

Ćwiczenie: A11

Tytuł ćwiczenia:

Zjawisko Faradaya

I. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest poznanie zjawiska Faradaya. Student zdobędzie wiedzę z zakresu: zjawiska polaryzacji światła, metod wytwarzania światła spolaryzowanego, metod wytwarzania jednorodnego pola magnetycznego, zjawiska skręcenia płaszczyzny polaryzacji w ośrodkach optycznie czynnych i pod wpływem pola magnetycznego.

II. Zakres ćwiczenia (zadania do wykonania)

1. Cechowanie sondy pomiarowej za pomocą cewek Helmholtza.
2. Pomiar natężenia pola magnetycznego wzdłuż osi solenoidu.
3. Wyznaczenie stałej Verdetta cieczy.

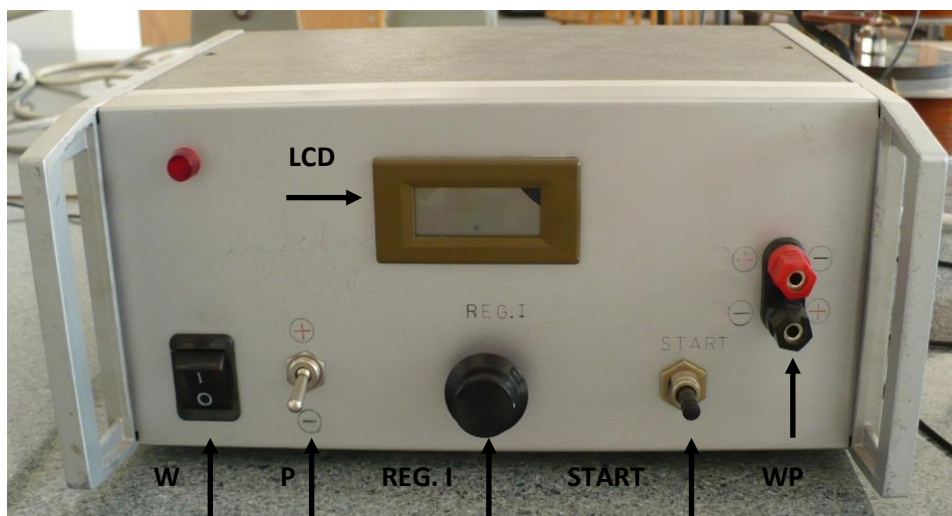
III. Zagadnienia do kolokwium

1. Fala elektromagnetyczna, polaryzacja światła - wyjaśnienie zjawiska, rodzaje polaryzacji.
2. Metody polaryzacji światła, nikol, dwójłomność światła, analizator półcieniowy.
3. Skręcenie płaszczyzny polaryzacji przez substancje optycznie czynne oraz pod wpływem pola magnetycznego, prawo Verdetta.
4. Pole magnetyczne solenoidu, cewki Helmholtza.
5. Indukcja elektromagnetyczna, siła elektromotoryczna.

IV. Opis urządzeń i przyrządów używanych w eksperymencie

Zasilacz prądu cewek i solenoidu

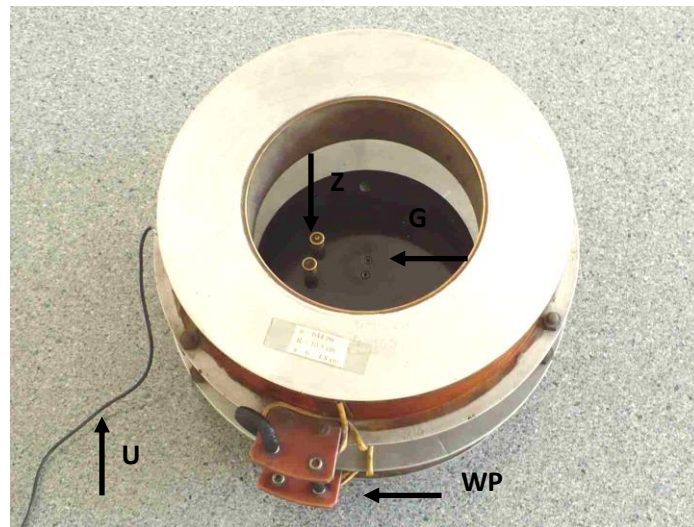
Zasilacz służy do zasilania prądem cewek Helmholtza lub solenoidu. Rys. 1 przedstawia zasilacz z widoczną płytą czołową. Zmiana kierunku prądu płynącego przez cewki lub solenoid dokonuje się za pomocą przełącznika P. Przycisk START zamyka obwód wewnętrzny zasilacza i kiedy jest wciśnięty wywołuje przepływ prądu w zewnętrznym obwodzie.



Rys. 1 Fotografia zasilacza prądu cewek. W – włącznik główny, LCD – wyświetlacz LCD wskazujący wartość prądu w amperach, P – przełącznik kierunku przepływu prądu, REG. I – potencjometr służący do regulowania wartości natężenia prądu, START – przycisk wyzwalający przepływ prądu w obwodzie, WP – wyjścia prądowe.

Cewki Helmholtza

Rys. 2 przedstawia używane w eksperymencie cewki Helmholtza. Liczba zwojów $n=644$, grubość zwojów $b=4,8$ cm, promień cewek $R=10,5$ cm. Prąd podawany jest na cewki z zasilacza prądowego (Rys. 1) poprzez zaciski WP.



