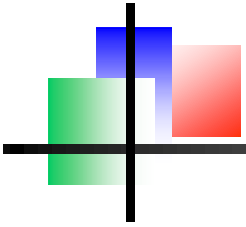


Podstawy Fizyki IV

Optyka z elementami fizyki współczesnej

wykład 20, 07.05.2012

wykład:	Czesław Radzewicz
pokazy:	Radosław Chrapkiewicz, Filip Ozimek
ćwiczenia:	Ernest Grodner



Wykład 19 - przypomnienie

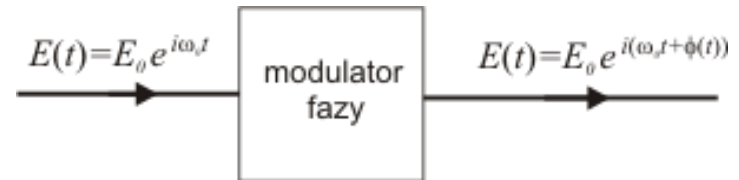
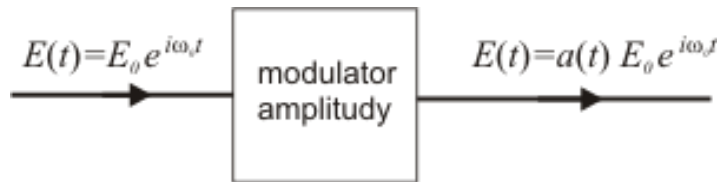
- wektor Jonesa dla światła całkowicie spolaryzowanego – definicja, przykłady
- baza polaryzacji liniowych, baza polaryzacji kołowych – przejścia z jednej do drugiej
- obrót układu odniesienia
- macierze Jonesa, przykłady
- przykłady transformacji polaryzacji przez płytki falowe – rachunek Jonesa
- światło częściowo spolaryzowane – macierz koherencji, stopień polaryzacji
- wektor Stokesa, sfera Poincare
- przykłady transformacji na sferze Poincare

modulacja światła

$$E(t) = A(t)e^{i[\omega t + \varphi(t)]}$$

↑
zależna od czasu amplituda

↖
zależna od czasu faza



$$a(t) = \frac{1}{2} [1 + \varepsilon \cos(\Omega t)]$$

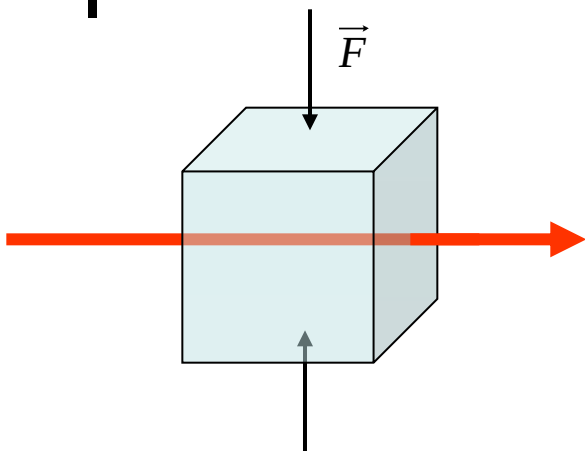
$$\begin{aligned} E_{out}(t) &= E_0 [1 + \cos(\Omega t)] e^{i\omega t} \\ &= \frac{E_0}{2} \left[e^{i\omega t} + \frac{\varepsilon}{2} e^{i(\omega - \Omega)t} + e^{i(\omega + \Omega)t} \right] \end{aligned}$$

$$\varphi(t) = \delta \sin(\Omega t)$$

$$\begin{aligned} E_{out}(t) &= E_0 e^{i[\omega t + \delta \sin(\Omega t)]} \\ &= E_0 \sum_{n=-\infty}^{\infty} (-1)^n J_n(\delta) e^{i(\omega + n\Omega)t} \end{aligned}$$

J_n - funkcja Bessela 1. rodzaju rzędu n

efekt elasto-optyczny



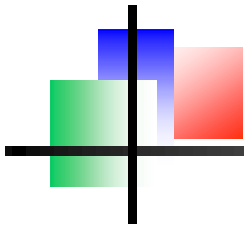
Efekt elasto-optyczny:

Naprężenia mechaniczne w materiale izotropowym czynią ten materiał dwójłomnym

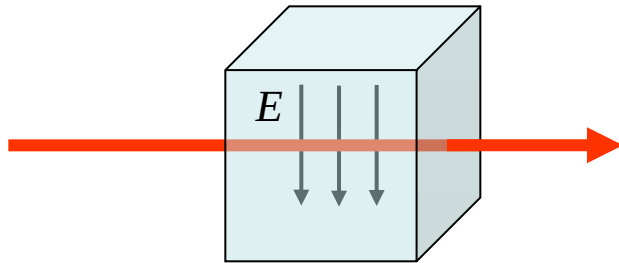
Dwójłomność jest proporcjonalna do różnicy naprężeń mechanicznych

$$\Delta n \propto \sigma_1 - \sigma_2$$

Testy naprężeń w układach mechanicznych



efekty elektro-optyczne



Efekt elektro-optyczny:
pole elektryczne przyłożone do materiału
zmienia jego współczynnik załamania

Ponieważ efekt e-o jest mały to
stosujemy rozwinięcie w szereg Taylora
$$n(E) = n_0 + rE + sE^2 + \dots$$

Liniowy efekt elektro-optyczny - efekt Pockelsa
Kwadratowy efekt elektro-optyczny - efekt Kerra

Twierdzenie: **efekt Pockelsa nie występuje w ośrodkach centrosymetrycznych,
na przykład w gazach, cieczach i szklach**

Definicja: ośrodek centrosymetryczny to taki, w którym transformacja

$$T: (x, y, z) \rightarrow (-x, -y, -z)$$

nie zmienia jego własności

Dowód:

Niech pole E skutkuje dwójłomnością $\Delta n = rE$.
stosujemy transformację T , która daje $E \rightarrow -E$.
Ostatecznie
 $rE = -rE$ czyli $r = 0$

kryształy dwójłomne

efekt Pockelsa

pole elektryczne jest wektorem
kryształ ma określoną symetrię
fala jest spolaryzowana

} złożona
matematyka
(tensor elektro-optyczny)

Przykład: kryształ KDP (KH_2PO_4),
pole elektryczne w kierunku osi optycznej

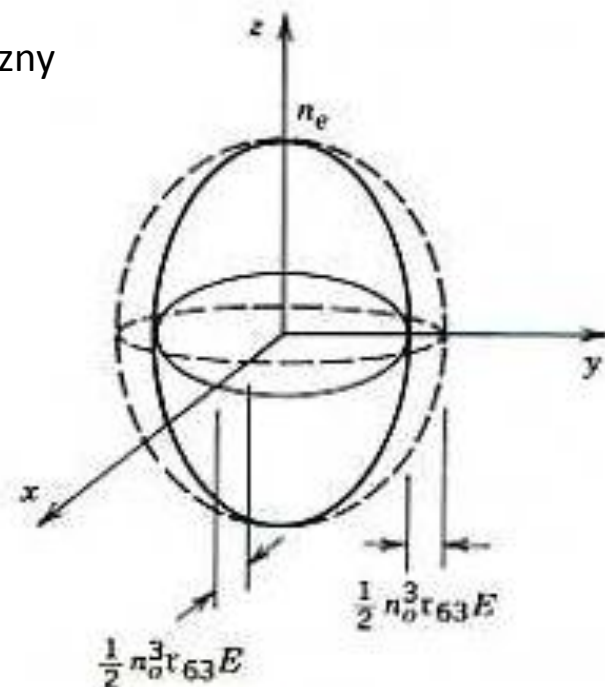
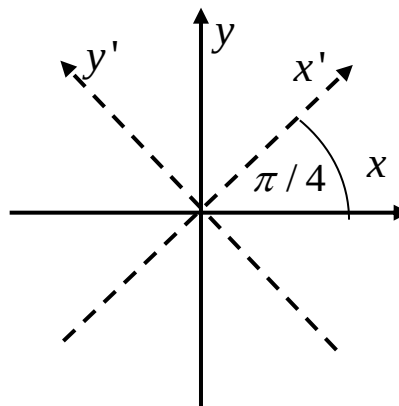
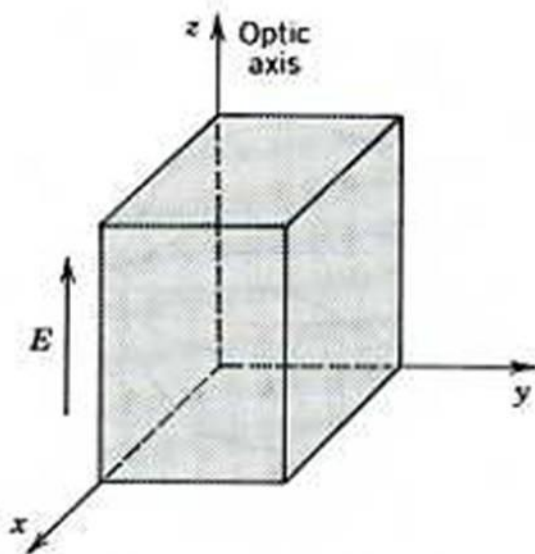
wynik:

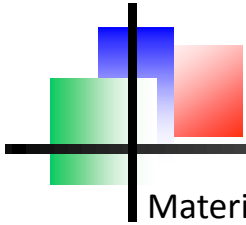
$$n_e = \text{const}$$

$$n_{x'} = n_o - \frac{1}{2} n_o^3 r_{63} E$$

$$n_{y'} = n_o + \frac{1}{2} n_o^3 r_{63} E$$

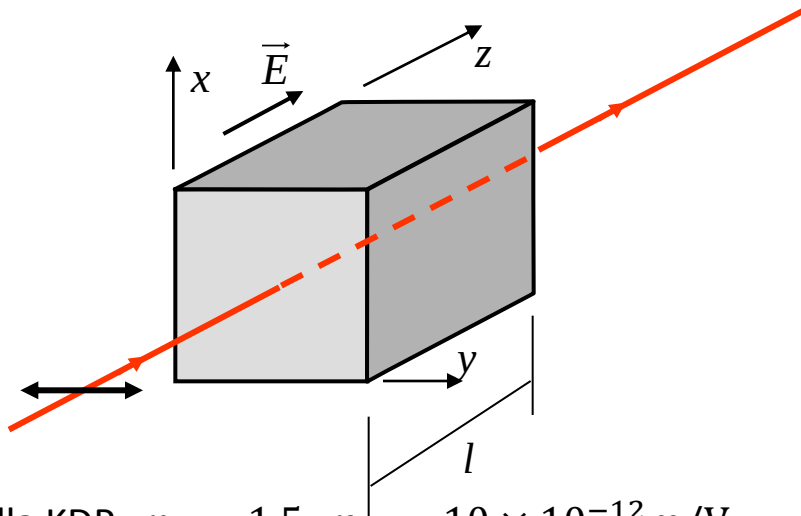
r_{63} - współczynnik elektro-optyczny





Materiał: KDP

podłużna komórka Pockelsa, 1



Liczby dla KDP: $n_o = 1.5$, $r_{63} = 10 \times 10^{-12} \text{ m/V}$
 Jeśli przyjmiemy $\lambda = 0.5 \mu$ to dostajemy $U_{\lambda/2} \cong 7 \text{ kV}$

Szybkość przełączania ograniczana przez szybkość sterownika elektrycznego

Dla modulacji harmonicznej o częstotliwości f impedancja komórki to $Z = \frac{1}{i2\pi fC}$, gdzie C jest pojemnością komórki. Moc sterownika

$$P = \frac{U^2}{Z}$$

opóźnienie fazowe dla polaryzacji wzdłuż kierunków x', y' to

$$\Gamma_{x'} = \frac{2\pi l}{\lambda} \left(n_o - \frac{1}{2} n_o^3 r_{63} E \right)$$

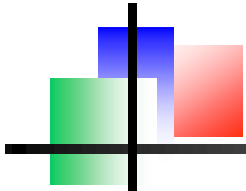
$$\Gamma_{y'} = \frac{2\pi l}{\lambda} \left(n_o + \frac{1}{2} n_o^3 r_{63} E \right)$$

dają względne opóźnienie fazowe

$$\Gamma = \Gamma_{y'} - \Gamma_{x'} = \frac{2\pi n_o^3 r_{63} E l}{\lambda}$$

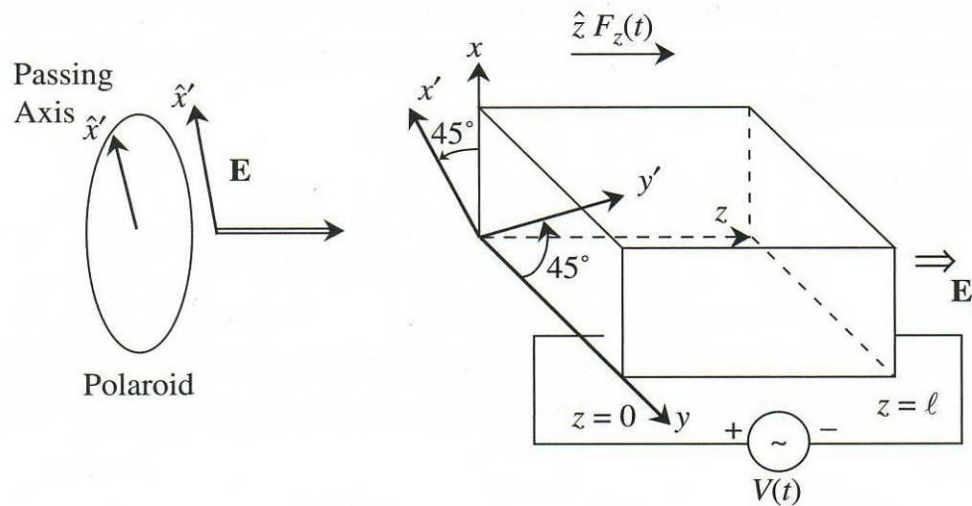
$$= \frac{2\pi n_o^3 r_{63} U}{\lambda} = \pi \frac{U}{U_{\lambda/2}}$$

gdzie $U_{\lambda/2} = \frac{\lambda}{2n_o^3 r_{63}}$ to nadęcie półfalowe komórki



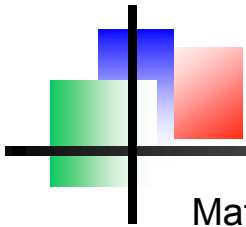
podł. kom. Pockelsa – modulacja fazy

Materiał: KDP



$$\begin{aligned}\Gamma_{x'} &= \frac{2\pi l}{\lambda} \left(n_0 - \frac{1}{2} n_0^3 r_{63} E \right) \\ &= \frac{2\pi l n_0}{\lambda} - \frac{2\pi l n_0^3 r_{63} E}{\lambda} \\ &= \Gamma_0 - \pi \frac{U}{U_{\lambda/2}}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}E_{in}(t) &= E_0 e^{i\omega t} \\ E_{out}(t) &= E_0 e^{i(\omega t - \Gamma_{x'})} = \\ &= E_0 e^{i\left(\omega t - \pi \frac{U(t)}{U_{\lambda/2}}\right)}\end{aligned}$$



Podł. kom. Pockelsa – modulacja amplit.

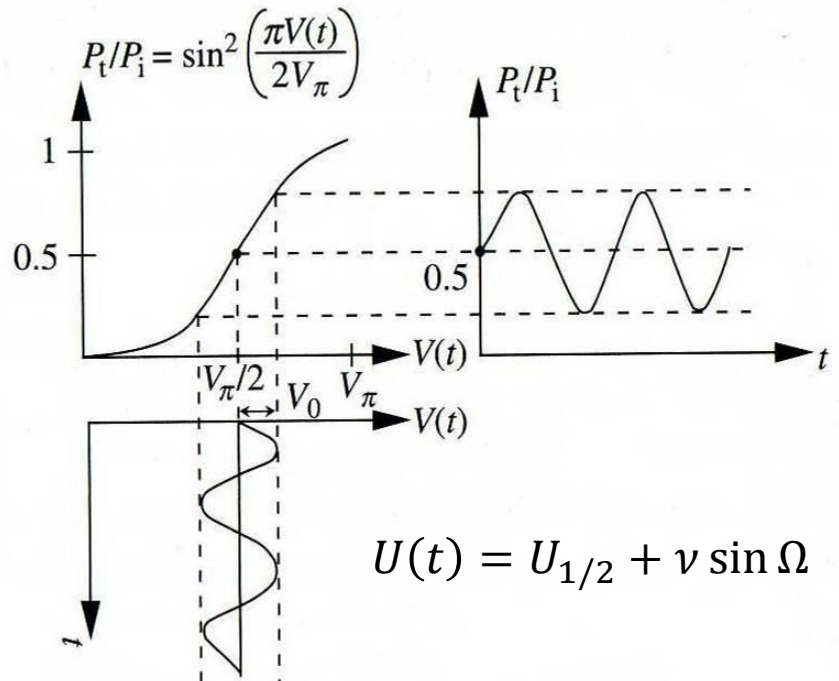
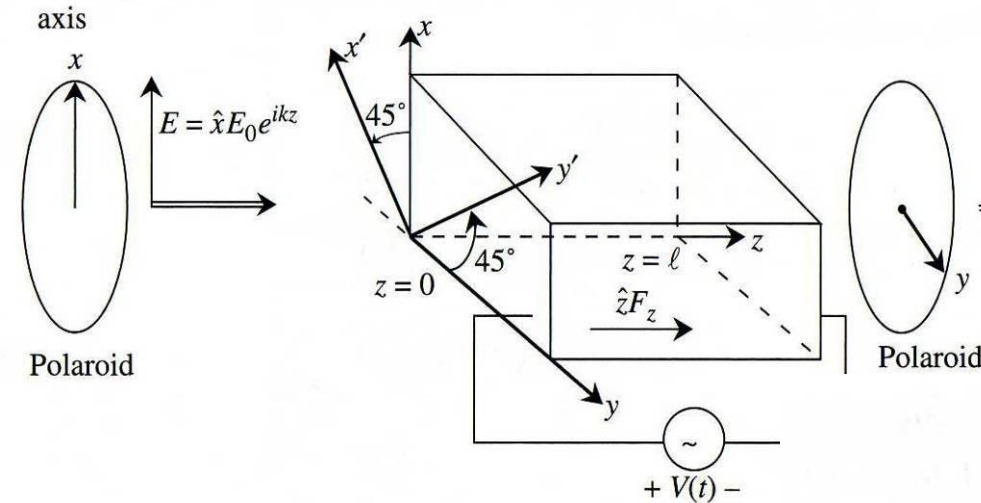
Materiał: KDP

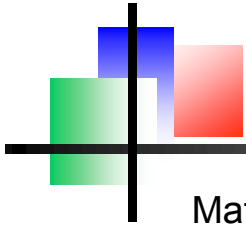
Komórka Pockelsa - płytka falowa z opóźnieniem regulowanym przez napięcie

$$\Gamma = \pi \frac{U}{U_{\lambda/2}}$$

wykład 19:

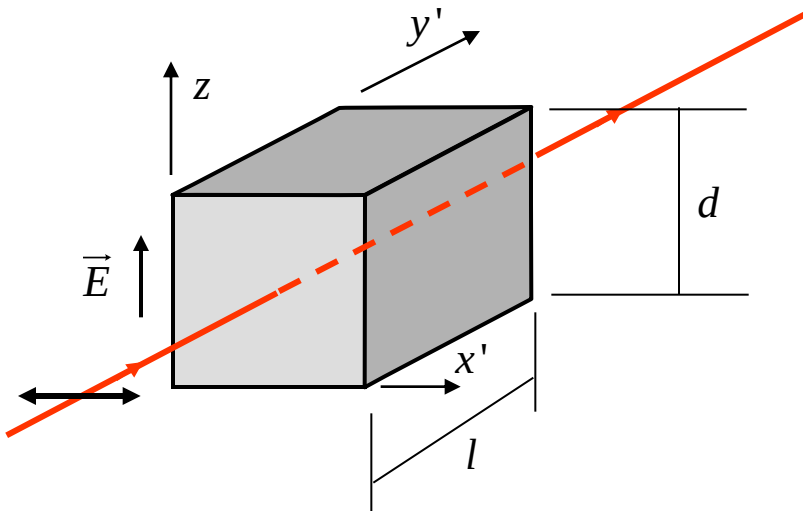
$$I_{out} = I_0 \sin^2 \Gamma/2$$





poprzeczna komórka Pockelsa

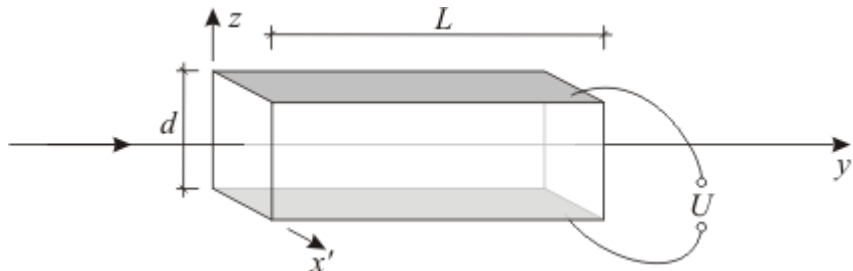
Materiał: KDP



opóźnienie fazowe dla polaryzacji wzdłuż kierunków x', z to

$$\Gamma_{x'} = \frac{2\pi l}{\lambda} \left(n_o - \frac{1}{2} n_o^3 r_{63} E \right)$$

$$\Gamma_z = \frac{2\pi l}{\lambda} n_e$$



względne opóźnienie fazowe dla polaryzacji wzdłuż kierunków x', z

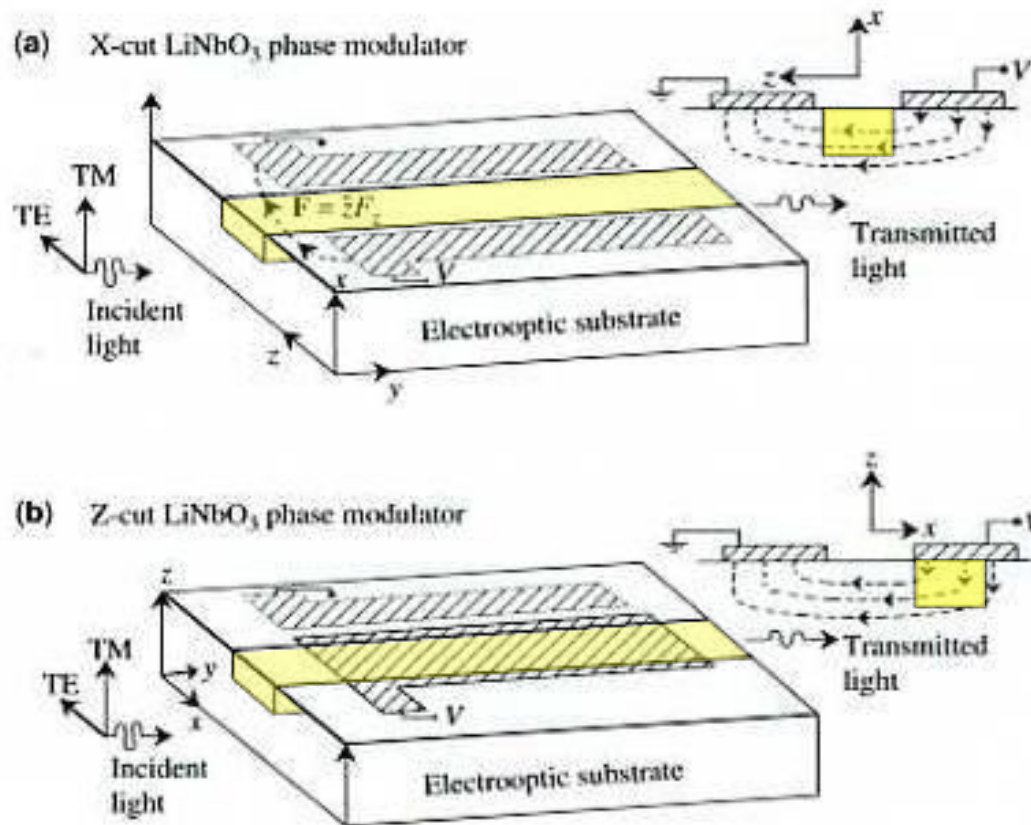
$$\begin{aligned} \Gamma &= \Gamma_z - \Gamma_{x'} = \frac{2\pi l}{\lambda} (n_e - n_o) + \frac{\pi n_o^3 r_{63} E l}{\lambda} \\ &= \frac{2\pi l}{\lambda} (n_e - n_o) + \frac{\pi n_o^3 r_{63} U l}{\lambda d} \end{aligned}$$

Co daje napięcie półfalowe

$$U_{\lambda/2} = \frac{\lambda}{n_o^3 r_{63}} \frac{d}{l}$$

zintegrowane modulatory elektro-optyczne, 1

Uwaga: kolorem żółtym
oznaczono falowód

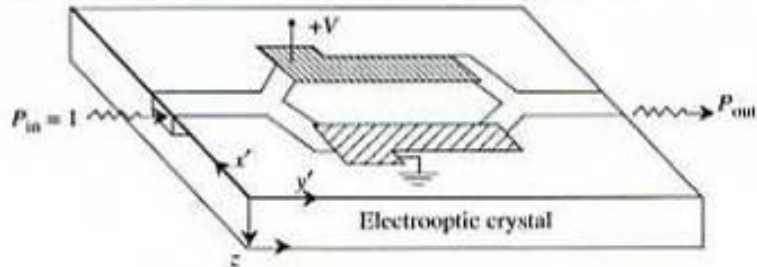


Liczby dla LiNbO₃: $n_o = 2.3$, $r_{33} = 31 \times 10^{-12} \text{ m/V}$
 $\lambda = 1.5 \mu\text{m}$, $l = 1 \text{ cm}$, $d = 10 \mu\text{m} \Rightarrow U_{\lambda/2} < 1 \text{ V}$

Uwaga: wyłącznie modulacja fazy

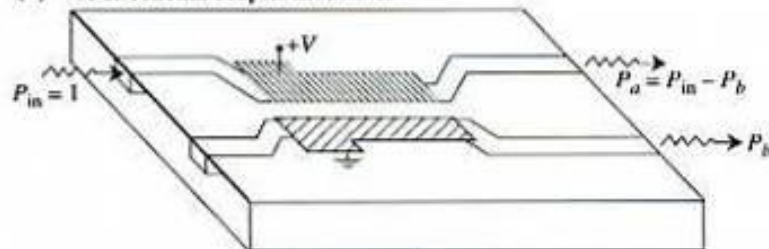
zintegrowane modulatory elektro-optyczne, 2

(a) A Mach-Zehnder interferometric waveguide modulator



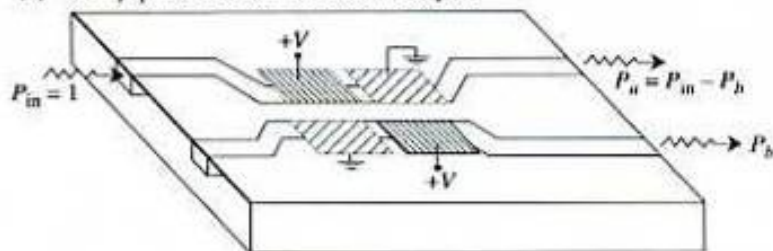
Modulator natężenia

(b) A directional coupler modulator



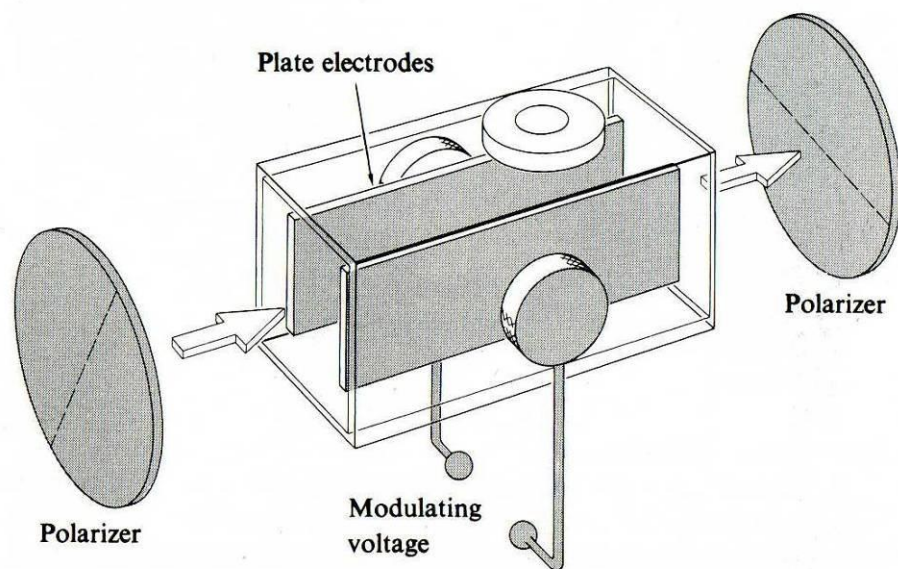
Regulowany sprzęgacz

(c) A $\Delta\beta$ -phase-reversal directional coupler



Regulowany sprzęgacz

komórka Kerra



Obserwacja:

pole elektryczne przyłożone do cieczy
czyni ją dwójłomną

efekt Kerra

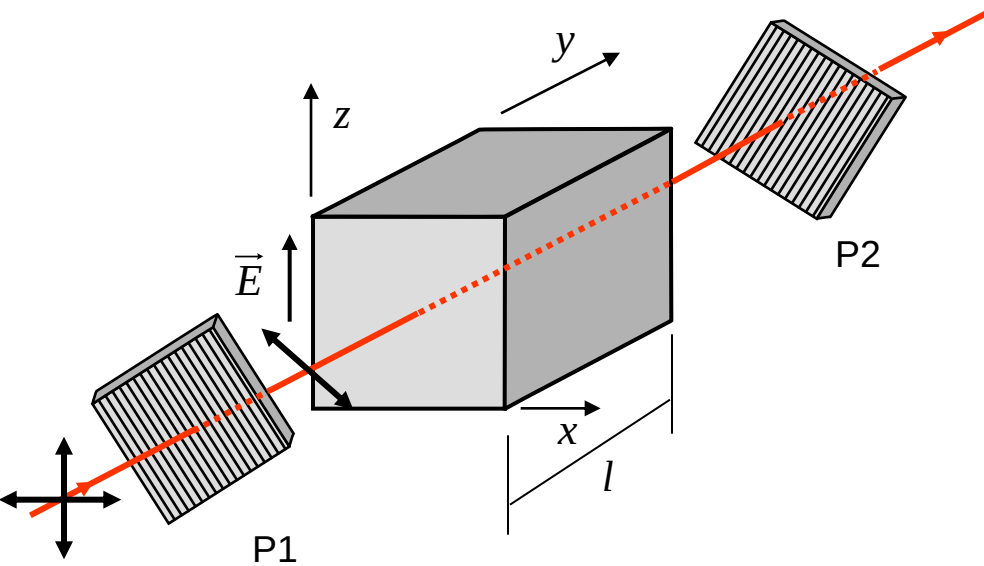
Efekt Kerra występuje w ośrodkach o dowolnej symetrii

dla ośrodków izotropowych (szkła, ciecze, etc.) pole elektryczne wymusza dwójłomność z osią optyczną wzdłuż kierunku pola i kwadratową zależnością od pola

$$\Delta n = \lambda K E^2$$

Regulowana płytka falowa

$$\Gamma = \frac{2\pi n l}{\lambda} \Delta n = 2\pi l K E^2$$

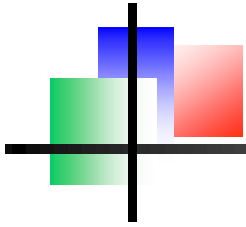


Liczyby:	woda	$K = 9.4 \times 10^{-14} \text{m/V}^2$
	nitrobenzen	$K = 4.4 \times 10^{-12} \text{m/V}^2$

dla nitrobenzenu: $l = 0.1 \text{m} \Rightarrow E_{\lambda/2} = \frac{1}{\sqrt{2lK}} \cong 10^6 \text{V/m} = 1 \text{kV/mm}$

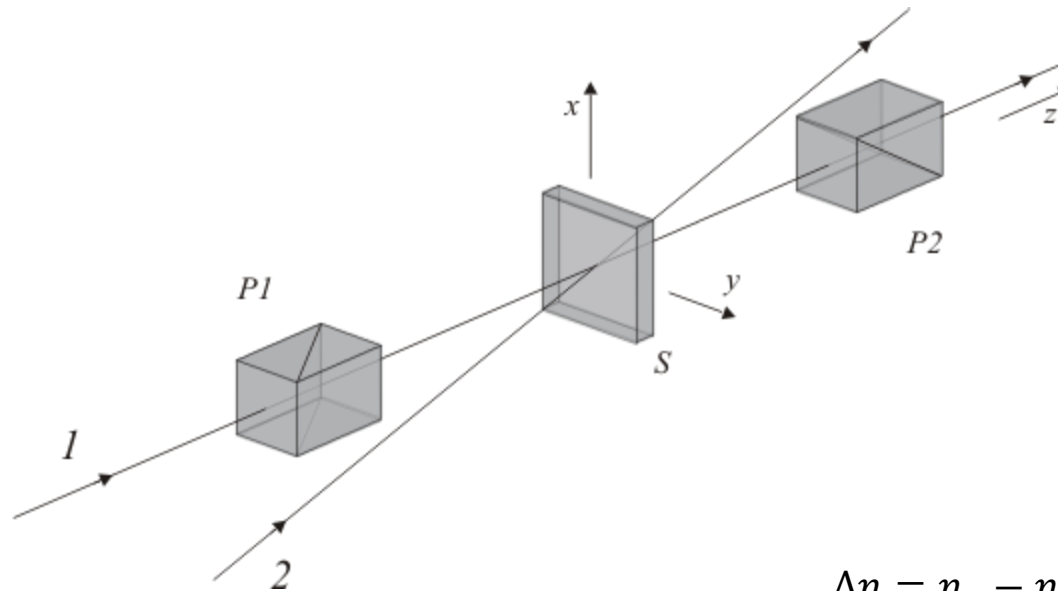
wykład 19: $I_{out} = \frac{I_0}{2} \sin^2 \frac{\Gamma}{2}$

dla małych wartości pola
 $I_{out} \cong 2I_0(\pi l K)^2 E^4$



optyczny efekt Kerra

Pole elektryczne indukujące efekt Kerra może być polem fali świetlnej

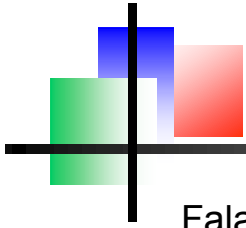


$$\Delta n = n_x - n_y \propto I_2$$

mierzymy

$$\frac{I_{out}}{I_1} = \sin^2 \left(\frac{2\pi \Delta n}{\lambda} \right)$$

krótkie impulsy – czasowa bramka optyczna



efekt akusto-optyczny, Raman-Nath

Fala dźwiękowa → modulacja współczynnika załamania

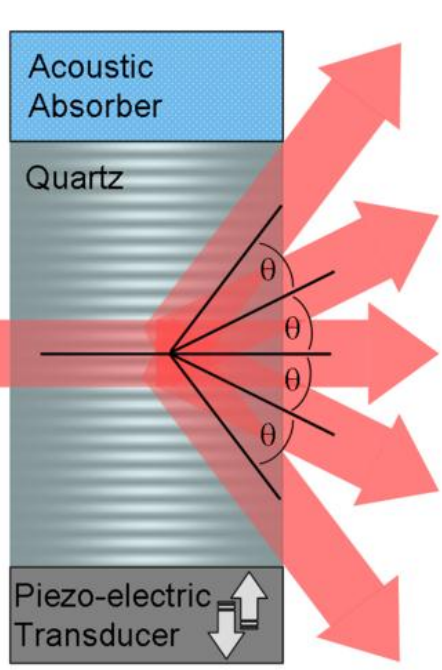
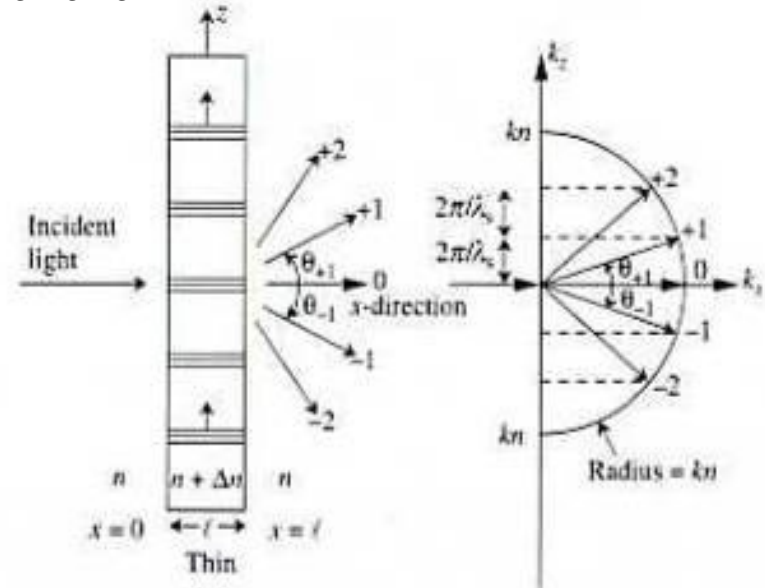
zakładamy proporcjonalność:

$$\Delta n(\vec{r}, t) = \Delta n \cos(\vec{k}_s \cdot \vec{r} - \omega_s t)$$

ω_s - częstość kołowa fali akustycznej

$\vec{k}_s$ - wektor falowy fali akustycznej

$v_s = \omega_s/k_s$ - prędkość fazowa fali akustycznej



modulator jest cienki; warunek Ramana-Natha: $l \ll \frac{k}{k_s^2}$

fazowa siatka dyfrakcyjna z odstępem pomiędzy rysami λ_s
ze wzoru siatkowego

$$\sin \Theta_m = m \frac{\lambda}{\lambda_s}$$

zachowanie energii i pędu dają

$$\omega_m = \omega + m\omega_s$$

$$k_{z,m} = mk_s$$

efekt akusto-optyczny, Bragg

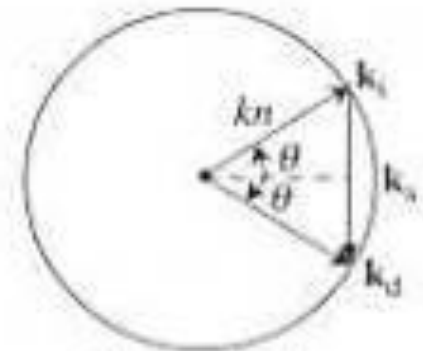
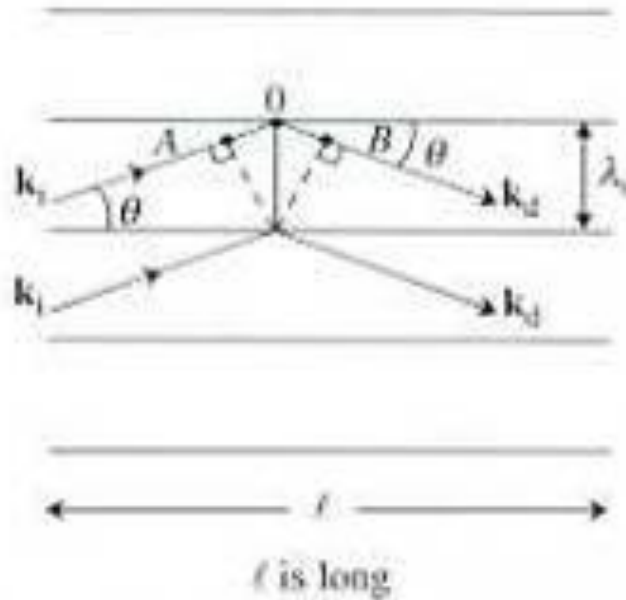
warunek Bragga

$$l \gg \frac{k}{k_s^2}$$

$$AO + OB = \lambda$$

$$2\lambda_s \sin \theta = \lambda$$

$$\sin \theta = \frac{\lambda}{2\lambda_s}$$



$$2kn \sin \theta = k_s$$

$$\vec{k}_d = \vec{k}_i + \vec{k}_s$$

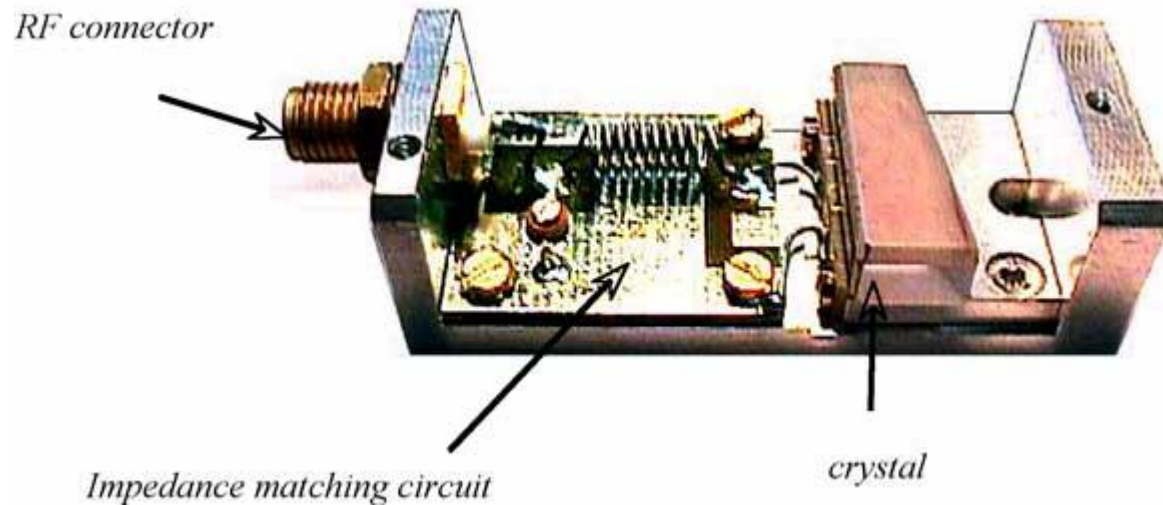
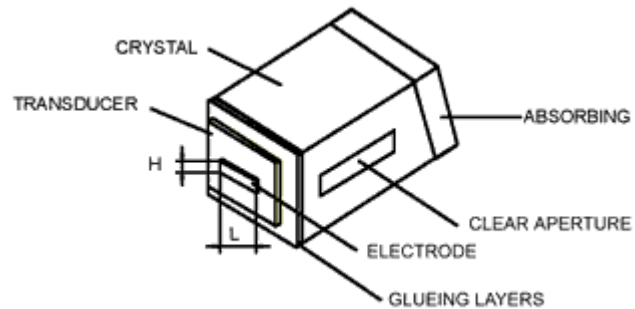
obraz kwantowy: foton + fonon

zachowanie energii i pędu

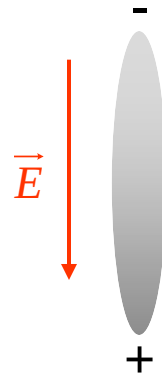
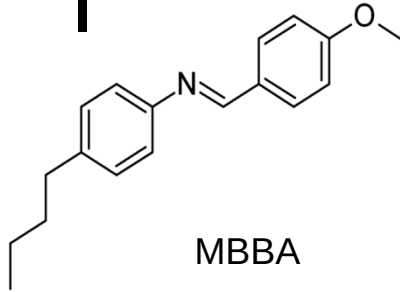
$$\omega_d = \omega_i + \omega_s$$

$$\vec{k}_d = \vec{k}_i + \vec{k}_s$$

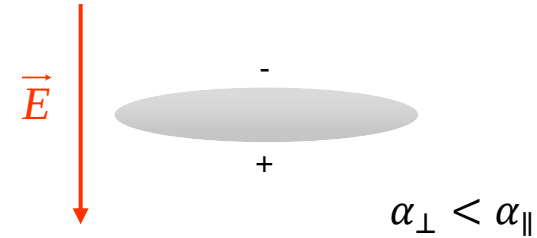
efekt akusto-optyczny, Bragg



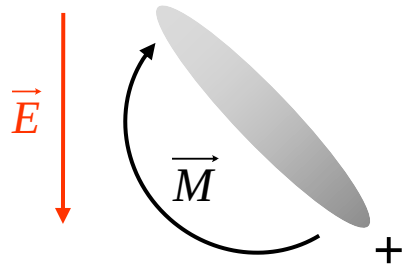
ciekłe kryształy, nematyki, 1



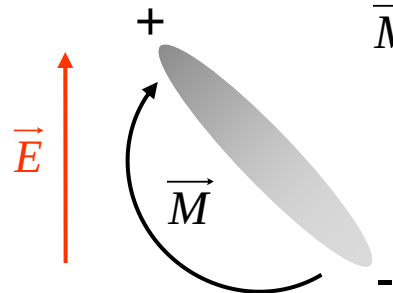
$\alpha_{\parallel}$



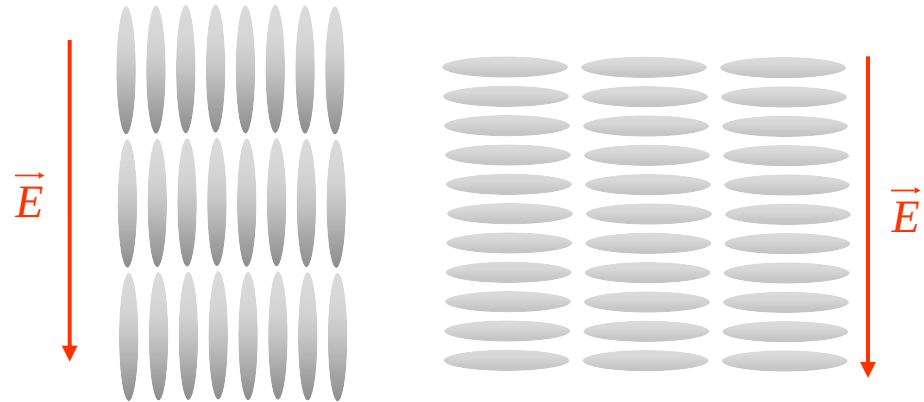
ciekawostka:
optyczne porządkowanie cieczy



$$\vec{M} = \vec{E} \times \vec{p}$$

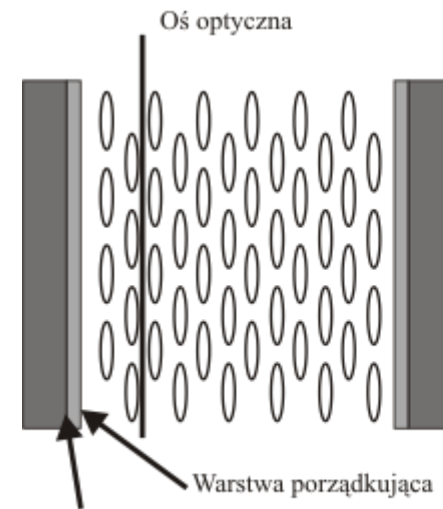
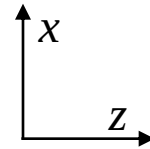
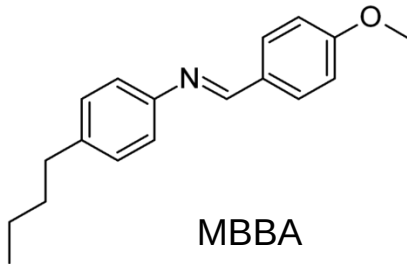
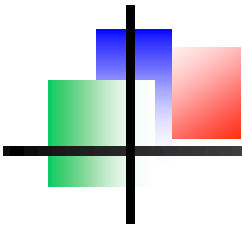


