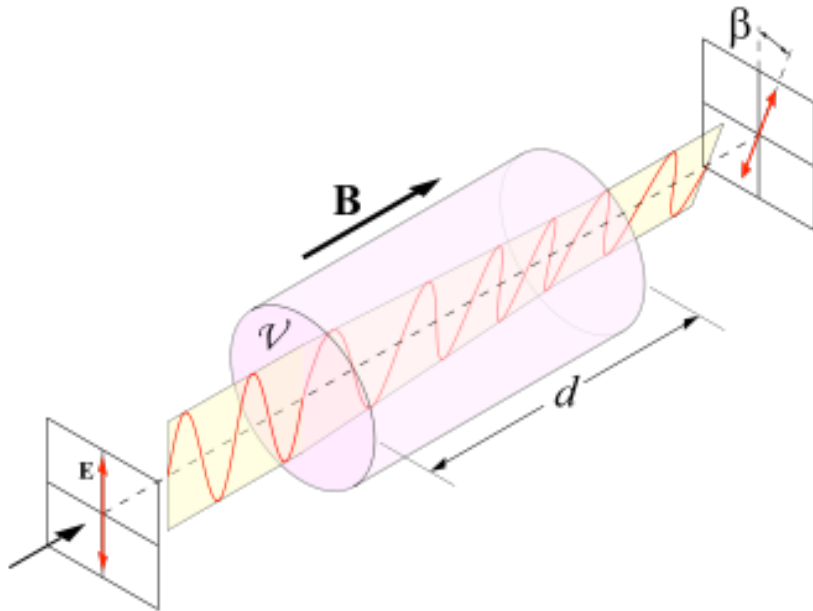
Transmittance (polarizer $\beta = 45^\circ$ respect to the z' axis)



Použití a využití polarizace

Faradayův a Kerrův jev

Polarization rotation of a linearly polarized light during the propagation through a rubic glass rod in magnetic field.



Použití a využití polarizace

Mechanismy vnímání hloubky a vzdálenosti

Méně než 2m – Akomodace čočky oka

Méně než 20m – Binokulární konvergence čočky oka

Méně než 100m – Binokulární paralaxa

Méně než 200m – paralaxa pohybu

Použití a využití polarizace

Monokulární vjemy vnímání hloubky

Akomodace čočky oka Když se oko snaží fokusovat optický systém na vzdálenější objekt, uvolní se svaly, které napínají čočku oka. Tím se změní její ohnisková vzdálenost. Informace o napětí svalů se přenese do mozku, který to zpracuje jako informaci o změně vzdálenosti předmětu (do 2m).

Paralaxa pohybu je monokulární vjem, který způsobuje, že objekty které jsou blízko se zdánlivě pohybují rychleji než vzdálenější objekty. Paralaxa pohybu ovlivňuje, jak posuzujeme relativní vzdálenost.



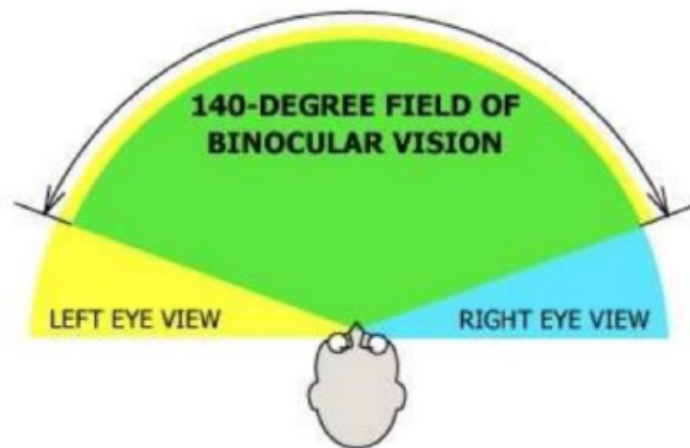
Použití a využití polarizace

Binokulární vidění

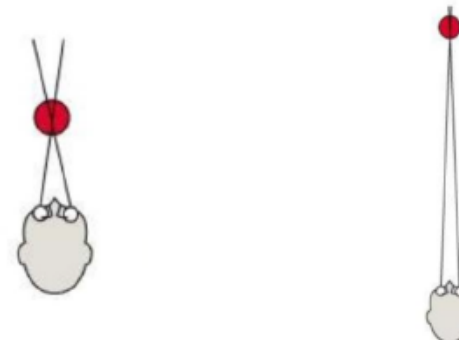
Mozek využívá několik triků, abychom viděli ve 3 dimenzích. Binokulární vidění je možné jen v části prostoru, kde se obrazy z obou očí překrývají.

Binokulární vidění znamená vidění oběma očima zároveň. Znamená to, že se obrazy vnímané simultánně oběma očima spojí v jeden a navíc nám umožňuje vnímat hloubku prostoru.

- simultánní vidění, tj. každé oko vnímá svůj obraz okolí
- fúze, tj. obraz okolí je vnímán oběma očima jako jeden vjem
- stereopse, tj. schopnost vytvořit hloubkový vjem, vzniká trojrozměrný obraz

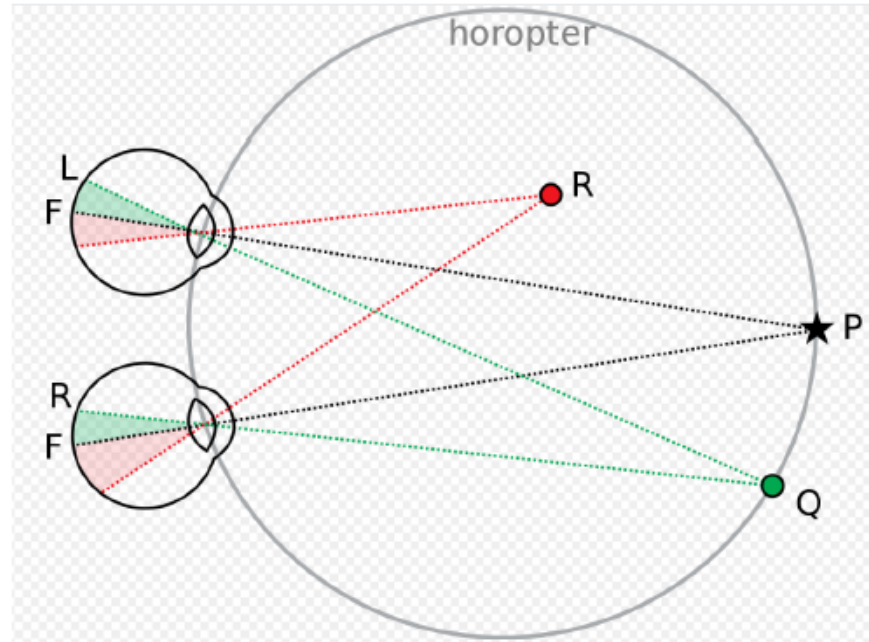


Je-li objekt blízko, mozek odhadne vzdálenost podle míry konvergence paprsků vstupujících z objektu do očí.



Použití a využití polarizace

Binokulární vidění



Mějme v prostoru bod P, na který je zaměřen zrak a který vytváří obrazy na sítnicích obou očí. Dále mějme bod Q v prostoru, který vytvoří také obrazy na sítnicích obou očí. Tyto obrazy (L a R) jsou na sítnici ve stejné vzdálenosti od obrazů (F) bodu P. Všechny takové body, jejichž obrazy na sítnicích jsou stejně vzdálené, mají nulovou disparitu a vnímáme je ve stejné hloubce. Říkáme o nich, že leží na horopteru.