

I Pracownia Fizyczna

Instrukcje do ćwiczeń laboratoryjnych z fizyki

Krzysztof Łapsa

Wydział Inżynierii Materiałowej i Fizyki Technicznej
Politechnika Poznańska

Spis treści

1. Badanie momentu bezwładności	3
2. Wyznaczenie prędkości fal ultradźwiękowych metodami interferencyjnymi.....	8
3. Badanie transformatora	14
4. Badanie oddziaływania pola magnetycznego na przewodnik z prądem	19
5. Wyznaczanie pojemności kondensatora za pomocą drgań relaksacyjnych	24
6. Badanie optycznych widm emisyjnych	31
7. Wyznaczenie skuteczności świetlnej wybranych źródeł światła.....	36
8. Badanie ogniwa fotowoltaicznego	42
9. Badanie fotorezystora	49
10. Badanie zjawiska absorpcji światła przez roztwory	55

Badanie momentu bezwładności

Cele ćwiczenia

- Wyznaczenie momentu bezwładności wybranych brył
- Doświadczalne potwierdzenie twierdzenia Steinera

Wprowadzenie

W opisie dynamiki ruchu postępowego pojawia się pojęcie bezwładności związane z masą m poruszającego się ciała. W przypadku ruchu obrotowego znajomość masy ciała jest niewystarczająca, istotny jest również jej przestrzenny rozkład względem osi obrotu. Wielkością fizyczną zawierającą informacje o masie ciała i jej przestrzennym rozkładzie względem osi obrotu jest *moment bezwładności* I . Wielkość ta pojawia się w zasadach dynamiki ruchu obrotowego, w zasadzie zachowania momentu pędu itd.

Dla pojedynczego punktu materialnego o masie m wirującego wokół osi oddalonej od niego o odległość r (rys. 1a) możemy zapisać następującą zależność na moment bezwładności:

$$I = mr^2. \quad (1)$$

W przypadku układu N punktów materialnych sztywno połączonych ze sobą względem osi obrotu, zwanej osią bezwładności (rys. 1b), moment bezwładności układu jest równy sumie momentów bezwładności poszczególnych punktów materialnych:

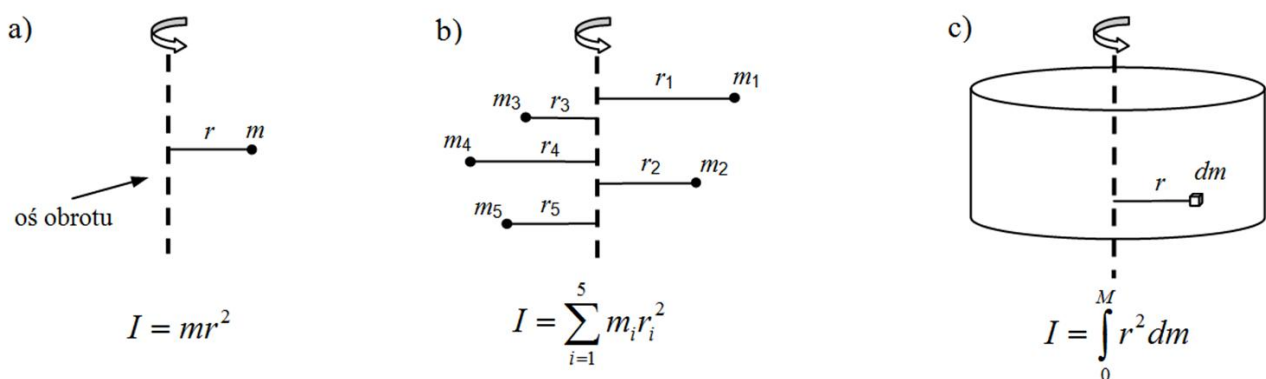
$$I = m_1 r_1^2 + m_2 r_2^2 + \dots + m_N r_N^2 = \sum_{i=1}^N m_i r_i^2, \quad (2)$$

gdzie m_i jest masą i -tego punktu materialnego, a r_i jego odległością od osi bezwładności.

Jeżeli mamy do czynienia z bryłą sztywną o masie M , hipotetycznie dzielimy ją na zbiór nieskończenie małych elementów (wycinków) o masach dm . Moment bezwładności bryły jest równy sumie momentów bezwładności poszczególnych elementów. Zakładając, że masa dm elementu bryły dąży do zera, sumę można zapisać w postaci całkowej:

$$I = \int_0^M r^2 dm, \quad (3)$$

gdzie r jest odległością elementu o masie dm od osi obrotu (rys. 1c).



Rys.1 Wizualizacja wyznaczania momentu pędu dla a) punktu materialnego, b) zbioru punktów materialnych sztywno połączonych ze sobą, c) bryły sztywnej.

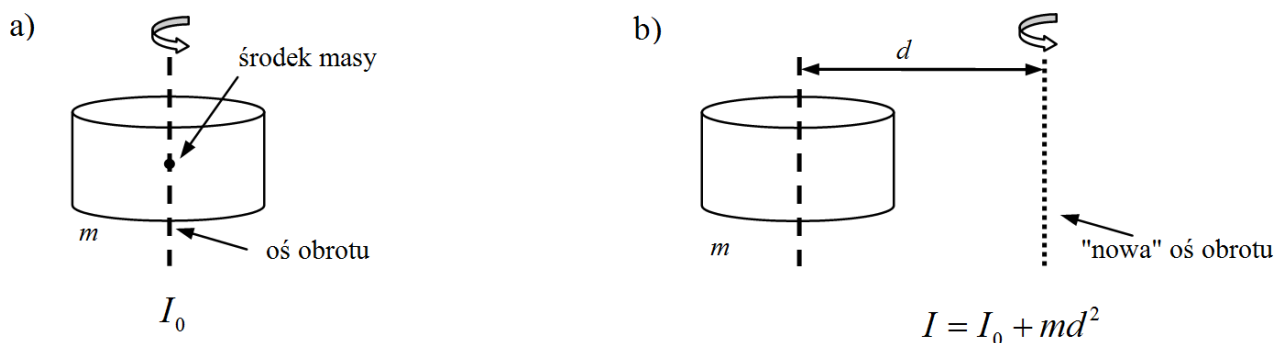
Obliczenia momentu bezwładności na podstawie wzoru (3) są stosunkowo proste jedynie dla brył posiadających oś symetrii równoległą względem osi bezwładności (pręt, walec, kula itp.). W przypadku brył o złożonym lub nieregularnym kształcie metody analityczne są bardzo skomplikowane. W praktyce moment bezwładności takich brył można wyznaczyć korzystając z metod doświadczalnych lub analizy numerycznej.

Twierdzenie Steinera

Jeżeli chcemy obliczyć moment bezwładności względem dowolnej osi nieprzechodzącej przez środek masy bryły, przydatne staje się twierdzenie Steinera. Mówi ono, że jeżeli moment bezwładności bryły sztywnej względem osi przechodzącej przez jej środek masy równa się I_0 , to moment bezwładności tej bryły obracającej się względem innej osi równoległej do osi przechodzącej przez jej środek masy wynosi:

$$I = I_0 + md^2, \quad (4)$$

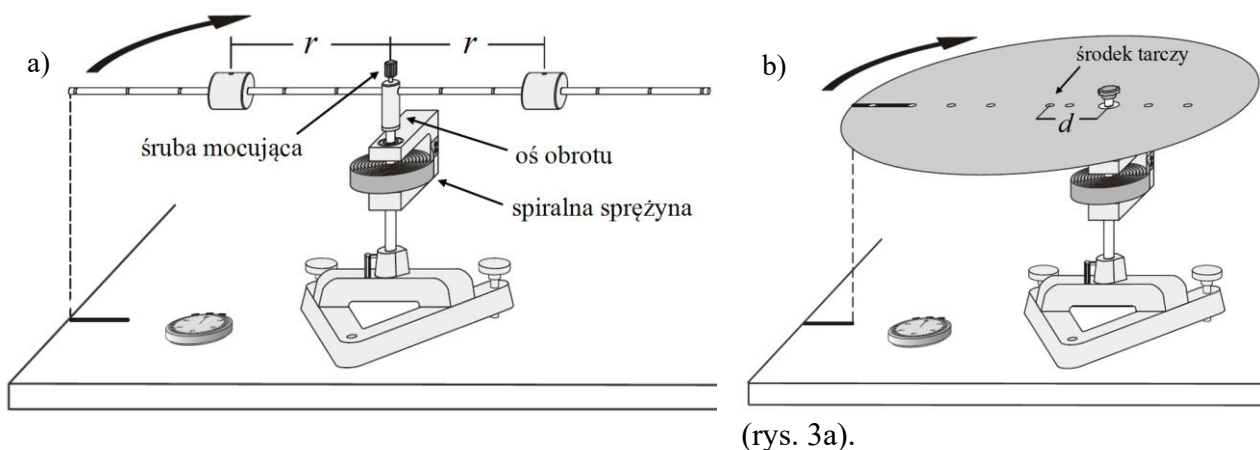
gdzie m jest masą bryły, a d jest odległością między osiami. Powyższe twierdzenie zostało zobrazowane na rys. 2.



Rys.2 Ilustracja twierdzenia Steinera: a) I_0 - moment bezwładności bryły względem osi przechodzącej przez jej środek masy, b) I - moment bezwładności bryły względem "nowej" osi obrotu.

Układ pomiarowy

W ćwiczeniu zostaną wyznaczone momenty bezwładności stalowego pręta oraz dysku. Dodatkowym zadaniem będzie eksperymentalne potwierdzenie twierdzenia Steinera. Do badań posłużą wahadło skrętne złożone ze stabilnej podstawy oraz pionowej osi osadzonej na łożyskach o bardzo małym tarczu. Oś oraz podstawa połączone są przy pomocy spiralnej sprężyny, która umożliwia wahania skrętne. Na końcu osi znajduje się śruba umożliwiającą mocowanie na niej brył



(rys. 3a).

Rys. 3 Wahadło skrętne: a) zestaw do wyznaczenia momentu kierującego, b) zestaw do badania twierdzenia Steinera

W trakcie ćwiczenia na osi wahadła będą mocowane: pręt, pręt z dwoma ciężarkami lub dysk (rys. 3). Na pręcie znajdują się nacięcia, a w ciężarkach wkręcone są specjalne sprężynujące śruby, co umożliwia precyzyjne umieszczenie ciężarków na pręcie (przesuwając ciężarek wzdłuż pręta,

czujemy wyraźne wskoczenie śruby do nacięcia). W metalowej tarczy służącej do badania twierdzenia Steinera nawiercono szereg otworów, poprzez które można mocować tarczę na osi wahadła.

Wahadło skrętne jest szczególnym przypadkiem wahadła fizycznego. Jeżeli założymy, że wychylenia wahadła są niewielkie (do około 180°) oraz zaniedbamy siły oporu, jego ruch można opisać jako *ruch harmoniczny prosty*. W takim przypadku okres T drgań wahadła można zapisać następująco:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I}{D}}, \quad (5)$$

gdzie I jest momentem bezwładności bryły zamocowanej na osi wahadła, a D jest *momentem kierującym* sprężyny wahadła. Moment kierujący D jest parametrem charakterystycznym dla danej sprężyny, zależnym od jej budowy, rodzaju materiału, sposobu hartowania itd.

Pomiary i obliczenia

Dysponując wahadłem skrętnym, możemy wyliczyć moment bezwładności zamocowanej na nim bryły. Zastosujemy w tym celu przekształcone równanie (5), wynik pomiaru okresu drgań T oraz wyznaczony moment kierujący D :

$$I = D \left(\frac{T}{2\pi} \right)^2. \quad (6)$$

Wyznaczenie momentu kierującego

W omawianym ćwiczeniu moment kierujący sprężyny wyznaczmy mierząc okresy wahań pręta obciążonego dwoma ciężarkami (rys. 3a). Moment bezwładności układu złożonego z pręta z dwoma ciężarkami, umieszczonymi symetrycznie w odległości r od osi obrotu, można zapisać następującym wzorem:

$$I = I_p + 2m_C r^2, \quad (7)$$

gdzie I_p jest momentem bezwładności pręta, a m_C jest masą każdego ciężarka.

Na podstawie wzoru (6) moment bezwładności pręta zamocowanego na osi możemy zapisać równaniem:

$$I_p = D \left(\frac{T_p}{2\pi} \right)^2, \quad (8)$$

gdzie T_p jest okresem drgań wahadła obciążonego prętem (bez ciężarków).

Podstawiając do równania (6) wzory (7) i (8), otrzymujemy następującą zależność:

$$D \left(\frac{T}{2\pi} \right)^2 = 2m_C r^2 + D \left(\frac{T_p}{2\pi} \right)^2, \quad (9)$$

która po przekształceniu przybiera postać:

$$T^2 = \frac{8\pi^2 m_C}{D} r^2 + T_p^2. \quad (10)$$

Dokonując w powyższym równaniu następujących podstawień, $y = T^2$, $x = r^2$, $a = 8\pi^2 m_C / D$ oraz $b = T_p^2$, uzyskuje się zależność typu $y = ax + b$. Jest to funkcja liniowa, gdzie wartość a jest współczynnikiem kierunkowym prostej a b punktem przecięcia z osią y . Stosując metodę regresji liniowej do zależności kwadratu okresu drgań od kwadratu odległości ciężarków od osi: $T^2 = f(r^2)$, można wyznaczyć współczynnik nachylenia prostej a , a następnie moment kierujący:

$$D = \frac{8\pi^2 m_C}{a}. \quad (11)$$

Wyznaczenie momentów bezwładności pręta i dysku względem ich osi symetrii

W celu wyznaczenia momentu bezwładności pręta można skorzystać z wcześniejszego pomiaru okresu dla nieobciążonego pręta oraz z równania (8). Chcąc wyznaczyć moment bezwładności dysku należy zamocować jego środek na osi, a następnie zmierzyć okres drgań wahadła. Korzystając z równania (6) wyznaczmy doświadczalną wartość momentu bezwładności dysku. Chcąc porównać uzyskane wartości doświadczalne z wartościami teoretycznymi, należy zważyć obydwie bryły, zmierzyć długość pręta oraz średnicę dysku. Wartości teoretyczne momentów bezwładności obliczymy z następujących równań:

$$I = \frac{1}{12}ml^2, \quad (12)$$

$$I = \frac{1}{2}MR^2, \quad (13)$$

gdzie m jest masą pręta, l - długością pręta, M - masą dysku, R - promieniem dysku.

Doświadczalne potwierdzenie twierdzenia Steinera

Do badań wykorzystamy wahadło z zamocowanym dyskiem w konfiguracji przedstawionej na rys. 3b. Dysk kolejno przykręcamy na osi dla różnych odległości d od środka tarczy (0, 2, 4, ..., 14 cm). Dla każdego położenia wyznaczamy okres drgań wahadła, a następnie, korzystając z równania (6), moment bezwładności dysku. W celu potwierdzenia twierdzenia Steinera obliczamy teoretyczny moment bezwładności dysku na podstawie równania (4), które w powyższym przypadku przybierze następującą postać:

$$I = \frac{1}{2}MR^2 + Md^2. \quad (14)$$

Przebieg ćwiczenia**A. Wyznaczenie momentu kierującego sprężyny**

1. Wyznacz: masę ciężarków, masę i długość pręta oraz odległości między nacięciami na pręcie. Zapisz dokładności pomiarowe.
2. Umocuj środek pręta na osi wahadła, a następnie wychyl go o kąt około 90° i puść. Za pomocą stopera zmierz czas pięciu okresów wychyleń ($t = 5T$). Czynność tę powtórz jeszcze dwukrotnie.
3. Wsuń ciężarkę na pręt i ustaw je symetrycznie tak, aby ich środki pokrywały się z nacięciami na pręcie znajdującymi się najbliżej jego środka (przy precyzyjnym ustawieniu czuje się wskoczenie śruby ciężarka do nacięcia). Wykonaj pomiary okresu analogicznie do pkt. 2.
4. Pomiary z pkt. 3 kontynuuj dla kolejnych odległości r ciężarków od osi obrotu.
5. Dla każdego położenia ciężarków wylicz średni czas pięciu okresów wychyleń, a następnie okres drgań T .
6. Wykreśl zależność kwadratu okresu od kwadratu odległości ciężarków $T^2 = f(r^2)$.
7. Posługując się metodą regresji liniowej wyznacz współczynnik nachylenia prostej a oraz jego niepewność pomiarową. Następnie, korzystając z równania (11), wylicz moment kierujący D oraz jego niepewność pomiarową. Wykonaj rachunek jednostek.

B. Wyznaczenie momentów bezwładności pręta i dysku względem ich osi symetrii

1. Korzystając z wyników uzyskanych w punktach A.1 i A.2 oraz równania (8), wylicz moment bezwładności pręta.
2. Wyznacz masę dysku oraz jego średnicę. Zamocuj dysk tak, aby jego środek pokrywał się z osią obrotu. Wykonaj pomiary analogicznie do punktu A2.
3. Oblicz średni okres wahań dysku oraz jego moment bezwładności (skorzystaj z równania (6)).

4. Korzystając z wyników pomiaru mas brył, długości pręta oraz średnicy dysku, oblicz teoretyczne wartości momentów bezwładności na podstawie wzorów (12) i (13). Porównaj wyniki doświadczalne z teoretycznymi.

C. Doświadczalne potwierdzenie twierdzenia Steinera

1. Kontynuuj pomiary okresu drgań dysku analogicznie do poprzednich, zmieniając odległość osi od środka tarczy d co 2 cm (0, 2, 4, ..., 14 cm).
2. Wylicz średnie wartości okresów wahań oraz momenty bezwładności dysku korzystając z równania (6).
3. Wylicz z równania (14) teoretyczne wartości momentu bezwładności dysku względem kolejnych osi obrotu.
4. Porównaj w tabeli uzyskane doświadczalnie i teoretycznie momenty bezwładności dysku celem potwierdzenia twierdzenia Steinera.
5. Na wspólnym układzie współrzędnych wykreśl doświadczalne i teoretyczne momenty bezwładności dysku w funkcji kwadratu odległości osi od środka dysku: $I = f(d^2)$.

Zapisz wnioski.

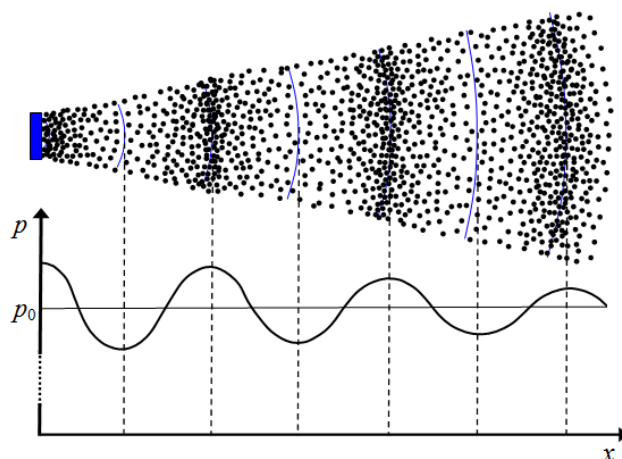
Wyznaczenie prędkości fal ultradźwiękowych metodami interferencyjnymi

Cele ćwiczenia

- Praktyczne zapoznanie się ze zjawiskiem interferencji fal akustycznych
- Wyznaczenie prędkości fal ultradźwiękowych metodami interferencyjnymi

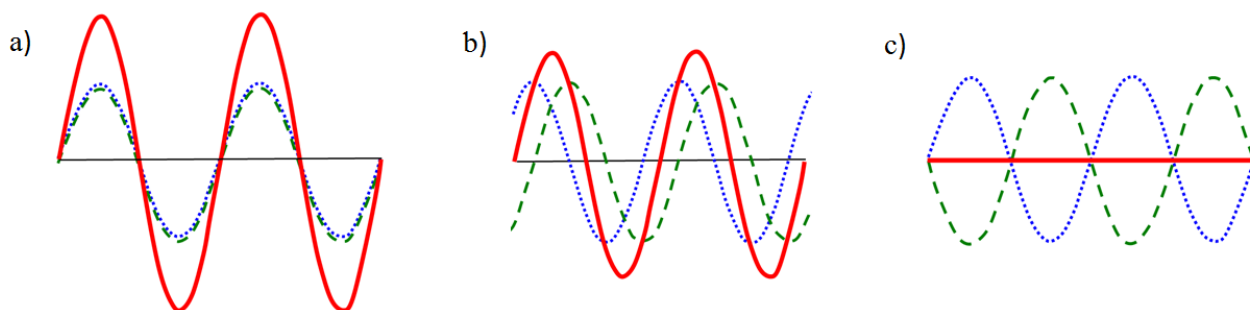
Wprowadzenie

Fale ultradźwiękowe mają bardzo szerokie zastosowanie w technice i medycynie. Są to fale akustyczne o częstotliwościach z zakresu $20 \text{ kHz} \div 1 \text{ GHz}$. Ultradźwięki są więc rozchodzącymi się w przestrzeni zaburzeniami ośrodka sprężystego połączonymi z lokalnymi zmianami gęstości i ciśnienia ośrodka. Zaburzenia te przenoszą energię mechaniczną, jednak średnie położenia drgających cząsteczek ośrodka nie ulegają zmianie. W gazach ultradźwięki rozchodzą się w postaci fal podłużnych, tzn. kierunek drgań cząsteczek ośrodka jest zgodny z kierunkiem rozchodzenia się fali. Na rysunku 1 przedstawiono falę akustyczną w ośrodku gazowym wywołaną drganiami harmonicznymi membrany nadajnika oraz ciśnienie odpowiadające chwilowym położeniom zaburzenia. Jak widać, w tym przypadku lokalne zmiany ciśnienia i, co za tym idzie, amplituda fali maleją wraz odległością od nadajnika.



Rys. 1. Podłużna fala akustyczna wywołana drganiami membrany oraz zależność ciśnienia gazu od odległości (p_0 - ciśnienie atmosferyczne).

Zjawisko interferencji dotyczy wszystkich rodzajów fal. Polega ono na nakładaniu się dwóch lub więcej fal spotykających się w tym samym punkcie przestrzeni. Zwykle możemy przyjąć, że fala wypadkowa w punkcie spotkania będzie prostą sumą fal składowych (zasada superpozycji). Aby wynik interferencji nie zmieniał się w czasie, nakładające się fale muszą być spójne, tzn. różnica faz interferujących fal jest stała. Na rysunku 2 pokazano przykłady nakładania się fal o równych amplitudach i długościach (fale kreskowana i kropkowana). Jak widać, wynik nałożenia fal (fala czerwona ciągła) jest zależny od przesunięcia fazowego pomiędzy falami składowymi.



Rys. 2. Zjawisko interferencji: a) różnica faz pomiędzy falami składowymi wynosi 0 - wypadkowa fala ma amplitudę dwukrotnie większą niż fale składowe (maksymalne wzmocnienie), b) różnica faz wynosi $\pi/2$ - wypadkowa fala ma amplitudę większą niż fale składowe (wzmocnienie), c) różnica faz wynosi π - wypadkowa fala ma amplitudę równą zero (całkowite wygaszenie).