wykład 3: $\vec{p} = \alpha \epsilon_0 \vec{E}$,
 α - polaryzowalność atomu/cząsteczki



wykład 3: $n^2 = 1 + \frac{N\alpha}{1 - (N\alpha/3)}$
 $n_{\perp} < n_{\parallel}$

ciekłe kryształy, nematyki, 2

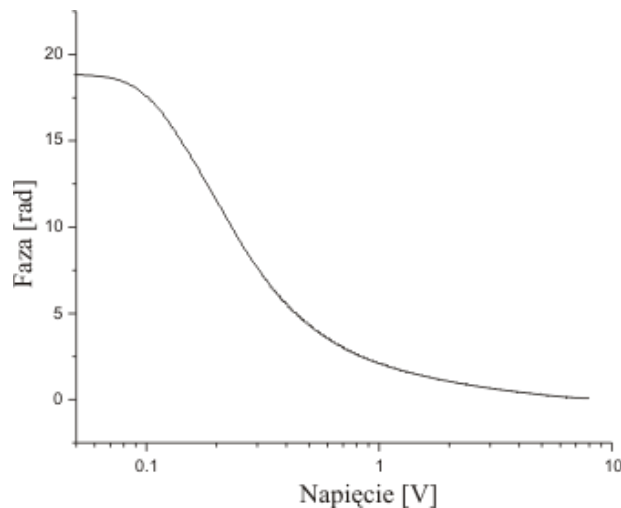
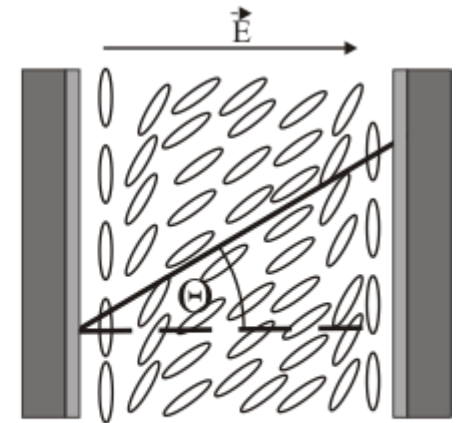


„spontaniczne” uporządkowanie

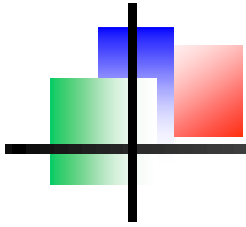
bez pola elektr.
z polem

$$n_y < n_x$$

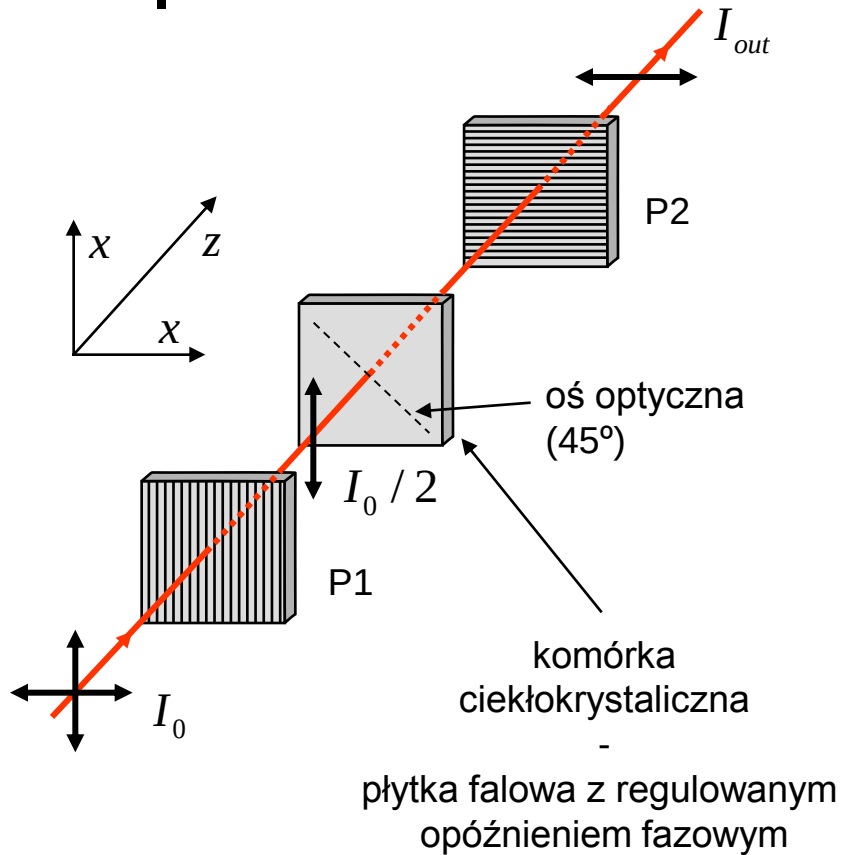
$$n_y = n_y(E)$$



Mamy materiał z dwójłomnością regulowaną elektrycznie
czas reakcji - ms



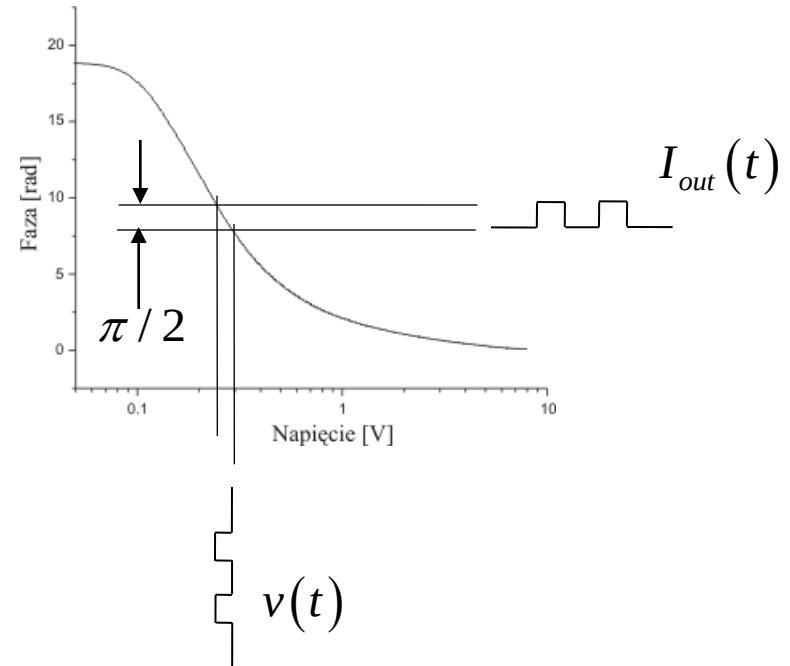
modulator natężenia (nematyczny)

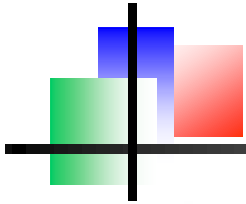


wykład 19:

$$I_{out} = \frac{I_0}{2} \sin^2 \frac{\Gamma}{2}$$

Γ - opóźnienie fazowe komórki zależne od napięcia





ciekłe kryształy, nematyki spiralne

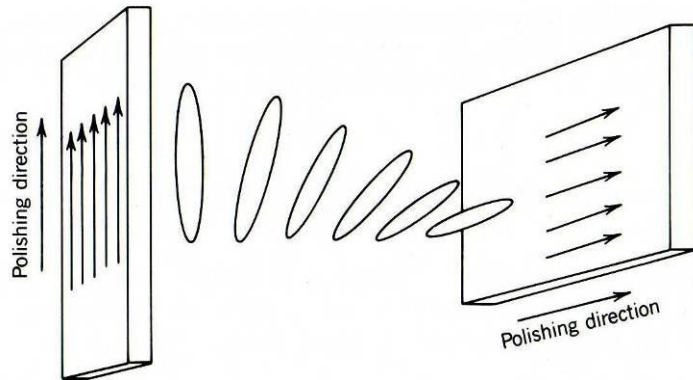
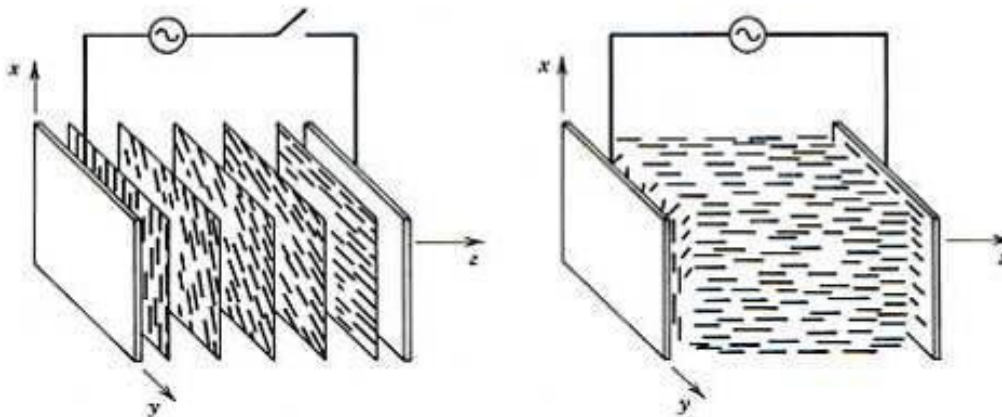


