

Pomiar dwójłomności taśmy klejącej

Wojciech Wasilewski

3 marca 2010

1 Wstęp

Celem ćwiczenia jest wyznaczenie dwójłomności taśmy klejącej poprzez wyznaczenie polaryzacji światła przed i po przejściu przez badany materiał. Pomiaru dokonuje się na dwóch długościach fali.

W trakcie ćwiczenia student zapozna się z następującymi zagadnieniami: dwójłomnością optyczną, działaniem polaryzatora, stanami polaryzacji światła, działaniem fotodiody, powstawaniem obrazu.

2 Opis stanu polaryzacji światła

Pole elektryczne wiązki monochromatycznej z lasera biegnącej wzdłuż osi z , o częstotliwości ω w ustalonym punkcie przestrzeni jest wektorem i można je najzupełniej ogólnie zapisać w postaci:

$$\vec{E}(t) = \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = E_0 \Re \left[\begin{pmatrix} \cos(\theta/2) e^{i\phi} \\ \sin(\theta/2) \end{pmatrix} e^{-i\omega t} \right]. \quad (1)$$

Powyżej przyjęliśmy założenie, że polaryzacja nie ulega zmianom w czasie. Tak zazwyczaj jest w przypadku laserów. Źródła światła niespójnego, takie jak diody LED czy żarówki emitują krótkie pakiety o przypadkowej polaryzacji i wymagają bardziej złożonego opisu. Tym niemniej w naszym doświadczeniu będziemy mierzyć pola dające się opisać powyższym wzorem.

Przedyskutujmy zachowanie wektora pola elektrycznego $\vec{E}(t)$ dla różnych parametrów θ i ϕ .

Dla $\phi = 0$ mamy do czynienia z polaryzacjami liniowymi:

$$\vec{E}(t) = E_0 \begin{pmatrix} \cos(\theta/2) \cos(\omega t) \\ \sin(\theta/2) \cos(\omega t) \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Wektor $\vec{E}(t)$ porusza się po prostej nachylonej pod kątem $\theta/2$ do osi x w płaszczyźnie $x - y$.

Dla $\phi \neq 0$ mamy do czynienia z polaryzacjami eliptycznymi, wektor $\vec{E}(t)$ zakreśla elipsę w płaszczyźnie $x - y$. W szczególności dla $\theta = \pi/2$ i $\phi = \pi/2$ będziemy mieli polaryzację kołową:

$$\vec{E}(t) = \frac{E_0}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} \sin(\omega t) \\ \cos(\omega t) \end{pmatrix}. \quad (3)$$

3 Przejście światła przez ośrodek dwójłomny

W ośrodku dwójłomnym padający promień świetlny rozdziela się na dwie składowe, zwane promieniem zwyczajnym (ang. ordinary ray, o-ray) i nadzwyczajnym (ang. extraordinary ray, e-ray). Wektor pola elektrycznego promienia nadzwyczajnego drga w płaszczyźnie zawierającej oś optyczną ośrodka i wektor falowy promienia, zaś wektor pola elektrycznego promienia zwyczajnego w płaszczyźnie prostopadłej. Promienie o i e mają różne współczynniki załamania, odpowiednio n_o i n_e . Przy przejściu przez warstwę ośrodka o grubości d promień o doznaje opóźnienia fazowego wynoszącego:

$$\frac{2\pi n_o d}{\lambda} \quad (4)$$

i analogicznie dla promienia e , przy czym długość fali $\lambda = 2\pi c/\omega$. Różnica opóźnień między promieniami wyniesie:

$$\Delta = \frac{2\pi}{\lambda}(n_e - n_o)d. \quad (5)$$

Przesunięcie fazowe Δ przełoży się na zmianę stanu polaryzacji padającej wiązki. Przymijmy, że oś optyczna ośrodka leży w płaszczyźnie $x - z$. Jeśli pole elektryczne przed ośrodkiem było liniowo spolaryzowane pod kątem $\theta/2$ do osi płytki:

$$\vec{E}_{in}(t) = \Re \left[E_0 \begin{pmatrix} \cos(\theta/2) \\ \sin(\theta/2) \end{pmatrix} e^{-i\omega t} \right]. \quad (6)$$

to za płytką przyjmie polaryzację eliptyczną opisaną wzorem:

$$\vec{E}_{out}(t) = \Re \left[E_0 \begin{pmatrix} \cos(\theta/2)e^{i\Delta} \\ \sin(\theta/2) \end{pmatrix} e^{-i\omega t} \right]. \quad (7)$$

W tym miejscu warto wspomnieć, że płytki tego rodzaju powszechnie używane są w eksperymentach optycznych. Szczególnie proste w użyciu są płytki o $\Delta = \pi$ zwane półfalówkami, oraz płytki o $\Delta = \pi/2$, zwane ćwierćfalówkami.

4 Tomografia stanu polaryzacji

Do zbadania stanu polaryzacji używamy w ćwiczeniu polaryzatora umieszczonego w uchwycie obrotowym. Zgodnie z konwencją wprowadzoną powyżej, przyjmujemy układ odniesienia związany z osią optyczną badanego ośrodka (taśmy) i względem niej mierzymy wszystkie kąty. Niech oś polaryzatora będzie nachylona pod kątem α do osi x . Wtedy wektor wskazujący kierunek pola elektrycznego przepuszczanego przez polaryzator będzie miał postać $(\cos \alpha, \sin \alpha)$. Jeśli pole przed polaryzatorem opisane jest wzorem (1), to za nim natężenie pola wyniesie:

$$E_p = \Re E_0 e^{i\omega t} [\cos(\alpha) \cdot \cos(\theta/2) e^{i\phi} + \sin(\alpha) \cdot \sin(\theta/2)] \quad (8)$$

i pole będzie drgać wzdłuż osi polaryzatora.