Fala stojąca

Założmy, że w przestrzeni spotykają się dwie fale sinusoidalne o takich samych amplitudach y_m i długościach λ , rozchodzące się w przeciwnych kierunkach. Równania tych fal możemy zapisać następująco:

$$y_1(x,t) = y_m \sin(kx - \omega t) \quad \text{oraz} \quad y_2(x,t) = y_m \sin(kx + \omega t) \quad (1)$$

gdzie $k = 2\pi/\lambda$ - wektor falowy, x - położenie, ω - częstotliwość kołowa, t - czas. W wyniku nałożenia się tych fal powstaje fala wypadkowa o równaniu:

$$y(x,t) = y_1(x,t) + y_2(x,t) = 2y_m \sin(kx) \cos(\omega t) \quad (2)$$

co możemy zapisać również jako:

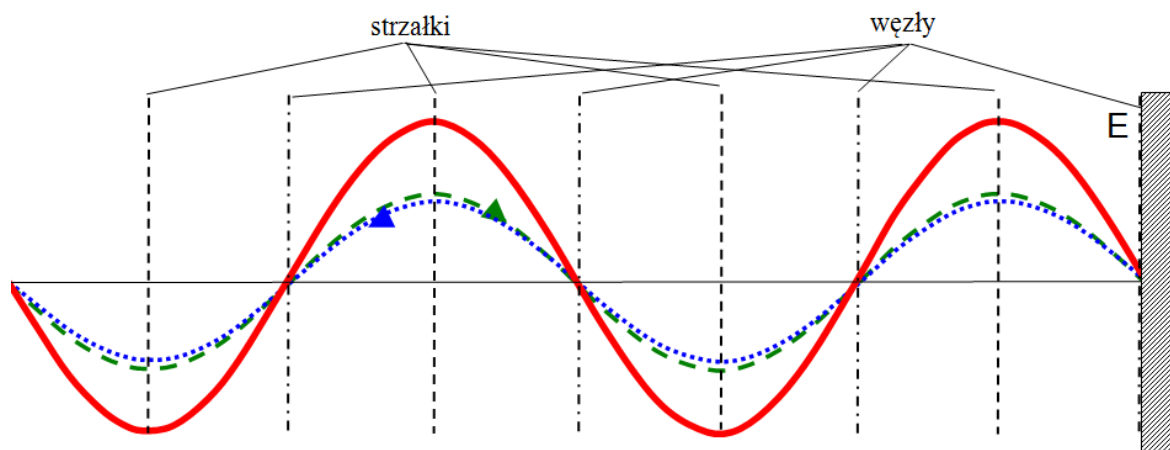
$$y(x,t) = [2y_m \sin(\frac{2\pi}{\lambda} x)] \cos(\omega t). \quad (3)$$

Jest to równanie *fali stojącej*. W odróżnieniu do fali biegnącej fala ta nie przemieszcza się. Łatwo jest natomiast zauważyć, że amplituda fali (czynnik w nawiasie kwadratowym w równaniu (3)) zależna jest od położenia x . Oznacza to, że w szczególnych położeniach cząsteczki ośrodka nie wykonują drgań, a w innych mogą osiągnąć maksymalne wychylenie $2y_m$.

Korzystając z równania (3), możemy wyliczyć położenia x , dla których amplituda fali stojącej osiąga wartość maksymalną $2y_m$ oraz zerową. Położenia takie nazywamy odpowiednio *strzałkami* i *węzłami*. Strzałka wystąpi, jeżeli $|\sin(2\pi x/\lambda)| = 1$, natomiast węzeł w przypadku, gdy $\sin(2\pi x/\lambda) = 0$. Pozwala to zapisać warunki:

$$\text{strzałka dla } x = (n + \frac{1}{2}) \frac{\lambda}{2}, \quad \text{węzeł dla } x = n \frac{\lambda}{2}, \quad \text{gdzie } n = 0, 1, 2, 3... \quad (4)$$

Na rysunku 3 pokazano przykład powstawania fali stojącej. Należy pamiętać, że fale akustyczne rozchodzące się w gazach to wyłącznie fale podłużne, a więc sinusoidy na rysunku 3 nie obrazują chwilowego położenia cząstek gazu tylko wartości amplitud ich drgań. Fala z nadajnika (zielona linia przerywana) przemieszcza się w prawą stronę, a następnie odbija się od sztywnego ekranu E. Fala rozchodząca się w powietrzu w wyniku odbicia od ośrodka gęstsze zmienia fazę na przeciwną. Cząsteczki w fali odbitej (niebieska linia kropkowana) są więc wychylone w tę samą stronę co cząsteczki fali padającej, a tym samym następuje wzmocnienie nałożonych fal (fala wypadkowa - czerwona linia ciągła). Obserwując w czasie interferencję fal: nadawanej i odbitej, zaobserwujemy, że wypadkowe zaburzenie nie przemieszcza się. W strzałkach będziemy obserwowali maksymalne wychylenia cząsteczek natomiast w węzłach brak drgań cząsteczek.



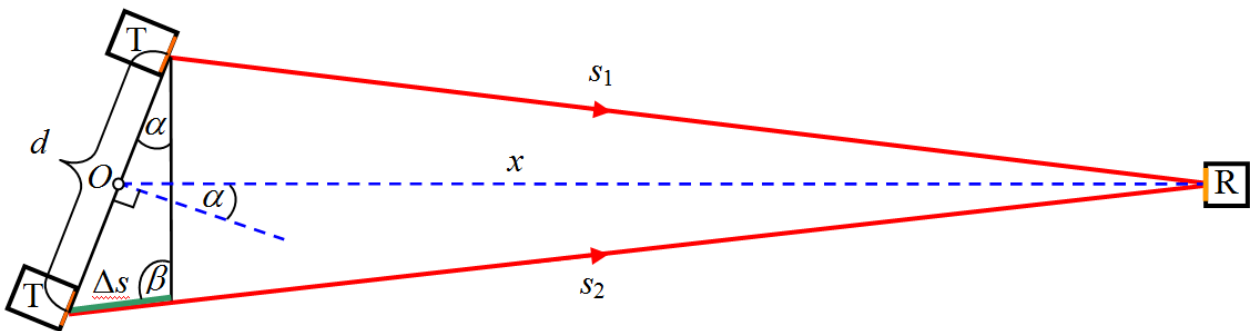
Rys. 3. Powstawanie fali stojącej (czerwona linia ciągła) po odbiciu fali od sztywnego ekranu E.

Interferencja fal spójnych pochodzących z dwóch jednakowych źródeł punktowych

Rozpatrzmy dwa jednakowe nadajniki T ustawione w odległości d , równoległe względem siebie (patrz rys.4). Nadawane przez nie fale mają jednakową częstotliwość i tę samą fazę. W odległości x od środka linii łączącej nadajniki znajduje się odbiornik fal R. Układ nadajników może obracać się względem osi O przechodzącej przez środek łączącej ich linii. Jeżeli kąt α na rysunku 4 jest równy zero, to odległości pomiędzy nadajnikami i odbiornikiem są sobie równe $s_1 = s_2$. Fale dotrą do odbiornika w tej samej fazie, więc zaobserwujemy ich maksymalne wzmocnienie. Jeżeli nadajniki obrócimy o pewien kąt α , nadawane fale przebędą drogi o różnej długości s_1 i s_2 , wskutek czego różnica faz fal docierających do nadajnika może się zmienić. Kąt obrotu α a tym samym różnica dróg przebytych przez fale $\Delta s = s_2 - s_1$ będzie więc decydować o różnicy faz pomiędzy falami docierającymi do odbiornika a tym samym o wyniku ich interferencji.

Zależność pomiędzy wielkościami d , Δs i α jest skomplikowana, ale, zakładając, że $d \ll x$, możemy ją znacznie uprościć. Na rysunku 4 można zauważyć, że przy powyższym założeniu kąt $\beta \approx \pi/2$ a tym samym:

$$\Delta s / d = \sin \alpha. \quad (5)$$



Rys. 4. Schemat układu do pomiaru interferencji fal spójnych emitowanych przez dwa źródła.

Ażebyśmy obserwowali maksymalne wzmocnienie interferujących fal, różnica ich faz musi być równa zero. Oznacza to, że różnica przebytych dróg Δs powinna być równa całkowitej wielokrotności długości fali:

$$\Delta s = n\lambda, \quad \text{gdzie } n = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3 \dots \quad (6)$$

Korzystając z równań (5) i (6), możemy zapisać następujący warunek na maksymalne wzmocnienie fal (maksimum):

$$d \sin \alpha_n = n\lambda, \quad \text{gdzie } n = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3 \dots \quad (7)$$

wygaszenie fal (minimum) powinno wystąpić dla warunku:

$$d \sin \alpha_n = (n + 1/2)\lambda, \quad \text{gdzie } n = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3 \dots \quad (8)$$

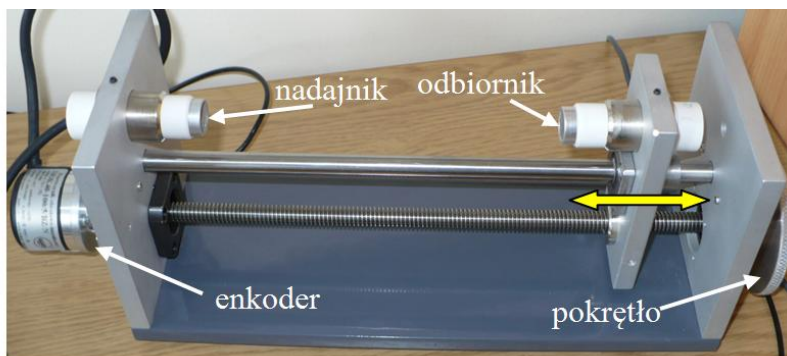
Z powyższych równań wynika, że dla szeregu kątów obrotu nadajników α_n powinniśmy uzyskać wzmocnienia i wygaszenia sygnału.

Układ pomiarowy

Układ pomiarowy składa się z dwóch niezależnych zestawów eksperymentalnych połączonych z komputerem. Pierwszy oparty jest na powstawaniu fali stojącej pomiędzy nadajnikiem i odbiornikiem (stąd skrótowa nazwa zestawu "fala stojąca"). Zestaw drugi przypomina wersję doświadczenia Younga wykonaną dla fal akustycznych, przez co nadano mu skrótową nazwę "Young".

Zestaw eksperymentalny - fala stojąca

Zestaw ten składa się z nieruchomego nadajnika fal ultradźwiękowych o częstotliwości 40 kHz połączonego z generatorem sygnału sinusoidalnego. Naprzeciwko nadajnika znajduje się ruchomy odbiornik fal podłączony do interfejsu komputerowego. Położenie odbiornika możemy zmieniać za pomocą pokrętki śruby napędowej. Obrót jest rejestrowany przez enkoder podłączony do interfejsu. Układ umożliwia rejestrację amplitudy sygnału z odbiornika w funkcji zmiany odległości pomiędzy nadajnikiem i odbiornikiem. Na rysunku 5 przedstawiono widok głównej części zestawu eksperymentalnego.



Rys. 5. Widok głównej części zestawu - fala stojąca

Zasada pomiaru oparta jest na tworzeniu się fali stojącej pomiędzy nadajnikiem i odbiornikiem dla ściśle określonych odległości pomiędzy nimi. Fala nadawana docierająca do odbiornika jest częściowo przez niego odbijana, co powoduje interferencję fal: nadawanej i odbitej. W chwili, gdy odległość między nadajnikiem i odbiornikiem jest całkowitą wielokrotnością połowy długości fali, dochodzi do powstawania fali stojącej, co powoduje maksymalne wzmocnienie sygnału. W trakcie ruchu nadajnika będziemy więc rejestrowali maksymalne występujące dla przesunięć co $\lambda/2$ (rys. 6).

Sygnały poprzez interfejs docierają do komputera i są prezentowane na monitorze. Program umożliwia również zapis sygnału (bliższe informacje po kliknięciu przycisku - POMOC). Za pomocą kursora można wyznaczyć położenie poszczególnych maksimów, a, znając odległość pomiędzy nimi, wyznaczyć $\lambda/2$. Znajomość długości fali λ oraz częstotliwości generatora f umożliwia wyznaczenie prędkości propagacji fal ultradźwiękowych V z zależności:

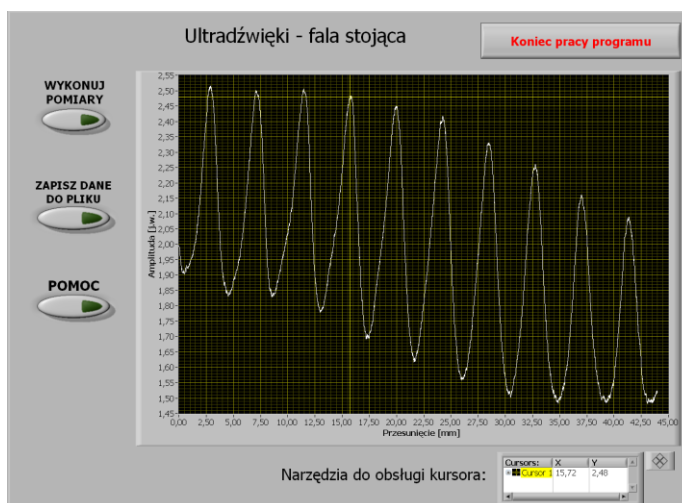
$$V = \lambda f. \quad (9)$$

Zestaw eksperymentalny - Young

Zestaw składa się z dwóch nadajników fal ultradźwiękowych o częstotliwości 40 kHz połączonych z generatorem sygnału sinusoidalnego. Nadajniki mogą obracać się względem wspólnej osi obrotu znajdującej się pomiędzy nimi. Naprzeciwko nadajników znajduje się odbiornik połączony z interfejsem komputerowym.



Rys. 7. Widok z góry głównej części zestawu - Young



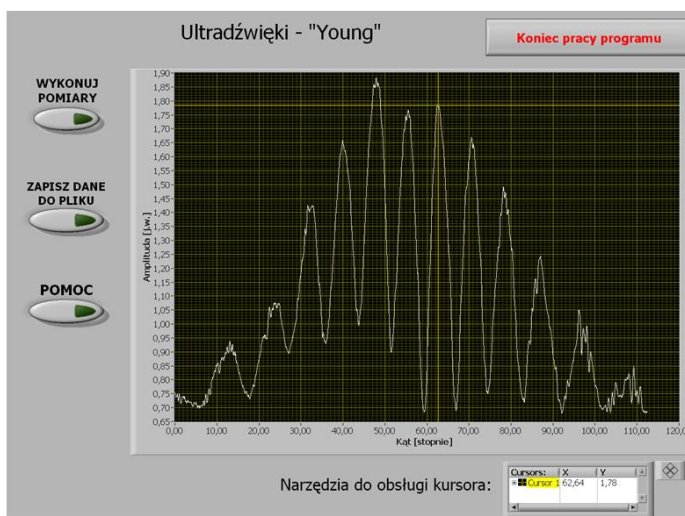
Rys. 6. Widok okna pomiarowego - fala stojąca

Położenie katowe odbiorników może-my zmieniać za pomocą pokręta, którego obrót jest rejestrowany przez enkoder podłączony do interfejsu. Układ umożliwia więc zmianę położenia katowego nadajników, jednocześnie rejestrując amplitudę sygnału z odbiornika w funkcji kąta obrotu nadajników. Na rysunku 7 przedstawiono widok głównej części zestawu eksperymentalnego.

Idea pomiaru przedstawiona jest na rysunku 4. Obracając nadajniki, rejestrujemy efekt interferencji nadawanych fal w punkcie, w którym znajduje się odbiornik. Na ekranie komputera obserwujemy szereg wzmocnień i osłabień sygnału (rys. 8). Za pomocą kursora odczytujemy położenia katowe maksimum związanych z kolejnymi rzędami interferencyjnymi. Chcąc wyznaczyć kąt α_n , należy odczytać położenie katowe maksimum n -tego rzędu po prawej stronie α_{np} , a następnie po lewej stronie α_{nL} . Kąt α_n obliczamy z poniższej zależności:

$$\alpha_n = \frac{\alpha_{nP} - \alpha_{nL}}{2}. \quad (10)$$

Znając rząd maksimum n , kąt α_n oraz wiedząc, że $d = (65 \pm 1) \text{ mm}$, możemy wyznaczyć długość fali λ ze wzoru (7). Znajomość długości fali λ oraz generowanej częstotliwości f umożliwia wyznaczenie prędkości propagacji fal ultradźwiękowych V z zależności (9).



Rys. 8. Widok okna pomiarowego - Young

Przebieg ćwiczenia

A. Wyznaczenie prędkości fal ultradźwiękowych z badań interferencji fal nadawanej i odbitej

1. Sprawdź i zapisz temperaturę t w pomieszczeniu.
2. Włącz generator i ustaw jego częstotliwość w zakresie 40,1 - 40,3 kHz. Następnie włącz komputer i uruchom program *Fala stojąca* (klikając ikonę *Ultradźwięki fala stojąca*).
3. Kręcąc pokrętelem, ustaw odbiornik w odległości około 10 cm od nadajnika. Na ekranie komputera kliknij przycisk "WYKONUJ POMIARY" i, wolno kręcąc pokrętelem, zarejestruj m kolejnych maksimum ($m \geq 10$). Wyłącz rejestrację sygnału poprzez ponowne kliknięcie przycisku "WYKONUJ POMIARY".

Uwaga! W obydwu eksperymentach należy kręcić pokrętelem stosunkowo powoli (jeden obrót przez około 10 s).

4. Za pomocą kursora wyznacz położenia maksimum. Wiedząc, że odległość między kolejnymi maksimum wynosi $\lambda/2$ wyznacz średnią długość fali.
5. Pomiar wykonaj pięciokrotnie, każdorazowo zapisując częstotliwość generatora f .
6. Kliknij na ekranie przycisk "Koniec pracy programu".
7. Korzystając z otrzymanych wyników oraz równania (9), wyznacz prędkość propagacji fal ultradźwiękowych w powietrzu dla każdej serii pomiarowej, a następnie wartość średnią prędkości i jej niepewność.

B. Wyznaczenie prędkości fal ultradźwiękowych z badań interferencji fal pochodzących z dwóch jednakowych nadajników

1. Uruchom program *Young* (klikając ikonę *Ultradźwięki Young*).
2. Kręcąc pokrętkiem, ustaw odchylenie nadajników o około 50° w prawo (posłuż się skalą pomocniczą). Następnie na ekranie komputera kliknij przycisk "WYKONUJ POMIARY" i, wolno kręcąc pokrętkiem, obróć nadajniki do położenia kąтового 50° w lewo. Wyłącz rejestrację sygnału poprzez ponowne kliknięcie przycisku "WYKONUJ POMIARY".
3. Za pomocą kursora wyznacz kątowne położenia maksimum z prawej α_{nP} i lewej strony α_{nL} .
4. Pomiar powtórz pięciokrotnie, każdorazowo zapisując częstotliwość generatora f .
5. Korzystając z otrzymanych wyników oraz równań (7), (9) i (10), wyznacz prędkość propagacji fal ultradźwiękowych w powietrzu dla każdej serii pomiarowej a następnie wartość średnią prędkości i jej niepewność.
6. Na podstawie zmierzonej temperatury wyznacz teoretyczną wartość prędkości propagacji fal akustycznych w suchym powietrzu, korzystając z równania $V = [331,5 + (0,6t)]$ m/s, gdzie t oznacza temperaturę w stopniach Celsjusza ($^\circ\text{C}$).
7. Porównaj wyniki otrzymane obiema metodami do wyliczonej wartości teoretycznej. Zapisz wnioski.

Badanie transformatora

Cele ćwiczenia

- Wyznaczenie przekładni transformatora
- Wyznaczenie zależności napięcia oraz sprawności transformatora od natężenia prądu w uzwojeniu wtórnym dla transformatora obciążonego

Wprowadzenie

Prąd przemienny

Prąd przemienny o częstotliwości 50 Hz jest powszechnie wykorzystywany do zasilania urządzeń domowych i przemysłowych. Zależność napięcia przemiennego od czasu t możemy zapisać następującym równaniem

$$u = U_0 \cos(\omega t), \quad (1)$$

gdzie u jest chwilową wartością napięcia, U_0 - napięciem szczytowym a ω - częstotliwością kołową. Argument funkcji kosinus nazywany jest fazą. W obwodzie zamkniętym popłynie prąd o tym samym charakterze zmian, ale jego faza początkowa może różnić się od fazy napięcia

$$i = I_0 \cos(\omega t + \varphi), \quad (2)$$

gdzie i jest chwilową wartością natężenia prądu, I_0 - szczytowym natężeniem prądu a φ - różnicą faz napięcia i prądu. Różnica faz zależy od rodzaju i wartości elementów występujących w obwodzie: rezystancji, indukcyjności i pojemności. Jeżeli w obwodzie występuje jedynie rezystancja, to $\varphi = 0$ czyli nie ma przesunięcia fazowego między napięciem i prądem. W przypadku, gdy obwód ma charakter indukcyjny, napięcie wyprzedza prąd, a różnica faz mieści się w przedziale $(-\pi/2, 0)$. W obwodzie o charakterze pojemnościowym prąd wyprzedza napięcie, a φ mieści się w przedziale $(0, \pi/2)$.

Moc wydzielana w obwodzie prądu przemiennego wyraża się wzorem

$$P = \frac{1}{2} U_0 I_0 \cos \varphi. \quad (3)$$

Taka sama moc $P = UI$ wydzielaliby się w przypadku przepływu prądu stałego o napięciu $U = U_0 / \sqrt{2}$ i natężeniu $I = I_0 / \sqrt{2}$ dla $\varphi = 0$. Wielkości U oraz I nazywa się odpowiednio napięciem skutecznym i natężeniem skutecznym. Podstawiając wartości skuteczne do równania (3), uzyskamy

$$P = UI \cos \varphi. \quad (4)$$

Jak widać w przypadku prądu przemiennego moc w obwodzie nie zależy jedynie od napięcia i natężenia prądu, ale również od ich przesunięcia fazowego, które powoduje straty mocy. W elektrotechnice wyrażenie $\cos \varphi$ nazywane jest kosinusem kąta strat.

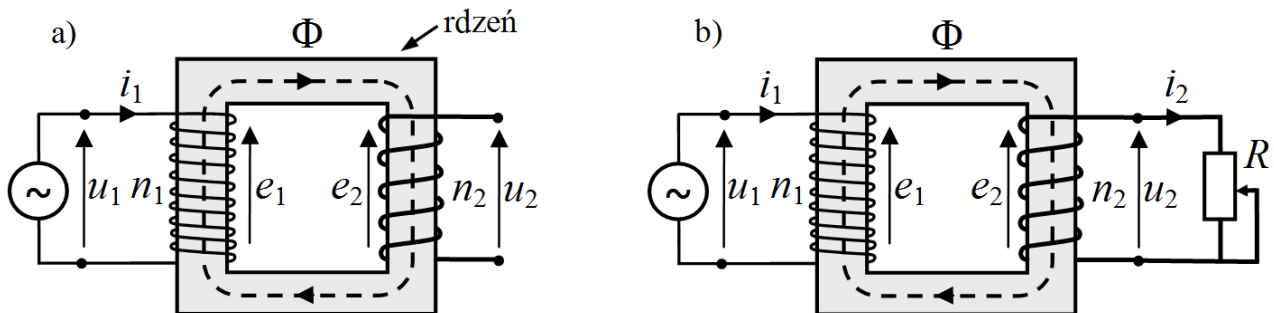
W praktyce posługujemy się wartościami skutecznymi napięcia i prądu. Na miernikach odczytujemy właśnie takie wartości. Musimy jednak mieć świadomość, że wartość napięcia w gniazdkach naszych domów zmienia się w zakresie 0 - 325 V (230 V to wartość skuteczna napięcia).

Transformator

Transformator jest urządzeniem powszechnie wykorzystywanym w energetyce, elektrotechnice, elektronice, spawalnictwie itd. Służy on do zamiany napięcia i natężenia prądu przemiennego na inne napięcie i natężenie prądu bez zmiany częstotliwości prądu. Przykładowo transformatory umożliwiają zamianę wysokiego napięcia stosowanego w energetycznych liniach przesyłowych (np. 400000 V) na znacznie niższe wykorzystywane w domowych urządzeniach. Transformatory w zależności od zastosowania mają różnorodną budowę, a teoria związana z ich

działaniem jest bardzo złożona. W niniejszym ćwiczeniu poznamy jedynie podstawowe, często uproszczone, informacje związane z tym urządzeniem.

Transformator składa się z ferromagnetycznego rdzenia i co najmniej dwóch uzwojeń (cewek) nawiniętych na niego (rys. 1). Uzwojenia pierwotne (zasilające) i wtórne (odbiorcze) stanowią obwody elektryczne transformatora, natomiast rdzeń transformatora jest jego obwodem magnetycznym. Zasada działania transformatora opiera się na zjawisku indukcji elektromagnetycznej. Rozróżniamy trzy podstawowe stany pracy transformatora: *stan jałowy*, *stan zwarcia* oraz *stan obciążenia*.



Rys. 1 Poglądowy schemat budowy transformatora a) praca w stanie jałowym, b) praca w stanie obciążonym

Stan jałowy (stan nieobciążony) transformatora

O stanie jałowym transformatora mówimy w sytuacji, gdy uzwojenie pierwotne podłączone jest do źródła prądu przemiennego, natomiast uzwojenie wtórne jest rozwarte (rys. 1a). Prąd przemienny przepływający w uzwojeniu pierwotnym indukuje w rdzeniu przemienny strumień magnetyczny Φ . Zgodnie z prawem indukcji Faradaya pod wpływem zmiennego pola magnetycznego przenikającego przez uzwojenia pierwotne i wtórne indukują się w nich chwilowe siły elektromotoryczne o wartościach

$$e_1 = -n_1 \frac{d\Phi}{dt}, \quad e_2 = -n_2 \frac{d\Phi}{dt}, \quad (5)$$

gdzie e_1 i e_2 są siłami elektromotorycznymi indukowanymi w uzwojeniach pierwotnym i wtórnym, n_1 i n_2 to liczby zwojów w uzwojeniach pierwotnym i wtórnym, wyrażenie $d\Phi/dt$ oznacza pochodną strumienia magnetycznego Φ po czasie t (szybkość z jaką strumień przenikający przez jeden zwoj zmienia się w czasie).

