

## Polarizační mikroskop, GDx

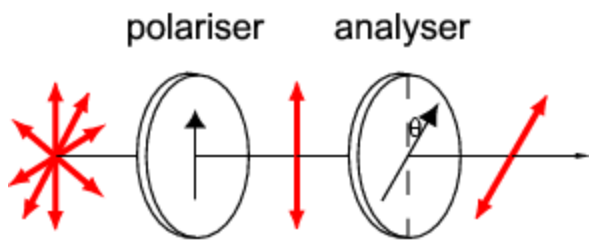
$$c = \lambda_0 f, \quad \omega = 2\pi f, \quad k = 2\pi n / \lambda_0$$

$$\vec{k} = (k_x, k_y, k_z) := (0, 0, k_z)$$

$$\vec{E} = \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{pmatrix} := \begin{pmatrix} E_{0x} \cos(\omega t - k_z z + \delta_x) \\ E_{0y} \cos(\omega t - k_z z + \delta_y) \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\vec{E} \perp \vec{H} \perp \vec{k} \perp \vec{E}$$

**Malusův zákon** – popisuje průběh intenzity původně nepolarizovaného světla po průchodu dvěma polarizátory, vzájemně otočenými o úhel  $\delta$  :



$$I = I_0 \cos^2 \delta$$

**“nezničitelnost” elipticky polarizovaného světla** – není možné nalézt konfiguraci, v rámci které by použití jednoho polarizátoru zcela potlačilo elipticky (kruhově) polarizovanou vlnu:

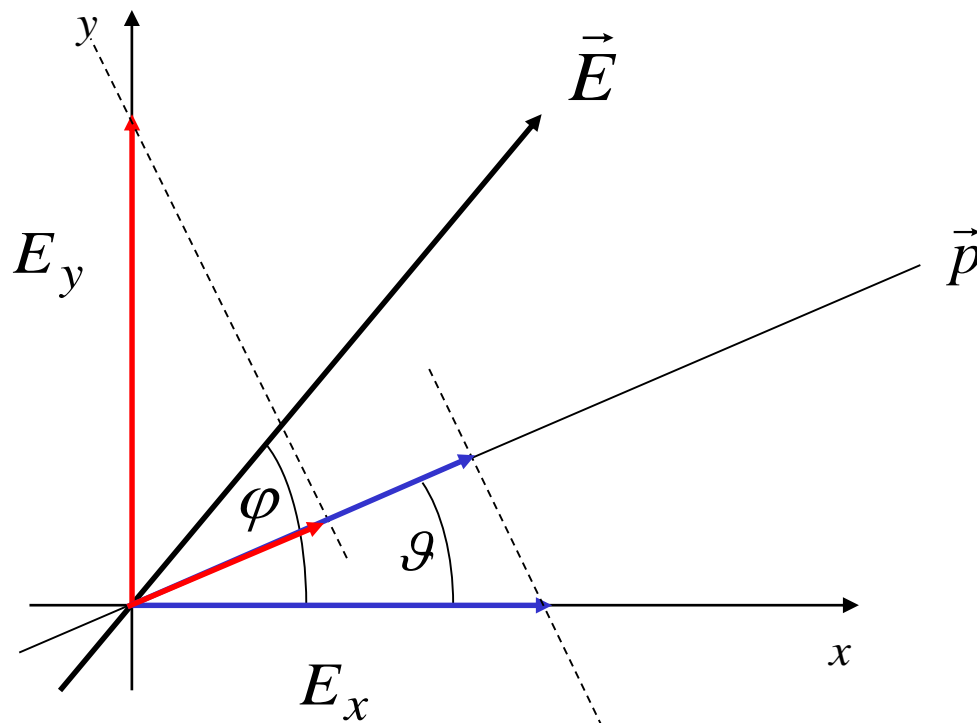
protože má elipticky polarizovaná vlna v každém okamžiku alespoň část ze složek  $E_x$  a  $E_y$ , podaří se pro libovolné natočení polarizátoru najít nenulový průmět

využívá se v polarizačním mikroskopu při pozorování dvojlomných vzorků

## Malusův zákon - účinek lineárního polarizátoru na dopadající světlo

**Lineární polarizátor** – propouští pouze světlo lineárně polarizované v jenom směru  
tento směr nazýváme směrem **orientace polarizátoru**

