



**ĆWICZENIE
89**

BADANIE WYMUSZONEJ AKTYWNOŚCI OPTYCZNEJ

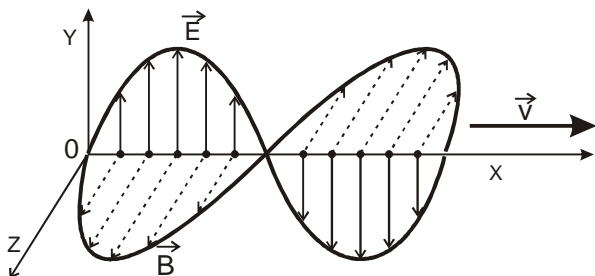
Cel ćwiczenia:

- Zapoznanie się ze zjawiskiem Faradaya.
- Wyznaczenie stałej Verdet dla danej próbki.
- Wyznaczenie wartości ładunku właściwego elektronu e/m .

Zagadnienia: Fala elektromagnetyczna, światło widzialne, liniowa polaryzacja światła, metody uzyskania światła spolaryzowanego, dwójłomność, zjawisko aktywności optycznej, zjawisko Faradaya

1 Wprowadzenie

Fala elektromagnetyczna. Przez falę elektromagnetyczną rozumiemy rozchodzące się w przestrzeni zaburzenie pola elektrycznego i magnetycznego. Niech zaburzenie (fala) rozchodzi się wzdłuż pewnej prostej OX . Fala elektromagnetyczna jest falą poprzeczną. Oznacza to, że jeżeli wybierzemy jakiś punkt przestrzeni, przez który przechodzi fala elektromagnetyczna, to w tym punkcie wektory natężenia pola elektrycznego (\vec{E}) i indukcji magnetycznej (\vec{B}) będą zawsze prostopadłe do siebie, a płaszczyzna w której one leżą będzie prostopadła do kierunku rozchodzenia się fali.



Rys. 1. Rozkład pola elektrycznego i magnetycznego fali elektromagnetycznej w pewnej chwili czasu.

Jeżeli wektor \vec{E} skierowany jest wzdłuż osi OY , to wektor \vec{B} skierowany będzie wzdłuż osi OZ (patrz rys.1). Wartości składowych wektorów \vec{E} i \vec{B} będą zmieniały się sinusoidalnie z czasem i położeniem, zgodnie z poniższymi wyrażeniami:

$$E_y = E_{0y} \sin\left(\frac{2\pi}{T}t - kx\right), \quad (1)$$

$$B_z = B_{0z} \sin\left(\frac{2\pi}{T}t - kx\right),$$

gdzie E_{0y} , B_{0z} są amplitudami pól, T jest okresem zmian, a $k = 2\pi / \lambda$ jest liczbą falową fali o długości λ .

W dowolnym momencie czasu zmiany (oscylacje) pola elektrycznego i magnetycznego będą miały taką samą fazę, a iloraz wartości natężenia pola elektrycznego do wartości indukcji magnetycznej będzie stały i będzie równy prędkości v fali elektromagnetycznej (światła) w ośrodku, w którym się ona rozchodzi:

$$\frac{E}{B} = v, \quad v = \frac{c}{n}, \quad (2)$$

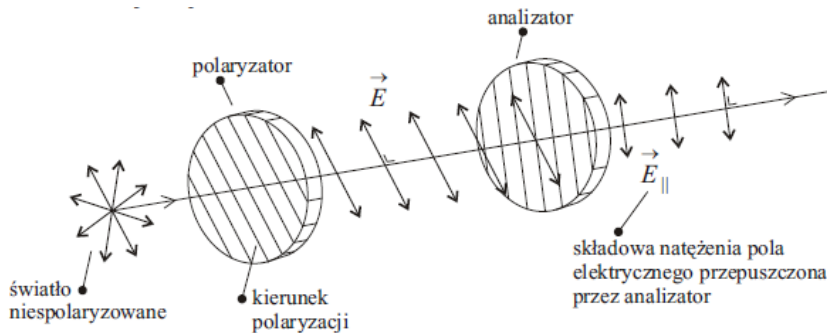
gdzie c – prędkość światła w próżni, a n – bezwzględny współczynnik załamania ośrodka. Przyjrzyjmy się "migawkowemu zdjęciu" fali elektromagnetycznej, które przedstawia rys. 1. Przedstawiono tu falę elektromagnetyczną rozchodzącą się w kierunku osi OX . Strzałki symbolizują wektory: natężenia pola elektrycznego oraz indukcji pola magnetycznego (przerywane) w zaznaczonych punktach (\bullet) na osi OX . Wartość prędkości v rozchodzenia się fali elektromagnetycznej zależy od ośrodka i jest to stosunek prędkości światła w próżni do współczynnika załamania ośrodka, w którym fala elektromagnetyczna się rozchodzi.