Zwykle rezystancje uzwojeń transformatora są pomijalnie małe, a więc w stanie jałowym transformatora możemy zapisać, że chwilowe spadki napięć na uzwojeniu pierwotnym i wtórnym są równe co do wartości indukowanym w nich siłom elektromotorycznym

$$u_1 = e_1, \quad u_2 = e_2, \quad (6)$$

gdzie u_1 jest chwilowym napięciem źródła prądu dołączonego do uzwojenia pierwotnego a u_2 chwilowym spadkiem napięcia na końcach uzwojenia wtórnego. Korzystając z równań (5) i (6), możemy napisać następującą zależność

$$\frac{u_1}{u_2} = \frac{n_1}{n_2}. \quad (7)$$

Zastępując chwilowe spadki napięć na uzwojeniach pierwotnym i wtórnym odpowiednimi napięciami skutecznymi, możemy ostatecznie zapisać

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{n_1}{n_2} = K. \quad (8)$$

Liczbę K nazywamy *przekładnią transformatora*. Z równania (8) wynika, że, dobierając odpowiedni stosunek liczby uzwojeń pierwotnego i wtórnego, możemy uzyskać wzrost lub spadek napięcia na wyjściu transformatora w stosunku do napięcia zasilającego.

Stan zwarcia transformatora

O stanie zwarcia transformatora (stanie maksymalnego obciążenia) mówimy w przypadku, gdy uzwojenie pierwotne jest połączone ze źródłem prądu przemiennego, a uzwojenie wtórne jest zwarte. Odpowiada to sytuacji na rys. 1b, gdy regulowany rezystor (odbiornik) jest ustawiony w położeniu $R = 0$. Prąd o natężeniu i_1 płynący w uzwojeniu pierwotnym indukuje zmienny strumień pola magnetycznego w rdzeniu. W uzwojeniu wtórnym pod wpływem indukcji pojawia się prąd przemienny o chwilowym natężeniu i_2 . Jeżeli pominiemy straty w transformatorze, możemy, korzystając z zasady zachowania energii, stwierdzić, że moc przekazywana przez źródło do uzwojenia pierwotnego $U_1 I_1$ jest równa mocy przekazywanej do obwodu wtórnego $U_2 I_2$

$$U_1 I_1 = U_2 I_2, \quad (9)$$

gdzie U_1 , U_2 są skutecznymi napięciami, a I_1 , I_2 są skutecznymi natężeniami prądów odpowiednio w uzwojeniach pierwotnym i wtórnym.

Korzystając z powyższej zależności oraz równania (8), możemy napisać

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{1}{K}. \quad (10)$$

Stan obciążenia transformatora

Do tej pory omówiliśmy dwa skrajne przypadki stanu pracy transformatora, gdy uzwojenie wtórne było rozwarne (rezystancja odbiornika $R = \infty$) oraz, gdy było zwarte (rezystancja odbiornika $R = 0$). O stanie obciążenia transformatora mówimy, gdy do uzwojenia pierwotnego podłączono źródło prądu przemiennego, a uzwojenie wtórne połączone z odbiornikiem o skończonej rezystancji $R \neq 0$ (rys. 1b). W tej sytuacji stosunek napięć w uzwojeniu pierwotnym i wtórnym nie jest równy przekładni transformatora, gdyż w obwodzie uzwojenia wtórnego mamy do czynienia ze spadkiem napięcia na rezystancji uzwojenia wtórnego związanym z przepływem prądu. Badając więc napięcie na uzwojeniu wtórnym, obserwujemy jego spadek wraz ze wzrostem natężenia prądu płynącego w tym uzwojeniu (spadkiem rezystancji odbiornika).

Sprawność transformatora

Powyższe rozważania dotyczą tak zwanego *transformatora idealnego* (bezstratnego). W rzeczywistym transformatorze występują straty spowodowane głównie przez: rezystancję uzwojeń, prądy wirowe powstające w rdzeniu, histerezę ferromagnetyka oraz rozproszenie pola magnetycznego poza rdzeniem. Konstruktorzy starają się zapobiegać tym efektom poprzez: stosowanie w uzwojeniach wysokiej jakości przewodów miedzianych, tworzenie rdzeni transformatorów z szeregu odizolowanych blach ferro-magnetycznych, optymalizacji kształtu rdzenia i uzwojeń w zależności od zastosowania transformatora.

Istotnym parametrem transformatora jest jego sprawność obliczana jako stosunek mocy oddanej P_2 do mocy pobranej ze źródła P_1 . Chcąc podać sprawność η w procentach, korzystamy z równania

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} 100\%. \quad (11)$$

Pamiętając, że mamy do czynienia z prądem przemiennym, a obwody mają charakter indukcyjny, wzory na moce pobraną P_1 i oddaną P_2 możemy zgodnie z równaniem (4) zapisać następująco

$$P_1 = U_1 I_1 \cos \varphi_1, \quad P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_2, \quad (12)$$

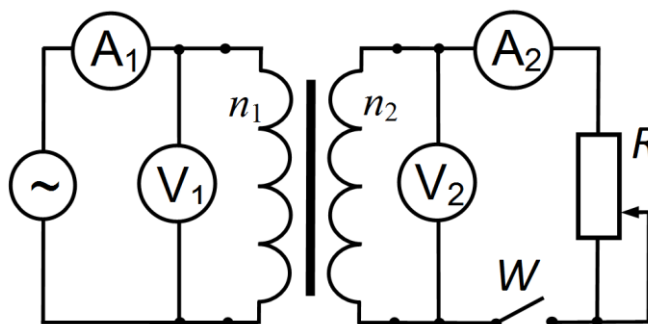
gdzie φ_1 i φ_2 są kątami przesunięcia fazowego pomiędzy napięciem i natężeniem prądu w obwodach pierwotnym i wtórnym. Zakładając z dużym przybliżeniem, że $\varphi_1 = \varphi_2$, możemy napisać przybliżony wzór na sprawność transformatora

$$\eta = \frac{U_2 I_2}{U_1 I_1} 100\%. \quad (13)$$

Chcąc uzyskać maksymalną sprawność transformatora, należy go odpowiednio zaprojektować, uwzględniając parametry elektryczne odbiornika. Dobrze zaprojektowane transformatory bardzo dużej mocy osiągają sprawność 97 - 99%, natomiast w przypadku prostych transformatorów małej mocy sprawność wynosi ok. 80%.

Układ pomiarowy

Do badań transformatora zaprojektowano układ pomiarowy składający się z regulowanego zasilacza prądu przemiennego, transformatora, rezystora suwakowego, włącznika, dwóch woltomierzy i dwóch amperomierzy (rys. 2). Uzwojenia transformatora mają odczepy umożliwiające wybór 200, 400 lub 600 zwojów. Napięcie źródła zasilającego można zmieniać w zakresie 1 - 12 V. Rezystor pełniący rolę odbiornika umożliwia zmiany rezystancji w zakresie 0 - 34 Ω .



Rys. 2 Schemat elektryczny układu pomiarowego

Uwaga! W obwodzie, ze względu na jego indukcyjny charakter, istnieje możliwość powstawania silnych impulsów prądowych w trakcie podłączania i wyłączenia uzwojeń transformatora. W związku z tym zmiana ilości uzwojeń transformatora oraz włączanie i wyłączenie zasilania obwodu powinno odbywać się przy minimalnym napięciu na źródle (1 V).

Przebieg ćwiczenia

A. Badania transformatora w stanie jałowym - wyznaczenie przekładni transformatora

1. Połącz układ zgodnie ze schematem na rys. 2, wybierając liczbę zwojów $n_1 = 400$ i $n_2 = 600$. Włącznik W przełącz na pozycję - rozłączony (0).
2. Ustaw pokrętkę regulacji napięcia zasilacza na 1 V i włącz go.
3. Włącz multimetry i dodatkowo wciśnij w nich przyciski koloru niebieskiego w celu wyboru pomiaru prądów i napięć przemiennych.
4. Zmieniaj napięcie zasilania co 1 V w zakresie 1 - 10 V, każdorazowo zapisując napięcia U_1 i U_2 .
5. Powtórz pomiary dla liczby zwojów wtórnych n_2 równej 400 i 200 ($n_1 = 400$).
6. Wykreśl na wspólnym układzie współrzędnych zależności napięcia wtórnego od napięcia pierwotnego $U_2 = f(U_1)$
7. Korzystając z uzyskanych wyników pomiarowych oraz równania (8), wyznacz badane przekładnie transformatora a następnie ich wartości średnie i niepewności pomiarowe.
8. Wyznacz wartości teoretyczne przekładni transformatora ze stosunków liczby zwojów na uzwojeniach pierwotnym i wtórnym (równanie (8)). Porównaj wyniki doświadczalne z teoretycznymi.

B. Badania transformatora w stanie zwarcia

1. Napięcie zasilania nastaw na 1 V, wyłącznik W ustaw na pozycję - załączony (1) a suwak rezystora w położeniu 0Ω .
2. Wykonaj pomiary natężeń prądów I_1 i I_2 analogicznie do badań wykonanych wcześniej ($n_1 = 400$ a $n_2 = 600, 400$ oraz 200). Każdorazowo po pomiarach napięcie na zasilaczu ustaw w pozycji 1 V.
3. Wykreśl na wspólnym układzie współrzędnych zależności natężenia prądu wtórnego od natężenia prądu pierwotnego $I_2 = f(I_1)$.

C. Badania transformatora w stanie obciążonym

1. Na transformatorze wybierz liczby zwojów $n_1 = 400$ i $n_2 = 200$.
2. Ustaw regulator zasilacza w pozycji 4 V, a wyłącznik W pozostaw w pozycji - załączony (1).
3. Wykonaj 12 - 15 pomiarów wartości U_1, I_1, U_2 oraz I_2 , zmieniając rezystancję odbiornika w zakresie $0 - 34 \Omega$. Rezystancję zmieniaj początkowo co ok. 1Ω , potem co 2Ω , na końcu co 4Ω .
4. Wyłącznik W przełącz na pozycję - rozłączony (0), a następnie zapisz wartości U_1, I_1, U_2 oraz I_2 (w tym przypadku $R = \infty$).
5. Regulator zasilacza ustaw w pozycji 1 V, a następnie wyłącz zasilacz.
6. Wykreśl zależność napięcia od natężenia prądu w obwodzie wtórnym $U_2 = f(I_2)$.
7. Korzystając z wyników pomiarowych oraz równania (13), wylicz sprawności transformatora dla poszczególnych pomiarów, następnie wykreśl zależność sprawności transformatora od natężenia prądu w uzwojeniu wtórnym $\eta = f(I_2)$.

Zapisz wnioski.

Badanie oddziaływania pola magnetycznego na przewodnik z prądem

Cele ćwiczenia

- Zapoznanie się ze zjawiskiem oddziaływania pola magnetycznego na przewodnik z prądem
- Wyznaczenie zależności siły elektrodynamicznej od natężenia prądu płynącego w ramce z drutu oraz od ilości uzwojeń ramki
- Wyznaczenie średniej wartości indukcji pola magnetycznego pomiędzy biegunami magnesu

Wprowadzenie

Oddziaływanie pola magnetycznego na przewodnik z prądem jest zjawiskiem powszechnie wykorzystywanym w technice. Przykładem takiego zastosowania są silniki elektryczne napędzające m.in. tramwaje, pralki, suszarki do włosów, wycieraczki samochodowe, zabawki. Zdolność do wykonania pracy przez silnik elektryczny wynika z pojawienia się siły (tzw. siły elektrodynamicznej) działającej na przewodnik z prądem znajdujący się w polu magnetycznym. Zanim jednak zaczniemy omawianie siły elektrodynamicznej, zajmijmy się siłą działającą na naładowaną cząsteczkę poruszającą się w polu magnetycznym.

Siła Lorentza

W licznych doświadczeniach z cząsteczkami obdarzonymi ładunkiem elektrycznym poruszającymi się w polu magnetycznym zaobserwowano występowanie siły powodującej zakrzywienie ich toru. Holenderski fizyk Hendrik Lorentz jako pierwszy zapisał następującą formułę opisującą tę siłę (tzw. siłę Lorentza)

$$\vec{F}_L = q(\vec{v} \times \vec{B}), \quad (1)$$

gdzie: q - ładunek cząsteczki, \vec{v} - wektor prędkości cząsteczki, \vec{B} - wektor indukcji pola magnetycznego.

Zapisując ten sam wzór w postaci skalarnej, otrzymamy wartość siły działającej na cząsteczkę

$$F_L = qvB \cdot \sin \alpha, \quad (2)$$

gdzie α oznacza kąt pomiędzy wektorami \vec{v} i \vec{B} .

Analizując wzory (1) i (2), łatwo zauważyć, że siła F_L jest równa zero, gdy naładowana cząsteczka nie porusza się lub porusza się wzdłuż kierunku linii pola magnetycznego, natomiast jest maksymalna, gdy cząsteczka porusza się prostopadle do kierunku linii pola magnetycznego. Kierunek siły Lorentza jest zawsze prostopadły do płaszczyzny utworzonej przez wektory \vec{v} i \vec{B} , a zwrot zależy od znaku ładunku (rys. 1a).

Siła elektrodynamiczna

Konsekwencją występowania siły Lorentza jest siła działająca w polu magnetycznym na przewodnik z prądem. Na rys. 1b przedstawiono fragment przewodnika, w którym przepływ prądu jest spowodowany ruchem elektronów swobodnych. W odcinku o długości l w danej chwili przepływa n elektronów o ładunku e i średniej prędkości unoszenia v_u . Na każdy elektron działa siła Lorentza (rys. 1 a, b) o wartości

$$F_L = e v_u B \cdot \sin \alpha. \quad (3)$$

Sumaryczna siła działająca na ładunki w odcinku przewodnika o długości l wynosi więc

$$F_{ED} = n e v_u B \cdot \sin \alpha. \quad (4)$$

Suma ładunków swobodnych znajdujących się w odcinku przewodnika wynosi $q = nev_u$, a czas przepływu elektronu przez odcinek o długości l wynosi $t = l/v_u$, zatem korzystając z zależności na natężenie prądu $I = q/t$, otrzymamy równanie

$$I = \frac{nev_u}{l}. \quad (5)$$

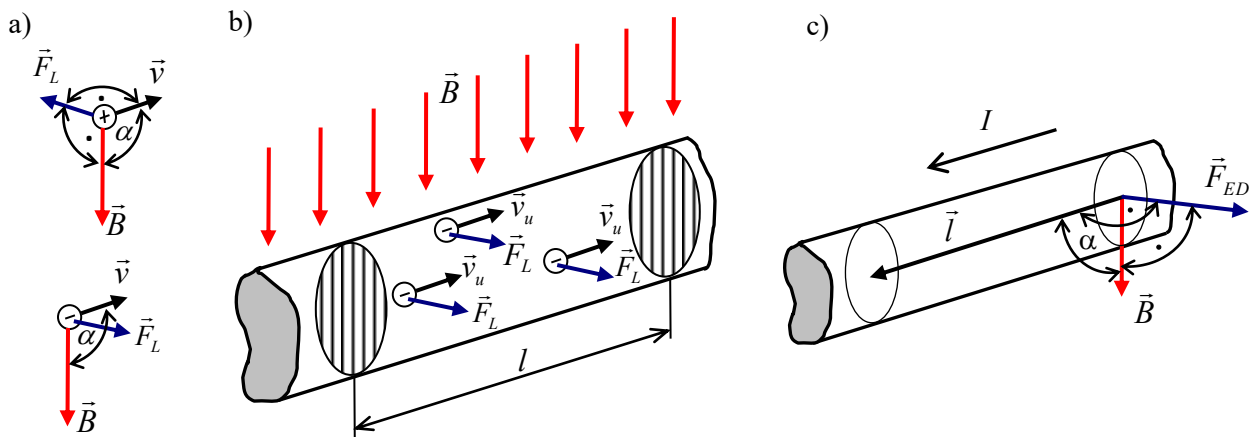
Na podstawie wzorów (4) i (5) można zapisać zależność

$$F_{ED} = IlB \cdot \sin \alpha \quad (6)$$

lub w postaci wektorowej

$$\vec{F}_{ED} = I(\vec{l} \times \vec{B}). \quad (7)$$

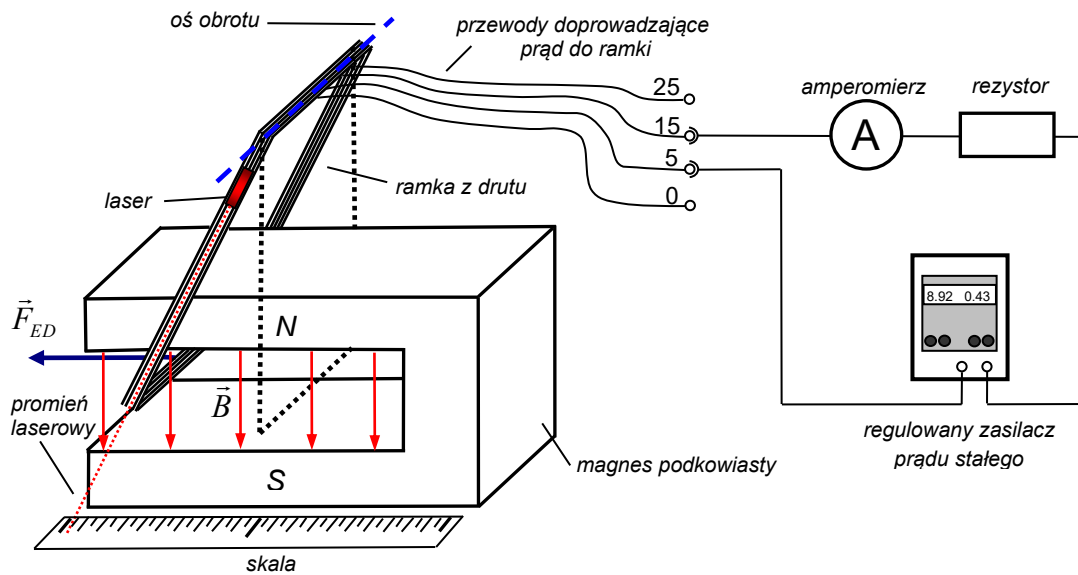
Wzór (6) opisuje wartość siły elektrodynamicznej. Wektor \vec{l} ma kierunek i zwrot zgodny z kierunkiem przepływu prądu w przewodniku (przepływ ten jest przeciwny do kierunku ruchu elektronów). Kąt α we wzorze (6) jest to kąt pomiędzy wektorem odcinka przewodnika \vec{l} a wektorem indukcji pola magnetycznego \vec{B} (rys. 1c).



Rys. 1. a) wzajemna orientacja wektorów: \vec{v} - prędkości cząsteczki naładowanej, \vec{B} - indukcji magnetycznej i \vec{F}_L - siły Lorentza, b) kierunek siły działającej na poszczególne elektrony w wycinku przewodnika z prądem umieszczonego w polu magnetycznym, c) kierunek i zwrot siły elektrodynamicznej \vec{F}_{ED} działającej na odcinek przewodnika z prądem o natężeniu I (strzałka pod I oznacza kierunek i zwrot przepływu prądu)

Opis stanowiska pomiarowego

Na stanowisku pomiarowym (rys. 2) znajduje się magnes podkowiasty wytwarzający bardzo silne pole magnetyczne (Uwaga! Nie zbliżaj metalowych przedmiotów i elektroniki!). Nad nim na obrotowej osi została zawieszona prostokątna ramka z drutu tak, aby jej dolny bok znajdował się pomiędzy biegunami magnesu.

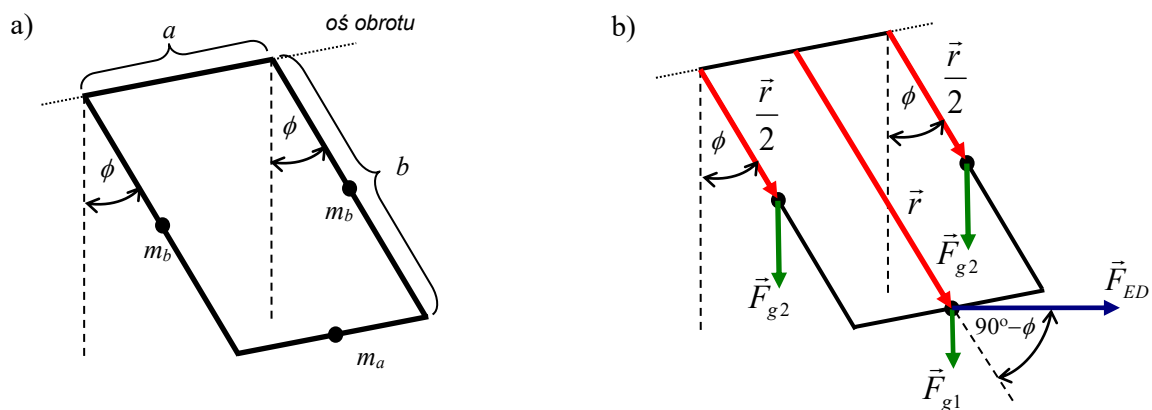


Rys. 2. Schemat ćwiczenia. W powyższym przykładzie prąd płynie przez 10 uzwojeń ramki ($15 - 5 = 10$)

Ramka, która powstała z nawinięcia 25 uzwojeń drutu miedzianego, posiada odczepy po 5, 15 i 25 uzwojeniach. Umożliwia to podłączenie źródła prądu do 5, 10, 15, 20 lub 25 uzwojeń ramki w zależności od sposobu podłączenia przewodów. Źródłem prądu w obwodzie jest regulowany zasilacz prądu stałego. W obwodzie elektrycznym włączone są również: amperomierz umożliwiający precyzyjny pomiar natężenia prądu oraz rezystor chroniący ramkę przed przegrzaniem. Do ramki zamocowano miniaturowy laser, którego promień służy jako wskaźnik umożliwiający odczyt na skali znajdującej się pod ramką.

Metoda wyznaczania siły elektrodynamicznej

Chcąc wyznaczyć siłę elektrodynamiczną działającą na dolny bok ramki, musimy rozważyć momenty sił występujące po wychyleniu ramki z położenia równowagi. Momenty te będą związane z siłami: grawitacji oraz elektrodynamiczną. Na rysunku 3a przedstawiono schematycznie prostokątną ramkę o bokach a i b wychyloną z położenia równowagi o kąt ϕ . Na trzech bokach zaznaczono ich środki mas m_a i m_b . Rysunek 3b przedstawia siły ciężkości działające na środki mas poszczególnych boków oraz siłę elektrodynamiczną. Poza tym zaznaczono wektory ramion r związane z poszczególnymi siłami.



Rys. 3 Ramka z drutu a) schemat ramki z zaznaczonymi środkami mas poszczególnych boków, b) wektory ramienia siły oraz siły.

Aby ramka pozostawała w równowadze, momenty sił działające na nią powinny się równoważyć

$$\vec{r} \times \vec{F}_{g1} + \frac{\vec{r}}{2} \times \vec{F}_{g2} + \frac{\vec{r}}{2} \times \vec{F}_{g2} + \vec{r} \times \vec{F}_{ED} = 0. \quad (8)$$

Wartości sił grawitacji możemy wyliczyć mnożąc masę poszczególnych boków ramki $m_{a,b}$ przez przyspieszenie ziemskie g ($F_g = mg$), natomiast wartość wektora ramienia r jest równa długości boku b . Korzystając z powyższych równań oraz zależności trygonometrycznych możemy zapisać skalarnie

$$(b \sin \phi) m_a g + 2 \left(\frac{b}{2} \sin \phi \right) m_b g - (b \sin(90^\circ - \phi)) F_{ED} = 0. \quad (9)$$

Po przekształceniach uzyskamy następujący wzór na siłę elektrodynamiczną

$$F_{ED} = (m_a + m_b) g \cdot \operatorname{tg} \phi. \quad (10)$$

Ponieważ masa całej ramki m jest równa sumie mas jej poszczególnych boków $m = 2m_a + 2m_b$, możemy ostatecznie napisać

$$F_{ED} = \frac{1}{2} mg \cdot \operatorname{tg} \phi. \quad (11)$$

Znajomość masy ramki, przyspieszenia ziemskiego oraz tangensa kąta odchylenia ramki umożliwia więc wyznaczenie siły elektrodynamicznej. W opisywanym ćwiczeniu do wyznaczenia $\operatorname{tg} \phi$ posłużą nam promień światła emitowany przez laser oraz skala z podziałką milimetrową (rys. 2 i 4).

