

**WS6
BADANIE ZJAWISKA FARADAYA**

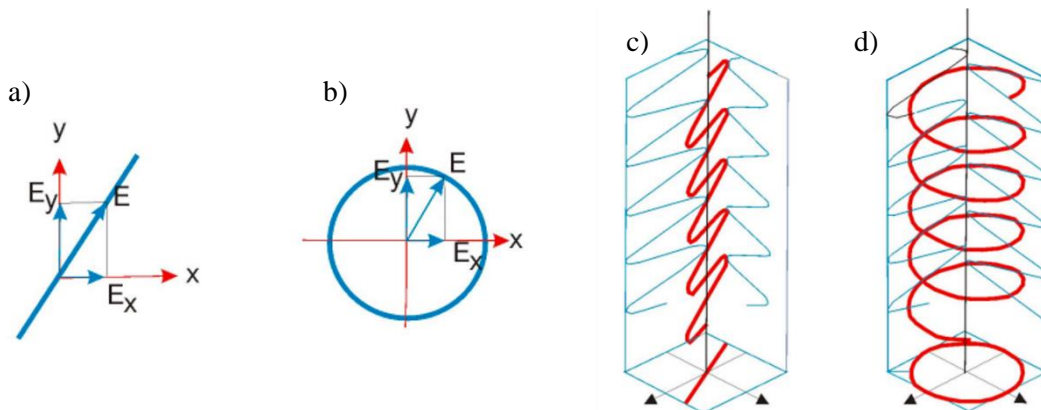
I. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się ze zjawiskiem Faradaya. W tym celu zostanie zbadana zależność kąta polaryzacji światła od wartości indukcji pola magnetycznego wyindukowanego w różnych rodzajach szkła. Porównanie wyników uzyskanych dla różnych materiałów posłuży do określenia wpływu zmiany dyspersji współczynnika załamania światła na wartość stałej Verdet materiału.

II. Podstawy teoretyczne

Zjawisko Faradaya zostało odkryte w 1845 roku przez angielskiego uczonego Michaela Faradaya. Przewidywał on, że światło to fala elektromagnetyczna. Zmiana natężenia pola elektrycznego powinna prowadzić do indukcji pola magnetycznego. Z uwagi na wzajemne oddziaływanie obydwu pól Faraday założył, że propagacja fali powinna zależeć od wartości natężenia zewnętrznego pola elektrycznego lub magnetycznego. Uczony zaobserwował, że wzrost indukcji pola magnetycznego zmienia kąt polaryzacji światła.

Polaryzacja światła to płaszczyzna drgań pola elektrycznego bądź magnetycznego. Jeśli wiązka światła jest spolaryzowana, to drgania te zachodzą wyłącznie w określonym kierunku. Najprostszym przypadkiem polaryzacji jest światło spolaryzowane liniowo, gdzie drgania pola elektrycznego odbywają się w jednej płaszczyźnie (Rys. 1a, c). W przypadku polaryzacji kołowej, wektor pola elektrycznego w trakcie propagacji zmienia płaszczyznę drgań (Rys. 1b). W konsekwencji, podczas propagacji na drodze długości fali wektor pola elektrycznego zakreśla pełne koło (Rys. 1d). Wektor pola magnetycznego jest do niego prostopadły.



Rysunek 1, wektory pola elektrycznego w przypadku polaryzacji: a) liniowej, b) kołowej, propagacja wektora pola elektrycznego dla fali spolaryzowanej: c) liniowo, d) kołowo. Źródło: <http://skaczmarek.zut.edu.pl/>.

Zależnie od kierunku obrotu wektora polaryzacji mamy do czynienia z polaryzacją kołową prawo lub lewo skrętną. Skrętność polaryzacji wpływa również na zwrot wektora pola magnetycznego fali. Światło spolaryzowane liniowo można otrzymać przez złożenie dwóch polaryzacji kołowych: prawo i lewo skrętnych. Jeśli światło propaguje się przez ośrodek, w którym indukcja pola magnetycznego jest zerowa, faza fali światła spolaryzowanego prawo i lewo skrętnie nie ulega zmianie. W konsekwencji, polaryzacja światła przechodzącego przez ośrodek jest taka sama jak polaryzacja światła padającego na ośrodek. Sytuacja ulega zmianie po wyindukowaniu w ośrodku pola magnetycznego w kierunku propagacji fali. Wtedy, dojdzie do wzmocnienia bądź osłabienia indukcji pola magnetycznego indukowanego w kierunku