W przypadku fal mechanicznych tym co drga są cząstki ośrodka, natomiast w przypadku fali elektromagnetycznej „drgają” wektory: natężenia pola elektrycznego \vec{E} i indukcji magnetycznej \vec{B} . Wektory \vec{E} oraz \vec{B} są zawsze prostopadłe do siebie i prostopadłe do kierunku rozchodzenia się fali. Rys.1 przedstawia przykładowe ułożenie tych wektorów. Tu oś OY wybrano tak, że jest ona równoległa do kierunku wektora \vec{E} .

Światło widzialne jest częścią promieniowania elektromagnetyczną zawartą w zakresie długości fali od 380 nm (fiolet) do 760 nm (czerwień). Na ten zakres długości fal wrażliwe jest oko ludzkie.

Polaryzacja fali elektromagnetycznej. Naturalne źródła światła emitują falę elektromagnetyczną składającą się z dużej liczby fal elektromagnetycznych emitowanych przez atomy (molekuły) materiału, z którego wykonane jest źródło fali. Akty emisji fali przez poszczególne atomy są przypadkowe i niezależne od siebie. W konsekwencji światło rozchodzące się w danym kierunku jest superpozycją (złożeniem) niezależnych ciągów falowych, dla których kierunki drgań wektora \vec{E} (a tym samym i \vec{B}) zorientowane są przypadkowo w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku rozchodzenia się fali. Znając w danej chwili kierunek zmian wektora \vec{E} nie jesteśmy w stanie przewidzieć jaki będzie kierunek zmian \vec{E} w chwili następnej. Takie światło nazywamy **niespolaryzowanym**.

Światłem **spolaryzowanym liniowo** nazywamy falę elektromagnetyczną, dla której zmiany (drgania) wektora \vec{E} zachodzą w każdej chwili w tej samej płaszczyźnie. Płaszczyznę wyznaczoną przez wektor \vec{E} oraz wektor prędkości (propagacji) fali nazywamy płaszczyzną polaryzacji fali elektromagnetycznej. Światło spolaryzowane emitowane jest przez niektóre sztuczne źródła promieniowania np. lasery. Światło spolaryzowane możemy także uzyskać ze światła niespolaryzowanego np. przy użyciu tzw. **polaryzatorów** (płytek polaryzacyjnych). Polaryzator przepuszcza całkowicie tylko składowe fal świetlnych, dla których kierunki drgań wektora \vec{E} są równoległe do **kierunku polaryzacji** (patrz rys. 2), a pochłania całkowicie składowe fal, dla których kierunek drgań \vec{E} jest prostopadły do kierunku polaryzacji. W rezultacie, niespolaryzowane światło po przejściu przez polaryzator jest spolaryzowane w kierunku równoległym do kierunku polaryzacji polaryzatora. Oznacza to, że „drgania” wektora \vec{E} zachodzą wyłącznie w kierunku równoległym do kierunku polaryzacji polaryzatora.



Rys. 2. Układ dwóch polaryzatorów ustawionych wzdłu osi padania światła. Niespolaryzowane światło pada na pierwszy polaryzator i przechodzi przez niego spolaryzowane liniowo, a następnie na drugi zwany analizatorem. Analizator przepuszcza tylko składową wektora \vec{E} równoległą do jego kierunku polaryzacji.

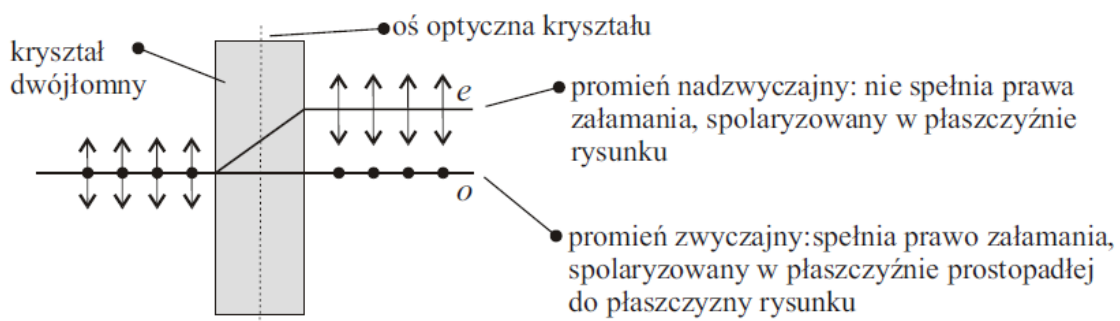
Jeżeli światło spolaryzowane pada na drugi polaryzator nazywany analizatorem, to przepuszczona zostanie tylko składowa \vec{E} równoległa do kierunku analizatora. W szczególnym przypadku, gdy kierunek wektora \vec{E} fali jest równoległy do kierunku polaryzacji analizatora, światło zostaje całkowicie przepuszczone, a gdy jest prostopadły – całkowicie wygaszone.

Polaryzacja za pomocą polaryzatorów dwójłomnych. Światło spolaryzowane można również uzyskać wykorzystując zjawisko podwójnego załamania, które ma miejsce w pewnej grupie kryształów zwanych kryształami dwójłomnymi. Kryształy dwójłomne są to ośrodki, w których prędkość rozchodzenia się światła, a co za tym idzie, wartość współczynnika załamania zależy od kierunku rozchodzenia się światła i jego polaryzacji. Ośrodkami takimi nazywamy optycznie anizotropowymi. Ośrodkami takimi są zazwyczaj kryształy mające wyróżnioną oś w budowie krystalicznej, jak np. kalcyt (CaCO_3) i kwarc (SiO_2). Niespolaryzowane światło padające na kryształ dwójłomny rozdziela się w nim na dwie wiązki światła spolaryzowanego o różnych prędkościach rozchodzenia się, co odpowiada różnym kątom załamania obu wiązek (patrz rys.3). Są to:

- promień zwyczajny (o), który leży w tej samej płaszczyźnie co promień padający i spełnia prawo załamania tak jak dla ośrodków izotropowych,
- promień nadzwyczajny (e), który na ogół nie leży w płaszczyźnie padania, a jego współczynnik załamania zależy od kąta padania.

Obie wiązki są spolaryzowane liniowo w kierunkach wzajemnie prostopadłych.

Wyróżniony kierunek w ośrodku anizotropowym (kryształy), w którym wiązka światła przechodzi bez podwójnego załamania nazywa się **osią optyczną**. Największa różnica współczynnika załamania promieni o i e występuje dla kierunku padania prostopadłego do osi optycznej. Na rysunku poniżej mamy przedstawioną taką sytuację.



Rys. 3. Przejście światła przez kryształ dwójłomny – ośrodek optycznie anizotropowy.

Dodatkowo jeżeli promień padający jest prostopadły do powierzchni kryształu to, zgodnie z prawem załamania promień zwyczajny nie zmienia kierunku, w przeciwieństwie do promienia nadzwyczajnego. Otrzymanie światła liniowo spolaryzowanego przy wykorzystaniu ciał dwójłomnych polega na znalezieniu metody usunięcia jednego z promieni załamanych. Najbardziej znanym polaryzatorem dwójłomnym jest polaryzator skonstruowany w 1828 roku przez szkockiego fizyka Williama Nicola. W pryzmacie tym, do rozdzielenia wiązek, wykorzystuje się zjawisko całkowitego wewnętrznego odbicia.

Zjawisko aktywności optycznej. Do obserwacji kierunku polaryzacji należy posłużyć się układem dwóch polaryzatorów. W takim układzie światło niespolaryzowane przechodzi przez pierwszy polaryzator polaryzujący światło liniowo, a następnie przez drugi polaryzator zwany analizatorem. Jeżeli kierunki polaryzacji polaryzatora i analizatora są do siebie prostopadłe, to światło przez taki układ nie jest przepuszczane. Jeśli między polaryzator i analizator na rys.2. o prostopadłych kierunkach polaryzacji wstawimy kawałek kwarcu lub roztwór cukru, zauważymy, że ciemne poprzednio pole widzenia rozjaśni się, jednak po obrocie o pewien kąt analizatora możemy wiązkę przechodzącą całkowicie wygasić. Wnioskujemy stąd, że substancja skręca płaszczyznę polaryzacji. Ciała zachowujące się w ten sposób nazywamy ciałami optycznie czynnymi, a samo zjawisko nazywamy aktywnością optyczną.