Na rys. 4 widać, że $\operatorname{tg} \phi$ będzie równy stosunkowi długości odcinka x odczytanej ze skali do odległości osi obrotu od środka skali d . Tym samym wartość siły elektrodynamicznej będzie równa

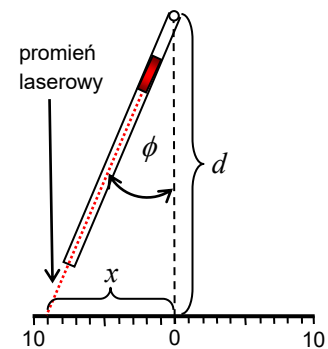
$$F_{ED} = \frac{1}{2} mg \frac{x}{d}. \quad (12)$$

Łatwo zauważyć, że wielkości m , g i d są stałe a więc wprowadzając współczynnik $c = mg/2d$, ostatecznie możemy napisać, że

$$F_{ED} = cx. \quad (13)$$

Jak widać siła elektrodynamiczna jest wprost proporcjonalna do wskazań na skali x . Wyznaczony doświadczalnie współczynnik proporcjonalności $c = (2,65 \pm 0,05) N/m$.

W powyższych rozważaniach założono, że moment siły grawitacji działający na miniaturowy laser jest zanedbywalnie mały.



Rys. 4. Schemat pomocny do wyznaczenia $\operatorname{tg} \phi$

Wyznaczenie wartości indukcji pola magnetycznego pomiędzy biegunami magnesu

W opisanym doświadczeniu widać, że kierunek przepływu prądu w dolnym boku ramki jest prostopadły do kierunku linii pola magnetycznego ($\alpha = 90^\circ$). Wzór (6) można więc zapisać w postaci

$$F_{ED} = IlB, \quad (14)$$

gdzie l jest całkowitą długością przewodnika z prądem oddziałującego z polem magnetycznym. Długość tę można wyznaczyć, mnożąc liczbę uzwojeń i długość dolnego boku ramki, $l = na$, gdzie $a = (13,0 \pm 0,2) \text{ cm}$.

Chcąc wyznaczyć średnią wartość indukcji pola magnetycznego oddziałującego z dolnym bokiem ramki, możemy posłużyć się więc równaniem

$$F_{ED} = BnaI. \quad (15)$$

Dokonując podstawień $y = F_{ED}$, $x = I$ oraz $a_R = Bna$ w powyższym równaniu, uzyskuje się zależność liniową typu $y = a_Rx + b$. Jest to zależność liniowa, gdzie wartość a_R jest współczynnikiem kierunkowym prostej. Wykreślając zależność siły elektrodynamicznej w funkcji natężenia prądu płynącego przez ramkę: $F_{ED} = f(I)$, powinno się otrzymać linię prostą. Stosując metodę regresji liniowej do tak otrzymanego wykresu, można wyznaczyć współczynnik nachylenia prostej a_R , a następnie, korzystając ze znanych wartości n i a , wyznaczyć wartość indukcji pola magnetycznego B . Wyliczona wartość indukcji pola magnetycznego jest w rzeczywistości pewną średnią wartością, gdyż pole magnetyczne, w którym porusza się dolny bok ramki nie jest w pełni jednorodne na całej długości boku.

Przebieg ćwiczenia

A. Wyznaczenie zależności siły elektrodynamicznej od natężenia prądu płynącego przez uzwojenia ramki $F_{ED} = f(I)$

- Połącz układ według schematu przedstawionego na rys. 2, wybierając 5 uzwojeń ramki (przewody dołączone do wejść 0 i 5). Upewnij się, czy pokrętko multimetru jest ustawione w pozycji amperomierza, a następnie włącz zasilacz oraz laser.
- Regulując zasilacz, zwiększaj natężenie prądu przepływającego przez uzwojenia ramki tak, aby położenie plamki lasera zmieniało się co 1 cm. Każdorazowo zapisuj położenie plamki na skali (1 - 10 cm) oraz odpowiednie wartości natężenia prądu. Ustaw napięcie zasilacza na zero, zamień przewody miejscami i powtórz pomiary dla przeciwnego kierunku przepływu prądu.
- Podłączając przewody w różnych kombinacjach, powtórz pomiary z pkt.2 dla liczby uzwojeń 10, 15, 20 i 25.
- Korzystając z równania (13), oblicz wartości siły elektrodynamicznej F_{ED} odpowiadające poszczególnym wychyleniom ramki.
- Na wspólnym wykresie wykreśl zależność siły elektrodynamicznej od natężenia prądu przepływającego przez uzwojenia ramki $F_{ED} = f(I)$.
- Zapisz wnioski.

Uwaga! Po każdej zakończonej serii pomiarowej ustaw napięcie zasilacza na zero!

B. Wyznaczenie zależności siły elektrodynamicznej od liczby uzwojeń $F_{ED} = f(n)$

- Korzystając z uzyskanych wykresów $F_{ED} = f(I)$, odczytaj przybliżone wartości F_{ED} dla jednej stałej wartości prądu z zakresu 0,15 - 0,25 A (np. 0,2 A).
- Dla $I = \text{const.}$ wykreśl zależność siły elektrodynamicznej od liczby uzwojeń ramki $F_{ED} = f(n)$.
- Zapisz wnioski.

C. Wyznaczenie wartości indukcji pola magnetycznego B pomiędzy biegunami magnesu

- Wybierz wykres $F_{ED} = f(I)$ najbardziej zbliżony do linii prostej, a następnie, posługując się metodą regresji liniowej, wyznacz jego współczynnik nachylenia prostej a_R oraz błąd.
- Korzystając z danych oraz wzoru (15), wyznacz wartość indukcji pola magnetycznego ($B = a_R/na$).
- Wykonaj rachunek jednostek oraz wylicz błąd pomiarowy obliczonej indukcji pola magnetycznego (metodą różniczki logarytmicznej lub zupełnej).

Wyznaczenie pojemności kondensatorów z pomiarów drgań relaksacyjnych

Cele ćwiczenia

- Zapoznanie się z budową i zastosowaniami kondensatora oraz procesem relaksacyjnym w układzie RC .
- Wyznaczenie pojemności elektrycznej badanych kondensatorów.

Wprowadzenie

Kondensatory są powszechnie wykorzystywane w urządzeniach elektrycznych takich jak zasilacze, radiodbiorniki, lampy błyskowe, defibrylatory, komputery itp. Służą one m.in. do magazynowania energii elektrycznej, filtrowania zmiennych przebiegów elektrycznych, dostrajania aparatury radiowej i telewizyjnej, tworzenia pamięci komputerowych. Wyróżniamy bardzo wiele typów kondensatorów w zależności od ich budowy i zastosowania. Najprostszym modelem kondensatora jest tzw. kondensator płaski, wykonany z dwóch równoległych płaskich płytek (okładek) z przewodnika oddzielonych warstwą izolującą (nie przewodzącą prądu elektrycznego). Izolatorem może być próżnia lub materiał dielektryczny. Po podłączeniu do kondensatora źródła napięcia na jego okładkach odkładają się ładunki elektryczne przeciwnych znaków, a między nimi pojawia się pole elektryczne. Istotną wielkością charakteryzującą kondensator jest jego pojemność elektryczna. Pojemność elektryczną C próżniowego kondensatora płaskiego o powierzchni okładek S i odległości pomiędzy nimi d można obliczyć z następującego równania:

$$C = \varepsilon_0 \frac{S}{d}, \quad (1)$$

gdzie $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ F/m jest przenikalnością elektryczną próżni. Jednostką pojemności elektrycznej jest farad $1F = 1C/1V$. W przypadku, gdy przestrzeń między okładkami kondensatora wypełnimy dielektrykiem (np.: ebonit, bakelit, porcelana, olej transformatorowy) pole elektryczne między okładkami kondensatora ulega zmianie wskutek zjawiska polaryzacji elektrycznej. Pojemność takiego kondensatora rośnie i można ją zapisać następującym wzorem:

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{S}{d}, \quad (2)$$

gdzie ε_r jest względną przenikalnością elektryczną dielektryka.

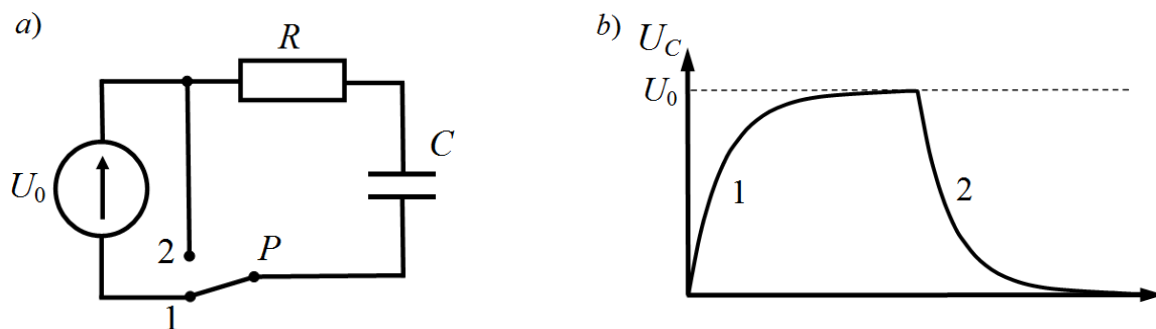
Rozpatrzmy proces ładowania i rozładowania kondensatora na przykładzie układu przedstawionego na rys. 1a. Do stabilizowanego źródła o napięciu U_0 podłączono rezystor o rezystancji R i kondensator o pojemności C . Układ jest wyposażony dodatkowo w przełącznik P . W przypadku, gdy przełącznik jest ustawiony w pozycji 1, kondensator jest połączony ze źródłem i na okładkach kondensatora zaczyna gromadzić się ładunek elektryczny (kondensator ładuje się). Zależność napięcia na kondensatorze w funkcji czasu t dla procesu **ładowania** kondensatora ma postać (krzywa 1 na rys. 1b):

$$U_C(t) = U_0 \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{RC}\right) \right]. \quad (3)$$

Jeżeli po naładowaniu kondensatora przełącznik P ustawimy w pozycji 2, nastąpi proces jego rozładowania poprzez rezystor. Napięcie na kondensatorze w procesie **rozładowania** będzie się zmniejszało w czasie zgodnie z następującą zależnością (krzywa 2 na rys. 1b):

$$U_C(t) = U_0 \exp\left(-\frac{t}{RC}\right). \quad (4)$$

Analizując wzory (3) i (4), można przyjąć z niewielkim przybliżeniem, że po czasie $t > 5RC$ napięcie na kondensatorze osiągnie napięcie zasilania U_0 (krzywa 1 na rys. 1b) lub kondensator całkowicie rozładuje się (krzywa 2 na rys. 1b). Wynika z tego, że jeżeli rezystancja układu R jest niewielka, można kondensator szybko naładować lub rozładować. Efekt ten wykorzystuje się w przypadku, gdy chcemy energię elektryczną szybko zgromadzić lub odzyskać (np. w defibrylatorze, lampie błyskowej), wówczas kondensator ma przewagę nad akumulatorem, w którym te procesy przebiegają znacznie wolniej.



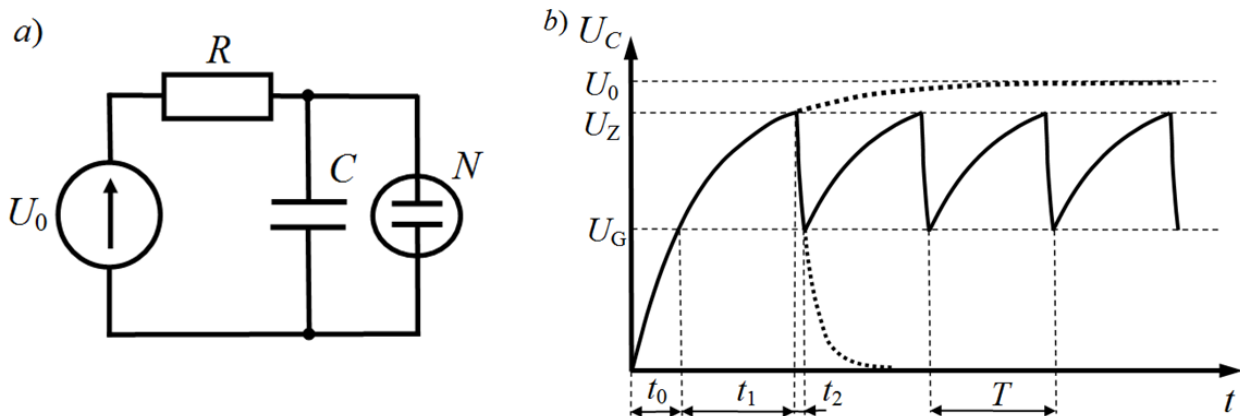
Rys. 1 a) schemat obwodu RC , b) zależność napięcia na kondensatorze w funkcji czasu dla procesów ładowania (1) i rozładowania (2) kondensatora.

Powstawanie drgań relaksacyjnych w układzie RC

Relaksacją - ogólnie - nazywany jest powrót układu do stanu równowagi połączony z rozproszeniem jego energii. Jeżeli do układu dostarczana jest energia z zewnętrznego źródła, jest on wzbudzany, a następnie może wrócić do stanu równowagi. Taki proces może powtarzać się cyklicznie. Mamy wtedy do czynienia z drganiami relaksacyjnymi. W zależności od charakteru układu możemy mówić o drganiach np. cieplnych, mechanicznych, elektrycznych.

W ćwiczeniu posłużymy się zjawiskiem powstawania relaksacyjnych drgań elektrycznych w układzie RC do wyznaczenia pojemności badanych kondensatorów. Aby zrozumieć mechanizm powstawania tych drgań, poznamy budowę i zasadę działania neonówki, a następnie przeanalizujemy powstawanie drgań relaksacyjnych w układzie złożonym z zasilacza, rezystora, kondensatora oraz neonówki.

Neonówka jest to niewielka szklana bańka wypełniona rozrzedzonym gazem szlachetnym (neonem), w której wtopione są dwie metaliczne elektrody. Po podłączeniu do elektrod napięcia o wartości mniejszej od napięcia progowego (napięcia zapłonu) nie obserwujemy żadnego efektu. Wprawdzie w neonówce znajduje się zwykle niewielka ilość jonów, ale przepływ prądu jest znikomy. Możemy powiedzieć, że rezystancja neonówki R_N jest bardzo duża ($R_N \rightarrow \infty$). Sytuacja ulega zmianie, gdy do elektrod neonówki podłączymy napięcie równe napięciu zapłonu U_Z lub większe od niego. Następuje wtedy lawinowa jonizacja gazu połączona z jego świeceniem. Jony gazu dobrze przewodzą prąd, a tym samym rezystancja neonówki staje się bardzo mała ($R_N \rightarrow 0$). Należy jednak zauważyć, że zmniejszenie napięcia przyłożonego do świecącej neonówki do wartości niższej od U_Z nie powoduje jej natychmiastowego zgaszenia. Dopiero po zmniejszeniu napięcia do tzw. napięcia gaśnięcia U_G jonizacja lawinowa ustaje, neonówka gaśnie, a jej rezystancja rośnie skokowo do bardzo dużej wartości. Można więc powiedzieć, że neonówka stanowi rodzaj przełącznika, który zamyka obwód powyżej napięcia U_Z i otwiera go (wyłącza) po spadku napięcia poniżej wartości U_G .



Rys. 2 a) schemat obwodu RC z neonówką, b) zależność napięcia na kondensatorze w funkcji czasu w trakcie drgań relaksacyjnych.

Rozpatrzmy układ przedstawiony na rys. 2a złożony z zasilacza o stabilizowanym napięciu U_0 ($U_0 > U_Z$), rezystora o rezystancji R , kondensatora o pojemności C i neonówki N . Po włączeniu zasilacza kondensator ładuje się, a przez rezystor R płynie prąd. Po osiągnięciu na kondensatorze napięcia zapłonu U_Z neonówka zapala się i zaczyna bardzo dobrze przewodzić prąd, a kondensator gwałtownie rozładowuje się aż do osiągnięcia napięcia gaśnięcia. Po zgaśnięciu neonówka przestaje przewodzić prąd i kondensator ładuje się do napięcia U_Z , przy którym neonówka ponownie się zapala i rozpoczyna się proces rozładowania. Omówiony proces powtarza się cyklicznie i w ten sposób obserwujemy drgania relaksacyjne. Na rysunku 2b pokazano zmiany napięcia na kondensatorze w funkcji czasu w procesie drgań relaksacyjnych. Okresowe zmiany napięcia można zaobserwować jako powtarzające się regularnie błyski neonówki.

Chcąc wyznaczyć okres T tych błysków, posłużymy się rysunkiem 2b oraz równaniami (3) i (4).

Jak widać na rysunku 2b, okres drgań relaksacyjnych T równa się sumie czasów t_1 i t_2 ($T = t_1 + t_2$). Napięcia na kondensatorze w chwilach czasu t_0 i $t_0 + t_1$ wynoszą odpowiednio $U_C(t_0) = U_G$ oraz $U_C(t_0 + t_1) = U_Z$. Podstawiając te dane do równania (3), otrzymamy następujące zależności:

$$U_G = U_0 \left[1 - \exp\left(-\frac{t_0}{RC}\right) \right]; \quad U_Z = U_0 \left[1 - \exp\left(-\frac{t_0 + t_1}{RC}\right) \right]. \quad (5)$$

Powyższe równania można zapisać w przekształconej formie:

$$U_0 - U_G = U_0 \exp\left(-\frac{t_0}{RC}\right); \quad U_0 - U_Z = U_0 \exp\left(-\frac{t_0}{RC}\right) \cdot \exp\left(-\frac{t_1}{RC}\right) \quad (6)$$

Dzieląc równania (6) stronami i obustronnie je logarytmując, uzyskamy zależność na czas t_1 :

$$t_1 = RC \ln\left(\frac{U_0 - U_G}{U_0 - U_Z}\right). \quad (7)$$

Czas rozładowywania się kondensatora t_2 można wyliczyć, posługując się równaniem (4). Zakładając, że w chwili rozpoczęcia rozładowania napięcie na kondensatorze wynosi U_Z , a po czasie t_2 wynosi U_G , równanie (4) można zapisać następująco:

$$U_G = U_Z \exp\left(-\frac{t_2}{R_N C}\right), \quad (8)$$

gdzie R_N jest rezystancją neonówki w czasie zapłonu. Przekształcając równanie (8), uzyskamy zależność na czas rozładowania:

$$t_2 = R_N C \ln\left(\frac{U_Z}{U_G}\right). \quad (9)$$

Rezystancja neonówki R_N w trakcie zapłonu jest dużo mniejsza od rezystancji rezystora R , a tym samym czas ładowania kondensatora do napięcia U_Z jest znacznie większy od czasu jego rozładowania do napięcia U_G ($t_1 \gg t_2$). Możemy więc zapisać, że okres drgań relaksacyjnych T jest w przybliżeniu równy czasowi t_1 ($T \approx t_1$). Korzystając z tych założeń i równania (7), otrzymamy zależność na okres drgań relaksacyjnych:

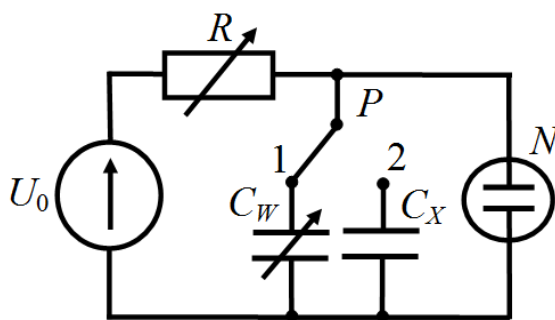
$$T = RC \ln\left(\frac{U_0 - U_G}{U_0 - U_Z}\right). \quad (10)$$

Wyrażenie $\ln[(U_0 - U_G)/(U_0 - U_Z)]$ jest wielkością stałą dla danego typu neonówki i wartości napięcia zasilania, a więc można je zapisać w postaci pewnej stałej k (stała neonówki). Równanie (10) przyjmie wtedy następującą postać:

$$T = RCk. \quad (11)$$

Układ pomiarowy

Do wyznaczenia pojemności badanych kondensatorów posłuży układ pomiarowy przedstawiony na rysunku 3. Składa się on z zasilacza o stabilizowanym napięciu U_0 , rezystora o zmiennej rezystancji R , kondensatora wzorcowego o zmiennej pojemności C_W , szeregu badanych kondensatorów o pojemnościach C_X , neonówki N oraz przełącznika P .



Rys. 3 Schemat układu pomiarowego.

Pomiary i obliczenia

Ćwiczenie składa się z dwóch etapów. Celem pierwszego z nich jest wyznaczenie stałej neonówki k . Na początku należy przy pomocy przełącznika P włączyć do obwodu kondensator wzorcowy o zmiennej pojemności C_W , nastawić rezystancję rezystora na dowolną wartość z zakresu $1 \div 5 \text{ M}\Omega$, a na zasilaczu wybrać napięcie około 80 V (napięcia tego nie należy zmieniać podczas wykonywania ćwiczenia). Następnie przy pomocy stopera należy zmierzyć czas $10 \div 20$ błysków neonówki. Dzielicz czas błysków przez ich ilość n , można wyznaczyć okres drgań relaksacyjnych T . Znajomość wielkości R , C_W oraz T po podstawieniu do przekształconego wzoru (11) umożliwi wyznaczenie stałej neonówki k :

$$k = \frac{T}{RC_W} \quad (12)$$

Powtarzając te pomiary kilkunastokrotnie dla różnych wartości R i C_W , wielokrotnie wyznaczmy stałą neonówki k a następnie jej wartość średnią i niepewność pomiarową.

W drugim etapie pomiarów przy pomocy przełącznika P należy włączyć do obwodu jeden z kondensatorów badanych o pojemności C_X , a następnie wykonać szereg pomiarów czasów $5 \div 15$ błysków neonówki, każdorazowo zmieniając rezystancję rezystora R w granicach $1 \div 5 M\Omega$. Dzieląc czas błysków przez ich ilość n , wyliczymy okres drgań relaksacyjnych T . Posługując się równaniem (11) oraz wielkościami R , k oraz T , można wyznaczyć pojemność kondensatora C_X . Wyniki pomiarowe uzyskane dla różnych wartości rezystora R należy uśrednić i obliczyć ich niepewność pomiarową. Powyższe pomiary i obliczenia przeprowadzamy dla pozostałych kondensatorów badanych.

W układzie pomiarowym istnieje możliwość podłączenia oscyloskopu komputerowego równoległe do neonówki. W tym przypadku nie posługujemy się stoperem, a okres T wyznaczamy z pomiarów na wykresie drgań relaksacyjnych $U_C = f(t)$ prezentowanym na monitorze komputera. Instrukcja obsługi oscyloskopu znajduje się na stanowisku laboratoryjnym.