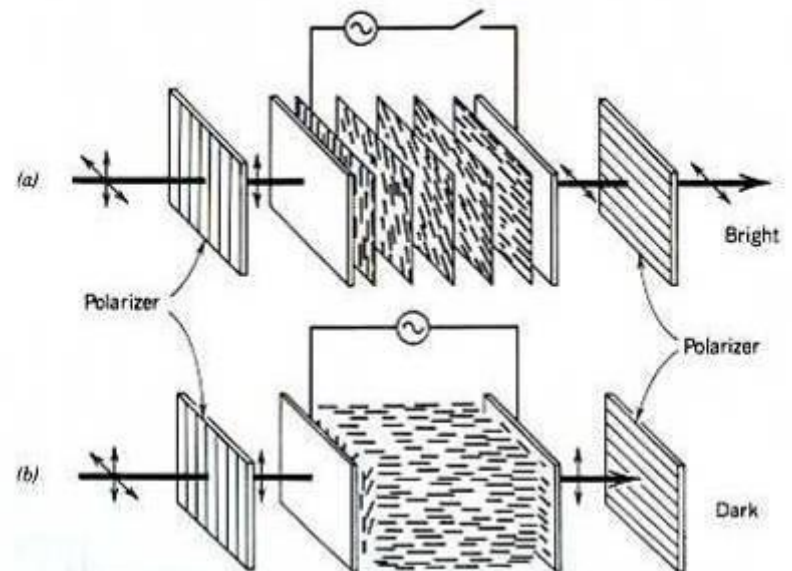
Figure 6.5-2 Molecular orientations of the twisted nematic liquid crystal.

bez napięcia – materiał aktywny
 optycznie – obrót płaszczyzny
 polaryzacji

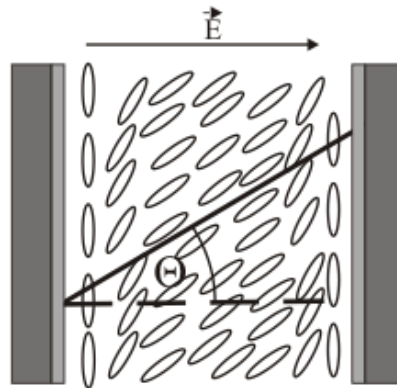
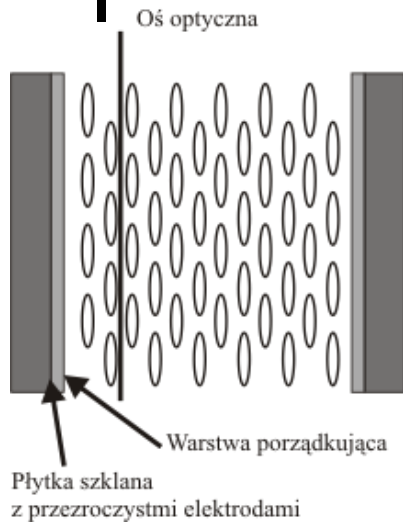
z napięciem – materiał izotropowy –
 nie zmienia polaryzacji



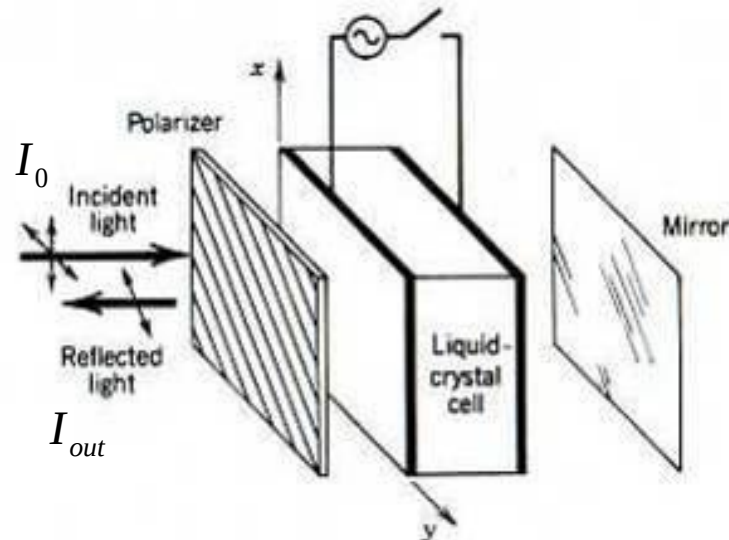
modulator natężenia na komórce
 z nematykiem spiralnym



wyświetlacze odbiciowe

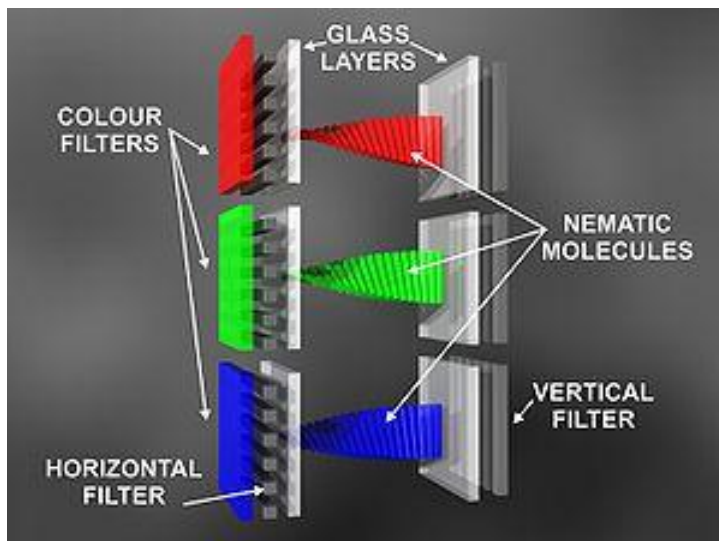


Nematyk bez spirali

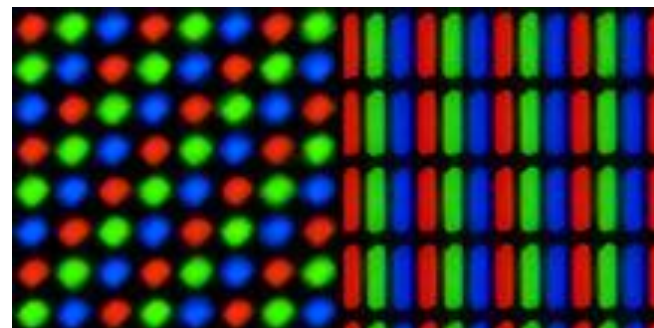


$$I_{out} = \frac{I_0}{2} \sin^2 \frac{\Gamma}{2}$$

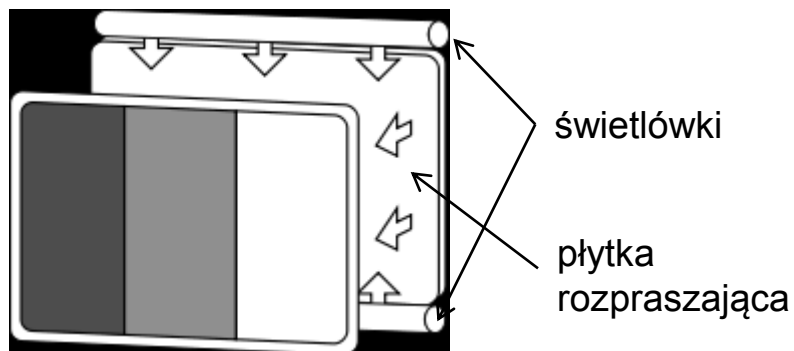
transmisyjne wyświetlacze LCD



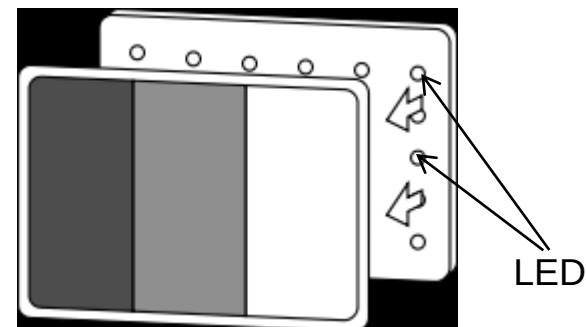
wizualizacja kolorowego wyświetlacza LCD



różne rastry



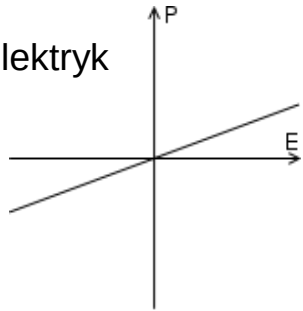
oświetlenie rozproszone



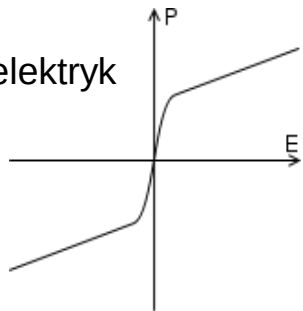
oświetlenie LED

ciekłe kryształy - smektyki

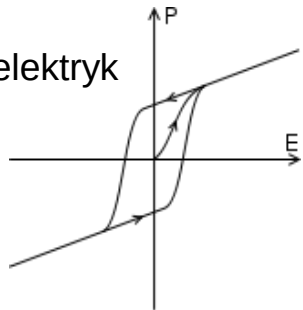
dielektryk



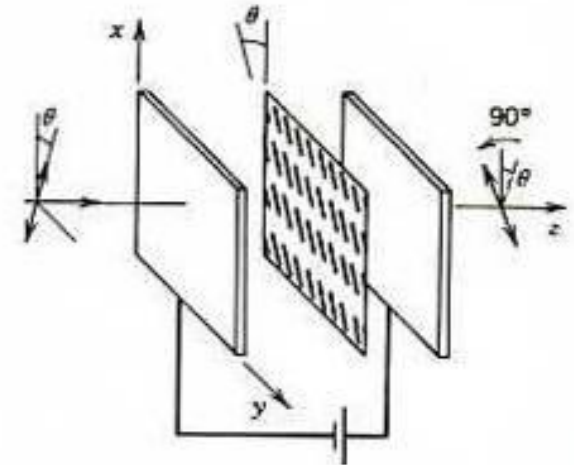
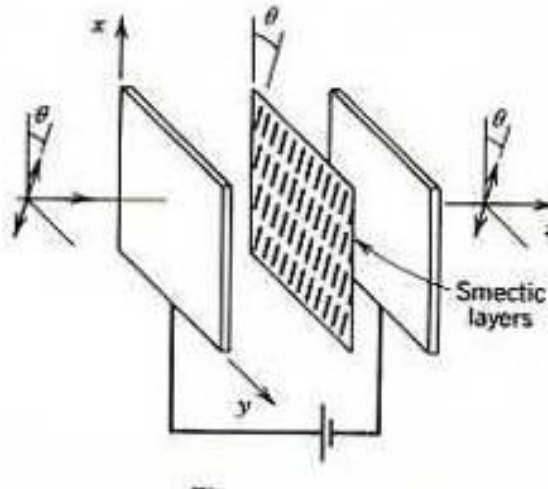
para-elektryk