Činnost polarizátoru lze vysvětlit jako kolmý průmět složek  $E_x$  a  $E_y$  do směru orientace polarizátoru  
a následné složení těchto dvou příspěvků



při konstrukci průmětu nedbáme  
ani na vzájemný fázový posun  
složek, ani na jejich okamžité  
hodnoty –

konstruueme vždy  
z maximálních výchylek

## Polarizační mikroskop

metoda vhodná k pozorování dvojlomných vzorků

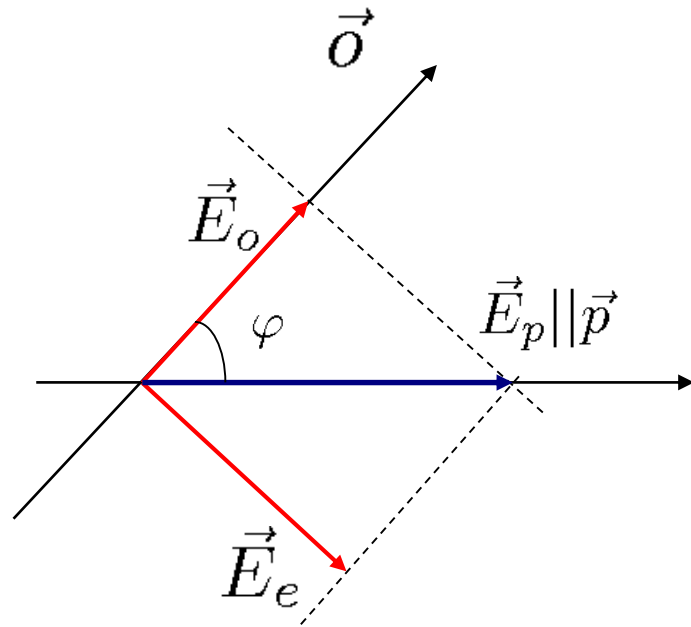
využívá skutečnosti, že elipticky polarizované světlo projde alespoň částečně každým lineárním polarizátorem

základ metody: zkřížené polarizátory, mezi které klademe vzorek;

dokud není vzorek přítomen, nepozorujeme žádnou intenzitu světla prošlého systémem

### Situace mezi polarizátorem a vzorkem po jeho vložení:

(předpokládáme, že optická osa dvojlomného vzorku leží v rovině dopadu světla na vzorek)



polarizovanou vlnu rozložíme na směr rovnoběžný s optickou osou a na směr na ni kolmý

$$E_o = E_p \cos \varphi$$

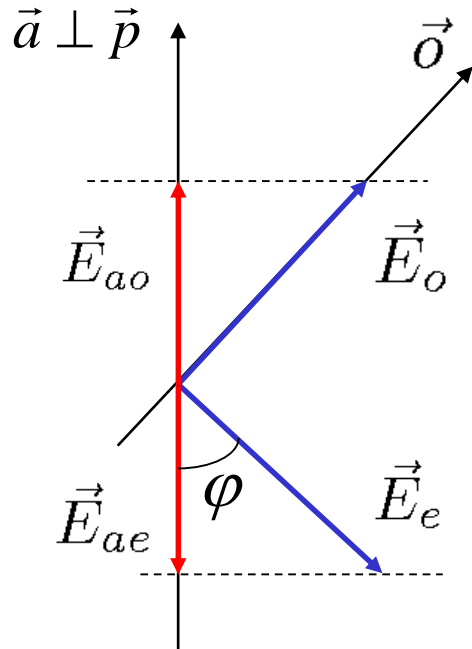
$$E_e = E_p \sin \varphi$$

Každá z vln postupuje krystalem samostatně; protože jejich amplitudy jsou na sebe vzájemně kolmé, nemají tendenci skládat se.