Przebieg ćwiczenia

A. Wyznaczenie stałej neonówki

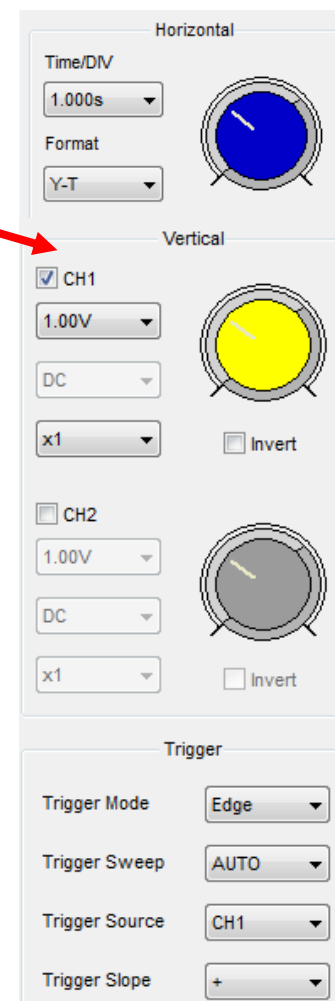
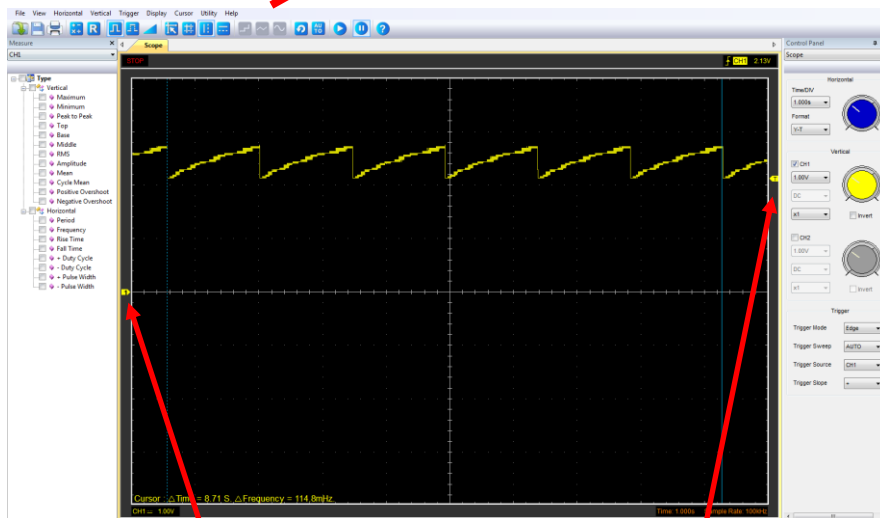
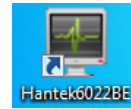
1. Włączyć zasilacz, ustawić napięcie około $80 V$ (nie należy zmieniać napięcia do końca zajęć) i odczekać około 5 minut.
2. Przy pomocy przełącznika P włączyć kondensator wzorcowy do obwodu, a następnie ustawić wartości rezystancji R i pojemności C_W tak, aby częstotliwość błysków umożliwiła ich zliczanie.
3. Wyznaczyć czas $10 \div 20$ błysków neonówki t . Pomiar ten należy powtórzyć dla kilkunastu innych kombinacji rezystancji R i pojemności kondensatora wzorcowego C_W .
4. Wyznaczyć okresy drgań relaksacyjnych T , dzieląc zmierzony czas błysków t przez ich ilość n ($T = t/n$).
5. Korzystając z zależności (12), wyznaczyć stałą neonówki k dla poszczególnych pomiarów a następnie ich średnia arytmetyczną i niepewność pomiarową.

B. Wyznaczenie pojemności badanych kondensatorów

1. Włączyć do obwodu pierwszy z kondensatorów badanych, a następnie wyznaczyć czasy $5 \div 15$ błysków neonówki, każdorazowo zmieniając rezystancję rezystora R w granicach $1 \div 5 M\Omega$.
2. Wyznaczyć okresy drgań relaksacyjnych T , dzieląc zmierzony czas błysków t przez ich ilość n ($T = t/n$).
3. Korzystając z przekształconej zależności (11), wyznaczyć pojemności kondensatora C_X dla poszczególnych pomiarów a następnie ich średnią arytmetyczną i niepewność pomiarową.
4. Pomiary i obliczenia powtórzyć dla pozostałych badanych kondensatorów, zestawić wyniki końcowe i zapisać wnioski dotyczące ćwiczenia.

Instrukcja pomiaru okresu drgań relaksacyjnych przy pomocy oscyloskopu komputerowego Hantek 6622

1. Włącz komputer, wybierz użytkownika "Student" i wpisz hasło "student".
2. Uruchom program oscyloskopu klikając dwukrotnie na ikonę Hantek6622.
3. Na ekranie pojawi się panel wirtualnego oscyloskopu.




Znacznik kanału 1 powinien być ustawiony na zerze wykresu. Jeśli nie jest, przycisnąć lewy klawisz myszki na znaczniku i ustawić go odpowiednio.

Znacznik poziomu Trigera powinien być ustawiony podobnie jak na rysunku. Jeżeli wykres nie jest obserwowany przycisnąć lewy klawisz myszki na znaczniku i ustawić go odpowiednio.

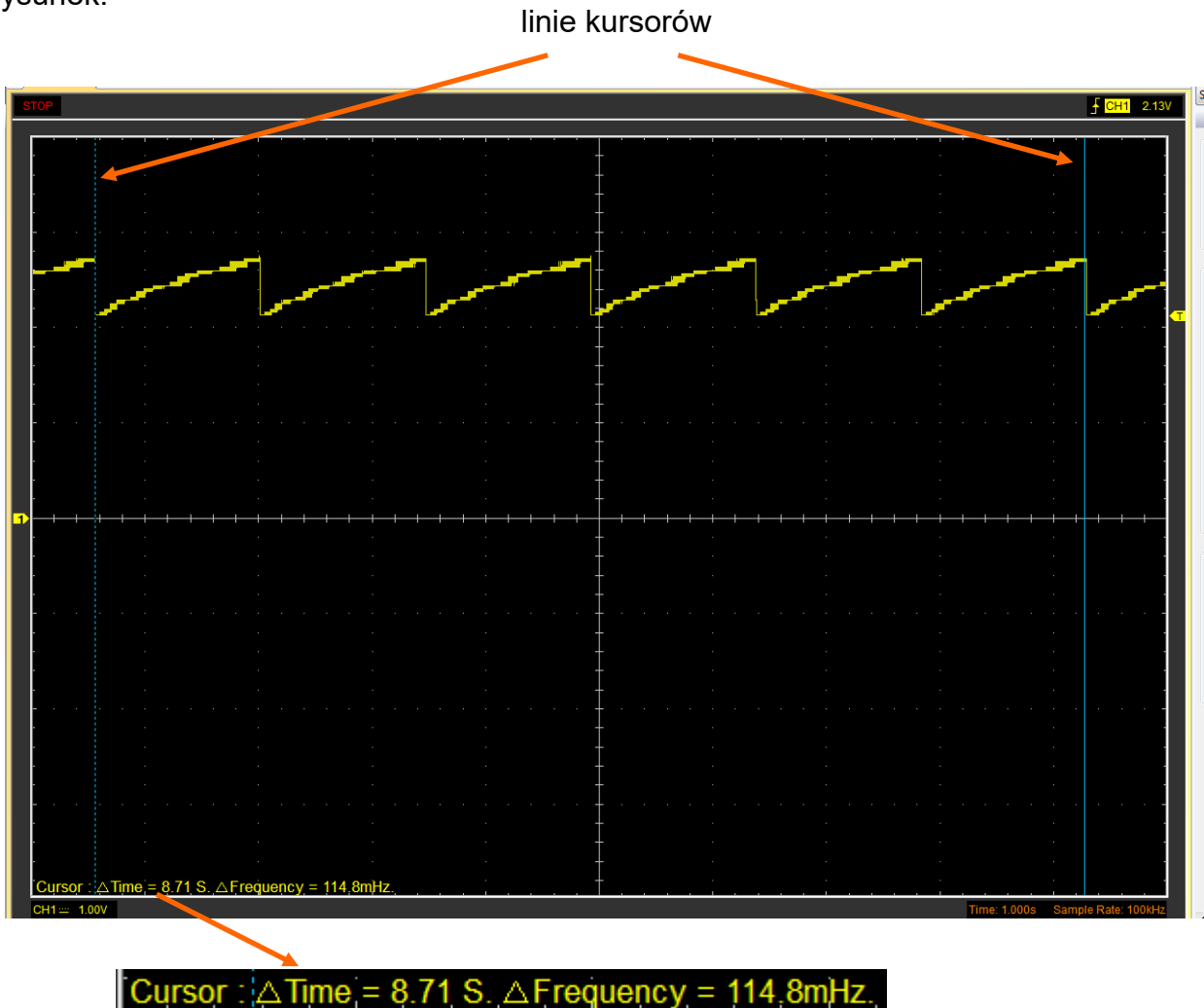
4. Ustawienia na panelu oscyloskopu (prawa strona rysunku) powinny być takie jak na powyższym rysunku z wyjątkiem Time/DIV. W tym przypadku dobieramy podstawę czasu (czas na działkę) tak, aby wykres był dobrze obserwowalny.

5. Jeżeli cykliczne wzrosty i spadki napięć na kondensatorze są dobrze obserwowalne zatrzymujemy rejestrację wciskając przycisk "pauza" w pasku narzędzi oscyloskopu.




6. Na pasku narzędzi klikamy na ikonkę kursorów pionowych. 

7. Ustawiamy kursor myszki na krawędź opadającą wykresu a następnie wciskamy lewy przycisk myszki (w tym miejscu pojawi się pionowa ciągła linia kursora). Klikamy ponownie w tym miejscu lewym kursorem myszki przeciągając drugi kursor (linia przerywana) w interesujący nas fragment wykresu (inna krawędź opadającą wykresu). Patrz na poniższy rysunek.



8. Na dole ekranu możemy odczytać różnicę czasu pomiędzy kursorami ΔTime równą czasowi szeregu przebiegów (błysków) t . Okres jednego błysku T obliczamy dzieląc czas t (odczytaną różnicę ΔTime) przez liczbę cyklicznych przebiegów (błysków neonówki) n

$$T = t / n$$

9. W celu dalszych pomiarów należy wcisnąć przycisk start  i kontynuować pomiary.

10. Zmianę położenia kursora uzyskujemy poprzez wciśnięcie przez dłuższą chwilę lewego klawisza myszki w interesującym nas punkcie wykresu.

Badanie optycznych widm emisyjnych

Cele ćwiczenia

- Zidentyfikowanie pierwiastków na podstawie ich widm
- Zbadanie widm wybranych źródeł światła białego

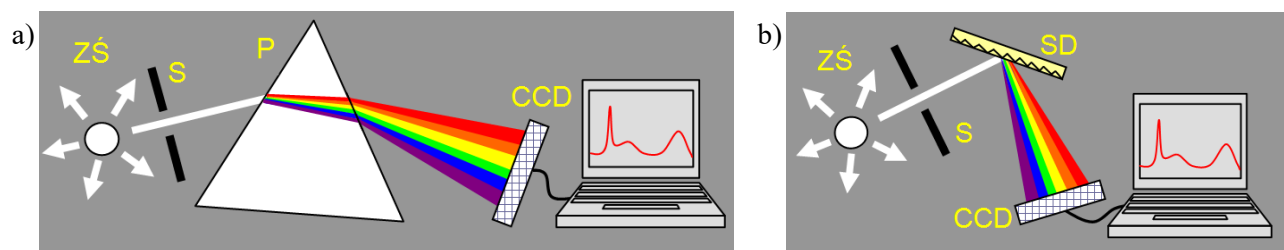
Wprowadzenie

Widmo jest bardzo szerokim pojęciem w nauce i technice. W ogólnym znaczeniu jest to zależność natężenia sygnału od jego częstotliwości. Widmo może dotyczyć fal elektromagnetycznych (mikrofalowych, świetlnych, rentgenowskich itd.), fal akustycznych (infradźwiękowych, dźwiękowych, ultradźwiękowych) oraz innych sygnałów. Dział nauki zajmujący się badaniem widm to *spektroskopia* (*spectrum* - widmo w j. łac.). Dostarcza on bardzo wielu informacji na temat różnych zjawisk i właściwości materii. Ze względu na to, że spektroskopia jest bardzo szerokim działem nauki, w niniejszym ćwiczeniu skoncentrujemy się jedynie na niewielkim wycinku badań widm optycznych. *Widmem optycznym* nazywamy zależność natężenia światła od częstotliwości lub długości fali.

Sposoby otrzymywania widm optycznych

Światłem powszechnie nazywamy fale elektromagnetyczne widzialne przez człowieka (długości fal z zakresu $380 \div 780$ nm). W technice światło jest pojęciem szerszym: są to fale elektromagnetyczne, które spełniają zasady optyki geometrycznej. Do światła oprócz zakresu widzialnego (światła widzialnego) zalicza się również bliską podczerwień i bliski ultrafiolet.

Do obserwacji i rejestracji widm w zakresie widzialnym używa się *spektrometrów* wyposażonych w elementy rozszczepiające światło (pryzmaty lub siatki dyfrakcyjne). We współczesnych spektrometrach rozszczepione światło pada na matrycę światłoczułą CCD, a następnie widmo jest rejestrowane w komputerze. Na rys.1 przedstawiono schematycznie spektrometry wyposażone w pryzmat oraz odbiciową siatkę dyfrakcyjną. W rzeczywistości budowa spektrometru jest znacznie bardziej złożona, a zaawansowane technicznie urządzenia posiadają dwa lub trzy elementy rozszczepiające światło.



Rys. 1 Schematyczna budowa spektrometru optycznego a) wyposażonego w pryzmat, b) wyposażonego w odbiciową siatkę dyfrakcyjną. Oznaczenia: ZŚ - źródło światła, S - szczelina, P - pryzmat, CCD - matryca światłoczuła, SD - odbiciowa siatka dyfrakcyjna

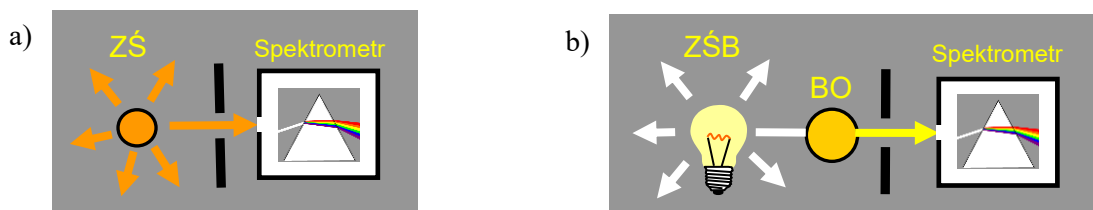
Rodzaje widm optycznych

Istnieje wiele kryteriów klasyfikacji widm. Poniżej podano dwa podstawowe sposoby ich podziału.

1. Ze względu na mechanizm powstawania widma możemy podzielić na:

- a) *emisyjne* (promieniowania) - otrzymywane w wyniku promieniowania światła przez ośrodek (rys. 2a)

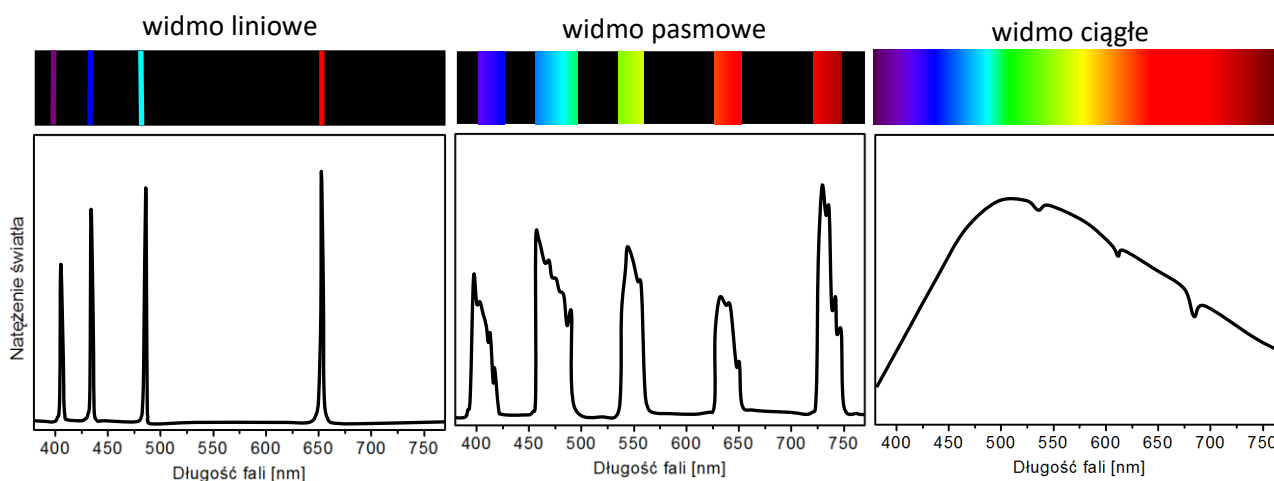
b) *absorpcyjne* (pochłaniania) - otrzymywane po przejściu światła białego przez badany ośrodek (rys. 2b)



Rys. 2 Sposoby otrzymywania widm a) emisyjnego, b) absorpcyjnego. Oznaczenia: ZŚ - źródło światła, ZŚB - źródło światła białego, BO - badany ośrodek

2. Ze względu na charakter (obraz) widma rozróżniamy widma (rys. 3):

- a) *liniowe* - składają się z szeregu wąskich linii odpowiadających konkretnym długościom fal; źródłem tych widm są gazy jednoatomowe lub pary metali
- b) *pasmowe* - składają się z dużej ilości linii położonych blisko siebie, tworzących w rezultacie dosyć szerokie pasma; źródłem tych widm są gazy dwuatomowe lub cząsteczki
- c) *ciągłe* - w skład widm ciągłych wchodzi fale o wszystkich długościach; źródłem tych widm są ciała stałe lub ciecze



Rys. 3 Przykłady widm emisyjnych: liniowego, pasmowego i ciągłego. Na górze przedstawiono obrazy rozszczepionych wiązek światła a na dole zarejestrowane widma

Dlaczego materia świeci?

Ażeby odpowiedzieć na powyższe pytanie, należy wniknąć w budowę atomu. Składa się on z niewielkiego, ciężkiego, dodatnio naładowanego jądra oraz krążących wokół niego ujemnie naładowanych, lekkich elektronów. Ruch elektronów odbywa się po tzw. dozwolonych orbitalach atomowych, a energia elektronu na każdym z orbitali jest ściśle określona. Innymi słowy: energia elektronu w atomie jest skwantowana (porcjowana). Elektron zmieniający orbital o wyższej energii (orbital położony dalej od jądra) na orbital o niższej energii, emituje kwant promieniowania elektromagnetycznego o energii

$$E = h\nu = E_n - E_m \quad (1)$$

gdzie h - stała Plancka, ν - częstotliwość wyemitowanej fali elektromagnetycznej, E_n i E_m - energie elektronu odpowiednio na n -tym i m -tym orbitalu. Korzystając z zależności pomiędzy częstotliwością a długością fali $\nu = c/\lambda$, można przekształcić wzór (1) do następującej postaci

$$\lambda = \frac{hc}{E_n - E_m} \quad (2)$$

gdzie λ - długość wyemitowanej fali elektromagnetycznej, c - prędkość światła w próżni.

Jak widać z powyższej zależności, jeżeli energie elektronów w atomie mogą przybierać tylko ściśle określone wartości, to może on emitować tylko fale o konkretnych długościach. Długości te są charakterystyczne dla każdego pierwiastka. Na podstawie analizy widma możemy więc wiele dowiedzieć się na temat budowy atomu lub z drugiej strony zidentyfikować rodzaj pierwiastka emitującego fale. Fale emitowane przez atomy w wyżej opisany sposób mieszczą się w zakresach podczerwonym, widzialnym, nadfioletowym lub rentgenowskim. Jeżeli długość wyemitowanej fali mieści się w zakresie widzialnym, mówimy, że obiekt świeci.

Do tej pory mówiliśmy o powstawaniu emisyjnego widma liniowego. Dlaczego jednak widmo gazów złożonych oraz ciał stałych i cieczy różni się od widm pojedynczych atomów pobudzonych do świecenia? Dzieje się tak, ponieważ układ złożony z wielu atomów dodatkowo zwiększa liczbę możliwych poziomów energetycznych. Przykładowo: cząsteczka wodoru H_2 składa się zaledwie z dwóch elektronów i dwóch protonów, ale jej widmo jest znacznie bardziej złożone od widma pojedynczego atomu wodoru. W skład energii wewnętrznej cząsteczki wchodzi dodatkowo energia wzajemnych drgań atomów oraz energia jej ruchu obrotowego względem środka masy cząsteczki. W konsekwencji cząsteczka H_2 ma liczne linie widmowe wobec zaledwie czterech linii obserwowanych w zakresie widzialnym dla atomu H. Im bardziej złożona jest cząsteczka i wchodzące w jej skład atomy, tym bogatsze jest widmo. Dla ciał stałych i cieczy liczba linii widmowych jest tak ogromna, że w konsekwencji obserwujemy widmo ciągłe.

Przykłady zastosowania spektroskopii optycznej:

1) Chcąc skontrolować jakość blachy w walcowni, wytwarza się łuk elektryczny, który powoduje parowanie świecących atomów z materiału. Badając widmo linowe takich par, można określić skład materiału (na podstawie charakterystycznych długości linii widmowych) oraz proporcje składników (na podstawie stosunku natężeń linii poszczególnych pierwiastków).

2) Na podstawie widma emitowanego przez gwiazdę astronomowie mogą poznać nie tylko jej skład ale również jej prędkość względem Ziemi. Badając subtelne zmiany w widmach gwiazd, stwierdzono, że wszechświat się rozszerza.

Co to jest światło białe?

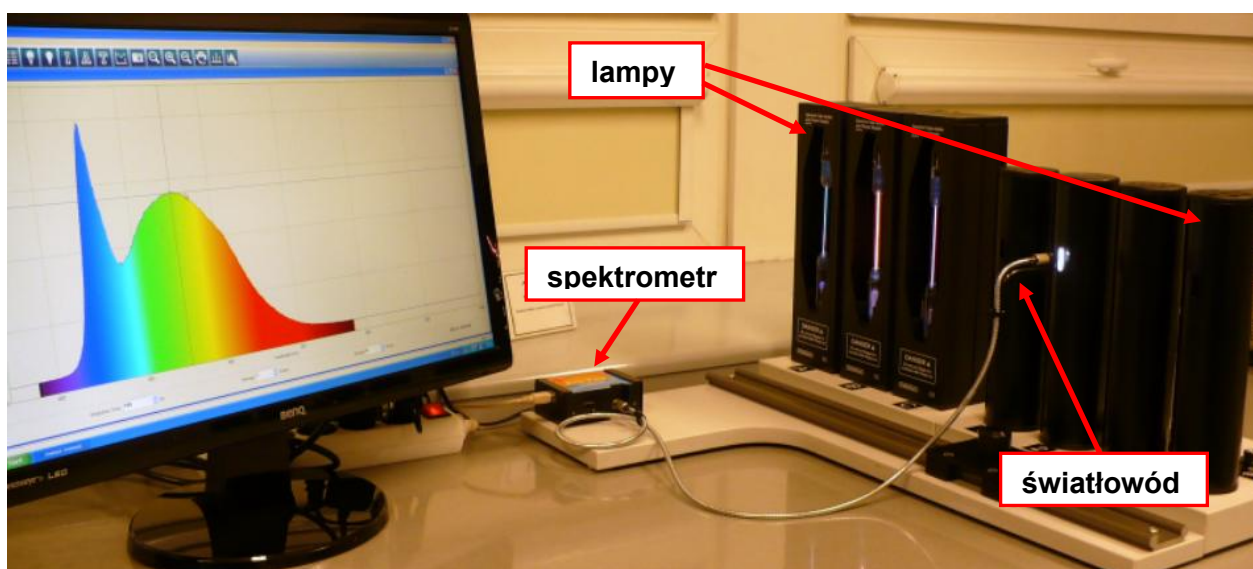
Powszechnie definiuje się światło białe jako *efekt złożenia wszystkich barw* (fal o wszystkich długościach z zakresu widzialnego). Obserwując rozszczepione w kroplach deszczu białe światło słoneczne, widzimy wielokolorową tęczę. Jednak dla oka ludzkiego można stworzyć wrażenie światła białego na różne sposoby. Wynika to z faktu, że w oku znajdują się receptory światła (czopki) wrażliwe na trzy podstawowe barwy: czerwoną, zieloną i niebieską. Mieszając je w różnych proporcjach, możemy uzyskać wrażenie światła białego lub tworzyć nowe barwy. Czasami światło białe pochodzące z różnych źródeł, padające na białą kartkę jest niemal identyczne w odbiorze, jednak jego widmo może się znacznie różnić. Również inaczej będzie wyglądał barwny obraz oświetlony na przykład żarówką, świetlówką kompaktową lub lampą LED pomimo, że każde z nich teoretycznie emituje barwę białą. Wynika to z różnego sposobu otrzymywania światła białego w tych źródłach a tym samym innych ich widm.