zgodnym bądź przeciwnym względem kierunku propagacji światła. W konsekwencji, osłabienie/wzmocnienie indukcji pola magnetycznego prowadzi do wygenerowania przesunięcia fazowego między światłem spolaryzowanym prawo i lewo skrętnie. Zmienia się również wartość współczynników załamania dla polaryzacji lewo (n_-) i prawo skrętnej (n_+). Tą sytuację na gruncie klasycznej elektrodynamiki opisał Arnold Sommerfeld z wykorzystaniem wzoru:

$$n_- - n_+ = \frac{B\rho e^3}{nm_0^2\varepsilon_0} \frac{\omega}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2}, \quad (1)$$

gdzie B to indukcja pola magnetycznego, ρ to gęstość oscylatorów w ośrodku (w tym przypadku drgań elektronów), e to ładunek elektronu, m_0 to masa elektronu, ε_0 to przenikalność dielektryczna ośrodka, ω to częstość fali, zaś ω_0 to częstość własna oscylatorów. n to współczynnik załamania ośrodka bez przyłożonego pola magnetycznego, który wyraża się wzorem:

$$n = \sqrt{1 + \frac{\rho e^2}{m_0 \varepsilon_0} \frac{1}{(\omega_0^2 - \omega^2)}}. \quad (2)$$

W konsekwencji, podczas propagacji na drodze d różnica wartości współczynników załamania n_- i n_+ prowadzi do powstania przesunięcia płaszczyzny polaryzacji liniowej o kąt θ :

$$\theta = d \frac{\omega}{c} \left(\frac{n_- - n_+}{2} \right) = dB \frac{\rho e^3}{2nm_0^2 c \varepsilon_0} \frac{\omega^2}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2} = dBV, \quad (3)$$

gdzie c to prędkość światła w próżni, a V to stała Verdet. Stała Verdet charakteryzuje stopień skręcenia polaryzacji światła przez materiał, tj. o jaki kąt zostanie przekręcona polaryzacja światła, które przechodzi przez ośrodek o grubości 1 cm w polu magnetycznym o indukcji 10^{-4} T. Wartość tej stałej można obliczyć korzystając z równania (3) i (1):

$$V = \frac{\omega}{2c} \left(\frac{n_- - n_+}{B} \right) = \frac{\rho e^3}{2nm_0^2 c \varepsilon_0} \frac{\omega^2}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2} = \frac{e}{2m_0 c} \omega \frac{dn}{d\omega}. \quad (4)$$

Po przekształceniu równania (4) możemy uzyskać wygodniejszą relację uwzględniającą dyspersję współczynnika załamania w funkcji długości fali λ :

$$V = \frac{e}{2m_0 c} \lambda \frac{dn}{d\lambda}. \quad (5)$$

W rzeczywistości, z uwagi na zachodzące oddziaływanie światła z domieszkami materiału i pojawiające się anomalie magnetoptyczne, wyznaczone w ten sposób wielkości stałych Verdet nie zgadzają się z doświadczalnymi. W celu poprawy zgodności wzór (5) należy zmodyfikować o dodatkowy współczynnik γ :

$$V = \gamma \frac{e}{2m_0 c} \lambda \frac{dn}{d\lambda}, \quad (6)$$

a wartość stałej stałą Verdetą wyznacza się empirycznie podczas pomiaru zjawiska Faradaya.

Najważniejszymi wnioskami, które można wysnuć z analizy równania (6) jest zależność wartości stałej Verdetą od długości fali i dyspersji współczynnika załamania. Ponadto, ważne jest uwzględnienie obecności anomalii magnetoptycznych. Materiałem, który charakteryzuje się jedną z najwyższych stałych Verdetą jest granat terbowo galowy ($Tb_3Ga_5O_{12}$, $V = -134$ rad/(T·m) dla długości fali 632 nm). Tak wysoka wartość jest efektem oddziaływania światła z terbem. Dla szkła, wartości stałej Verdetą są dwa rzędy wielkości mniejsze (szkło BK-7, $V = -4,9$ rad/(T·m) dla długości fali 632 nm).