Rys. 2 Fotografia cewek Helmholtza. WP – wejścia prądowe, G – gniazdo na sondę pomiarową w postaci dwu otworów, Z – metalowe zaciski służące do połączenia sondy pomiarowej z integratorem napięcia, U – uziemienie obudowy cewek.

Solenoid

Rys. 3 przedstawia solenoid, w którym badane są substancje (znajdujące się w specjalnych kuwetach) w polu magnetycznym. Długość solenoidu wynosi 100 cm.

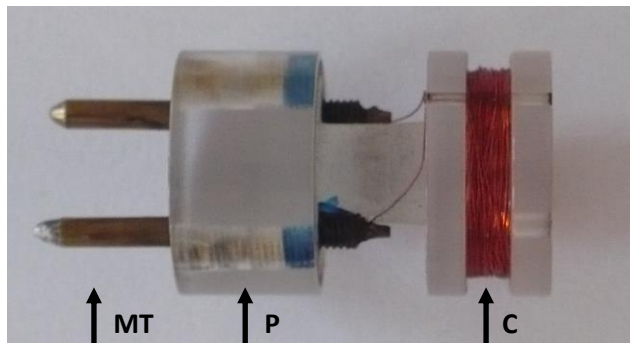


Rys. 3 Fotografia solenoidu. WP – wejścia prądowe, ł – główna łaśa optyczna.

Sonda pomiarowa

Sondą pomiarową jest mała cewka, Rys. 4, znajdująca się w obudowie wykonanej z pleksiglasu. W dolnej części obudowy znajdują się dwa wyjścia elektryczne w postaci metalowych trzpieni, które należy umieścić w gnieździe znajdującym się na płycie wewnątrz cewek Helmholtza (Z na Rys. 2) lub na końcu metalowej rury, Rys. 5.

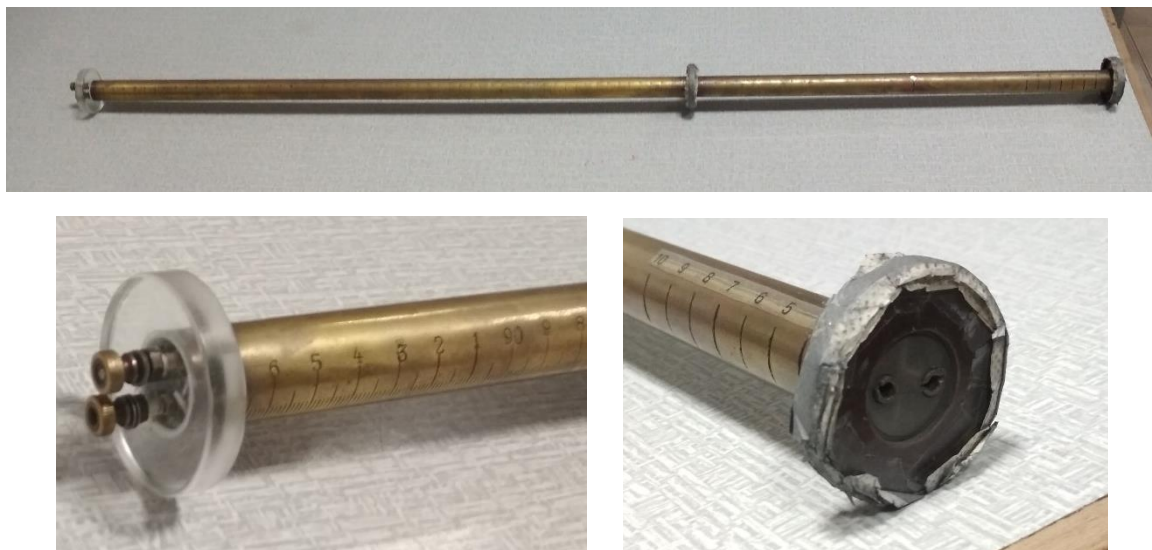
UWAGA: Podczas wkładania/wyjmowania sondy pomiarowej do/z gniazda sondę należy trzymać wyłącznie za podstawę obudowy.



Rys. 4 Fotografia sondy pomiarowej. C – cewka detekcyjna, P – podstawa obudowy, MT – metalowe trzpienie.

Metalowa rura.

Mosiężna rura o długości 97 cm z umieszczoną na niej centymetrową skalą, Rys. 5. Rura wykorzystywana jest w pomiarach natężenia pola magnetycznego wzdłuż osi solenoidu. Na jednym z końców znajduje się gniazdo na sondę pomiarową (panel prawy). Na drugim końcu znajdują się metalowe zaciski służące do połączenia elektrycznego sondy pomiarowej z galwanometrem (lewy panel).

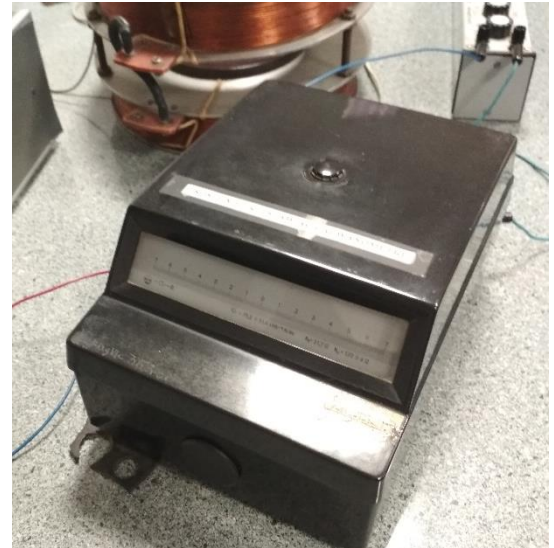
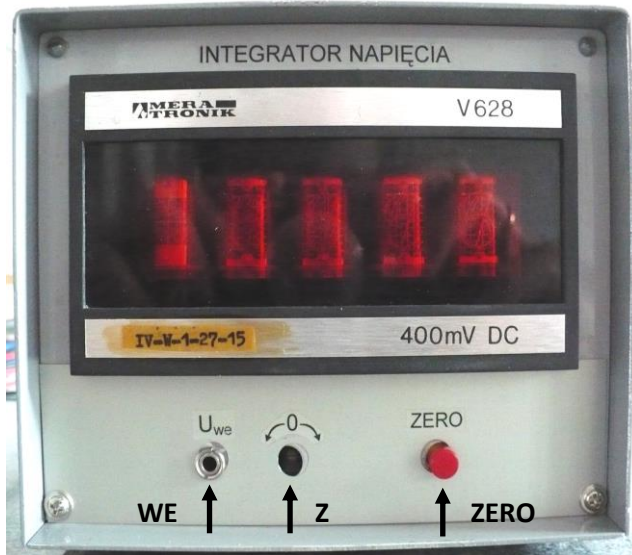


Rys. 5 Fotografia mosiężnej rury ze skalą centymetrową (górny panel). Na końcach rury znajdują się wejścia na trzpienie sondy pomiarowej (prawy panel) oraz zaciski do połączenia elektrycznego sondy z galwanometrem (lewy panel).

Integrator napięcia / galwanometr świetlny

Na Rys. 6 przedstawiony jest integrator napięcia z widoczną płytą czołową (lewy panel) oraz galwanometr świetlny z opornikiem dekadowym (prawy panel). W eksperymencie używamy jednego z tych urządzeń do zmierzenia napięcia generowanego na cewce pomiarowej poddanej działaniu zewnętrznego pola magnetycznego.

Uwaga: galwanometr świetlny jest wyjątkowo czułym urządzeniem i należy się z nim obchodzić bardzo ostrożnie.



Rys. 6 Fotografia integratora napięcia (lewy panel): WE – wejście napięciowe, Z – zerowanie miernika, ZERO – przycisk służący do zerowania integratora, włącznik główny znajduje się na płycie tylnej integratora. Prawy panel przedstawia galwanometr świetlny z opornikiem dekadowym MDR-93-6aa do ograniczenia prądu indukowanego w cewce pomiarowej.

Integrator napięcia służy do całkowania napięcia $E(t)$ indukowanego w sondzie pomiarowej w czasie t_c , w którym zachodzi zmiana strumienia pola magnetycznego $\Delta\Phi$:

$$U = \frac{1}{\tau} \int_0^{t_c} E(t) dt , \quad (2)$$

gdzie $E(t)$ jest siłą elektromotoryczną indukcji, τ - stałą układu całkującego.

Z prawa indukcji Faraday'a wiadomo, że wartość siły elektromotorycznej indukcji $E(t)$ wynosi:

$$E(t) = -\frac{d\Phi}{dt} , \quad (3)$$

gdzie Φ jest strumieniem indukcji magnetycznej, $\Phi = \vec{B} \cdot \vec{S}$, gdzie \vec{B} jest indukcją pola magnetycznego wytworzonego przez cewkę, a \vec{S} - wektorem powierzchni obejmowanej przez cewkę sondy pomiarowej. Zatem możemy zapisać:

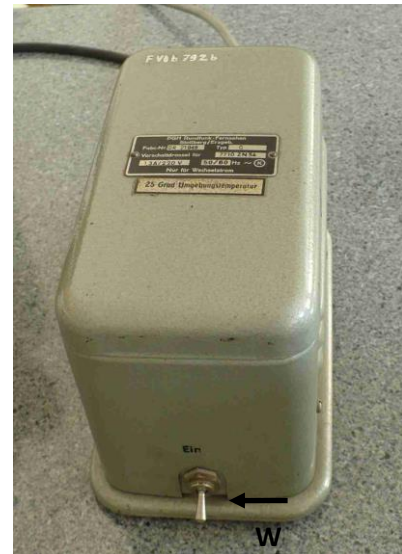
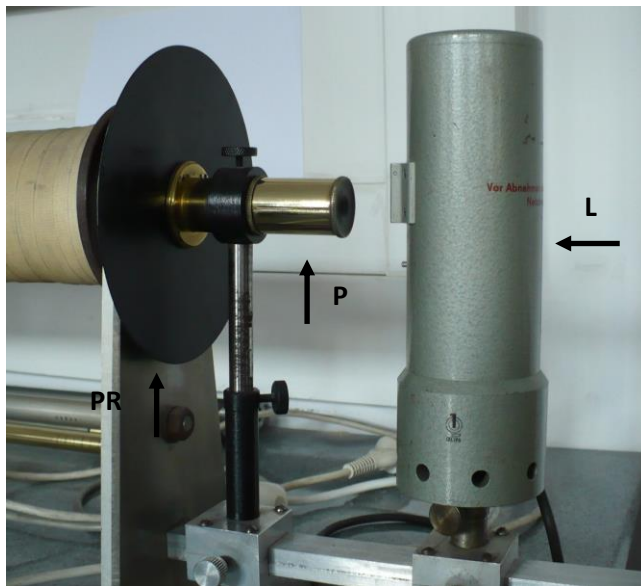
$$U = -\frac{1}{\tau} \int_0^{t_c} \frac{d\Phi}{dt} dt = w \cdot \Delta\Phi , \quad (4)$$

gdzie w jest współczynnikiem proporcjonalności.