Rozważmy w jaki sposób można uzyskać światło białe. Jak już wspomniano, żeby doszło do świecenia atomu, jego elektron musi na początek uzyskać energię potrzebną do "przeskoku" na wyższy orbital, aby potem móc ją utracić w procesie emisji fali elektromagnetycznej. Energię tę można dostarczyć na różne sposoby. Najprościej jest ogrzać ciało do wysokiej temperatury. Przykładowo, rozgrzana do temperatury 5800 K powierzchnia Słońca emituje intensywne białobłękitne światło. Zjawisko powstawania światła w wyniku żarzenia wykorzystuje się w klasycznych *żarówkach*. Ich wolframowe włókno rozgrzane do temperatury około 2700 K świeci biało-żółtym światłem. Ta metoda jest jednak mało wydajna. Żarówka wypromieniowuje zaledwie 3-5% światła w zakresie widzialnym, natomiast reszta to niewidzialne dla człowieka promieniowanie podczerwone. Wydajniejszym źródłem światła białego jest *światłówka kompaktowa* (kompaktowa lampa fluorescencyjna), w której źródłem światła są głównie pary rtęci pobudzone do świecenia przez wyładowanie elektryczne. Światło emitowane przez atomy rtęci pada na luminofor, którym pokryta jest powierzchnia światłówki, i pobudza go do świecenia (zjawisko fluorescencji). Widmo takiej lampy różni się znacznie od widma słonecznego, przez co barwy np. obrazu wyglądają inaczej niż w oświetleniu dziennym. Innym źródłem światła białego jest *lampa LED*. Jest to najczęściej zbiór diod elektroluminescencyjnych pokrytych luminoforem, umieszczonych w oprawie przeznaczonej dla żarówek. Diody w wyniku zjawiska elektroluminescencji emitują światło niebieskie, które wzbudza do świecenia luminofor. Żółto-zielono-czerwone światło emitowane przez luminofor po zmieszaniu z niebieskim światłem diody daje barwę białą. Jeżeli w widmie światła białego znajduje się dużo światła niebieskiego, mówimy o barwie *zimnej* światła, natomiast jeżeli światła niebieskiego jest mało, otrzymujemy tzw. *ciepłe* światło białe (biało-żółte).

Układ pomiarowy

Układ pomiarowy (rys. 4) składa się ze spektrometru (zakres pomiarowy 300 - 1000 nm) połączonego z komputerem. Za pomocą światłowodu do spektrometru może docierać światło z siedmiu różnych źródeł oznaczonych A, B, C oraz 1, 2, 3, 4. Obsługę spektrometru umożliwia program *Overture*, który należy uruchomić po włączeniu komputera. Oznaczenia wybranych funkcji programu znajdują się na stanowisku pomiarowym.

Ćwiczenie składa się z dwóch etapów. Pierwszy z nich polega na identyfikacji pierwiastków zawartych w rurkach spektralnych (lampy A, B i C). Znajdujące się na stanowisku lampy zawierają: A – mieszaninę par metalu i gazu jednoatomowego; B - gaz jednoatomowy; C - prosty gaz dwuatomowy. W trakcie identyfikacji gazów należy wziąć pod uwagę, że rozdzielczość wykorzystywanego w ćwiczeniu spektrometru edukacyjnego jest niezbyt duża. W związku z tym, jeżeli odległość między liniami spektralnymi jest mniejsza niż 3 nm, mogą się one "zlewać" w jedną szerszą linię (pasma). Etap drugi polega na obserwacji widm światła białego pochodzących różnych źródeł: 1 - światłówka kompaktowa, 2 - lampa LED, 3 - lampa LED RGB, 4 - żarówka.



Rys. 4 Układ eksperymentalny do badań optycznych widm emisyjnych

Przebieg ćwiczenia

A. Identyfikacja gazów zawartych w rurkach spektralnych

1. Włącz lampę A, a następnie ustaw koniec światłowodu naprzeciwko niej. Doreguluj położenie wózka ze światłowodem oraz "czas integracji pomiaru" tak, aby widmo w całości mieściło się na ekranie. Włącz ikonę "kolor", aby przybliżyć sobie rzeczywiste barwy widma.
2. Za pomocą myszki komputerowej ustaw kursor kolejno na maksimum każdej z linii. Zapisuj ich długości fal oraz intensywność. W przypadku "poszerzonej" linii zaznacz w notatkach, że mogą to być blisko położone dwie lub trzy linie spektralne.
3. Pomiary powtórz dla lamp B i C.
4. Porównaj uzyskane linie widmowe do widm zawartych w dołączonych do opisu ćwiczenia "Tablicach spektralnych" lub do widm w programie Spektruś (link dostępny na stronie I PF).
5. Określ pierwiastki zawarte w lampach A, B, C oraz zapisz wnioski.

B. Obserwacja widm wybranych źródeł światła białego

1. Włącz lampę 1 (światłówka kompaktowa) i zarejestruj widmo.
2. Zapisz położenia pasm oraz ich intensywność, a następnie porównaj je z liniami emitowanymi przez rtęć. Zapisz wnioski.
3. Włącz lampę 2 (lampa LED). Zapisz położenia występujących w widmie maksimów. Zapisz wnioski.
4. Włącz lampę 3 (dioda LED - RGB) i za pomocą załączonego pilota ustaw światło białe (pilot należy kierować na otwór znajdujący się w tylnej części obudowy lampy). Zapisz długości fal, dla których obserwuje się maksymalne wartości pasm spektralnych.
5. Za pomocą pilota zmień barwę lampy na np: żółtą, fioletową, pomarańczową. Przeanalizuj widma i zapisz wnioski.
6. Włącz lampę 4 (żarówka). Za pomocą potencjometru ustaw maksymalne napięcie na żarówce, odpowiadające maksymalnej temperaturze jej włókna. Zarejestruj widmo, klikając na ikonę "migawka".
7. Zarejestruj w ten sposób jeszcze kolejne 3-4 widma przy coraz niższych napięciach.
8. Porównaj widma uzyskane dla różnych temperatur włókna żarówki. Zwróć uwagę na minimalne długości fal emitowane przez żarówkę dla różnych temperatur jej włókna. Zapisz wnioski.

Wyznaczenie skuteczności świetlnej wybranych źródeł światła

Cele ćwiczenia

- Wyznaczenie natężenia oświetlenia w funkcji odległości od źródła światła
- Wyznaczenie skuteczności świetlnej badanych źródeł światła (lampy LED, żarówki halogenowej oraz żarówki tradycyjnej)
- Wyznaczenie zależności skuteczności świetlnej żarówek od pobieranej mocy

Wprowadzenie

Opatentowana przez Thomasa Edisona w 1879 roku żarówka nadal cieszy się dużą popularnością w oświetleniu domowym. Jest to zasługa jej niskiego kosztu produkcji, braku efektu stroboskopowego oraz widma promieniowania zbliżonego do widma światła słonecznego. Zdecydowaną wadą żarówki jest jej niska skuteczność świetlna wynikająca z faktu, że zaledwie 2 - 4 % pobieranej przez nią energii jest przetwarzana na światło. Z tej przyczyny od lat są poszukiwane jej ekonomiczniejsze zamienniki. Obecnie można spotkać wiele różnorodnych elektrycznych źródeł światła, ale ich stosunkowo wysoka skuteczność świetlna łączy się niestety z wadami. Od kilkunastu lat w naszych domach coraz częściej pojawiają się świetlówki kompaktowe a od kilku lat bardzo wydajne lampy LED. Zaletą tych ostatnich jest duża żywotność oraz skuteczność świetlna (często ponad dziesięciokrotnie większa niż dla tradycyjnych żarówek). W niniejszym ćwiczeniu skupimy pomiary właśnie na tym ostatnim parametrze.

Wyznaczenie skuteczności świetlnej źródła światła

Skuteczność świetlną η definiujemy jako stosunek całkowitego strumienia świetlnego Φ_C emitowanego przez źródło światła do mocy pobieranej przez źródło P

$$\eta = \frac{\Phi_C}{P}. \quad (1)$$

Pobieraną moc można wyliczyć z iloczynu napięcia elektrycznego U oraz natężenia prądu elektrycznego I przepływającego przez źródło światła

$$P = UI. \quad (2)$$

Strumień świetlny Φ jest to ilość energii świetlnej przenoszona przez dowolną powierzchnię w jednostce czasu. Mierząc energię fal świetlnych przechodzącą w jednostce czasu przez powierzchnię otaczającą źródło światła, otrzymamy całkowity strumień świetlny źródła światła Φ_C .

Pomiar Φ_C zwykle nie jest prosty ze względu na to, że źródła światła mają różnorodny kształt a energia wysyłanego promieniowania zwykle zależy od kierunku promieniowania (promieniowanie anizotropowe). Do wyznaczenia całkowitego strumienia świetlnego stosuje się specjalne metody eksperymentalne wykorzystujące kule fotometryczne lub fotometry umieszczone na ruchomym ramieniu umożliwiającym pomiar światła w różnych przestrzennych konfiguracjach. Ta ostatnia metoda pozwala stworzyć mapę przestrzennego rozsyłu światła. W niniejszym ćwiczeniu posłużymy się uproszczoną metodą pomiaru całkowitego strumienia świetlnego opartą na założeniu, że badane źródła światła są izotropowymi źródłami punktowymi. To znaczy, że ich rozmiar jest pomijalnie mały, a energia wysyłanego promieniowania świetlnego jest jednakowa we wszystkich kierunkach. Założenie to nie jest prawdziwe, ale w dalszych rozważaniach wykazemy, że w szczególnych przypadkach takie uproszczenie może być uzasadnione.

Wyznaczenie całkowitego strumienia świetlnego punkowego, izotropowego źródła światła na podstawie pomiaru natężenia oświetlenia

Podstawowym parametrem fotometrycznym jest *światłość* I_s . Jest to stosunek strumienia świetlnego $d\Phi$ zawartego w granicach nieskończenie małego kąta bryłowego do wartości tego kąta $d\omega$ (rys.1)

$$I_s = \frac{d\Phi}{d\omega}. \quad (3)$$

Jednostką światłości jest *kandela* (cd). Jest to jednostka ściśle zdefiniowana, należąca do układu SI. Jej nazwa wywodzi się z języka łacińskiego (candela - świeca), a pierwotnie światłość o wartości 1 cd odpowiadała światłości specjalnie wykonanej świecy. Dziś oczywiście taka definicja kandel nie jest wystarczająco precyzyjna.

Jeżeli mamy do czynienia z izotropowym źródłem światła, to światłość możemy zapisać jako stosunek całkowitego strumienia świetlnego do wartości pełnego kąta bryłowego $I_s = \Phi_C/4\pi$. Po przekształceniu uzyskamy zależność na całkowity strumień świetlny

$$\Phi_C = 4\pi I_s. \quad (4)$$

Jednostką strumienia świetlnego jest *lumen* (lm) zdefiniowany jako strumień świetlny wysłany w granicach kąta bryłowego równego jednemu steradianowi przez izotropowe, punktowe źródło światła o światłości jednej kandelii umieszczone w wierzchołku tego kąta ($1\text{ lm} = 1\text{ cd}\cdot 1\text{ sr}$).

W naszych badaniach wyznaczymy Φ_C na podstawie innej wielkości fizycznej - *natężenia oświetlenia* E - posługując się luksomierzem. Natężenie oświetlenia jest to stosunek strumienia świetlnego $d\Phi$ do *powierzchni* dS na którą pada:

$$E = \frac{d\Phi}{dS}. \quad (5)$$

Jednostką natężenia oświetlenia jest luks ($1\text{ lx} = 1\text{ lm}/\text{m}^2$). Na rys. 1 widać punktowe źródło światła oraz fragment powierzchni dS oświetlonej przez strumień $d\Phi$. Jeżeli za dS przyjmiemy powierzchnię całej sfery o promieniu r ($S = 4\pi r^2$), to $d\Phi$ będzie całkowitym strumieniem świetlnym emitowanym przez źródło Φ_C . Wzór na natężenie oświetlenia przybierze w tym przypadku następującą postać

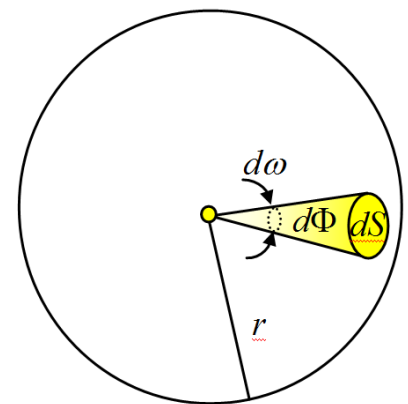
$$E = \frac{\Phi_C}{4\pi r^2}. \quad (6)$$

Z powyższego równania wynika, że - jeżeli mamy do czynienia z punktowym, izotropowym źródłem światła - pomiar natężenia oświetlenia E w odległości r od źródła umożliwi obliczenie całkowitego strumienia świetlnego emitowanego przez źródło.

Czy żarówkę możemy potraktować jako punktowe, izotropowe źródło światła?

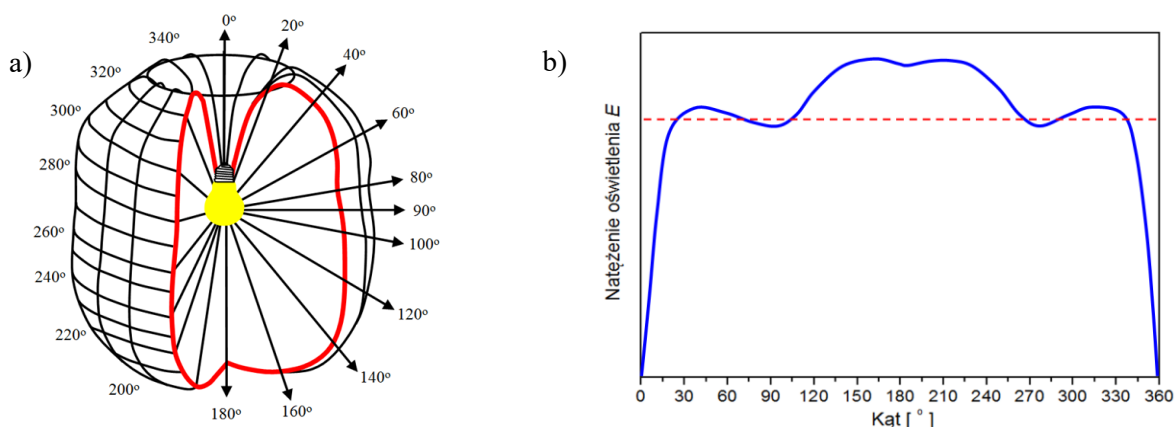
Oczywiście żarówkę trudno uznać za punktowe źródło światła. Udowodniono jednak, że z niewielkim przybliżeniem możemy potraktować źródło światła jako punktowe, jeżeli odległość pomiaru jest co najmniej 5 razy większa niż rozmiar źródła. Jeżeli będziemy więc wykonywali pomiary w dostatecznie dużej odległości, to nasze źródło światła możemy potraktować jako punktowe.

Bardziej złożony jest problem izotropowości źródła światła. Rzeczywiste źródła światła w mniejszym lub większym stopniu nie spełniają tego kryterium. Na przykład tzw. mleczone żarówki wysyłają światło w miarę równomiernie w każdym kierunku, ale jednak w kierunku trzonka



Rys. 1 Promieniowanie punktowego źródła światła.

(mocowania) żarówki nie jest ono emitowane. Na rysunku 2a przedstawiono tzw. powierzchnię rozsyłu światłości poglądowo obrazującą intensywność promieniowania w zależności od kierunku względem żarówki. Rysunek 2b ukazuje zależność natężenia oświetlenia od kąta (kierunku) względem żarówki. Łatwo zauważyć, że w przedstawionym przypadku największe natężenie obserwujemy dla kątów około 150° i 210° , natomiast dla kąta 0° wartość natężenia wynosi zero. Na rysunku 2b linią przerywaną zaznaczono również średnią wartość natężenia oświetlenia. Jak widać, nie odbiega ona znacznie od wartości natężenia w kierunku 90° . Tym samym w przybliżeniu możemy uznać, że pomiar natężenia oświetlenia w kierunku prostopadłym do osi symetrii żarówki (kąt 90°) jest wartością średnią natężenia oświetlenia. Oczywiście powyższe przybliżenie może być stosowane tylko w przypadku wybranych źródeł światła i nie można z niego korzystać w profesjonalnych pomiarach.



Rys. 2 Przykład rozsyłu światła przez żarówkę a) powierzchnia rozsyłu światłości (tzw. bryła fotometryczna), b) zależność natężenia oświetlenia w funkcji kąta (kierunku) emisji. Linią przerywaną zaznaczono wartość średnią natężenia oświetlenia.

Dlaczego żarówki mają niską skuteczność świetlną?

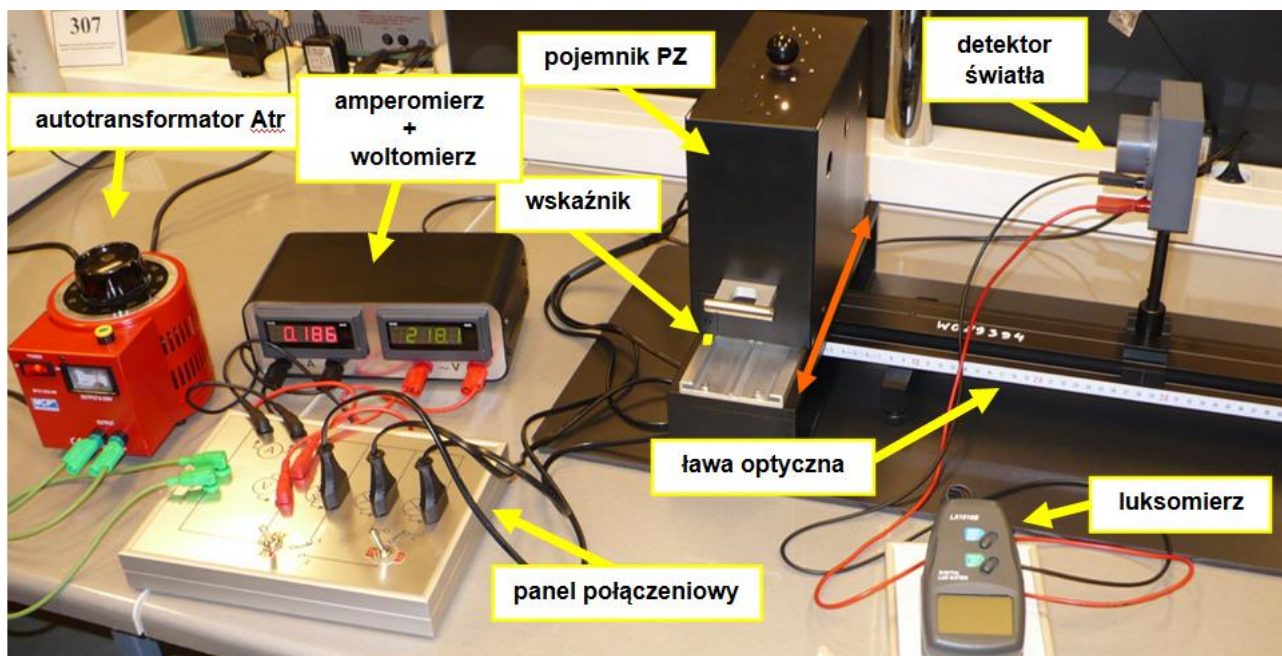
Budowa i zasada działania tradycyjnej żarówki niewiele zmieniła się w ciągu ostatnich stu lat. Jest to bańka szklana wypełniona najczęściej azotem, w środku której znajduje się cienki drucik wolframowy (żarnik). Na skutek przepływu prądu elektrycznego żarnik zostaje rozgrzany do temperatury ok. 2600 K. Każde ciało o temperaturze powyżej 0 K emituje fale elektromagnetyczne. Większość ciał, które nas otaczają, emituje fale podczerwone czyli w zakresie niewidzialnym dla człowieka. Dopiero po przekroczeniu temperatury około 1000 K ciało zaczyna świecić w kolorze ciemnoczerwonym. Wzrost temperatury powoduje emisję dalszych barw: żółtej, zielonej, niebieskiej. W wyniku ich nałożenia obserwujemy białe-żółte światło żarówki. Nadal jednak ponad 95% promieniowania to podczerwień. Poprawę skuteczności świetlnej dałoby zwiększenie temperatury żarnika. Na przykład przy temperaturze porównywalnej do temperatury powierzchni Słońca (6000 K) ponad 40% emitowanej energii fal znajdowałoby się w zakresie widzialnym. Niestety taka temperatura żarnika jest zbyt wysoka. Powszechnie stosowany wolfram zaczyna intensywnie wyparowywać w temperaturach powyżej 2600 K. W celu podniesienia temperatury żarnika żarówki zaczęto wypełniać halogenkami (np: jod, fluor, brom). Halogenki wiążą się z atomami odparowanego wolframu, a następnie, znajdując się w pobliżu rozgrzanego żarnika, związki rozpadają się, a wolfram ponownie osadza się na żarniku. Taki cykl nazywamy procesem regeneracyjnym a żarówkę - żarówką halogenową. Dzięki takiemu cyklowi żarniki żarówek

halogenowych można rozgrzewać do temperatury 3000 K, co daje wzrost skuteczności świetlnej o około 30% w stosunku do żarówek klasycznych.

W ostatnich latach coraz większą popularność zdobywają lampy LED. Lampa LED to najczęściej zbiór diod elektroluminescencyjnych pokrytych luminoforem umieszczonych w oprawie przeznaczonej dla żarówek. Zasada działania diody elektroluminescencyjnej jest zupełnie inna niż żarówki. Nie rozgrzewa się ona do wysokich temperatur (nie żarzy się), dlatego potoczna nazwa "żarówka LED" nie jest poprawna. Diody emitują światło niebieskie, które wzbudza do świecenia luminofor. Żółto-zielone światło emitowane przez luminofor po zmieszaniu z niebieskim światłem diody daje barwę białą. Zatem w przypadku lampy LED, w odróżnieniu od żarówki, całe światło jest emitowane w zakresie widzialnym dla ludzkiego oka. Straty wynikają jedynie ze sprawności urządzenia, co sprawia, że skuteczność świetlna lamp LED jest znacznie wyższa od skuteczności żarówek.

Układ pomiarowy

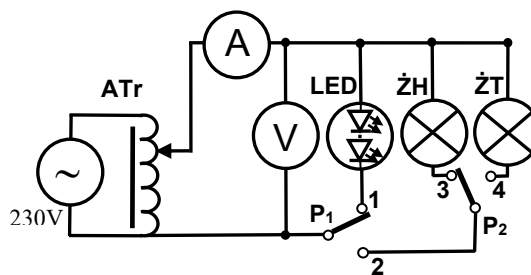
Układ pomiarowy jest tak zaprojektowany, aby można wyznaczyć skuteczność świetlną trzech źródeł światła: lampy LED, żarówki halogenowej i żarówki tradycyjnej (wypełnionej azotem). Dodatkowo można przeprowadzić badania skuteczności świetlnej żarówek w funkcji pobieranej przez nie mocy. Na rys. 3 pokazano układ eksperymentalny. Badane źródła światła znajdują się w pojemniku PZ, który można przesuwając w kierunku prostopadłym do ławy optycznej. Na wyskalowanej ławie znajduje się detektor światła połączony z luksomierzem, który pozwala wyznaczyć natężenie oświetlenia w wybranej odległości od źródła światła. Do zasilania źródeł światła służy autotransformator ATr. Źródła światła, woltomierz, amperomierz oraz autotransformator są połączone za pośrednictwem panelu połączeniowego. Tam też znajdują się przełączniki P_1 i P_2 umożliwiające włączenie wybranego źródła światła. Na rysunku 4 przedstawiono schemat elektryczny układu.



Rys. 3 Układ eksperymentalny do pomiaru skuteczności świetlnej wybranych źródeł światła.

Wyznaczenie skuteczności świetlnej η badanych źródeł światła

W celu wyznaczenia skuteczności świetlnej badanego źródła światła należy przesunąć pojemnik PZ tak, aby źródło znalazło się naprzeciwko detektora światła. W skrajnym położeniu "do siebie" badamy lampę LED, w położeniu środkowym (wskaźnik pojemnika na znaczniku suwnicy) badamy żarówkę halogenową a skrajnym położeniu "od siebie" - żarówkę tradycyjną. Po włączeniu wybranego źródła światła należy wyznaczyć wartości napięcia U i natężenia prądu I , a następnie wykonać pomiary natężenia oświetlenia E w funkcji odległości r od źródła. Aby wyznaczyć całkowity strumień świetlny Φ_C , należy posłużyć się równaniem (6). Dokonując w nim następujących podstawień, $y = E$, $x = 1/r^2$ oraz $a = \Phi_C/4\pi$, uzyskuje się zależność typu $y = ax + b$. Jest to zależność liniowa, gdzie wartość a jest współczynnikiem kierunkowym prostej. Wykreślając zależność natężenia oświetlenia w funkcji odwrotności kwadratu odległości od źródła światła: $E = f(1/r^2)$, powinno się otrzymać linię prostą. Stosując metodę regresji liniowej do tak otrzymanych wyników, można wyznaczyć współczynnik nachylenia prostej a , a następnie całkowity strumień świetlny $\Phi_C = 4\pi a$. Korzystając z wyników pomiarów napięcia U i natężenia prądu I , należy wyznaczyć moc pobieraną przez źródło światła $P = UI$. Ostatecznie posługując się wzorem (1), możemy wyznaczyć skuteczność świetlną.