ferro-elektryk

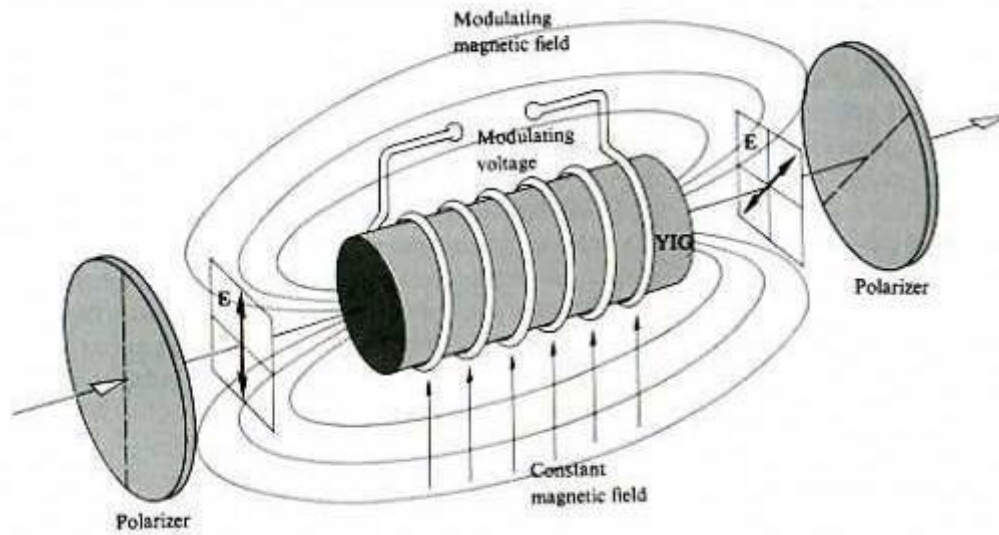


smektyk = ferro-elektryk

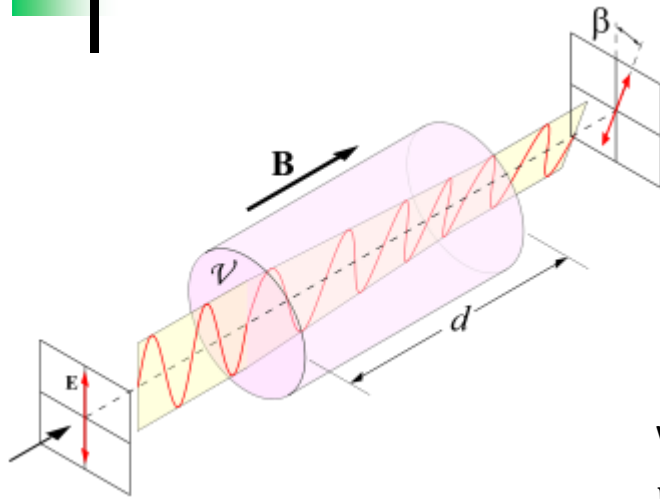


czas reakcji - μs

Efekt Faradaya, 1



Efekt Faradaya, 2



doświadczenie: $\beta = VBd$
stała V to stała Verdet

Efekt Faradaya – indukowana polem magnetycznym aktywność optyczna

wykład 19; w bazie polaryzacji kołowych

$$W_{Fk} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i\Gamma} \end{bmatrix}$$

gdzie Γ to względne opóźnienie dla polaryzacji kołowych

przechodzimy do bazy pol. liniowych:

$$W_{Fl} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -i & i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i\Gamma} \end{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & i \\ 1 & -i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \frac{\Gamma}{2} & \sin \frac{\Gamma}{2} \\ -\sin \frac{\Gamma}{2} & \cos \frac{\Gamma}{2} \end{bmatrix}$$

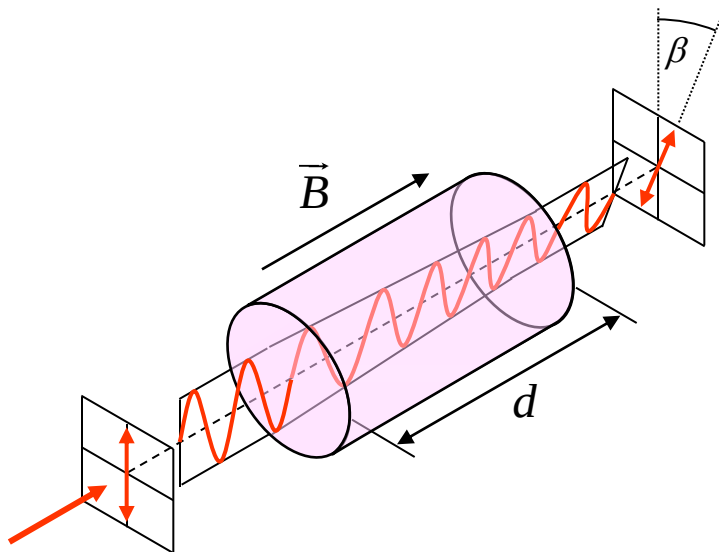
obrót o kąt $\Gamma/2$

Liczby: dla TGG

$$V = 40 \text{ rad}/(\text{m} \cdot \text{T})$$

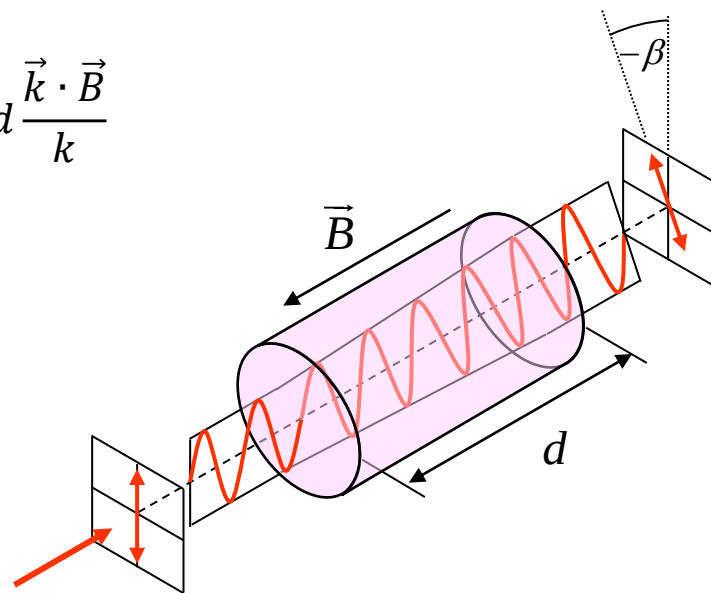
$$\beta = \frac{\pi}{4}, B = 1 \text{ T} \Rightarrow d = \frac{\beta}{VB} \cong 2 \text{ cm}$$

Efekt Faradaya, 3

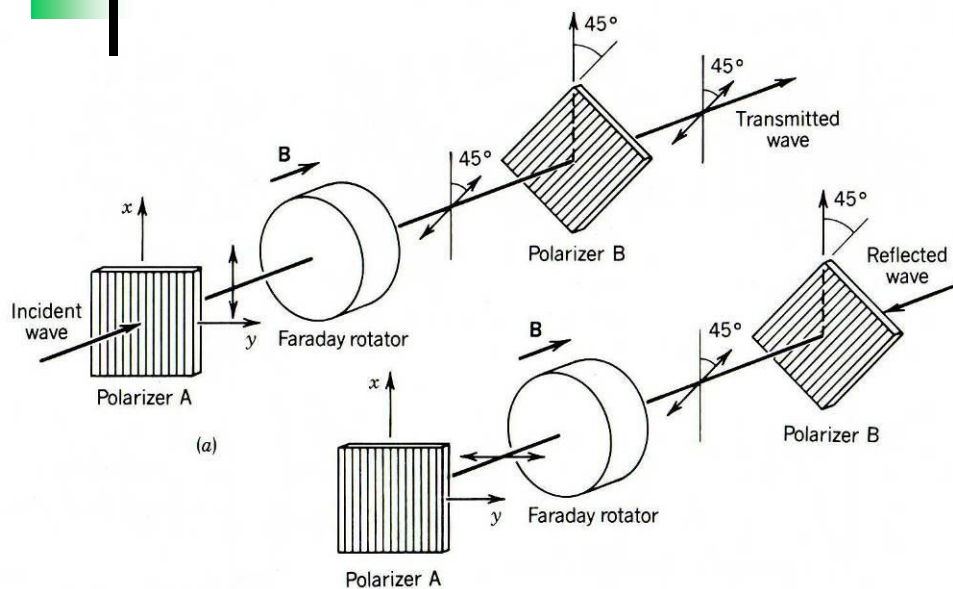


ważny jest zwrot pola magnetycznego!

$$\beta = Vd \frac{\vec{k} \cdot \vec{B}}{k}$$



izolator optyczny



bez zmiany polaryzacji:

