Badanie liniowego efektu elektrooptycznego

Wstęp

Rozwój telekomunikacji optycznej oraz techniki laserowej spowodował zapotrzebowanie na materiały i urządzenia, za pomocą których można sterować wiązką świetlną. Do modulacji wiązki świetlnej najczęściej wykorzystywany jest efekt elektrooptyczny, ponieważ wytworzenie pola elektrycznego o określonej wartości jest znacznie prostsze niż np. pola magnetycznego. Bardzo ważnym argumentem jest również możliwość bardzo szybkich zmian pola elektrycznego, a więc modulacja światła z bardzo wysoką częstością.

Celem ćwiczenia jest zapoznanie ze zjawiskami, w których objawia się falowa natura światła, podstawowymi pojęciami dotyczącymi własności optycznych ośrodków anizotropowych, liniowym i kwadratowym zjawiskiem elektrooptycznym, oraz metodą badania zjawiska elektrooptycznego .

Zjawisko podwójnego załamania światła

Fala przechodząc przez granicę ośrodków ulega zwykle załamaniu. Współczynnik załamania definiowany jest jako stosunek prędkości fazowych fal w tych ośrodkach. W przypadku światła mamy do czynienia z falą elektromagnetyczną, a współczynnik załamania określa się najczęściej w stosunku do próżni (bezwzględny współczynnik załamania światła). Prawo załamania światła dla ośrodków izotropowych zapisuje się w postaci podanej przez Sneliusa

$$\sin\alpha / \sin\beta = n = c / v \qquad (1)$$

gdzie a jest kątem padania promienia, to jest kątem pomiędzy normalną do powierzchni i promieniem padającym, p- kątem załamania, *n* - współczynnikiem załamania, c - prędkością światła w próżni, a u prędkością światła w danym ośrodku. Warto podkreślić dość oczywisty fakt, że promień padający i załamany leżą w jednej płaszczyźnie, gdy mamy do czynienia z ośrodkiem izotropowym. W przypadku ośrodków anizotropowych prędkość fazowa fali zależy nie tylko od kierunku rozchodzenia się promienia, lecz może zależeć od kierunku drgań wektora elektrycznego. Tę zależność współczynnika załamania od kierunku propagacji fali opisuje się za pomocą zależności

$$\frac{x^2}{n_x^2} + \frac{y^2}{n_y^2} + \frac{z^2}{n_z^2} = 1 \qquad (2)$$

Jest to równanie tzw. indykatrysy, a n_x, n_y , n_z są głównymi współczynnikami załamania. W ośrodkach anizotropowych istnieje przynajmniej jeden taki kierunek rozchodzenia się promienia, dla którego prędkość fazowa światła nie zależy od kierunku polaryzacji. Kierunek ten nazywamy osią optyczną ośrodka. Jeżeli wiązka światła niespolaryzowanego rozchodzi się w ośrodku optycznie anizotropowym pod pewnym kątem do osi optycznej, to ulega rozdzieleniu na dwie. Jedna z tych wiązek leży w płaszczyźnie padania i spełnia prawo Sneliusa. Wiązkę tę nazywa się wiązką lub promieniem zwyczajnym. Druga z wiązek leży poza płaszczyzną padania i nazywana jest nadzwyczajną. Współczynnik złamania promienia zwyczajnego n_o i współczynnik załamania promienia nadzwyczajnego n_e określimy jako

$$n_0 = c / v_0 \qquad (3)$$
$$n_e = c / v_e \qquad (4)$$

Występujące w równaniach (3) i (4) wielkości \)$_0$ i \)$_e$ są prędkościami fazowymi dla promienia zwyczajnego i nadzwyczajnego. Zjawisko podwójnego załamania nazywane jest dwójłomnością.

Ze względu na własności optyczne ciała stałe (kryształy) dzielimy na trzy grupy:

1. Kryształy należące do układu regularnego zachowują się jak ośrodki izotropowe, a więc nie obserwuje się w nich podwójnego załamania (przykładem jest sól kuchenna). W tym przypadku $n_x = n_y = n_z = n_o$ i indykatrysa jest kulą o promieniu n_o.

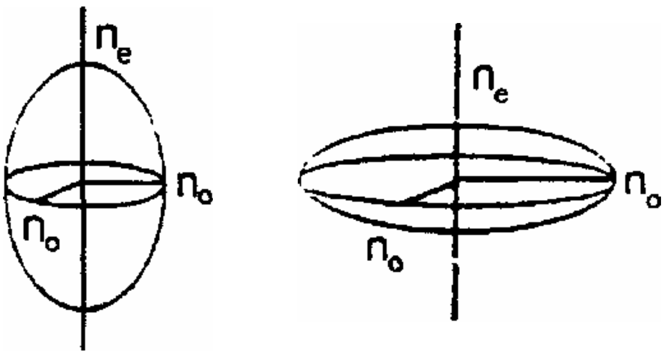
2. W kryształach należących do układu heksagonalnego, trygonalnego i tetragonalnego istnieje jeden kierunek (tzw. oś optyczna), dla którego prędkość fazowa fali świetlnej nie zależy od kierunku polaryzacji. Kryształy te nazywa się optycznie jednoosiowymi. Główne współczynniki załamania $n_x = n_y = n_o$ *i n^* = n_e *i* wobec tego indykatrysa jest elipsoidą obrotową. Osią optyczną jest oś z.

3. W kryształach należących do układu jednoskośnego, trójskośnego i rombowego istnieją dwa wyróżnione kierunki (osie optyczne). Kryształy te nazywamy dwuosiowymi. Tutaj mamy $n_x \neq n_y \neq n_z$.

Miarą dwójłomności ośrodka jest różnica pomiędzy współczynnikiem załamania dla promienia zwyczajnego i nadzwyczajnego

$$\Delta n = n_e - n_0 \qquad (5)$$

Jeżeli Aw < O, to kryształ nazywany jest optycznie dodatnim, natomiast w przypadku A/i > O optycznie ujemnym. Warto jeszcze podkreślić, że promienie zwyczajny i nadzwyczajny są spolaryzowane w kierunkach wzajemnie prostopadłych. Zjawisko to wykorzystuje się do budowy polaryzatorów, np. pryzmatów Nicola.



Rys. l. Indykatrysy kryształów jednoosiowych (oś optyczna zaznaczona grubszą linią) dla dwóch przypadków: a) kryształ optycznie ujemny i b) optycznie dodatni.

Promienie zwyczajny i nadzwyczajny mogą ze sobą interferować. Jeżeli interferują ze sobą dwie wiązki spolaryzowane liniowo o kierunkach wzajemnie prostopadłych, to w wyniku interferencji otrzymamy wiązkę spolaryzowaną kołowo, eliptycznie lub liniowo w zależności od różnicy faz, tak jak to ma miejsce podczas składania drgań wzajemnie prostopadłych o tej samej częstości.

Jeżeli promień zwyczajny i nadzwyczajny przejdą w krysztale drogę /, to różnica faz pomiędzy promieniem zwyczajnym i nadzwyczajnym wynosi

$$\Delta\gamma = (n_e - n_0)2\pi d / \lambda_0 \tag{6}$$

gdzie λ_0 jest długością fali w próżni.

Zjawisko elektrooptyczne

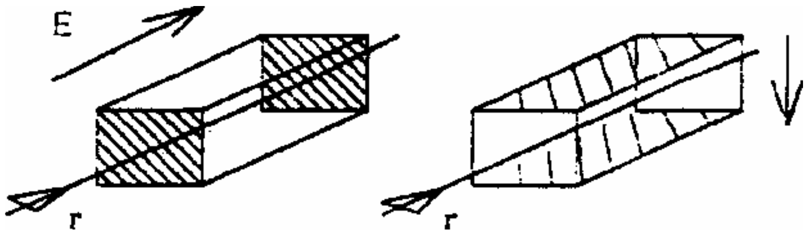
Dwójłomność może zostać wywołana (również w ciałach izotropowych) za pomocą czynników zewnętrznych takich jak naprężenia mechaniczne, pole elektryczne lub magnetyczne czy też gradient temperatury. Dwójłomność ośrodka pod nieobecność czynników zewnętrznych nazywa się dwójłomnością spontaniczną, natomiast dwójłomność spowodowana czynnikiem zewnętrznym nazywa się dwójłomnością wymuszoną lub indukowaną. Zmiana dwójłomności wywołana zewnętrznym polem elektrycznym nazywa się zjawiskiem elektrooptycznym. Jeżeli zmiana dwójłomności 6Aw jest liniową fiinkcją natężenia pola elektrycznego £, to mówimy o liniowym efekcie elektrooptycznym lub o efekcie Pockelsa

$$\delta\Delta n = rE \tag{7}$$

W przypadku, gdy zmiana jest proporcjonalna do kwadratu natężenia pola elektrycznego, mamy do czynienia z kwadratowym zjawiskiem elektrooptycznym nazwanym na cześć jego odkrywcy efektem Kerra

$$\delta\Delta n = RE^2 \tag{8}$$

W obu przypadkach może zmieniać się wartość zarówno współczynnika załamania promienia zwyczajnego jak i nadzwyczajnego. Jeżeli kierunek rozchodzenia się wiązki światła jest równoległy do kierunku zewnętrznego pola elektrycznego, mamy do czynienia z podłużnym zjawiskiem elektrooptycznym, natomiast w przypadku, gdy kierunek pola elektrycznego jest prostopadły do tego promienia, zjawisko nazywamy poprzecznym. Na rys. 2 przedstawiono wzajemną orientację kierunku rozchodzenia się wiązki światła i pola elektrycznego w podłużnym i poprzecznym efekcie elektrooptycznym. Powierzchnie zakreskowane symbolizują elektrody naniesione na kryształ (do elektrod przykładane jest napięcie).



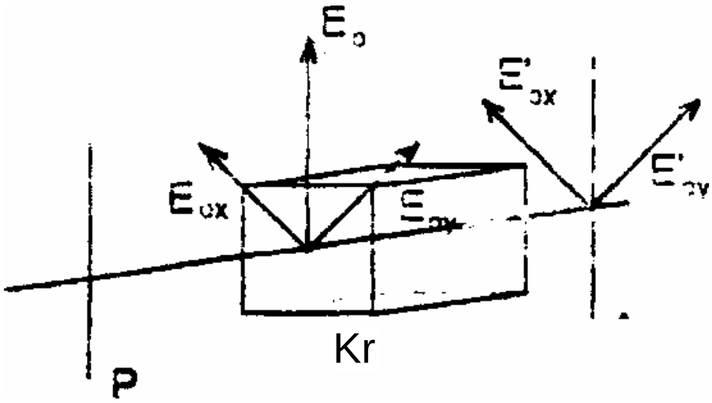
efekt podłużny $r \,||\, E$ efekt poprzeczny $r \perp E$

Rys. 2. Efekty elektrooptyczne, podłużny i poprzeczny. Zaznaczono kierunek biegu wiązki światła r i pola elektrycznego *E*.

Rozpatrzmy przejście wiązki światła spolaryzowanego przez kryształ. Dla prostoty rozważań założymy, że płaszczyzna polaryzacji wiązki tworzy kąt *n/4 z* kierunkiem, dla którego współczynnik załamania ma wartość największą przy danym kierunku propagacji wiązki. Wiązka ulega rozdzieleniu na dwie wzajemnie prostopadle spolaryzowane wiązki. Jeżeli natężenia pola elektrycznego wiązki padającej oznaczymy przez j£$_0$, to amplitudy pól promienia zwyczajnego E_{0x} i nadzwyczajnego E_0 będą jednakowe

$$E_{0x} = E_{0y} = \frac{E_0}{\sqrt{2}} \tag{9}$$

Podczas wejścia do kryształu fazy tych promieni są także jednakowe.



Rys. 3. Ilustracja do obliczenia natężenia fali świetlnej przy przechodzeniu przez układ polaryzator P, kryształ Kr, analizator A. Na rysunku zaznaczono płaszczyzny transmisji polaryzatora i analizatora.