Rys. 4 Schemat elektryczny układu zasilania i pomiaru pobieranej mocy.

Wyznaczenie zależności skuteczności świetlnej żarówki w funkcji pobieranej mocy $\eta = f(P)$

W celu wyznaczenia zależności skuteczności świetlnej żarówki w funkcji pobieranej mocy należy detektor światła umieścić w stałej odległości r naprzeciwko badanej żarówki. Następnie, zmieniając napięcie autotransformatorem, wykonać pomiary natężenia oświetlenia E . Korzystając ze wzorów (1), (2) oraz (6), możemy zapisać następującą zależność na skuteczność świetlną punktowego, izotropowego źródła światła

$$\eta = \frac{4\pi r^2 E}{UI}. \quad (7)$$

Moc należy wyznaczyć z równania (2).

Przebieg ćwiczenia

A. Wyznaczenie skuteczności świetlnej η badanych źródeł światła

1. Ustaw położenie pojemnika PZ w skrajnej pozycji "do siebie", aby lampa LED znajdowała się naprzeciwko detektora luksomierza.
2. Ustaw przełącznik P_1 w pozycji 1. Włącz zasilanie woltomierza, amperomierza i autotransformatora a następnie ustaw wartość napięcia - 230V. Zapisz odczytane wartości napięcia i natężenia prądu.
3. Wykonaj 10 ÷ 12 pomiarów natężenia oświetlenia w funkcji odległości od źródła światła w zakresie 25 ÷ 90 cm. Ze względu na nieliniową zależność oświetlenia od odległości początkowo zmieniaj dystans co 2 cm, potem co 5 cm a na koniec co 10 ÷ 15 cm.
4. Pomiary powtórz dla żarówki halogenowej (przełączniki P_1 i P_2 w pozycjach 2 i 3) oraz żarówki tradycyjnej (przełączniki P_1 i P_2 w pozycjach 2 i 4)
5. Korzystając z otrzymanych wyników wykreśl na wspólnym wykresie zależności natężenia oświetlenia od odwrotności kwadratu odległości od źródła światła $E=f(1/r^2)$ dla badanych źródeł światła.

6. Posługując się metodą regresji liniowej, wyznacz współczynniki nachylenia otrzymanych prostych a oraz ich błędy a następnie wartości całkowitego strumienia świetlnego $\Phi_C = 4\pi a$ i ich błędy pomiarowe.

7. Korzystając z otrzymanych wyników oraz równań (1) i (2), wyznacz skuteczność świetlną badanych źródeł światła oraz błędy pomiarowe.

8. Porównaj uzyskane wyniki i zapisz wnioski.

B. Wyznaczenie zależności skuteczności świetlnej żarówek w funkcji pobieranej mocy $\eta = f(P)$.

1. Ustaw żarówkę tradycyjną naprzeciwko detektora luksomierza w odległości $r = 35$ cm. Następnie włącz obwód żarówki i posługując się autotransformatorem ustaw napięcie zasilające na 230 V.

2. Wykonaj 10 pomiarów natężenia oświetlenia zmniejszając napięcie zasilające co 10 V. Każdorazowo zapisuj wartości napięcia i natężenia prądu.

3. Posługując się równaniami (2) i (7), wyznacz poszczególne wartości mocy oraz skuteczności świetlnej.

4. Powtórz powyższe pomiary dla żarówki halogenowej.

5. Na wspólnym wykresie wykreśl zależności skuteczności świetlnej żarówek od pobieranej mocy $\eta = f(P)$.

6. Zapisz wnioski.

Badanie ogniwa fotowoltaicznego

Cel ćwiczenia

Zapoznanie się z podstawowymi wiadomościami na temat ogniw fotowoltaicznych oraz wyznaczenie: zależności prądu fotoogniwa od natężenia oświetlenia, charakterystyk prądowo-napięciowych fotoogniwa dla różnych wartości natężenia oświetlenia, oporu wewnętrznego oświetlonego fotoogniwa.

Wprowadzenie

Ogniwa fotowoltaiczne służą do zamiany energii światła na energię elektryczną. W ostatnich latach można zaobserwować coraz większą popularność takich urządzeń, nazywanych powszechnie ogniwami (bateriami) słonecznymi lub fotoogniwami. Dynamiczny rozwój techniki fotowoltaicznej spowodowany jest poszukiwaniem alternatywnych źródeł energii. Ogniwa fotowoltaiczne uważane są za najbardziej przyjazne środowisku źródła energii. Jest to związane między innymi z brakiem: hałasu, emisji zanieczyszczeń, wpływu paneli słonecznych na ekosystem. Poza tym materiały używane do produkcji baterii słonecznych są powszechnie dostępne a utylizacja zużytych instalacji nie jest kłopotliwa. Niestety stosunkowo wysoki koszt wytworzenia do wyprodukowanej energii elektrycznej powoduje relatywnie niewielki zysk z instalacji fotowoltaicznych. Dodatkową wadą tych urządzeń jest zależność ilości produkowanej energii elektrycznej od warunków pogodowych, co powoduje nieprzewidywalność produkcji. Wydajność paneli słonecznych może się zmienić ponad dziesięciokrotnie w zależności od nasłonecznienia i temperatury otoczenia (im wyższa temperatura fotoogniwa tym niższa jego wydajność).

Pojedyncze ogniwa fotowoltaiczne łączy się ze sobą tworząc baterię fotowoltaiczną (baterię słoneczną, panel słoneczny). Spotykane w Polsce baterie słoneczne najczęściej zasilają niewielkie urządzenia elektroniczne, lampy ogrodowe, instalacje drogowe itp. W naszej szerokości geograficznej, ze względu na niewielkie średnioroczne nasłonecznienie, raczej nie spotyka się elektrowni słonecznych. Coraz częściej wykorzystuje się natomiast energię słoneczną do podgrzewania wody w domach, instalując na ich dachach kolektory słoneczne (nie wytwarzają one prądu elektrycznego).

Obecnie na rynku najbardziej popularne są panele słoneczne wykonane z krzemu (monokrystalicznego, polikrystalicznego, amorficznego). Coraz powszechniej wykorzystuje się również ogniwa fotowoltaiczne na bazie telurku kadmu (CdTe) oraz stopu miedzi, indu, galu i selenu (CIGS). Ciekawie zapowiadają się badania ogniw fotowoltaicznych bazujących na naturalnych barwnikach (DSSC). Wprawdzie na razie ich sprawność jest niewielka, ale niski koszt i prostota produkcji (zwyczajne drukowanie) dają nadzieję na ich rozpowszechnienie. Pomimo że obecnie w warunkach laboratoryjnych uzyskuje się fotoogniwa krzemowe o sprawnościach ponad 25% (ogniwa wielowarstwowe nawet ponad 40%), to jednak te produkowane przemysłowo nie dają takich dobrych rezultatów (patrz Tabela 1). Wymienione powyżej fotoogniwa różnią się kosztami wytworzenia oraz sprawnością, dlatego - w zależności od potrzeby - wykorzystuje się różne ich typy (np. satelity wyposażane są w drogie i wydajne fotoogniwa z krzemu monokrystalicznego lub ogniwa wielowarstwowe, a lampki ogrodowe w tanie ogniwa z krzemu amorficznego).

Tabela 1. Sprawności ogniw fotowoltaicznych (produkowanych przemysłowo) w zależności od zastosowanego do ich budowy materiału

materiał użyty do wytworzenia fotoogniwa	sprawność [%]	materiał użyty do wytworzenia fotoogniwa (rodzaj fotoogniwa)	sprawność [%]
monokrystaliczny krzem	14÷17	telurek kadmu CdTe	ok. 11
polikrystaliczny krzem	11÷15	CIGS	10÷15
amorficzny krzem	5÷9	DSSC	ok. 3

Poznajmy uproszczony model działania ogniwa fotowoltaicznego na przykładzie popularnego fotoogniwa krzemowego. Aby to zrobić, na początek musimy zapoznać się z procesem przewodnictwa elektrycznego w półprzewodnikach, zasadą działania złącza $p-n$ oraz z wewnętrznym zjawiskiem fotoelektrycznym.

Przewodnictwo elektryczne w półprzewodnikach

Krzem jest materiałem półprzewodnikowym. Półprzewodniki w temperaturze zera bezwzględnego są izolatorami (wynika to z braku swobodnych nośników prądu elektrycznego), natomiast wraz ze wzrostem temperatury zaczynają coraz lepiej przewodzić prąd elektryczny. To drgania termiczne sprawiają, że część elektronów walencyjnych może oderwać się od atomów półprzewodnika i stać się nośnikami prądu elektrycznego. Zgodnie z teorią pasmową ciała stałego powiedzielibyśmy, że drgania dostarczyły elektronowi energię E_g potrzebną na przejście z pasma walencyjnego do pasma przewodnictwa. Należy jednak zaznaczyć, że koncentracja nośników prądu w półprzewodnikach nawet w stosunkowo wysokich temperaturach jest o ponad dziesięć rzędów mniejsza w porównaniu z dobrymi przewodnikami. Przydatność półprzewodników w technologii można znacznie poprawić, wprowadzając do ich sieci krystalicznych bardzo niewielką ilość odpowiednio dobranych atomów zwanych domieszkami. Istnieją dwa typy domieszkowania zwane typem n oraz typem p .

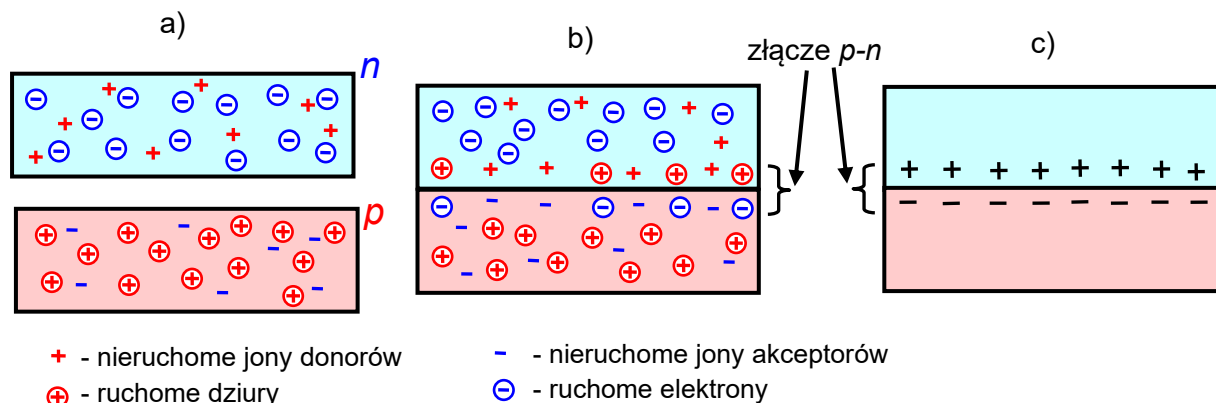
Prześledźmy proces domieszkowania na przykładzie krzemu. Krzem jest pierwiastkiem czterowartościowym. Jego atomy tworzące sieć krystaliczną łączą się z czterema najbliższymi sąsiadami, tworząc wiązania kowalencyjne. Jeżeli do sieci krystalicznej krzemu "wbudujemy" na przykład pięciowartościowy atom fosforu, cztery z elektronów walencyjnych atomu fosforu stworzą wiązania z otaczającymi go atomami krzemu. Piąty elektron nie biorący udziału w wiązaniu jest słabo związany z rdzeniem jonu fosforu. Energia potrzebna do oderwania takiego elektronu E_d jest mniejsza od energii E_g dla krzemu dlatego przy nieznacznym wzroście temperatury elektrony domieszki odrywają się od atomów fosforu powodując wzrost przewodnictwa elektrycznego. Atom fosforu nazywamy *donorem*, ponieważ łatwo dostarcza elektron do pasma przewodnictwa, natomiast półprzewodnik domieszkowany w powyższy sposób nazywamy półprzewodnikiem typu n , gdyż nośnikami większościowymi prądu są ujemnie naładowane elektrony (ang. *negative* - ujemny).

Jeżeli w sieć krystaliczną wbudujemy na przykład trójwartościowy atom glinu może on stworzyć wiązania kowalencyjne jedynie z trzema sąsiednimi atomami krzemu. Tym samym w jednym z wiązań pomiędzy atomem glinu i krzemem brakuje elektronu (jest dziura). Jeżeli dostarczymy stosunkowo niewielką energię E_a elektronowi z sąsiedniego wiązania pomiędzy atomami krzemu, zapełnimy tę dziurę, tworząc jednocześnie kolejną dziurę. Proces ten może dalej postępować i dziura będzie poruszać się w sieci krystalicznej. Atom glinu nazywamy *akceptorem*, gdyż przyjmuje elektron z sąsiedniego wiązania lub, inaczej mówiąc, z pasma walencyjnego

krzemu. Tak domieszkowany półprzewodnik nazywamy półprzewodnikiem typu p , gdyż nośnikami większościowymi prądu są dodatnio naładowane dziury (ang. *positive* - dodatni).

Złącze p - n

Jeżeli dwa niezależne półprzewodniki typu p i n (rys. 1a) połączymy ściśle ze sobą, to na granicy kontaktu część elektronów z półprzewodnika typu n dyfunduje do półprzewodnika typu p i na odwrót: część dziur z półprzewodnika typu p dyfunduje do obszaru półprzewodnika typu n (rys. 1b).



Rys. 1. a) rozkład nośników prądu elektrycznego w półprzewodnikach typu n i p , b) rozkład nośników prądu elektrycznego w półprzewodnikach typu n i p na granicy złącza, c) schematyczne przedstawienie warstwy kontaktowej (złącza p - n).

W obszarze przejściowym na granicy półprzewodników noszącym nazwę warstwy kontaktowej gromadzi się ładunek. W wyniku takiego rozdziału ładunków wewnątrz warstwy kontaktowej (złącza p - n) powstaje pole elektryczne i zarazem różnica potencjałów. Na rysunku 1c dla uproszczenia pokazano jedynie schematycznie warstwę kontaktową. Złącze p - n jest bardzo powszechnie wykorzystywane w elektronice, ale w naszych dalszych rozważaniach ograniczymy się jedynie do przypadku fotoogniwa. Zanim jednak przejdziemy do zasady jego działania, przypomnijmy, na czym polega zjawisko fotoelektryczne wewnętrzne.

Zjawisko fotoelektryczne wewnętrzne

Jak wspomniano, żeby oderwać elektron walencyjny od atomu półprzewodnika, należy dostarczyć mu pewnej energii E_g . Energię tę mogą dostarczyć drgania termiczne, ale również na przykład promieniowanie świetlne. Jeżeli w wyniku promieniowania świetlnego wewnątrz półprzewodnika powstają pary dziura-elektron to takie zjawisko nazywamy zjawiskiem fotoelektrycznym wewnętrznym. Zjawisko to ukazuje nam cząsteczkową naturę światła. Żeby doszło do uwolnienia elektronu walencyjnego kwant promieniowania świetlnego (foton) musi mieć energię co najmniej równą E_g . Energia kwantu E_f zależna jest od częstotliwości fali świetlnej ν w następujący sposób

$$E_f = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (1)$$

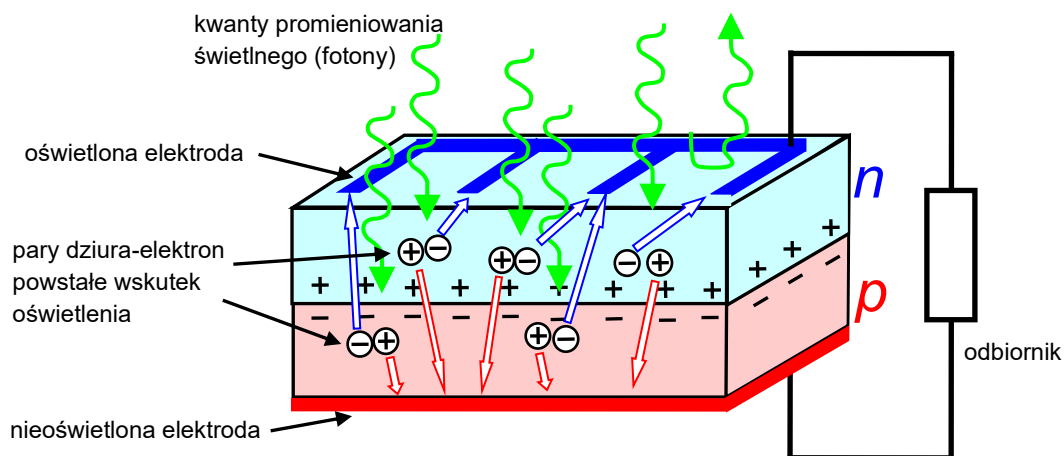
gdzie $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ Js jest stałą Plancka, $c = 3 \cdot 10^8$ m/s jest prędkością światła w próżni, λ jest długością fali świetlnej. Tym samym możemy zapisać warunek na zaistnienie zjawiska fotoelektrycznego wewnętrznego

$$h\nu \geq E_g. \quad (2)$$

Budowa i zasada działania ogniwa fotowoltaicznego

Aby zbudować ogniwo fotowoltaiczne należy na obydwu warstwach półprzewodników umieścić metaliczne elektrody zdolne do zbierania ładunku z ich powierzchni. Ze względu na to, że

do złącza p - n musi docierać światło, jedna z elektrod powinna mieć małą powierzchnię, aby światło mogło swobodnie docierać w głąb złącza. Druga z elektrod (nieoświetlona) przylega całkowicie do powierzchni dolnej ścianki fotoogniwa (rys. 2).

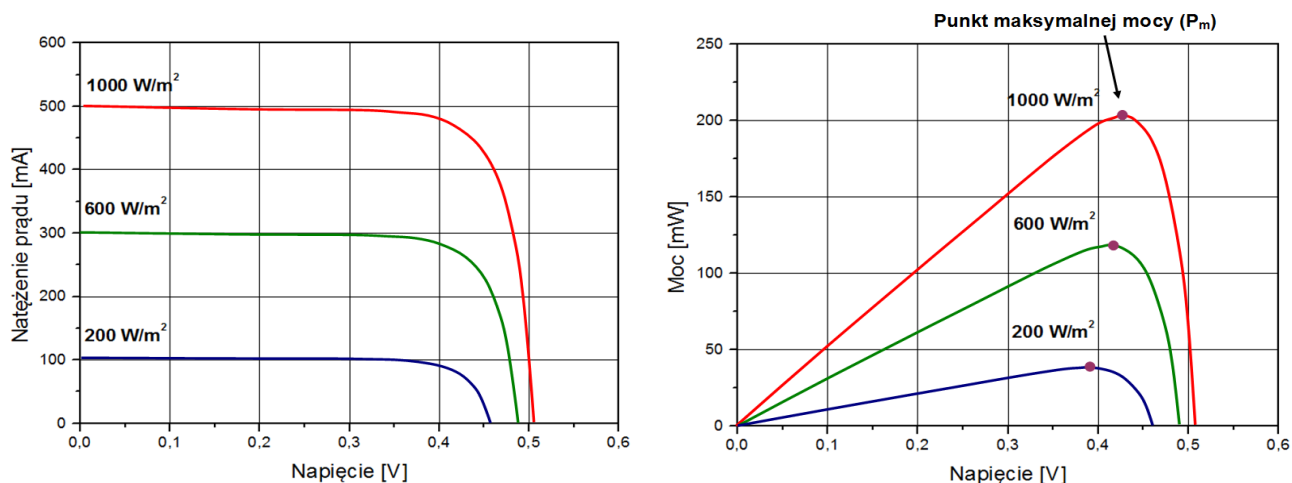


Rys. 2. Schemat budowy ogniwa fotowoltaicznego.

Jeżeli na fotoogniwo pada światło o dostatecznie dużej energii ($h\nu \geq E_g$), w jego wnętrzu zachodzi zjawisko fotoelektryczne wewnętrzne. Powstałe pary dziura-elektron (tzw. fotoelektron i fotodziura) w wyniku dyfuzji docierają do złącza. Jeżeli nośniki prądu docierają do złącza od strony półprzewodnika typu n , dziury, dla których nie istnieje bariera potencjału, zostaną przeniesione do półprzewodnika typu p , natomiast dla elektronów bariera potencjału jest granicą nie do pokonania. Sytuacja ma się odwrotnie od strony półprzewodnika typu p . Tym samym przy oświetleniu fotoogniwa w części n zbiera się ładunek ujemny, natomiast w części p ładunek dodatni. Pomiędzy elektrodami (oświetloną i nieoświetloną) występuje więc różnica potencjałów. Jeżeli elektrody podłączymy do odbiornika, w zamkniętym obwodzie elektrycznym popłynie prąd elektryczny. Natężenie tego prądu będzie w przybliżeniu proporcjonalne do natężenia oświetlenia fotoogniwa. Należy dodać, że sprawność fotoogniw obniża m.in. proces rekombinacji nośników czyli ponownego łączenia się dziury i elektronu. Negatywnie wpływa również zjawisko odbicia światła od powierzchni fotoogniwa (minimalizuje się je poprzez pokrycie fotoogniwa warstwą przeciw-odbiciową).

Przy projektowaniu urządzeń zasilanych energią z ogniw fotowoltaicznych istotna jest znajomość charakterystyk takich ogniw. Są one zbliżone dla różnych typów fotoogniw. Na rysunku 3 przedstawiono zależności prądu od napięcia oraz mocy od napięcia wykonane dla ogniwa fotowoltaicznego przy różnych natężeniach światła. Charakterystyki powstały poprzez zmianę rezystancji odbiornika.

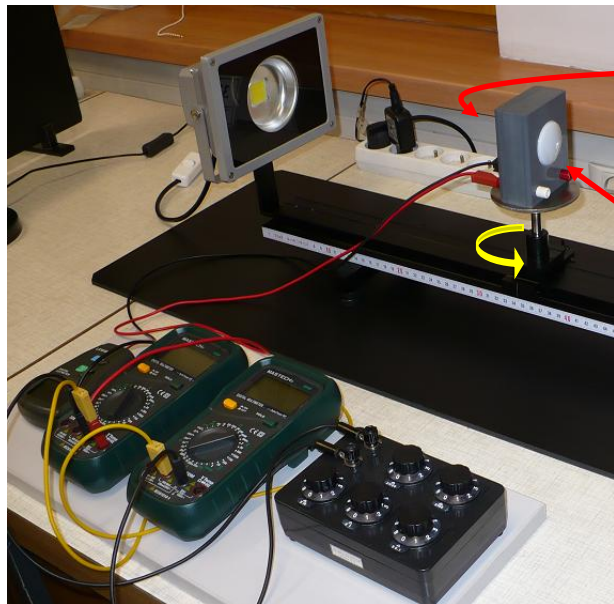
Jak widać z charakterystyk prądowo-napięciowych, maksymalny prąd ogniwa fotowoltaicznego zmienia się proporcjonalnie do jego oświetlenia, podczas gdy napięcie maksymalne zależy od oświetlenia w niewielkim stopniu. Zależność mocy od napięcia pokazuje dodatkowo, że przy pewnym obciążeniu fotoogniwa pobierana moc osiąga wartość maksymalną (punkt maksymalnej mocy). Maksymalną moc z ogniwa można uzyskać, gdy rezystancja odbiornika jest równa rezystancji wewnętrznej ogniwa.



Rys. 3. Charakterystyki prąd-napięcie oraz moc-napięcie przy różnym oświetleniu ogniwa fotowoltaicznego.

Opis stanowiska pomiarowego

Stanowisko pomiarowe składa z źródła światła (lampa LED), ławy optycznej ze skalą, przesuwne uchwyty z zamocowanym detektorem światła oraz ogniwo fotowoltaicznym. Znajduje się tu również luksomierz, rezystor dekadowy oraz dwa multimetry, z których jeden należy ustawić w opcji woltomierza (na zakresie 2V - prąd stały), a drugi miliamperomierza (zakres 200 mA - prąd stały). Detektor światła i ogniwo fotowoltaiczne znajdują się na wspólnym obrotowym uchwycie. Ich zamiany dokonuje się poprzez obrót kółka uchwytu o 180 stopni.