## Polarizační mikroskop

### Situace mezi vzorkem a analyzátozem

(předpokládáme, že optická osa dvojlomného vzorku leží i v rovině výstupu světla ze vzorku)



Analyzátor propustí pouze kolmý průmět každé z vln do svého směru

$$E_{ao} = E_p \cos \varphi \sin \varphi$$

$$E_{ae} = E_p \sin \varphi \cos \varphi$$

Za analyzátozem již obě vlny kmitají ve stejném směru, a proto by v principu mohly interferovat.

Zda k tomu dojde nebo ne, rozhodne překrytí vlnových klubek a to zpětně závisí na kvalitě hraničních ploch dvojlomného vzorku. My budeme pro jednoduchost uvažovat, že k interferenci nedojde. Potom je celková intenzita rovna součtu Intenzit jednotlivých vln a dostáváme

$$I_a = I_{ao} + I_{ae} = (E_{ao})^2 + (E_{ae})^2 = 2E_p^2 \cos^2 \varphi \sin^2 \varphi \approx I_p \sin^2(2\varphi)$$

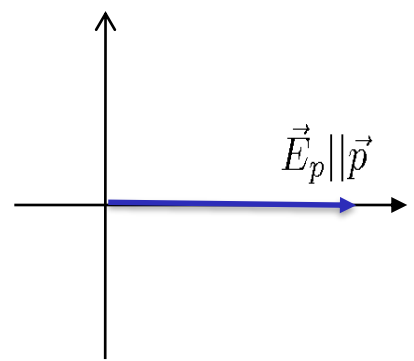
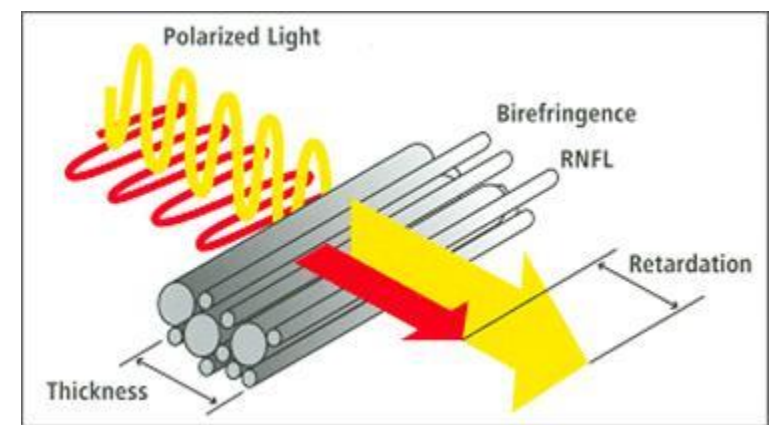
Budeme-li tedy otáčet vzorkem na podložce, během jedné otočky musíme pozorovat čtyři vyhasnutí signálu. (tato vyhasnutí by také ověřila předpoklad nekoherentního působení našeho vzorku)

# analýza tloušťky nervových vláken - GDx

využívá se přirozený dvojlom vláken způsobený jejich podélným charakterem

podmínkou je optická osa kolmá na směr paprsků, to splňují vlákna dobře

jedná se o speciální případ polarizačního mikroskopu: protože světlo vstupuje a vystupuje z oka, pracujeme zpravidla v režimu souběžných polarizátorů



1) situace za polarizátorem

$$E_p = E_x \cos(\omega t - kz)$$

2) po dopadu na dvojlomné vlákno

$$E_{||} = E_p \cos \varphi = E_x \cos \varphi \cos(\omega t - kz)$$

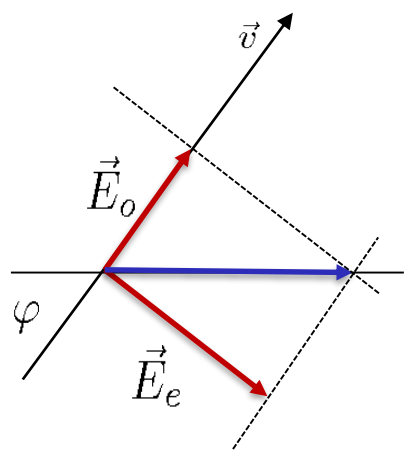
$$E_{\perp} = E_p \sin \varphi = E_x \sin \varphi \cos(\omega t - kz)$$