Wartość napięcia na wyjściu integratora jest proporcjonalna do całkowitej zmiany strumienia indukcji $\Delta\Phi$ obejmowanej przez sondę pomiarową, która następuje w czasie t_c włączania lub wyłączenia prądu w cewkach Helmholtza lub w solenoidzie. Zakładając, że wartość indukcji pola magnetycznego B_0 w laboratorium jest stała (pochodząca od Ziemi lub elementów magnetycznych) i w przybliżeniu równa zero otrzymujemy $\Delta\Phi = (B - B_0)S = BS$. Zatem z równania (4) wynika, że napięcie mierzone za pomocą integratora napięcia U jest proporcjonalne do indukcji pola magnetycznego B wytwarzanego przez cewki Helmholtza.

Lampa sodowa z zasilaczem

Źródłem światła jest lampa sodowa, Rys. 7. Po podłączeniu zasilacza do sieci należy go włączyć za pomocą znajdującego się na nim włącznika (pozycja Ein). Po włączeniu lampy należy odczekać około 5 minut, aż lampa zacznie świecić żółtym kolorem.



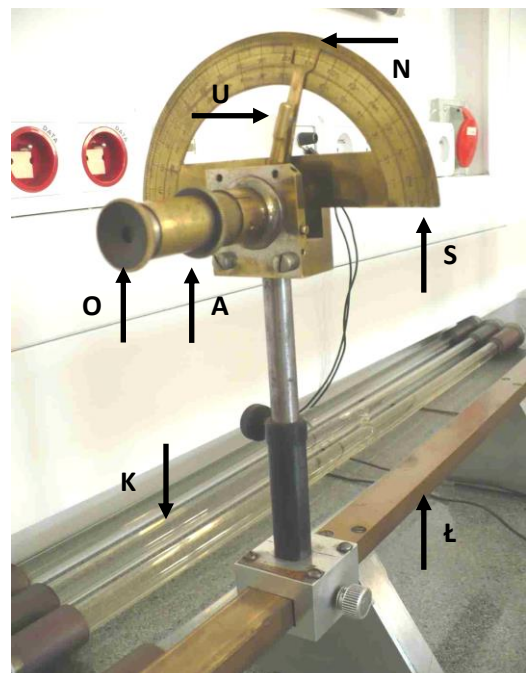
Rys. 7 Fotografia lampy sodowej (L), polaryzatora (P) oraz przesłony (PR).
Prawy panel przedstawia zasilacz lampy sodowej z włącznikiem (W).

Polaryzator

Polaryzator wykonany jest z kryształu kalcytu, tzw. nikol, Rys. 7, oznaczenie P. Polaryzator służy do liniowej polaryzacji światła. Pomiędzy polaryzatorem a solenoidem znajduje się przesłona osłaniająca rozproszone światło z lampy sodowej (PR na Rys. 7).

Analizator półcieniowy ze skalą i okulem

Analizator jest również nikolem. Do obudowy analizatora dołączona jest skala z podziałką co 0,5 stopnia, Rys. 8. Ruchomy noniusz umożliwia odczyt wartości kąta z dokładnością do 0,1 stopnia. Okular umożliwia obserwację plamki świetlnej. Ustawianie ostrości plamki świetlnej możliwe jest poprzez wsuwanie lub wysuwanie okularu.



Rys. 8 Fotografia przedstawia analizator (A), okular (O), skalę (S), ruchomy noniusz (N), uchwyt noniusza (U), kuwety z badanymi cieczami (K) oraz ławę pomocniczą (ł).

Ława optyczna główna i ława pomocnicza

Ława optyczna główna to ława, na której umieszczone są: lampa sodowa wraz z przesłoną, polaryzator, solenoid oraz analizator ze skalą i okularum, Rys. 3.

Ława pomocnicza, Rys. 8, służy do umieszczania na niej analizatora ze skalą i okularum podczas pomiarów pola magnetycznego wewnątrz solenoidu oraz podczas wymiany kuwet z cieczami w czasie pomiarów kąta skręcenia płaszczyzny polaryzacji. Zapobiega to przypadkowemu uszkodzeniu mechanicznemu analizatora.

Kuwety z badanymi cieczami.

Kuwety w postaci szklanych rur o długości 1 m, w których znajdują się badane ciecze, (K na Rys. 8). W środkowej części kuwet znajduje się wybrzuszenie. Powinno być ono skierowane ku górze po włożeniu kuwet do solenoidu.

V. Wykonanie ćwiczenia

(sposób postępowania, schematy blokowe, uwagi dotyczące obsługi aparatury i BHP)

W doświadczeniu Faradaya liniowo spolaryzowane światło przechodzi przez substancję (ciecz w szklanej kuwecie) znajdującą się w polu magnetycznym. Po przejściu przez substancję kierunek polaryzacji światła ulega skręceniu. Wartość kąta, o który zmienia się kierunek polaryzacji światła zależy od rodzaju substancji, wartości natężenia pola magnetycznego, długości fali padającego promieniowania i temperatury.