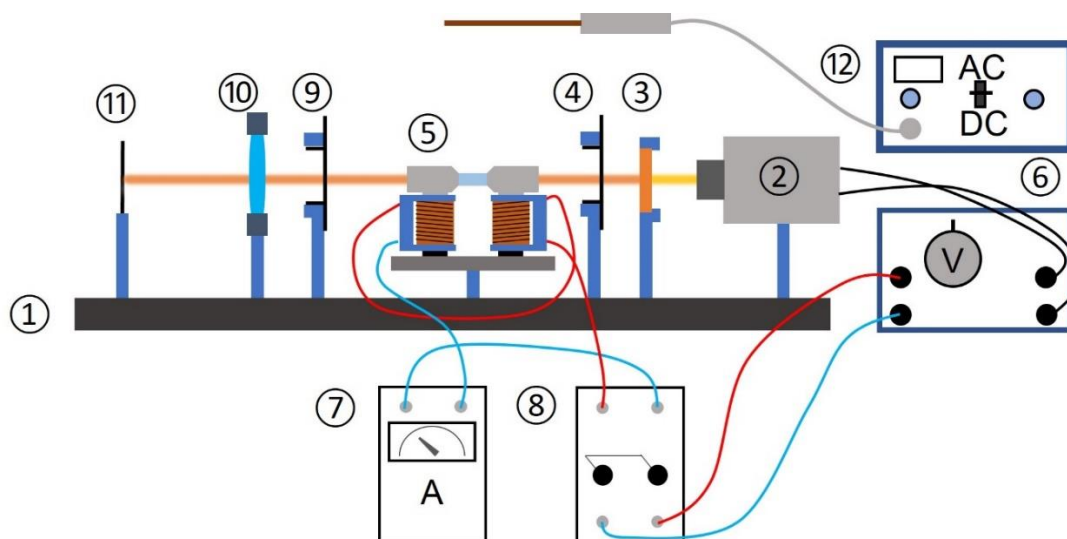
Zjawisko Faradaya znalazło zastosowanie w konstrukcji modulatorów światła. Bazują one na układach, w których medium jest ograniczone dwoma identycznie ustawionymi polaryzatorami. W takiej konfiguracji zmiana indukcji pola magnetycznego pozwala sterować intensywnością światła przechodzącego przez drugi polaryzator. Zjawisko to można również wykorzystać w optoelektronicznych urządzeniach spintronicznych, do odczytu informacji zapisanej w spinach elektronów. Ponadto, zjawisko Faradaya wykorzystuje się w badaniach astronomicznych do oszacowania indukcji pola magnetycznego pulsarów i gwiazd.

III. Wykonanie pomiarów

III.1. Wyposażenie

Masz do dyspozycji (w nawiasach podano oznaczenia zgodnie z rys. 2):

- Ławę optyczną (1),
- Lampę halogenową (2),
- Uchwyt na filtr światła (3)
- Filtry monochromatyczne: 505 nm, 525 nm, 580 nm i 595 nm.
- Polaryzator nr 1 (4),
- Układ cewek z uchwytem na próbkę (5)
- Próbkę szkła BK-7 i SF-13,
- Zasilacz PHYWE model 13531.93(6),
- Amperomierz PHYWE model 07036-00 (7),
- Komutator (8),
- Polaryzator nr 2 (analizator) (9)
- Soczewkę (10),
- Ekran (11),
- Miernik pola magnetycznego PHYWE model 13610-93 (12),



Rysunek 2, schemat układu pomiarowego zjawiska Faradaya w próbce szkła.

W celu rozpoczęcia pomiaru ustaw układ pomiarowy zgodnie ze schematem zaprezentowanym na Rys. 2. Analizator ustaw w takim położeniu, aby zapewniało ono wygodny odczyt jego kąta. Włącz zasilacz lampy sodowej. W odpowiednie uchwyty włóż próbkę szkła BK-7 oraz wybrany filtr (zanotuj, który filtr został wybrany do pomiaru).

Następnie, skalibruj układ pomiarowy. Ustaw polaryzator i analizator pod tym samym kątem. Dobierz położenie soczewki i ekranu tak, aby na ekranie widoczny był ostry obraz żarnika lampy halogenowej. Uzyskanie wyraźnego obrazu stanowi pozytywną weryfikację kalibracji układu. Następnie, włącz miernik pola magnetycznego i ustaw go w pozycji pomiaru stałego pola. Ustaw głowicę miernika z dala od źródeł prądu oraz od cewek. W celu kalibracji miernika pola wyzeruj prawym pokrętle wskazywaną wartość pola.

III.2. Planowanie pomiarów

Przed rozpoczęciem pomiarów upewnij się, że lampa jest rozgrzana, a układ poprawnie skalibrowany. Uważaj, aby nie zmieniać położenia elementów układu podczas pomiarów. Zwróć uwagę, który z polaryzatorów przekręcasz (polaryzator czy analizator). **Podczas pomiarów nie pozwól, aby natężenie prądu płynącego przez cewki przekroczyło 2 A** (próg grzania cewek). Upewnij się, czy ustawienie komutatora pozwala zmierzyć dodatnią wartość natężenia prądu, zanim zmienisz jej wartość na ujemną. Z uwagi na dobór skali, amperomierz mierzy tylko dodatnią wartość natężenia prądu. Dla ustawionej przez komutator ujemnej wartości natężenia prądu strzałka amperomierza nieznacznie przechodzi przez 0 A. Przed pomiarem sprawdź również, czy miernik pola magnetycznego jest dobrze wyzerowany, a zakres dobrze dobrany.

III.3. Badanie zjawiska Faradaya

Gdy przez cewki nie płynie prąd, próbka szkła nie zmienia płaszczyzny polaryzacji. Dla analizatora ustawionego pod tym samym kątem co polaryzator powinniśmy zaobserwować maksimum natężenia obrazu. Obrót analizatora obniża intensywność obrazu. Dla ustawienia analizatora pod kątem $\pm 90^\circ$ względem polaryzatora zaobserwujemy całkowite wygaszenie obrazu. Po przyłożeniu napięcia do cewek, w szkle zostaje wyindukowane pole magnetyczne. Powoduje ono obrót kąta polaryzacji światła przechodzącego względem padającego o kąt θ . Z uwagi na ograniczenie kąta obrotu polaryzatorów, w celu uzyskania dobrej precyzji odczytu zalecane jest obrócenie przed pomiarami polaryzatora i analizatora o kąt 45° . Wtedy, w celu wygaszenia obrazu, konieczne będzie obrócenie analizatora o kąt $90^\circ + \theta_L$. W ten sposób można zmierzyć kąt θ_{1L} . Indeks L oznacza, że pomiar jest wykonywany dla dodatniego kierunku przepływu prądu przez komutator (13). Można zauważyć, że do pojawienia się wyraźnego obrazu konieczne jest obrócenie polaryzatora o kilka stopni w przeciwną stronę. W ten sposób mierzymy drugi kąt θ_{2L} . Kąt polaryzacji dla dodatniego kierunku przepływu prądu wyraża się zatem wzorem:

$$\theta_L = \frac{1}{2}(\theta_{1L} + \theta_{2L}). \quad (7)$$

W celu uzyskania odpowiedniej precyzji pomiaru należy wykonać pomiar kąta θ_L i θ_P (ujemna polaryzacja komutatora) trzykrotnie. Dla danego natężenia prądu należy zmierzyć indukcję pola magnetycznego z wykorzystaniem miernika pola. **Pomiary wykonaj dla około czterech natężeń prądu nieprzekraczających 2 A.** Następnie, wykonaj pomiary z wykorzystaniem drugiego filtra. W drugiej części pomiarów wykonaj je zgodnie z tą samą procedurą dla próbki SF-13. Po zakończeniu pomiarów wyłącz zasilacze po czym odłóż filtr i próbkę szkła na miejsce. Zmierz długości próbek szkła. Szkła BK-7 i SF-13 cechują się wysoką czystością i przezroczystością. Dodatek ołowiu w szkle SF-13 zwiększa wartość jego współczynnika załamania oraz dyspersję, co powinno zwiększyć wartość stałej Verdet.

IV. Analiza wyników pomiarów

- 1) W pierwszym kroku analizy należy wykonać dwa wykresy prezentujące dane doświadczalne:
 - a. wykres zależności kąta skręcenia polaryzacji światła od pola magnetycznego dla dodatniej i ujemnej polaryzacji natężenia prądu dla każdego filtra dla szkła BK-7,
 - b. wykres zależności kąta skręcenia polaryzacji światła od pola magnetycznego dla dodatniej i ujemnej polaryzacji natężenia prądu dla każdego filtra dla szkła SF-13,
 Wartości kątów skręcenia płaszczyzny polaryzacji wyznacz ze wzoru (7). Dokładności używanych przyrządów analogowych oszacuj zgodnie z wielkością najmniejszej działki na skali i własnym odczuciem dokładności ich odczytu.
- 2) Przeanalizuj zgodność pomiarów wykonanych dla dodatniej i ujemnej polaryzacji prądu.
- 3) Na podstawie dopasowania równania (3) metodą najmniejszych kwadratów wyznacz wartości stałych Verdet dla obu próbek szkła wraz z ich niepewnościami. Porównaj wyznaczone wartości stałych pomiędzy dwoma szklami.
- 4) Wykonaj wykres zależności stałych Verdet od długości fali i rodzajów szkła (przyjmij długość fali jako znaną dokładnie).
- 5) Korzystając z równania (6) i danych zawartych w tabeli 1 wyznacz wartości współczynników γ dla obu szkieł i porównaj je. Porównując stałe Verdet i współczynniki γ szkieł BK-7 i SF-13 odnieś się do wartości dyspersji zawartych w tabeli 1.