(paprsky mají kolmé polarizace a nebudou tedy interferovat)

3) výstup ze vzorku po odrazu od jeho zadní stěny

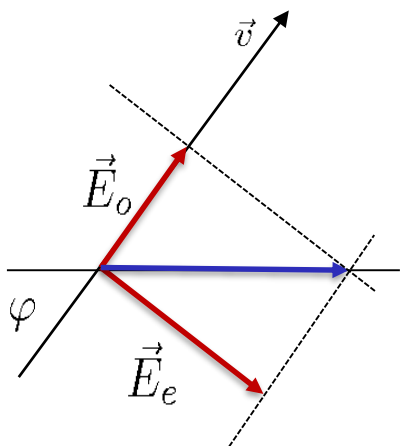
$$E_{||} = E_x \cos \varphi \cos(\omega t - kz - 2kn_o d)$$

$$E_{\perp} = E_x \sin \varphi \cos(\omega t - kz - 2kn_e d)$$



## analýza tloušťky nervových vláken - GDx

tloušťka nervového vlákna je malá – při průchodu tam a zpět nedojde k setření fázové informace



3) výstup ze vzorku po odrazu od jeho zadní stěny

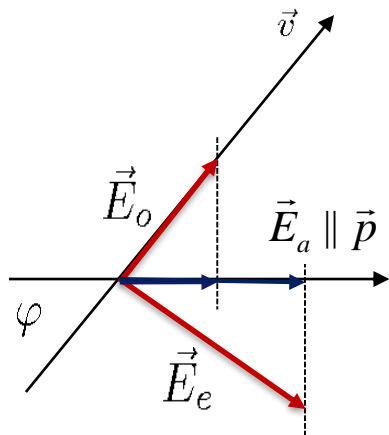
$$E_{||} = E_x \cos \varphi \cos(\omega t - kz - 2kn_o d)$$

$$E_{\perp} = E_x \sin \varphi \cos(\omega t - kz - 2kn_e d)$$

4) za analyzátozem

$$E_{p||} = E_{||} \cos \varphi = E_x \cos^2 \varphi \cos(\omega t - kz - 2kn_o d)$$

$$E_{p\perp} = E_{\perp} \sin \varphi = E_x \sin^2 \varphi \cos(\omega t - kz - 2kn_e d)$$



obě vlny kmitají ve stejném směru a mohou tedy interferovat, celkový fázový rozdíl je

$$\delta = 2k(n_o - n_e)d \quad (\text{faktor 2 se objevuje kvůli průchodu vláknem tam a zpět})$$

## analýza tloušťky nervových vláken - GDx

Interference dvou vln:  $I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \delta$  přičemž  $I = (E^0)^2$

v našem případě  $E_{p||}^0 = E_x \cos^2 \varphi$  ,  $E_{p\perp}^0 = E_x \sin^2 \varphi$  dává

$$I = E_x^2 (\cos^4 \varphi + \sin^4 \varphi + 2 \cos^2 \varphi \sin^2 \varphi \cos \delta)$$