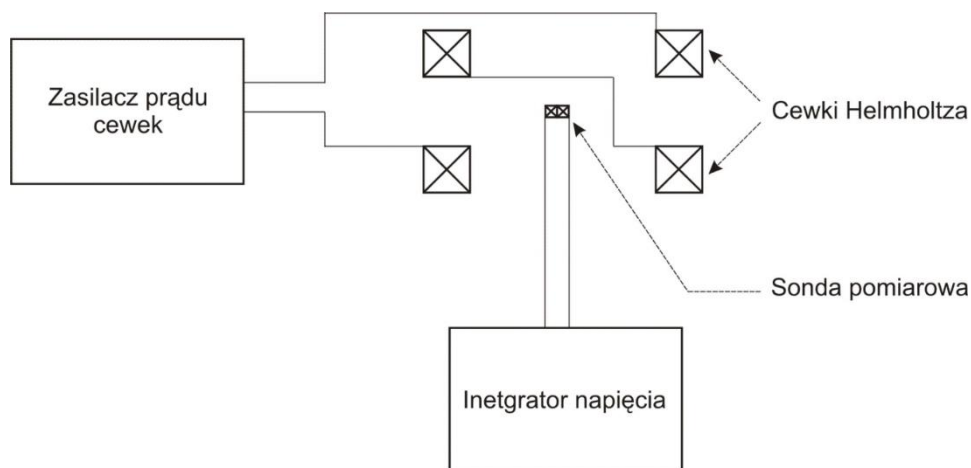
Wartość kąta skręcenia płaszczyzny polaryzacji α jest proporcjonalna do wartości indukcji pola magnetycznego B , co jest wyrażone prawem Verdetta:

$$\alpha = VBL, \quad (5)$$

gdzie V jest stałą Verdetta, L – długością odcinka, na którym na ciecz działa pole magnetyczne B . Zatem do wyznaczenia stałej Verdetta potrzebna jest znajomość rozkładu pola magnetycznego wewnątrz solenoidu co zostanie zmierzone za pomocą sondy pomiarowej, którą wcześniej należy wycechować.

Cechowanie sondy pomiarowej za pomocą cewek Helmholtza.

Celem pierwszej części ćwiczenia jest przeprowadzenie cechowania sondy pomiarowej, Rys. 4, w polu magnetycznym cewek Helmholtza, którego wartość indukcji można wyliczyć ze wzoru 6. Cechowanie polega na pomiarze za pomocą integratora napięcia lub galwanometru świetlnego maksymalnej wartości napięcia indukowanego w sondzie pomiarowej podczas przepuszczania przez cewki Helmholtza prądu o określonej wartości. W tym celu należy zestawić układ do cechowania według schematu przedstawionego na rysunku 9.



Rys. 9 Schemat blokowy do cechowania sondy pomiarowej za pomocą cewek Helmholtza.

Podłączyć do gniazd Z w cewkach Helmholtza, Rys. 2, przewody do mierzenia napięcia indukowanego w cewce pomiarowej – odblokować nakrętkę i pod nakrętką umieścić zaciski minilaboratoryjne (widełkowe) przewodu pomiarowego po czym dokręcić nakrętkę. Sondę pomiarową (Rys. 4) należy ostrożnie umieścić w gniazdach cewek Helmholtza oznaczonych symbolem Z na Rys. 2. Przed włączeniem zasilacza prądu należy sprawdzić czy obudowa cewki Helmholtza jest uziemiona, i czy pokrętło REG. I zasilacza prądu cewek jest skręcone maksymalnie w lewo.

Uwaga: Przez cewki Helmholtza nie może płynąć prąd o natężeniu większym niż 4,8 A.

Integrator napięcia włączyć na około 15 minut przed pomiarami w celu ustabilizowania wskazań zera. Przed każdym pomiarem napięcia integrator należy wyzerować poprzez wciśnięcie przycisku ZERO. Ewentualne, niewielkie odstępstwa od zera (rzędu dziesiątej części mV) należy uwzględnić (dodać lub odjąć) po odczycie napięcia. Jeżeli używamy **galwanometru świetlnego** do wskazań napięcia generowanego w cewce pomiarowej należy ustawić na oporniku dekadowym wartość ok. 2200 omów i zanotować zerowe wskazanie galwanometru (przy zerowym prądzie w cewkach Helmholtza). Miarą indukcji pola magnetycznego jest wychylenie plamki świetlnej galwanometru od wskazania zerowego. W przypadku gdy podczas pomiarów wychylenie plamki wychodzi poza skalę galwanometru (w lewą lub prawą stronę) należy zmienić kierunek wychylenia plamki świetlnej (poprzez zamianę wtyków kablowych z tyłu galwanometru) lub ograniczyć prąd zwiększając wartość oporu na oporniku dekadowym. Pomiary przeprowadzić według schematu:

1. Włączyć zasilacz prądu.
2. Ustalić żądaną wartość natężenia prądu płynącego w cewkach Helmholtza (za pomocą pokrętła REG. I) przytrzymując jednocześnie wciśnięty przycisk START. Wartość natężenia prądu wyrażona w amperach wskazana jest na wyświetlaczu zasilacza prądu. Pomiary wykonać dla natężenia prądu w zakresie od 0 do 4,6 A co 0,2 A.
3. Wciskając przycisk START odczytać maksymalne napięcie wskazywane przez integrator napięcia lub ilość działek wychylenia plamki świetlnej galwanometru, a następnie zwolnić przycisk START.
4. Zmienić kierunek przepływu prądu przez cewki Helmholtza i powtórzyć pomiary napięcia generowanego w cewce pomiarowej. Do zmiany kierunku przepływu prądu służy przełącznik "+/-" znajdujący się na płycie czołowej zasilacza prądu.

Pomiary zanotować w tabeli, Tab. 1, i wyliczyć wartość średnią napięcia dla danego natężenia prądu.

Tabela 1. Wyniki cechowania sondy pomiarowej.