Zjawisko aktywności optycznej ma zastosowanie do wyznaczania stężenia niektórych roztworów np. cukru. Można pokazać, że kąt skręcenia płaszczyzny polaryzacji jest proporcjonalny do stężenia roztworu.

Zjawisko Faradaya – aktywność optyczna wywołana polem magnetycznym. Zjawisko aktywności optycznej może też być wymuszone niektórymi czynnikami fizycznymi jak np. polem magnetycznym. Ciała, które w nieobecności pola magnetycznego nie są aktywne optycznie, po umieszczeniu ich w polu magnetycznym skręcają płaszczyznę polaryzacji. Zjawisko to zostało odkryte przez M. Faradaya w 1845 roku, który ustalił, że kąt skręcenia płaszczyzny polaryzacji jest proporcjonalny do wartości indukcji pola magnetycznego B i do długości drogi d światła przechodzącego przez badaną substancję.

Zjawisko Faradaya znalazło zastosowanie w technice laserowej w postaci urządzenia o nazwie rotator Faradaya, który jest wykorzystywany przy modulacji światła, np. w tzw. migawkach magnetoptycznych i urządzeniach przepuszczających światło tylko „w jednym kierunku”.

Skręcenie płaszczyzny polaryzacji zależy od kąta pomiędzy kierunkiem rozchodzenia światła a kierunkiem wektora indukcji magnetycznej. Jest ono największe, gdy światło biegnie równoległe do kierunku wektora indukcji magnetycznej. Kąt skręcenia płaszczyzny polaryzacji α w zjawisku Faradaya dla przypadku rozchodzenia się światła w kierunku równoległym do kierunku wektora indukcji magnetycznej \vec{B} można zapisać wzorem:

$$\alpha = V \cdot d \cdot B \quad (3)$$

gdzie: α - kąt skręcenia (w radianach), B - indukcja magnetyczna (w teslach), d - długość próbki (w metrach), V - stała materiałowa zwana stałą Verdetą.

Jeżeli badana substancja (np. szkło) przez którą przechodzi światło została umieszczona wewnątrz solenoidu przez który przepływa prąd o natężeniu I , wówczas zależność (3) określająca kąt skręcenia płaszczyzny polaryzacji przybiera postać:

$$\alpha = \mu_0 \cdot n \cdot V \cdot d \cdot I \quad (4)$$

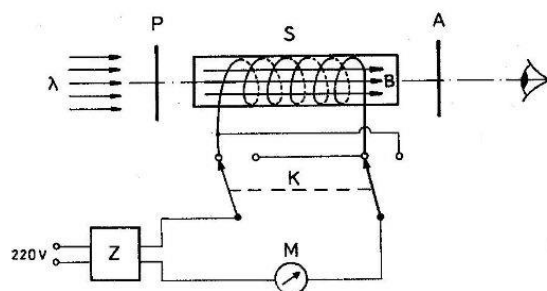
gdzie: μ_0 – przenikalność magnetyczna próżni, a n jest ilością zwojów solenoidu na jednostkę długości.

Z teorii zjawiska Faradaya wynika, że stała Verdetą wyraża się wzorem:

$$V = \frac{e}{2 \cdot m_e} \cdot \frac{\lambda}{c} \cdot \left| \frac{dn}{d\lambda} \right| \quad (5)$$

gdzie: e i m_e – odpowiednio ładunek i masa elektronu, λ – długość fali światła, a $\left| \frac{dn}{d\lambda} \right|$ – dyspersja ośrodka, czyli zmiana współczynnika załamania względem długości fali. Jeśli znana jest zależność współczynnika załamania od długości fali, wzór ten może posłużyć do obliczenia stosunku e/m_e dla elektronu.