což lze (spolu s označením  $E_x^2 = I_0$  ) přepsat jako

$$I/I_0 = 1 - \sin^2 \frac{\delta}{2} \sin^2 2\varphi$$

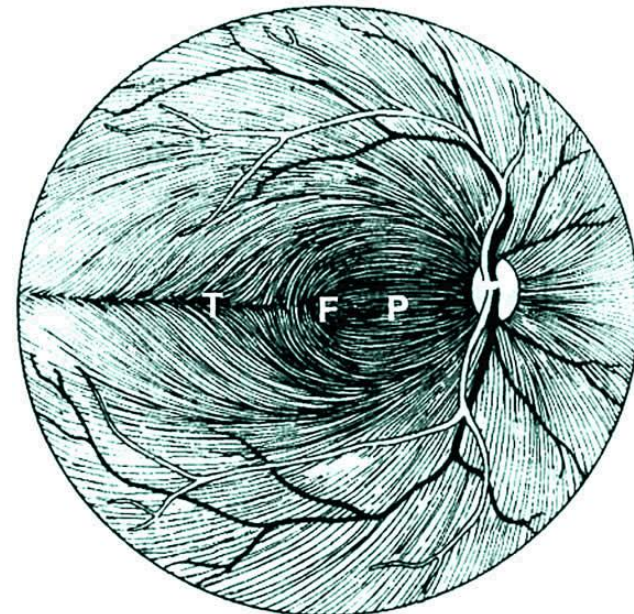
pro konkrétní vákno ( $\delta = \text{konst}$  ) můžeme otočit polarizátorem a pozorujeme vyhasínání intenzity:

$$I_{\max}(\varphi = 0) = I_0 \quad I_{\min}(\varphi = \pi/4) = I_0 \cos^2 \frac{\delta}{2}$$

Odtud lze již snadno určit tloušťka každého vlákna, neboť

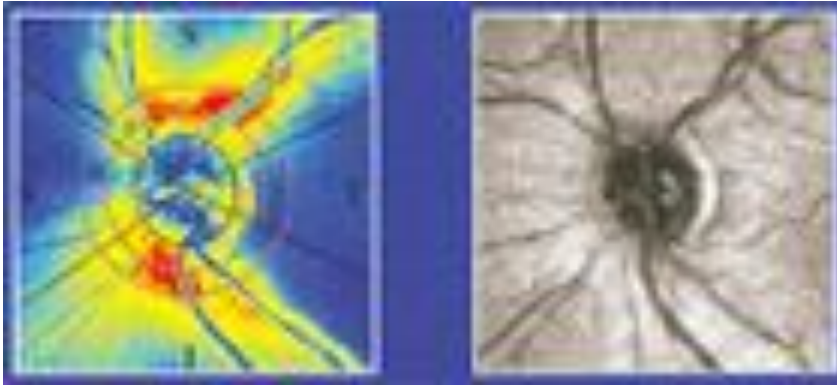
$$\frac{I_{\max}}{I_{\min}} = \cos^2 \frac{\delta}{2}$$

a v  $\delta = 2k(n_o - n_e)d$  je jedinou neznámou tloušťka vlákna  $d$



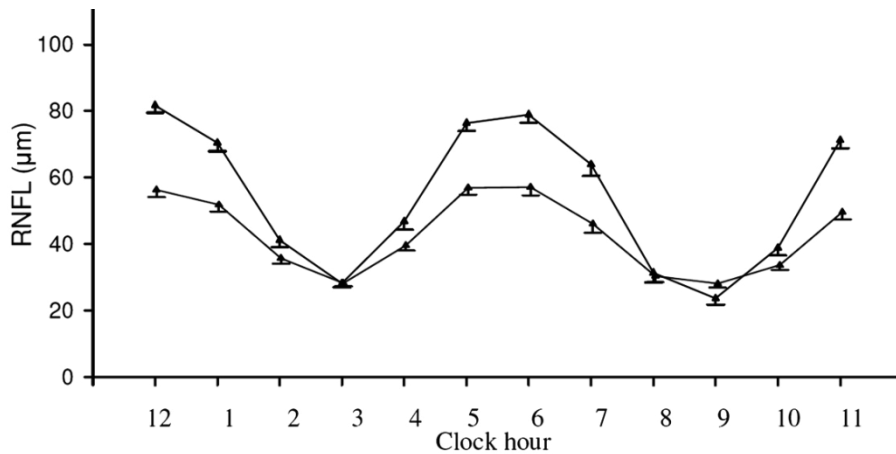


## analýza tloušťky nervových vláken - GDx



snímek výustění optického nervu (vpravo)

barevně kódovaná mapa tloušťky nervové tkáně z měření GDx



průběh tloušťky nervové tkáně podél zvolené zóny, horní křivka pro zdravé oko, dolní křivka pro oko postižené glaukomem