Po przejściu przez kryształ fazy te wynoszą γ_x i γ_y , a ich różnica określona jest równaniem (6). Składowe natężenia pola fal po przejściu przez kryształ są równe

$$E'_{0x} = \frac{E_0}{\sqrt{2}}\cos(\omega t + \gamma_x) \qquad (10)$$

$$E'_{0y} = \frac{E_0}{\sqrt{2}}\cos(\omega t + \gamma_y) \qquad (11)$$

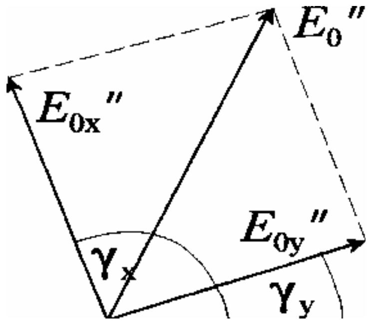
Jak już wspomniano, fale te interferują dając w wyniku tej interferencji falę spolaryzowaną liniowo, kołowo lub eliptycznie zależnie od różnicy faz y_x - Y Aby obliczyć natężenie wiązki po przejściu przez analizator ustawiony tak, że jego płaszczyzna przepuszczania jest równoległa do płaszczyzny przepuszczania polaryzatora, zwróćmy uwagę na to, że analizator przepuszcza rzuty tych promieni. Rzuty te są równe

$$E''_x = \frac{E'_x}{\sqrt{2}} = \frac{E_0}{2}\cos(\omega t + \gamma_x) = E''_{0x}\cos(\omega t + \gamma_x) \qquad (12)$$

$$E''_y = \frac{E'_y}{\sqrt{2}} = \frac{E_0}{2}\cos(\omega t + \gamma_y) = E''_{0y}\cos(\omega t + \gamma_y) \qquad (13)$$

Kwadrat amplitudy natężenia pola wypadkowego obliczymy tak jak oblicza się amplitudę złożenia dwóch drgań o jednakowych częstościach zachodzących w tej samej płaszczyźnie

$$E_0''^2 = E_{0x}''^2 + E_{0y}''^2 + 2E_{0x}''E_{0y}'' \cos(\gamma_x - \gamma_y) \tag{14}$$



Rys. 3 Ilustracja do wzoru (14)

Podstawiając do równania (14) $E''_{0x} = E''_{0y} = E_0/2$ otrzymamy

$$E''^2 = \frac{1}{2} E_0^2 \cdot \left[\cos(\gamma_x - \gamma_y) + 1\right] \tag{15}$$

Natężenie wiązki jest jak już wspomniano proporcjonalne do kwadratu amplitudy, a więc stosunek natężenia wiązki wychodzącej z układu do natężenia wiązki padającej uzyskujemy dzieląc prawą stronę równania (15) przez E_0^2

$$\frac{I_{wyj}}{I_0} = \frac{1}{2}\left[\cos(\gamma_x - \gamma_y) + 1\right] = \frac{1}{2}\left[\cos(\Delta\gamma) + 1\right] \tag{16}$$

Jeżeli dwójłomność wywołana jest przez liniowe zjawisko elektrooptyczne, to korzystając z równań (6) i (7) otrzymamy

$$\Delta\gamma = (n_e - n_0)\frac{2\pi d}{\lambda_0} = \frac{rE2\pi d}{\lambda_0} \tag{17}$$

W elektrooptyce stosowane jest oznaczenie $\Delta\Gamma$ zamiast $\Delta\gamma$ Napięcie potrzebne do wywołania różnicy faz $\Delta\Gamma = \pi$, czyli napięcie potrzebne do przejścia od całkowitego wygaszenia do maksymalnego rozjaśnienia nazywane jest napięciem półfali - $U_{1/2}$. Z równania (17) po skorzystaniu z warunku $\Delta\Gamma = \pi$ i z tego, że $U = Ed$, gdzie d jest odległością między elektrodami, mamy

$$\pi = \frac{2\pi d U_{1/2}}{d\lambda_0} \tag{18}$$

i po przekształceniu powyższego równania otrzymujemy

$$U_{1/2} = \frac{\lambda_0 d}{2rl} \tag{19}$$

Napięcie półfali podawane jest zwyczajowo w V/cm. Jeżeli korzystamy z podłużnego efektu elektrooptycznego, to długość drogi /, jaką przebywa promień światła jest równa odległości pomiędzy elektrodami *d i* napięcie półfali nie zależy od wymiarów kryształu. W przypadku zjawiska poprzecznego jest proporcjonalne do odległości między elektrodami i odwrotnie proporcjonalne do drogi optycznej. Tak więc wygodniej jest korzystać z efektu poprzecznego, ponieważ wydłużając drogę optyczną i zmniejszając grubość kryształu można znacznie zmniejszyć napięcie potrzebne do sterowania wiązką świetlną.