

# LINIOWY EFEKT ELEKTROOPTYCZNY

Materiały przeznaczone dla studentów kierunku  
*Zaawansowane Materiały i Nanotechnologia* w IFUJ – rok akademicki 2016/17  
prowadzący: dr hab. Krzysztof Dzierżęga

Ćwiczenie dotyczy problemu propagacji światła przez ośrodek dielektryczny poddany działaniu zewnętrznego pola elektrycznego. Pole to, działając na elektrony dielektryka, zmienia ich rozkład przestrzenny powodując, między innymi, zmianę jego właściwości optycznych. Ośrodki izotropowe mogą stawać się ośrodkami anizotropowymi, a kryształy jednoosiowe dwuosiowymi. Wymuszona w ten sposób dwójłomność prowadzi do zmiany współczynników załamania dla promieni zwyczajnego i nadzwyczajnego. Jeżeli zmiany te są wprost proporcjonalne do amplitudy przyłożonego pola elektrycznego to efekt nosi nazwę **liniowego efektu elektrooptycznego** lub **efektu Pockelsa**. Efekt elektrooptyczny zachodzi dla kryształów nie wykazujących symetrii inwersyjnej i prowadzi do zmiany polaryzacji światła propagującego przez taki kryształ. Efekt ten znalazł wiele zastosowań, w szczególności w technice laserowej w różnego typu modulatorach i deflektorach wiązek laserowych, a także w generacji laserowych impulsów gigantycznych czy femtosekundowych z wykorzystaniem tzw. komórki Pockelsa.

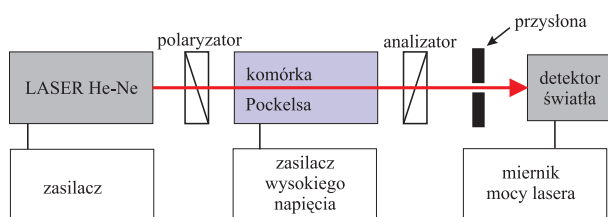
W trakcie ćwiczenia badany jest stan polaryzacji światła laserowego po przejściu przez kryształ KD\*P ( $KD_2PO_4$ ) do którego przyłożone jest zewnętrzne pole elektryczne. Bezpośrednim pomiarem podlega natężenie światła lasera He-Ne przechodzącego przez kryształ w zależności od napięcia przyłożonego do komórki Pockelsa i wyznaczana jest wartość tzw. **napięcia półfalowego** dla tego kryształu.

## Zagadnienia do samodzielnego przestudiowania

1. Fala świetlna oraz polaryzacja fal świetlnych i jej rodzaje [1].
2. Na czym polega zjawisko dwójłomności, co to są płytki falowe (fazowe) i w jaki sposób przy ich pomocy sprawdzić stan polaryzacji światła? [1, 2].
3. Co to jest elipsoida współczynnika załamania i jak wyznaczyć współczynnik załamania światła przy jej pomocy? Jak wygląda zależność pomiędzy współczynnikiem załamania światła a stałą przenikalności elektrycznej ośrodka? [1, 2].
4. Na czym polega **efekt elektrooptyczny**?, rodzaje kryształów dla których występuje liniowy lub kwadratowy efekt elektrooptyczny, komórka (modulator) Pockelsa [1, 2, 3].
5. Zastosowanie efektu elektrooptycznego - przełączniki, modulatory, odchyłacze wiązek światła [1].

## Aparatura i materiały

Laser He-Ne o mocy około 1.0 mW z zasilaczem, dwa polaryzatory, komórka Pockelsa z kryształem KD\*P



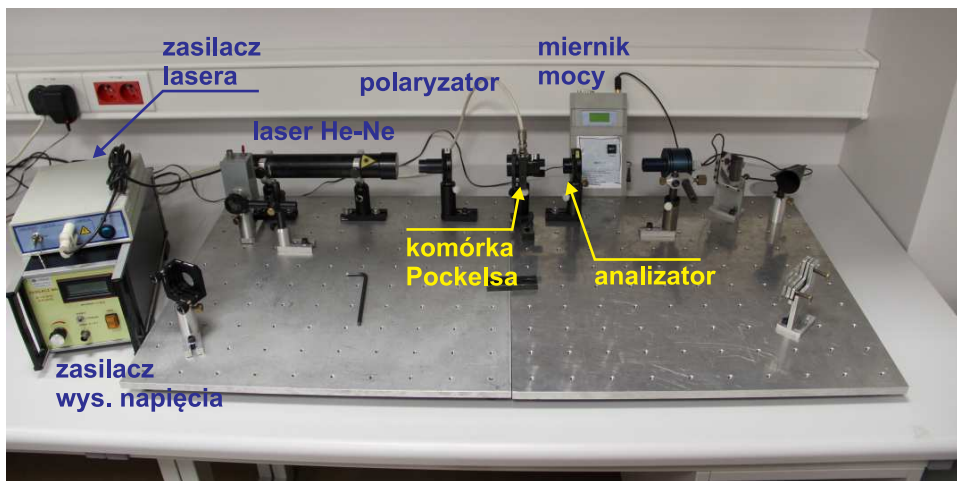
Rysunek 1: Schemat układu eksperymentalnego.

( $KD_2PO_4$ ), zasilacz wysokiego napięcia 0-3.0 kV, miernik mocy lasera, przysłona, kabel wysokonapięciowy, oprawki i uchwyty elementów optycznych, oscyloskop, generator sygnałów elektrycznych.

## Przebieg ćwiczenia

Układ eksperymentalny został schematycznie przedstawiony na rysunku 1. W celu wyznaczenia napięcia półfalowego dla kryształu  $KD_2PO_4$ , będącego integralnym elementem komórki Pockelsa, należy postępować w następujący sposób:

1. Włączyć laser He-Ne.  
**W celu osiągnięcia stabilnych warunków pracy laser He-Ne powinien być włączony przez około godzinę przed rozpoczęciem jakichkolwiek pomiarów ilościowych.**
2. Bez komórki Pockelsa, obserwując plamkę wiązki laserowej na ekranie za analizatorem, ustawić polaryzator i analizator w taki sposób aby natężenie plamki było minimalne (w idealnej sytuacji równe zero).
3. Pomiędzy polaryzator i analizator wstawić komórkę Pockelsa (bez przyłożonego napięcia) w taki sposób, aby transmisja układu nie uległa zmianie.
4. Obrócić nieco analizator i wstawić głowicę miernika mocy lasera w wiązkę, a następnie powrócić do poprzedniego ustawienia analizatora.
5. Zmierzyć moc przechodzącej wiązki laserowej w zależności od przyłożonego napięcia na komórkę Pockelsa. Pomiary przeprowadzić dla napięć w zakresie 0-6 kV w co najmniej dwóch seriach pomiarowych. Wyniki przedstawić w formie tabeli zamieszczonej poniżej.



Rysunek 2: Układ eksperymentalny.

L.p.	U [mV]	$I_{tr}$ [ $\mu$ W]	T	$\Gamma$ [ $\pi$ ]
1.				
2.				
...				

- Nie wolno dotykać elementów optycznych (polaryzatory, okienka lasera, okienka komórki Pockelsa) gdyż może to doprowadzić do ich zniszczenia.

6. Dla wartości napięć odpowiadających przesunięciu fazowemu o pół ( $V_\pi$ ) i ćwierć fali ( $V_{\pi/2}$ ) zbadać stan polaryzacji wiązki światła wychodzącej z kryształu. Wyniki przedstawić we współrzędnych polarnych.

## Opracowanie wyników

1. Na podstawie wyników przeprowadzonych pomiarów, dla każdego punktu pomiarowego (każdego napięcia), wyliczyć transmisję  $T$  oraz wartość przesunięcia fazowego  $\Gamma$ . Wyniki zamieścić w tabeli oraz przedstawić w formie wykresów.
2. Na podstawie wyników pomiarów wyznaczyć wartość napięcia półfalowego  $V_\pi$ .  
**Proszę pamiętać o przeprowadzeniu analizy niepewności pomiarowych.**
3. Wyniki doświadczalne porównać z obliczeniami teoretycznymi, wartości potrzebnych parametrów można znaleźć w pracy [3].

## Zasady BHP

Ponieważ w ćwiczeniu wykorzystywane jest promieniowanie laserowe, źródła wysokiego napięcia oraz niezwykle delikatne elementy optyczne wymagane jest od studenta stosowanie się do poniższych zasad.

- Nie wolno patrzeć wprost w wiązkę laserową, gdyż może to doprowadzić do trwałej utraty wzroku.
- Nie wolno kierować wiązki laserowej na inne osoby.
- Nie wolno dotykać wyjść zasilaczy wysokiego napięcia co grozi porażeniem prądem.

## Dodatek A: Efekt elektrooptyczny w kryształach $KD_2PO_4$

Kryształ  $KD_2PO_4$  (dwudeuterowy fosforan potasowy) posiada czterokrotną oś symetrii, którą zgodnie z konwencją, nazywa się osią optyczną kryształu i oznacza przez  $z$ . Dodatkowo kryształ ten posiada dwie wzajemnie prostopadłe dwukrotne osie symetrii, które leżą w płaszczyźnie prostopadłej do osi  $z$  i oznaczane są jako osie  $x$  i  $y$ . Kryształ ten należy do grupy symetrii  $42m$ , a jego tensor elektrooptyczny ma postać

$$r_{ij} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ r_{41} & 0 & 0 \\ 0 & r_{52} & 0 \\ 0 & 0 & r_{63} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

gdzie jedynymi niezerowymi elementami są  $r_{41} = r_{52}$  i  $r_{63}$ . Biorąc pod uwagę postać tensora elektrooptycznego równanie na elipsoidę współczynnika załamania w obecności pola elektrycznego  $\vec{e} = \{e_x, e_y, e_z\}$  przyjmuje postać

$$\frac{x^2}{n_0^2} + \frac{y^2}{n_0^2} + \frac{z^2}{n_e^2} + 2r_{41}e_x yz + 2r_{41}e_y xz + 2r_{63}e_z xy = 1. \quad (2)$$

Stałe występujące w pierwszych trzech członach nie zależą od pola elektrycznego, a ponieważ kryształ jest jednoosiowy przyjmuje się, że  $n_x = n_y = n_0$ ,  $n_z = n_e$ . Widać więc, że zastosowanie pola elektrycznego prowadzi do pojawienia się wyrazów mieszanych  $xy$ ,  $xz$  i  $yz$  w równaniu elipsoidy współczynnika załamania. Oznacza to, że osie główne elipsoidy nie są już równoległe

do osi  $x$ ,  $y$  i  $z$ . Koniecznym zatem staje się znalezienie nowych osi głównych kryształu w obecności pola elektrycznego.

Zakładając, że pole elektryczne jest równoległe do osi  $z$  równanie (2) przybiera postać

$$\frac{x^2}{n_0^2} + \frac{y^2}{n_e^2} + 2r_{63}e_z xy = 1. \quad (3)$$

Problem nowych osi głównych sprowadza się do znalezienia nowego układu współrzędnych  $x'$ ,  $y'$ ,  $z'$  w którym równanie elipsoidy przyjmuje postać

$$\frac{x'^2}{n_{x'}^2} + \frac{y'^2}{n_{y'}^2} + \frac{z'^2}{n_{z'}^2} = 1. \quad (4)$$

Długości osi głównych elipsoidy wynoszą  $2n_{x'}$ ,  $2n_{y'}$  i  $2n_{z'}$  i zależą od natężenia pola elektrycznego. Stosując transformację

$$\begin{aligned} \hat{x} &= \hat{x}' \cos 45^\circ + \hat{y}' \sin 45^\circ \\ \hat{y} &= -\hat{x}' \sin 45^\circ + \hat{y}' \cos 45^\circ. \end{aligned} \quad (5)$$

równanie elipsoidy (3) przyjmuje postać

$$\left(\frac{1}{n_0^2} - r_{63}e_z\right)x'^2 + \left(\frac{1}{n_0^2} + r_{63}e_z\right)y'^2 + \frac{z'^2}{n_e^2} = 1. \quad (6)$$

Równanie powyższe pokazuje, że  $x'$ ,  $y'$  i  $z$  są rzeczywiste osiami głównymi elipsoidy w przypadku gdy pole elektryczne ma kierunek osi  $z$ . Z równań (4) i (6) wynika, że współczynnik załamania  $n_{x'}$  spełnia relację

$$\frac{1}{n_{x'}^2} = \frac{1}{n_0^2} - r_{63}e_z. \quad (7)$$

Ponieważ zmiany współczynnika załamania są małe, wobec tego można przyjąć, że  $n_{x'} \simeq n_0$  i wtedy  $n_0 + n_{x'} = 2n_0$ , a w konsekwencji

$$\frac{1}{n_0^2} - \frac{1}{n_{x'}^2} = \frac{(n_{x'} - n_0)(n_0 + n_{x'})}{n_0^2 n_{x'}^2} \simeq \frac{2(n_{x'} - n_0)}{n_0^3} = r_{63}e_z,$$

co ostatecznie pozwala zapisać równanie (7) w postaci

$$n_{x'} = n_0 + \frac{n_0^3}{2} r_{63}e_z \quad (8)$$

i podobnie

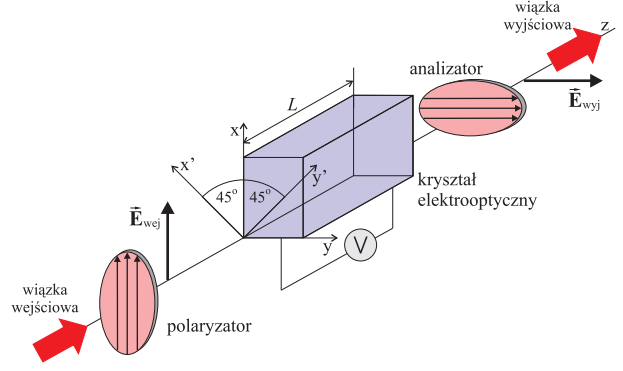
$$n_{y'} = n_0 - \frac{n_0^3}{2} r_{63}e_z \quad (9)$$

$$n_z = n_e. \quad (10)$$

## Dodatek B:

### Metoda wyznaczania napięcia półfalowego dla kryształu dwójłomnego

Rysunek 3 przedstawia układ do wyznaczania przesunięcia fazowego kryształu elektrooptycznego. Wiązka światła spolaryzowana liniowo w kierunku osi  $x$  pada na kryształ jednoosiowy wzdłuż kierunku jego osi optycznej  $z$ . W nieobecności pola elektrycznego tak



Rysunek 3: Schemat układu typowego modulatora elektrooptycznego

ustawiony kryształ jednoosiowy nie zmienia stanu polaryzacji światła. Przyłożenie zewnętrznego pola elektrycznego powoduje, że kryształ jednoosiowy staje się kryształem dwuosiowym z wyróżnionymi kierunkami  $x'$  i  $y'$  obróconymi o kąt  $45^\circ$  w stosunku do kierunku polaryzacji światła padającego. Wówczas przesunięcie fazowe  $\Gamma$  pomiędzy składowymi  $E_{x'}$  i  $E_{y'}$  wektora elektrycznego fali świetlnej po przejściu przez kryształ wynosi

$$\Gamma = (k_{x'} - k_{y'})L = \frac{\omega}{c}(n_{x'} - n_{y'})L = \frac{2\pi}{\lambda}(n_{x'} - n_{y'})L, \quad (11)$$

gdzie  $k_{x'}, k_{y'}$  oznaczają odpowiednie składowe wektora falowego,  $\lambda$  jest długością fali świetlnej w próżni, a  $L$  długością kryształu. Dla przypadku omówionego w poprzednim paragrafie, z polem elektrycznym skierowanym wzdłuż osi optycznej kryształu, a więc wzdłuż osi  $z$ , przesunięcie fazowe wynosi

$$\Gamma = \frac{2\pi}{\lambda} n_0^3 r_{63} e_z L.$$

Biorąc pod uwagę, że wartość pola elektrycznego w kryształach jest proporcjonalna do przyłożonego napięcia ( $e_z = V_z/L$ ) otrzymujemy

$$\Gamma = \frac{2\pi}{\lambda} n_0^3 r_{63} V_z, \quad (12)$$

a więc dla badanej konfiguracji wartość przesunięcia fazowego nie zależy od długości kryształu.

Wektor pola elektrycznego fali świetlnej po przejściu przez polaryzator

$$\vec{E}_{wej} = E_0 \hat{x} = \frac{E_0}{\sqrt{2}}(\hat{x}' + \hat{y}'). \quad (13)$$

Po przejściu przez kryształ wektor ten można zapisać jako:

$$\vec{E}_1 = \frac{E_0}{\sqrt{2}}(\hat{x}' + e^{i\Gamma} \hat{y}'), \quad (14)$$

a po przejściu przez drugi polaryzator (analizator)

$$\begin{aligned} \vec{E}_{wyj} &= (\vec{E}_1 \cdot \hat{y}) \hat{y} = \frac{E_0}{\sqrt{2}}(\hat{x}' + e^{i\Gamma} \hat{y}') \frac{1}{\sqrt{2}}(-\hat{x}' + \hat{y}') \hat{y} \\ &= \frac{E_0}{2}(-1 + e^{i\Gamma}) \hat{y}. \end{aligned} \quad (15)$$

Przy wyprowadzaniu powyższej relacji skorzystano z transformacji pomiędzy układami współrzędnych  $\hat{x}$   $\hat{y}$  a  $\hat{x}'$   $\hat{y}'$  opisanej równaniami (5).

Transmisja układu, czyli stosunek natężenia światła przechodzącego przez analizator do natężenia światła padającego na kryształ

$$\begin{aligned} T &\equiv \frac{I_{wyj}}{I_{wej}} = \frac{|\vec{E}_{wyj}|^2}{|\vec{E}_{wej}|^2} \\ &= \frac{(-1 + e^{i\Gamma})(-1 + e^{-i\Gamma})|E_0|^2/4}{|E_0|^2} \\ &= \sin^2(\Gamma/2). \end{aligned} \quad (16)$$

Podstawiając do powyższego równanie (12) transmisja przybiera postać

$$T = \sin^2(\pi n_0^3 r_{63} V_z / \lambda). \quad (17)$$

Wartość napięcia odpowiadającą przesunięciu fazowemu o pół długości fali wynosi  $V_\pi = \lambda / (2n_0^3 r_{63})$  i nazywane jest napięciem półfalowym. Wartość  $V_\pi$  można wyznaczyć mierząc transmisję w funkcji napięcia przyłożonego do kryształu i wówczas równanie (17) przybiera postać

$$T = \sin^2\left(\frac{\pi}{2} \frac{V_z}{V_\pi}\right). \quad (18)$$

## Literatura

- [1] B. Ziętek, *Optoelektronika*, Wydawnictwo UMK, Toruń 2005.
- [2] E. Hecht, *Optyka*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2012.
- [3] A. Yariv, *Optical Electronics in Modern Communications*, Oxford University Press, New York, Oxford 1997.

**UWAGA:** niniejsza instrukcja nie wystarcza do przygotowania się do ćwiczenia