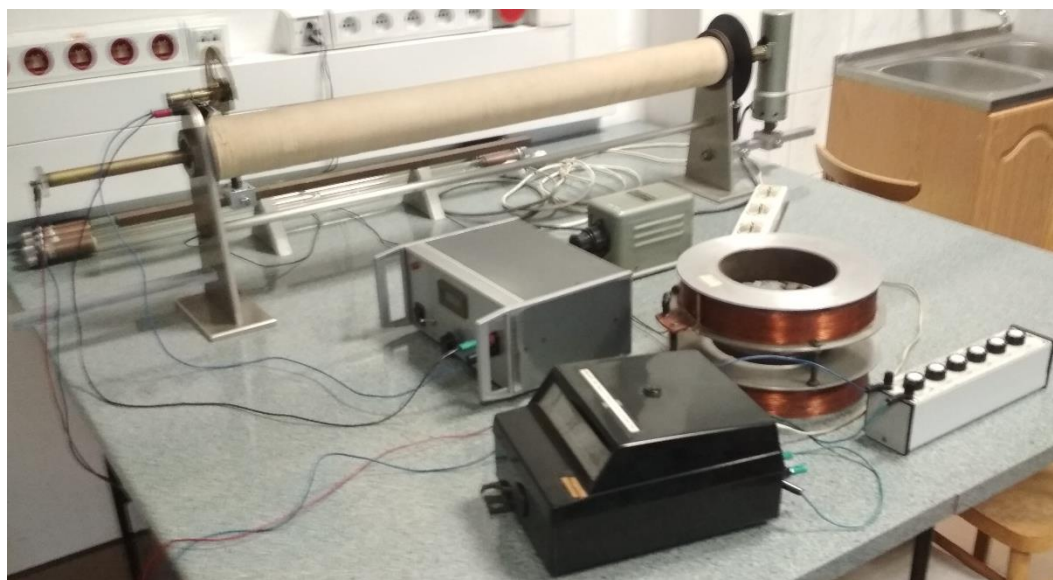
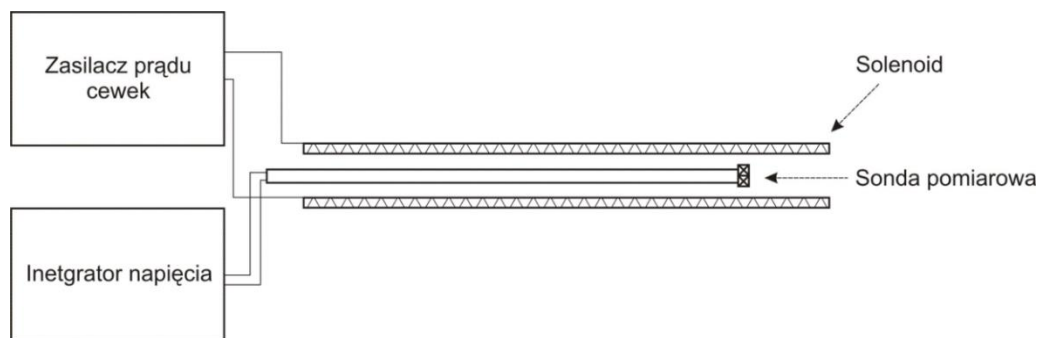
I [A]	U_1 (polaryzacja+/-)	U_2 (polaryzacja-/+)	$U_{\text{śr.}}$
0			
0,2			
0,4			
...			
4,6			

Pomiar natężenia pola magnetycznego wzdłuż osi solenoidu.

Celem drugiej części ćwiczenia jest pomiar natężenia pola magnetycznego wzdłuż osi solenoidu. Pomiar polega na rejestracji za pomocą integratora napięcia lub galwanometru świetlnego maksymalnej wartości napięcia indukowanego w sondzie pomiarowej umieszczonej wewnątrz solenoidu. W tym celu należy zestawić układ pomiarowy zgodnie ze schematem umieszczonym na rysunku 10, czyli:

1. Sondę pomiarową, Rys. 4, należy ostrożnie zdjąć z uchwytu w cewkach Helmholtza i zamocować ją na końcu metalowej rury, Rys. 5. Do drugiej końcówki rury zamocować przewody do pomiaru napięcia generowanego na cewce pomiarowej.
2. Podłączyć przewody zasilacza prądu do solenoidu, do gniazd WP na Rys. 3.

3. Włączyć zasilacz prądu cewek i ustalić natężenie na 2,9 A.
4. Pręt z założoną sondą pomiarową wsunąć do solenoidu. Położenie sondy pomiarowej w solenoidzie należy zmieniać przesuwając rurę w zakresie od 100 do 3 cm i odczytywać na skali centymetrowej położenie sondy wewnątrz solenoidu.
5. Wartość napięcia indukowanego w sondzie pomiarowej zmierzyć dla dwu kierunków przepływu prądu przez solenoid. Pomiaru napięcia dokonać w zależności od położenia sondy pomiarowej wewnątrz solenoidu.



Rys. 10 Schemat blokowy do pomiaru natężenia pola magnetycznego wzdłuż osi solenoidu oraz fotografia połączonych elementów układu.

Na obu końcach solenoidu, na odcinkach o długości 10 cm, należy mierzyć natężenie pola magnetycznego co 1 cm. W pozostałej części, wewnątrz solenoidu – co 10 cm. Długość solenoidu jest równa 100 cm, długość rury – 97 cm. Sonda pomiarowa z obudową ma długość równą około 3 cm. Wyniki zapisać w tabeli, Tab. 2.

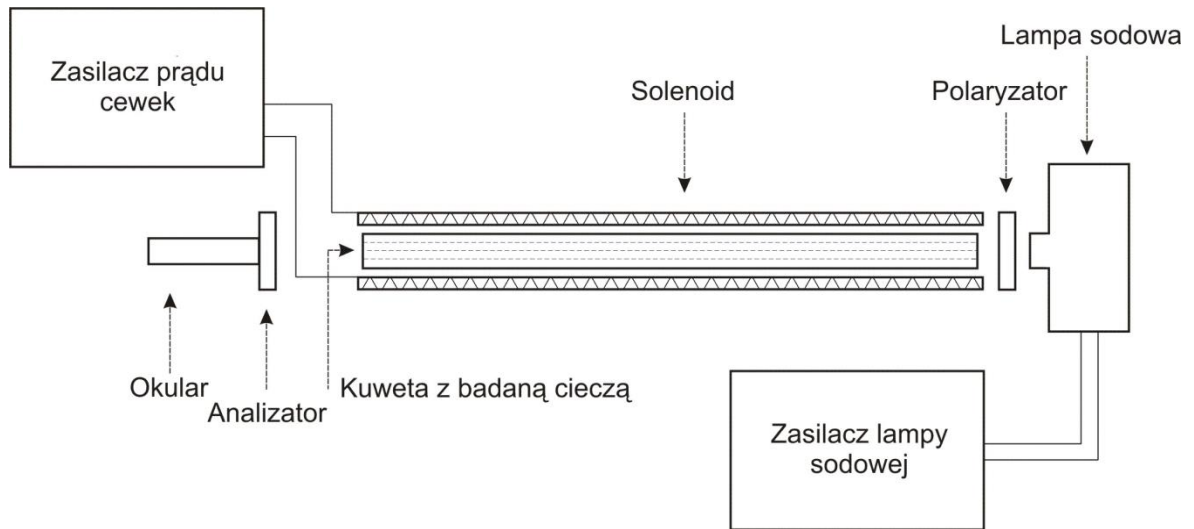
Tabela 2. Pomiar pola magnetycznego w solenoidzie.

$I = 2,9 \text{ A}$			
x [cm]	U_1 (polaryzacja+/-)	U_2 (polaryzacja-/+)	$U_{\text{śr.}}$
1,0			
2,0			
...			
10,0			
20,0			
...			
100,0			

Wyznaczenie stałej Verdetta cieczy.

Celem trzeciej części ćwiczenia jest pomiar wartości kąta skręcenia płaszczyzny polaryzacji światła i wyznaczenie na tej podstawie stałej Verdetta cieczy. Pomiar polega na określeniu wartości kąta skręcenia płaszczyzny polaryzacji po przejściu światła przez ciecz umieszczoną w polu magnetycznym. Badanymi cieczami są woda destylowana, metanol, etanol i aceton. Stałą Verdetta należy obliczyć na podstawie równania (5)

W tym celu należy zestawić układ pomiarowy zgodnie ze schematem umieszczonym na rysunku 11.



Rys. 11 Schemat blokowy do pomiaru wartości kąta skręcenia płaszczyzny polaryzacji światła.

1. Włączyć zasilacz lampy sodowej – przełącznik w położeniu Ein. I odczekać 5 minut aż lampa sodowa zacznie świecić żółtym kolorem.
2. Włączyć zasilacz prądu solenoidu. Ustawić natężenie prądu w solenoidzie na 2,9 A.
3. Umieścić w solenoidzie kuwetę z badaną cieczą (jako pierwszą zaleca się wybrać wodę destylowaną).

Uwaga:

- a) należy zachować ostrożność podczas zdejmowania i przenoszenia kuwety,
 - b) nie dotykać okienek znajdujących się na końcach kuwety,
 - c) kuwety wsuwać tak, aby wybrzuszenie znajdujące się na środku kuwety było skierowane ku górze.
4. Zdjąć analizator z ławy pomocniczej i zamocować go na ławie optycznej głównej kilka centymetrów przed solenoidem. Ruchomy noniusz przed skalą analizatora należy obracać za pomocą krótkiego, metalowego uchwyty znajdującego się przed noniuszem. Ostrość obrazu można regulować za pomocą ruchomego okularu.
 5. Odczytać wartość kąta skręcenia płaszczyzny polaryzacji w przypadku braku pola magnetycznego α_0 oraz dla dwóch kierunków przepływu prądu w solenoidzie, α_1 . i α_2 .

Pomiar wartości kąta skręcenia płaszczyzny polaryzacji z wykorzystaniem analizatora półcieniowego:

- a) jeżeli noniusz znajduje się w pozycji około 0 lub 180 stopni, wówczas obraz widoczny w okularze powinien tworzyć równomiernie oświetlone koło,
- b) jeżeli noniusz znajduje się w pozycji około 90 stopni, wówczas obraz składa się z dwu połówek koła, które są oświetlone w różnym stopniu,
- c) przesuając ruchomy uchwyt (obracając analizator) należy doprowadzić do sytuacji, w której obie połówki koła są jednakowo zaciemnione (polaryzator i analizator skrzyżowane); wówczas należy odczytać wartość kąta α na skali,
- d) wykonać pomiar dla dwóch kierunków przepływu prądu odczytując wartość kątów α_1 . i α_2 .

- e) wartość kąta skręcenia płaszczyzny polaryzacji światła obliczyć jako połowę różnicy odczytanych wartości kątów: $\frac{1}{2} \cdot |\alpha_1 - \alpha_2|$.

Pomiar kąta skręcenia płaszczyzny polaryzacji powtórzyć co najmniej trzykrotnie i obliczyć wartość średnią dla każdej z badanych cieczy.

6. Wymienić kuwetę z badaną substancją i ponownie przeprowadzić pomiary kąta skręcenia płaszczyzny polaryzacji dla innej substancji.

Uwaga: Podczas wymiany kuwet w solenoidzie analizator powinien być zamocowany na ławie pomocniczej.

VI. Opracowanie wyników i raport końcowy

Cechowanie sondy pomiarowej za pomocą cewek Helmholtza.

Wartość natężenia pola magnetycznego H w środku cewek Helmholtza dana jest wzorem:

$$H = \frac{0,8992 \cdot n \cdot I}{R} \left(1 - \frac{b^2}{60 \cdot R^2} \right), \quad (6)$$

gdzie n oznacza liczbę zwojów każdej z cewek $n=644$, I – natężenie prądu płynącego przez cewki, R – promień cewek $R=10,5\text{cm}$, b – grubość zwojów $b=4,8\text{ cm}$. Wzór (6) podaje wartość pola H w erstedach [Oe]. Znając wartość natężenia pola magnetycznego H należy obliczyć wartość indukcji pola magnetycznego B (wyrażonego w teslach) przyjmując za wartość przenikalności magnetycznej jej wartość dla próżni. Wyniki zestawień w tabeli 1 uzupełnionej o kolumny H i B . Następnie należy:

- sporządzić wykres przedstawiający zależność uśrednionego napięcia U indukowanego w sondzie pomiarowej od indukcji pola magnetycznego B .
- w punkty eksperymentalne wpisać prostą metodą najmniejszych kwadratów i narysować ją na tym samym wykresie. Wyznaczyć współczynniki a i b prostej oraz ich maksymalne niepewności Δa oraz Δb (skorzystać z odpowiednich programów komputerowych). Maksymalna niepewność pomiaru napięcia ΔU wynika z dokładności odczytu oraz stabilności wskazań zera napięcia.

Pomiar natężenia pola magnetycznego wzdłuż osi solenoidu.

Na podstawie wyników cechowania sondy pomiarowej (zależności $B(U)$), należy obliczyć wartości indukcji pola magnetycznego wewnątrz solenoidu uzupełniając tabelę 2 o kolumnę z wartościami pola magnetycznego B . Następnie sporządzić wykres indukcji pola magnetycznego od położenia sondy pomiarowej $B(x)$.

W dalszych obliczeniach potrzebna będzie uśredniona wartość natężenia pola magnetycznego wewnątrz solenoidu. Obliczamy ją w następujący sposób:

$$B_{\text{sr}} = \frac{\sum_i B_i \cdot \Delta x_i}{\sum_i \Delta x_i}, \quad (7)$$

gdzie B_i jest wartością indukcji pola magnetycznego wewnątrz solenoidu na odcinku o długości Δx_i . Zauważmy, że licznik wyrażenia (7) można obliczyć jako całkę z funkcji $B(x)$, a mianownik jest długością obszaru pomiarowego B w solenoidzie. Obliczoną średnią wartość indukcji pola magnetycznego zaznaczyć na wykresie $B(x)$.

Za maksymalną niepewność pomiaru B_{sr} przyjmujemy maksymalną niepewność pomiaru B_i wyznaczoną metodą różniczkową przy wykorzystaniu niepewności ΔU , Δa oraz Δb .

Wyznaczenie stałej Verdetta cieczy.

Na podstawie wyznaczonych wartości kąta skręcenia płaszczyzny polaryzacji i średniej wartości indukcji pola magnetycznego wewnątrz solenoidu oraz na podstawie wzoru (5) obliczyć stałą Verdetta badanych cieczy. Stałą wyrazić w jednostkach rad/T m.

Na niepewność pomiaru kąta skręcenia płaszczyzny polaryzacji światła składają się: dokładność odczytu wartości kąta na skali ($0,1^\circ$) oraz wartość kąta, o jaki możemy obrócić analizator tak, aby obie połówki koła były wciąż jednakowo zaciemnione.

Niepewność stałej Verdetta wyznaczamy metodą różniczkową.

Uzyskane wyniki należy porównać z danymi literaturowymi i omówić przyczyny ich ewentualnej niezgodności.

Literatura

- [1] *Crawford (1972)* – F.C. Crawford, Fale, PWN Warszawa 1972.
- [2] *Kaczmarek (1982)* – F. Kaczmarek, II pracownia fizyczna, PWN Warszawa 1976.
- [3] *Meyer-Arendt (1977)* – J.R. Meyer-Arendt, Wstęp do optyki, PWN Warszawa 1977.
- [4] *Purcell (1972)* – E. Purcell, Elektryczność i magnetyzm, PWN Warszawa 1972.
- [5] *Szczeniowski (1983a)* – Sz. Szczeniowski, Fizyka doświadczalna, Część IV Optyka, Wydanie piąte poprawione i uzupełnione, PWN Warszawa 1983.
- [6] *Szczeniowski (1983b)* – Sz. Szczeniowski, Fizyka doświadczalna, Część III Elektryczność i magnetyzm, Wydanie piąte poprawione i uzupełnione, PWN Warszawa 1983.
- [7] *Szydłowski (1975)* – H. Szydłowski, Pracownia fizyczna, PWN Warszawa 1975.
- [8] *Zawadzki (1970)* – A. Zawadzki, H. Hofmokr, Laboratorium fizyczne, Wydanie czwarte, PWN Warszawa 1968.