Pole to pada na detektor, który rejestruje jego natężenie:

$$I \propto \frac{1}{T} \int_0^T E_p^2 dt \quad (9)$$

gdzie T jest okresem drgań pola. Średnią tą można bardzo łatwo obliczyć, zauważając że:

$$\frac{\omega}{2\pi} \int_0^{2\pi/\omega} (\Re E_0 e^{i\omega t})^2 dt = \frac{1}{2} |E_0|^2. \quad (10)$$

W efekcie otrzymujemy, że natężenie światła przechodzącego przez polaryzator dla polaryzacji eliptycznej, której spodziewamy się za taśmą dwójłomną zgodnie ze wzorem (7), zmienia się sinusoidalnie z kątem obrotu polaryzatora, zaś jego maksymalna i minimalna wartość zależą od przesunięcia fazowego Δ .

5 Przed wykonaniem ćwiczenia

Proszę zapoznać się z całą instrukcją i przygotować odpowiedź na następujące pytania:

1. Na polaryzator pada wiązka światła spolaryzowana pionowo. Jakie będzie natężenie przechodzącego promieniowania w funkcji kąta obrotu polaryzatora? Podać wzór.
2. Na polaryzator pada wiązka światła spolaryzowana kołowo. Jakie będzie natężenie przechodzącego promieniowania w funkcji kąta obrotu polaryzatora?
3. Na polaryzator pada wiązka światła spolaryzowana eliptycznie, przy czym długa pół elipsy określanej przez wektor pola elektrycznego jest 3 razy dłuższa niż krótka pół. Jakie będzie maksymalne a jakie minimalne natężenie przechodzącego promieniowania w funkcji kąta obrotu polaryzatora?
4. Jakie przykładowe ϕ i $\tan(\theta)$ pozwoli opisać taką polaryzację za pomocą wzoru (1)?
5. Na taśmę dwójłomną ($\Delta > 0$) pada wiązka światła spolaryzowana pionowo. Jak może być ustawiona oś optyczna taśmy, aby polaryzacja wychodzącego z niej światła była pionowa?
6. Zakładając, że dwójłomność $n_e - n_o$ nie zależy od długości fali, jakiego stosunku różnic przesunień fazowych można się spodziewać dla światła czerwonego i niebieskiego?
7. Wiązkę światła z diody o rozbieżności całkowitej 15° chcemy w całości skupić na fotodiodzie przy użyciu soczewki o ogniskowej 50mm i średnicy 30mm. Jakiego rozmiaru obraz można uzyskać na fotodiodzie, jeśli rozmiar diody LED wynosi 1mm?

6 Przebieg ćwiczenia

1. **Pomiar nasycenia fotodiody.** Ustawiamy na ławie laser, polaryzator w uchwycie obrotowym i fotodiodę. Wykonujemy pomiar napięcia na fotodiodzie w funkcji kąta obrotu polaryzatora. Notujemy napięcie nasycenia fotodiody U_{sat} .
2. **Oslabienie wiązki z lasera.** Zdejmujemy polaryzator z ławy. Bezpośrednio na laser naklejamy drugi polaryzator. Ustawiamy go tak, aby przechodząca wiązka nie nasyciła fotodiody ($U_{\text{PD}} < U_{\text{sat}}/2$) a także umożliwiała osiągnięcie precyzyjnych wyników ($U_{\text{PD}} > 2V$).
3. **Weryfikacja prawa Malusa.** Wstawiamy na ławę polaryzator w uchwycie obrotowym. Wykonujemy pomiar napięcia na fotodiodzie w funkcji kąta obrotu polaryzatora $U_{\text{PD}}(\alpha)$.

4. **Orientacja optyczna taśmy.** Krzyżujemy polaryzatory. Pomiędzy nie wstawiamy jedną warstwę taśmy przyklejoną na uchwycie obrotowym. Znajdujemy takie jej ustawienia, przy których nie zmienia ona polaryzacji światła.
5. **Pomiar dwójłomności jednej warstwy taśmy.** Oś optyczną taśmy ustawiamy pod kątem 45° do polaryzacji podającego światła. Obracamy drugi polaryzator i rejestrujemy natężenie przechodzącego promieniowania w funkcji kąta jego obrotu.
6. **W domu: częściowe opracowanie wyników.** Wykonujemy wykres napięcia z fotodiody U_{PD} w funkcji natężenia padającego światła, zakładając doskonałe spełnienie prawa Malusa (dane z pkt. 1 i 3). Zaznaczamy nasycenie. Rozmyślamy o dwójłomności. Obliczamy przesunięcie fazowe $\Delta\phi$ w jednej warstwie taśmy.
7. **Pomiar dwójłomności jednej warstwy taśmy.** Oś optyczną taśmy ustawiamy pod kątem 30° i następnie 22.5° do polaryzacji podającego światła. Obracamy drugi polaryzator i rejestrujemy natężenie przechodzącego promieniowania w funkcji kąta jego obrotu.
8. **Pomiar dwójłomności dwóch i ew. trzech warstw taśmy.** analogicznie jak pkt. 4 i 6.
9. **Pomiar dwójłomności taśmy (ilość warstw wg. uznania) w świetle niebieskim.** Zamiast lasera wykorzystujemy niebieską diodę LED. Światło z diody obrazujemy za pomocą soczewki $+50\text{mm}$ na fotodiodzie. W wiązce wstawiamy: polaryzator, taśmę i drugi polaryzator.