Tabela 1, współczynniki załamania szkieł BK-7 i SF-13 i ich pochodne dla wybranych długości fali (źródło: <https://refractiveindex.info/>)

λ (nm)	BK-7		SF-13	
	n	$dn/d\lambda$ (nm ⁻¹)	n	$dn/d\lambda$ (nm ⁻¹)
505	1,521	$-6,5 \cdot 10^{-5}$	1,755	$-2,3 \cdot 10^{-4}$
525	1,520	$-5,8 \cdot 10^{-5}$	1,751	$-2,0 \cdot 10^{-4}$
580	1,517	$-4,4 \cdot 10^{-5}$	1,742	$-1,4 \cdot 10^{-4}$
595	1,516	$-4,0 \cdot 10^{-5}$	1,740	$-1,3 \cdot 10^{-4}$

Jeśli na którymś z etapów analizy danych prowadzisz dopasowanie zależności modelowej metodą najmniejszych kwadratów, obowiązkowo podaj postać dopasowywanej funkcji oraz określ przyjęte niepewności. Podaj uzasadnienie wyboru zmiennej niezależnej, za wyjątkiem sytuacji, w których ona jest z góry narzucona. Przeprowadź walidację modelu uwzględniającą zasadność przyjętych niepewności pomiarowych. Jako wynik dopasowania podaj estymaty dopasowywanych parametrów wraz z ich niepewnościami. W uzasadnionych przypadkach przedyskutuj istotność dopasowywanych parametrów. Do dobrej praktyki należy również w przypadku dopasowania funkcji opisanej więcej niż jednym parametrem podanie kowariancji i współczynników korelacji parametrów a także wykresu reszt z tego dopasowania oraz jego dyskusja.

Pamiętaj też, że najczęściej używana metoda najmniejszych kwadratów wymaga wyników pomiarowych, z których każdy uzyskany jest w niezależnym akcie pomiarowym. **Nie mają takiego charakteru wielkości uzyskane np. w wyniku odejmowania jednej ustalonej wartości od wszystkich wyników pomiarów, jeśli wartość odejmowana pochodzi z pomiaru.**

V. Dodatkowe uwagi odnośnie do raportu

Nim przygotujesz raport, zaznajom się z uwagami zawartymi w [wymaganiach dotyczących raportu](#) zamieszczonymi na stronie pracowni. Absolutnie zalecane jest także świadome przyjrzenie się redakcji tekstu, a także tabel, rysunków i wzorów, sposobów ich numerowania, tytułowania i opisywania w dowolnym, ale wydanym przez uznane wydawnictwo, akademickim podręczniku do fizyki, jak również zajrzenie do kilku publikacji w różnych czasopismach naukowych, co może ułatwić podjęcie decyzji co do podziału Twego raportu na części.

W raporcie **obowiązkowo** zamieść wszystkie surowe wyniki pomiarów tak, aby sięgając jedynie do raportu i bez potrzeby odwoływania się do protokołu z doświadczenia można było wykonać pełną i niezależną analizę Twych danych. Pamiętaj, że w niektórych przypadkach uzasadnione jest przeniesienie tych danych do Suplementu. W przypadku bardzo dużej liczby danych pomiarowych (np. zebranych komputerowo) dopuszczalne jest umieszczenie danych nie w formie tabel, ale w formie wykresów. Wówczas oryginalne dane należy dołączyć do raportu w formie cyfrowej (np. w wiadomości email do prowadzącego).

VI. Pytania definiujące wymagania do ćwiczenia

Problem 1. Opisz czym jest polaryzacja światła.

Problem 2. Opisz czym jest zjawisko Faradaya.

Problem 3. Opisz w jaki sposób dobrać próbkę o wysokiej skręcalności polaryzacji.

Problem 4. Jak można zmierzyć zjawisko Faradaya?

Źródła:

- 1) P. R. Berman, „Optical Faraday rotation”, American Journal of Physics 78, 270 (2010),
- 2) H.-J. Hoffmann, W.W. Jochs, G. Przybilla, “The Verdet Constant of Optical Glasses”, Topical Conference on Basic Properties of Optical Materials (1985),

Opracowanie: J. Kierdaszuk, wrzesień 2022