2 Zasada pomiaru i układ pomiarowy

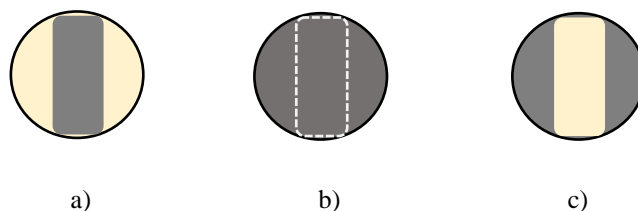


Rys.4. Schemat układu pomiarowego:

- P - polaryzator, A - analizator,
- S - solenoid ze szklanym prętym w środku wykonany z badanego materiału,
- λ - światło monochromatyczne,
- Z - zasilacz
- K - przełącznik zmieniający kierunek przepływu prądu przez solenoid,
- M - miernik natężenia prądu płynącego przez solenoid

Do pomiaru wpływu pola magnetycznego na wartość kąta skręcenia płaszczyzny polaryzacji w zjawisku Faradaya stosuje się polarymetr. Schemat urządzenia przedstawiony został na rys.4. Urządzenie to złożone jest z polaryzatora P i analizatora A, między którymi umieszczono solenoid S nawinięty na próbkę w kształcie walca, wykonaną z materiału wykazującego aktywność optyczną wywołaną polem magnetycznym.

W pierwszym kroku, gdy przez solenoid nie płynie prąd elektryczny ($B=0$), należy tak ustawić analizator, aby uzyskać całkowite wygaszenie światła w polu widzenia. Włączenie przepływu prądu przez solenoid wytworzy pole magnetyczne, w którym propagowane będzie spolaryzowane liniowo światło. Spowoduje to skręcenie płaszczyzny polaryzacji światła, a tym samym rozjaśnienie pola widzenia. Całkowite wygaszenie obrazu uzyskamy ponownie obracając analizator o kąt równy kątowi skręcenia płaszczyzny polaryzacji przez pole magnetyczne solenoidu. W czasie obracania analizatora oko źle ocenia, w którym momencie jest najciemniej.



Rys.5. Obraz uzyskiwany w polarymetrze dla trzech różnych ustawień analizatora.

Aby podnieść dokładność pomiaru w polarymetrze użytym w LPF zastosowano analizator wieloczęściowy podzielony na trzy części. Obraz dawany w takim polarymetrze przedstawiono na rys.5. Analizator ustawiamy tak aby pasek środkowy i pozostała część pola widzenia były jednakowo ciemne (rys. 5b). Właściwe ustawienie analizatora jest wówczas, gdy niewielka zmiana kąta powoduje pojawienie się rozjaśnienia na zewnątrz lub w środku pola widzenia.

3 Zadania do wykonania

Celem ćwiczenia jest wyznaczenie zależności kąta skręcenia płaszczyzny polaryzacji światła od wartości natężenia prądu elektrycznego płynącego w solenoidzie, w którym umieszczona jest badana próbka. W tym celu wykonujemy pomiary wartości skręcenia płaszczyzny polaryzacji światła dla różnych wartości natężenia prądu elektrycznego. Zgodnie z wyrażeniem (4) spodziewana zależność pomiędzy wartością kąta skręcenia a wartością natężenia prądu będzie zależnością liniową. Na podstawie otrzymanych wyników oraz korzystając z metody regresji liniowej należy wyznaczyć współczynnik proporcjonalności wraz z jego niepewnością. Następnie, na podstawie zależności (4) obliczyć wartość stałej Verdetta i jej niepewność. Na zakończenie, w oparciu o obliczoną stałą Verdetta na podstawie wzoru (5), wyznaczyć wartość e/m_e i niepewność jej wyznaczenia.

Szczegółowa instrukcja wykonania ćwiczenia oraz opracowania wyników została przedstawiona w instrukcji wykonawczej ćwiczenia.

4 Pytania:

1. Przedstaw podstawowe własności fali elektromagnetycznej.
2. Wyjaśnij co nazywamy falą elektromagnetyczną spolaryzowaną liniowo.
3. Przedstaw metody polaryzacji fali świetlnej.
4. Wyjaśnij na czym polega zjawisko aktywności optycznej.
5. Wyjaśnij na czym polega zjawisko Faradaya.

opracowali: K.Sierański, J.Szatkowski