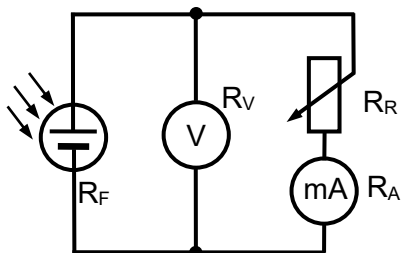
ogniwo fotowoltaiczne

detektor światła

Zdjęcie układu pomiarowego.

Celem ćwiczenia jest wyznaczenie: zależności prądu fotoogniwa od natężenia oświetlenia, charakterystyk prądowo-napięciowych fotoogniwa dla różnych wartości natężenia oświetlenia, oporu wewnętrznego oświetlonego fotoogniwa. Aby tego dokonać, na początek należy wyznaczyć zależność natężenia oświetlenia L od odległości od źródła światła r (zgodnie z teorią natężenie oświetlenia powinno maleć z kwadratem odległości od punktowego źródła światła $L \sim 1/r^2$). W tym celu detektor światła należy podłączyć do luksomierza. Po tych badaniach należy przystąpić do

właściwych pomiarów. Naprzeciwko źródła światła należy ustawić ogniwo fotowoltaiczne, a następnie połączyć je zgodnie ze schematem przedstawionym na rysunku 4. Rezystancję odbiornika należy zmieniać przy pomocy rezystora dekadowego. Napięcie zmierzone woltomierzem jest w rzeczywistości spadkiem napięcia na rezystorze dekadowym R_R oraz na rezystancji miliamperomierza R_A . Dla dużych wartości rezystancji R_R , rezystancja miliamperomierza ($R_A \approx 5\Omega$ na zakresie 200 mA) jest pomijalnie mała, ale trzeba pamiętać o wpływie rezystancji R_A na rezystancję odbiornika $R_{ODB} \approx R_R + R_A$ dla niewielkich wartości na rezystorze dekadowym.



Rys. 4. Schemat elektryczny obwodu pomiarowego

Na podstawie otrzymanych wyników można wykreślić zależność prądu od napięcia $I=f(U)$. Następnie należy obliczyć moc P wydzieloną na odbiorniku, korzystając ze wzoru

$$P = UI. \quad (3)$$

Po wykreśleniu zależności mocy od napięcia $P=f(U)$ należy wyznaczyć na wykresie punkt maksymalnej mocy. Odczytana z wykresu wartość maksymalnej mocy P_m oraz odpowiadające jej napięcie U_m umożliwi wyznaczenie z poniższej zależności rezystancji odbiornika R_{mODB} , która w tym przypadku jest równa rezystancji wewnętrznej fotoogniwa R_F

$$R_{mODB} = R_F = \frac{U_m^2}{P_m}. \quad (4)$$

Przebieg ćwiczenia

A. Pomiar zależności natężenia oświetlenia od odległości od źródła światła $L=f(r)$

1. Włącz lampę a następnie ustaw naprzeciwko niej detektor światła podłączony do luksomierza. Wykonaj pomiary natężenia oświetlenia w funkcji odległości od źródła światła w zakresie 20 ÷ 90 cm. Ze względu na nieliniową zależność oświetlenia od odległości, początkowo zmieniaj dystans co 2 cm, potem co 5 cm a na koniec co 10 cm.
2. Wykreśl zależność natężenia oświetlenia od odległości od źródła światła $L=f(r)$.
3. Zapisz wnioski.

Uwaga! W trakcie pomiaru luksomierzem korzystaj z odpowiednich zakresów pomiarowych przyrządu. Zwróć uwagę na mnożnik, który należy zastosować do wyświetlonej wartości (ukazuje się w dolnej części wyświetlacza).

B. Pomiar zależności natężenia prądu od natężenia oświetlenia $I=f(L)$

1. Odłącz detektor światła od luksomierza a następnie obróć go o 180° .
2. Połącz ogniwo fotowoltaiczne zgodnie ze schematem elektrycznym obwodu przedstawionym na rys. 4.

3. Na rezystorze dekadowym ustaw wartość $R_R = 0 \Omega$ a następnie wykonaj pomiary natężenia prądu w funkcji odległości od źródła światła w zakresie $20 \div 90$ cm (podobnie lub tak samo jak w przypadku pomiarów $L=f(r)$).
4. Korzystając wykresu $L=f(r)$ przyporządkuj wybranym odległościom odpowiednie wartości natężenia oświetlenia.
5. Wykreśl zależność prądu płynącego przez fotoogniwo od natężenia oświetlenia $I=f(L)$.
6. Zapisz wnioski.

C. Pomiar zależności natężenia prądu od napięcia $I=f(U)$

1. Ustaw fotoogniwo w odległości $r = 30$ cm od lampy i wykonaj pomiary natężenia prądu fotoogniwa od napięcia zmieniając rezystancję R_R .

Uwaga! Należy odpowiednio dobrać rezystancje tak, aby zarejestrować pełen przebieg charakterystyki prądowo-napięciowej. Na początek należy zmieniać rezystancję R_R co 1Ω (w zakresie $0 \div 10 \Omega$) następnie co 2Ω (w zakresie $10 \div 20 \Omega$) a potem co 5, 10, 100, 1000 Ω . Dla rezystancji powyżej 1000 Ω zmiany prądu i napięcia są prawie niezauważalne.

2. Czynności te powtórz dla odległości 35 cm oraz 45 cm.
3. Z wykresu $L=f(r)$ odczytaj wartości natężenia oświetlenia odpowiadające wybranym odległościom pomiarowym r .
4. Wykreśl wszystkie trzy charakterystyki prądowo-napięciowe na wspólnym wykresie.
5. Zapisz wnioski.

D. Wyznaczenie rezystancji wewnętrznej oświetlonego fotoogniwa

1. Korzystając z uprzednio uzyskanych wyników wylicz ze wzoru (3) moc a następnie wykreśl charakterystyki moc-napięcie na wspólnym wykresie.
2. Znajdź na każdym z wykresów punkt mocy maksymalnej a następnie korzystając ze wzoru (4) oblicz rezystancję wewnętrzną oświetlonego fotoogniwa.
3. Zapisz wnioski.

Badanie fotorezystora

Cele ćwiczenia

- Wyznaczenie zależności natężenia prądu płynącego przez fotorezystor od napięcia dla różnych wartości natężenia oświetlenia fotorezystora.
- Wyznaczenie zależności natężenia prądu płynącego przez fotorezystor od natężenia oświetlenia fotorezystora dla różnych wartości napięcia.
- Wyznaczenie zależności rezystancji fotorezystora od natężenia oświetlenia fotorezystora.

Wprowadzenie

Wiele urządzeń wykorzystywanych we współczesnym świecie zawiera detektory światła. Bez nich nie mogłyby poprawnie działać np: aparaty fotograficzne, zabezpieczenia drzwi tramwajowych, taśmy sklepowe, automatyczne włączniki świateł. Detektory światła powszechnie nazywa się fotokomórkami, jednak ta nazwa najczęściej nie jest poprawna. Współcześnie bardzo rzadko wykorzystuje się fotokomórki czyli szklane bańki próżniowe z dwiema metalicznymi elektrodami, których zasada działania opiera się na zjawisku fotoelektrycznym zewnętrznym. Najczęściej mamy do czynienia z detektorami półprzewodnikowymi wykorzystującymi *zjawisko fotoelektryczne wewnętrzne*. Wynika to z ich niezawodności, małych rozmiarów, prostej budowy i niewielkich kosztów produkcji. Do najbardziej popularnych detektorów światła należą fotodiody, fotorezystory, fotoogniwa oraz fototranzystory. W niniejszym ćwiczeniu skoncentrujemy się na fotorezystorze, elemencie światłoczułym, którego rezystancja znacząco zmienia się pod wpływem zmiany jego oświetlenia. Jeżeli umieścimy fotorezystor w obwodzie elektrycznym, to pod wpływem oświetlenia wzrośnie prąd elektryczny, inaczej mówiąc, obserwujemy zjawisko *fotoprzewodnictwa*. Zanim poznamy budowę i zasadę działania fotorezystora, przypomnijmy podstawowe informacje na temat półprzewodników oraz zjawiska fotoelektrycznego wewnętrznego.

Przewodnictwo elektryczne w półprzewodnikach

Półprzewodniki samoistne w temperaturze zera bezwzględnego są izolatorami (wynika to z braku swobodnych nośników prądu elektrycznego), natomiast wskutek wzrostu temperatury zaczynają przewodzić prąd elektryczny. Energia termiczna sprawia, że część elektronów walencyjnych może oderwać się od atomów półprzewodnika i stać się nośnikami prądu elektrycznego. Zgodnie z teorią pasmową ciała stałego powiedzielibyśmy, że elektrony uzyskują energię E_g potrzebną na przejście z *pasma walencyjnego* do *pasma przewodnictwa*. W paśmie walencyjnym pozostają natomiast puste miejsca po "wyrwanym" elektronie tzw. dziury, które są dodatnimi nośnikami prądu. Wartość energii E_g , która oddziela pasmo walencyjne od pasma przewodnictwa, nazywamy *przerwą energetyczną* i zależy od rodzaju półprzewodnika. Należy zaznaczyć, że koncentracja nośników prądu w półprzewodnikach, nawet w stosunkowo wysokich temperaturach, jest o ponad dziesięć rzędów mniejsza w porównaniu z dobrymi przewodnikami. Przydatność półprzewodników samoistnych w technologii można znacznie poprawić, wprowadzając do ich sieci krystalicznych bardzo niewielką ilość odpowiednio dobranych obcych atomów zwanych domieszkami. Istnieją dwa typy domieszkowania zwane typem *n* oraz typem *p*.

Prześledźmy proces domieszkowania na przykładzie krystalu krzemu. Krzem jest pierwiastkiem czterowartościowym. Jego atomy tworzące sieć krystaliczną łączą się z czterema najbliższymi sąsiadami, tworząc wiązania kowalencyjne. Jeżeli do sieci krystalicznej krzemu "wbudujemy" na przykład pięciowartościowy atom fosforu, cztery z elektronów walencyjnych atomu fosforu stworzą wiązania z otaczającymi go atomami krzemu. Piąty elektron, niebiorący udziału w wiązaniu, jest słabo związany z rdzeniem jonu fosforu i stosunkowo niewielka energia E_d

($E_d \ll E_g$) wystarczy, aby go oderwać, powodując wzrost przewodnictwa elektrycznego półprzewodnika. Atom fosforu nazywamy *donorem*, ponieważ łatwo dostarcza elektron do pasma przewodnictwa, natomiast półprzewodnik domieszkowany w powyższy sposób nazywamy półprzewodnikiem typu *n*, gdyż nośnikami większościowymi prądu są ujemnie naładowane elektrony (j. ang. *negative* - ujemny).

Jeżeli w sieć krystaliczną krzemu wbudujemy trójwartościowy atom, na przykład glinu, może on stworzyć wiązania kowalencyjne jedynie z trzema sąsiednimi atomami krzemu. Tym samym w jednym z wiązań pomiędzy atomem glinu i krzemu brakuje elektronu (jest dziura). Jeżeli dostarczymy stosunkowo niewielką energię E_a ($E_a \ll E_g$) elektronowi z sąsiedniego wiązania, zapełnimy tę dziurę, tworząc jednocześnie kolejną. Proces ten może dalej postępować i dziura będzie poruszać się w sieci krystalicznej. Atom glinu nazywamy *akceptorem*, gdyż przyjmuje elektron z sąsiedniego wiązania lub, inaczej mówiąc, z pasma walencyjnego krzemu. Tak domieszkowany półprzewodnik nazywamy półprzewodnikiem typu *p*, gdyż nośnikami większościowymi prądu są dodatnio naładowane dziury (j. ang. *positive* - dodatni).

Zjawisko fotoelektryczne wewnętrzne

Jak wspomniano, ażeby oderwać elektron walencyjny od atomu półprzewodnika samoistnego, należy dostarczyć mu pewnej minimalnej energii E_g równej przerwie energetycznej. Energię tę mogą dostarczyć drgania termiczne, ale również na przykład promieniowanie świetlne. Jeżeli w wyniku promieniowania świetlnego wewnątrz półprzewodnika powstają pary dziura-elektron, to takie zjawisko nazywamy zjawiskiem fotoelektrycznym wewnętrznym. Zjawisko to ukazuje nam cząsteczkową naturę światła. Żeby doszło do uwolnienia elektronu walencyjnego, kwant promieniowania świetlnego (foton) musi mieć energię co najmniej równą E_g . Energia fotonu E_f zależna jest od częstotliwości fali świetlnej ν w następujący sposób:

$$E_f = h\nu, \quad (1)$$

gdzie $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ Js jest stałą Plancka. Tym samym możemy zapisać warunek na zaistnienie zjawiska fotoelektrycznego wewnętrznego w półprzewodniku samoistnym:

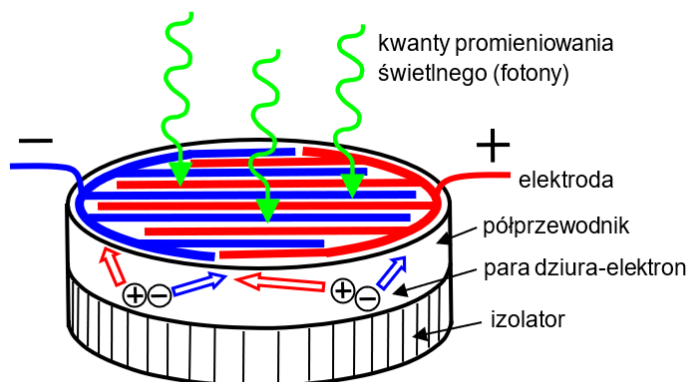
$$h\nu \geq E_g. \quad (2)$$

Jeżeli mamy do czynienia z półprzewodnikami domieszkowanymi typu *n* lub *p*, minimalne energie potrzebne do pojawienia się swobodnych nośników prądu są mniejsze niż E_g i wynoszą E_d i E_a odpowiednio dla półprzewodników typu *n* i *p*. Tym samym zjawisko fotoprzewodnictwa może zostać wywoływane światłem o stosunkowo niewielkiej częstotliwości.

Budowa i zasada działania fotorezystora

Fotorezystor ma najprostszą budowę wśród półprzewodnikowych detektorów światła. W zasadzie wystarczyłaby jedynie płytka półprzewodnikowa z podłączonymi do niej dwiema elektrodami. Zwykle jednak fotorezystory tworzy się tak, jak to schematycznie przedstawiono na rys. 1. Na okrągłą płytkę izolatora nanosi się warstwę półprzewodnika oraz dwie metaliczne, grzebieniowe elektrody. Całość przykryta jest przezroczystą, przeciwo odbiciową warstwą ochronną (nie zamieszczono jej na rysunku).

Prześledźmy działanie fotorezystora przy założeniu, że mamy do czynienia z półprzewodnikiem samoistnym. Jeżeli na fotoogniwo pada światło o dostatecznie dużej częstotliwości ($h\nu \geq E_g$), w jego wnętrzu zachodzi zjawisko fotoelektryczne wewnętrzne. Powstałe pary dziura-elektron (tzw. *fotodziura* i *fotoelektron*) mogą brać udział w przewodnictwie prądu



Rys. 1 Schemat budowy fotorezystora.

elektrycznego. Są to tak zwane *nośniki nadmiarowe*. Elektrony dyfundują do dodatniej elektrody, natomiast dziury do ujemnej. Ze względu na możliwość wystąpienia *procesu rekombinacji* (ponownego łączenia się dziury i elektronu), elektrody mają kształt grzebieniowy, aby powstałe nośniki prądu elektrycznego dzieliła od nich niewielka odległość. Wzrost koncentracji elektronów Δn oraz dziur Δp prowadzi do proporcjonalnego wzrostu

przewodnictwa elektrycznego półprzewodnika $\Delta\sigma$ zgodnie z zależnością:

$$\Delta\sigma = e(\mu_n\Delta n + \mu_p\Delta p), \quad (3)$$

gdzie e - ładunek elementarny, μ_n i μ_p - ruchliwości elektronów i dziur.

W przypadku, gdy mamy do czynienia z półprzewodnikami domieszkowanymi, budowa fotorezystora jest taka sama, natomiast wpływ oświetlenia na proces przewodnictwa jest bardziej złożony i różnorodny. Jak już wiemy, w tym przypadku energie potrzebne do wywołania przewodnictwa są znacznie mniejsze, dlatego takie fotorezystory są bardziej czułe. Wzrost przewodnictwa pod wpływem oświetlenia uzależniony jest od rodzaju półprzewodnika, sposobu domieszkowania, natężenia i zakresu widmowego światła. Dobierając odpowiednio półprzewodnik, możemy stworzyć fotorezystor o pożądanym zakresie czułości widmowej.

Natężenie prądu fotoelektrycznego płynącego przez fotorezystor można zapisać następująco:

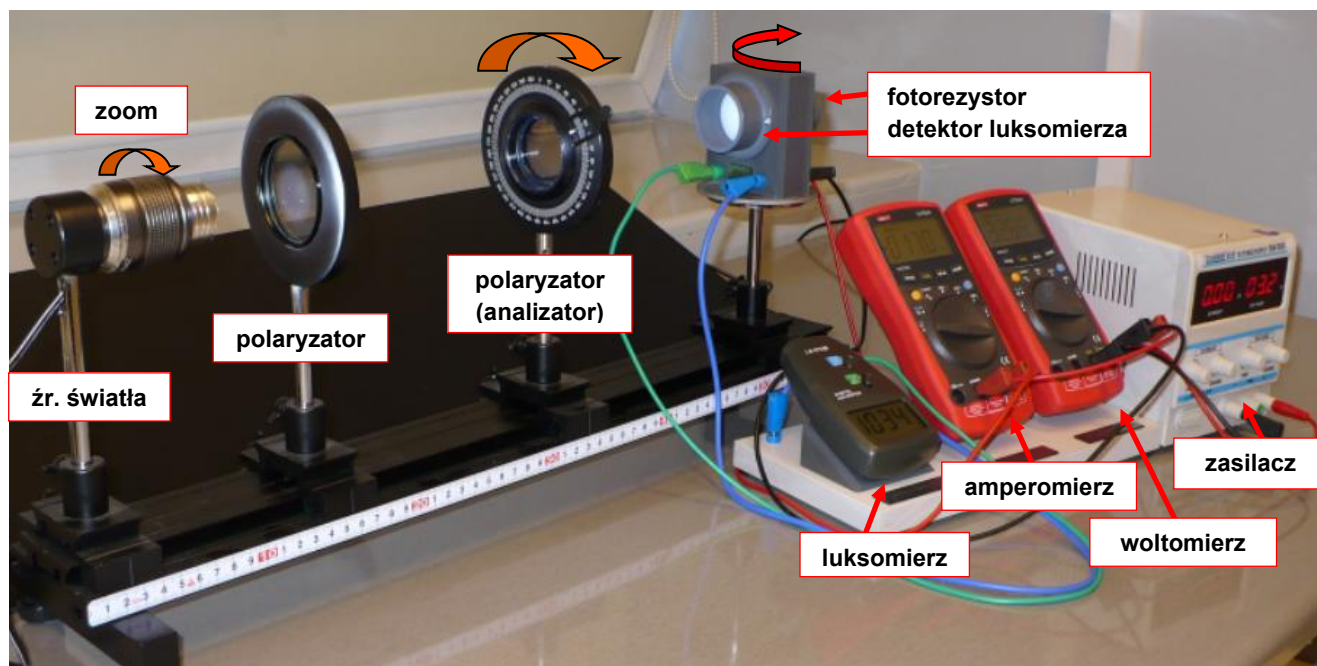
$$I = kUE^\gamma, \quad (4)$$

gdzie: U - napięcie na fotorezystorze, E - natężenie oświetlenia, k i γ - stałe zależne od półprzewodnika i rodzaju domieszkowania ($0,5 < \gamma < 1$).

Warto dodać, że przewodnictwo półprzewodnika zależy nie tylko od oświetlenia, ale również od temperatury, przez co fotorezystory są wrażliwe jej zmianę. Jest to jedna z ich wad.

Układ pomiarowy

Do badań fotorezystora wykorzystywany jest układ przedstawiony na rys. 2. Składa się on ze źródła światła (lampa LED), dwóch polaryzatorów, luksomierza, zasilacza, woltomierza, miliamperomierza oraz fotorezystora. Źródło światła posiada pokrętko zoom umożliwiające ogniskowanie strumienia światła.

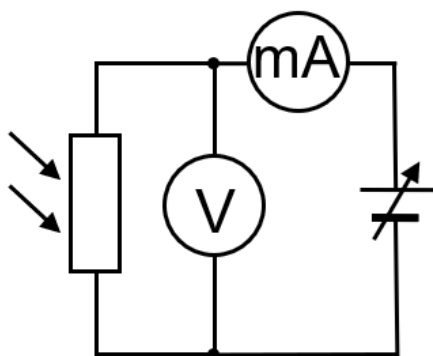


Rys. 2 Układ eksperymentalny do badania fotorezystora.

Fotorezystor (FR) oraz detektor luksomierza (DL) znajdują się po przeciwnych stronach obrotowej oprawy. Ich zamiany dokonuje się poprzez obrót kółka oprawy o 180 stopni. Polaryzatory służą do regulacji natężenia światła padającego na fotorezystor. Pierwszy z nich polaryzuje światło wysłane przez źródło, a drugi (zwany dalej analizatorem) służy do osłabienia strumienia światła. Analizator zamocowany jest w obrotowej oprawie wyposażonej w podziałkę kątową, dzięki czemu można precyzyjnie zmieniać kąt α pomiędzy kierunkami polaryzacji polaryzatora i analizatora. Korzystając z prawa Malusa oraz założenia, że natężenie oświetlenia jest proporcjonalne do natężenia światła, można zapisać następującą zależność:

$$E = E_0 \cos^2 \alpha, \quad (5)$$

gdzie E_0 jest natężeniem oświetlenia fotorezystora w przypadku, gdy polaryzator i analizator mają równe kierunki polaryzacji ($\alpha = 0$), natomiast E to natężenie oświetlenia fotorezystora dla dowolnego kąta α .



Rys. 3 Schemat elektryczny układu.

Aby zrealizować cele ćwiczenia, konieczna jest możliwość pomiaru: natężenia oświetlenia fotorezystora, napięcia na fotorezystorze oraz natężenia prądu płynącego przez fotorezystor. Posłużą do tego luksomierz, woltomierz i miliamperomierz. Układ elektryczny został

schematycznie zaprezentowany na rys. 3. Źródłem prądu stałego jest stabilizowany zasilacz o zakresie napięcia $0 - 15V$, natomiast dwa multimetry spełniają rolę woltomierza i miliamperomierza. Do badań wykorzystano fotorezystor zbudowany na bazie siarczku kadmu (CdS) o maksymalnej czułości dla światła o długości fali $\lambda = 560 \text{ nm}$.

Pomiary i obliczenia

Ćwiczenie składa się z kilku etapów. Na początku należy wykonać szereg pomiarów natężenia oświetlenia w zależności od kąta skręcenia analizatora α . W tym celu musimy włączyć źródło światła oraz luksomierz, a następnie ustawić jego detektor w kierunku źródła światła. Posługując się pokrętką zoom źródła światła, należy zogniskować strumień światła tak, aby dla kąta skręcenia analizatora $\alpha = 0^\circ$ wartość natężenia oświetlenia wynosiła około 1800 lx . Zmieniając kąt skręcenia analizatora, należy zapisywać wartości natężenia oświetlenia. W ten sposób przyporządkujemy wartościom kąta α wartości natężenia oświetlenia E . Następnie należy obrócić fotorezystor w kierunku źródła światła, włączyć elementy układu elektrycznego i wyznaczyć zależności natężenia prądu płynącego przez fotorezystor od napięcia $I = f(U)$ dla trzech wybranych wartości natężenia oświetlenia E (trzech wartości kąta α). Kolejnym etapem ćwiczenia jest wyznaczenie zależności natężenia prądu od natężenia oświetlenia $I = f(E)$ dla trzech wybranych napięć U na fotorezystorze. Natężenie oświetlenia należy zmieniać poprzez obrót analizatora. Następnie, korzystając z wyników pomiarów, należy wyznaczyć rezystancję R fotorezystora uzyskaną dla różnych natężeń oświetlenia stosując prawo Ohma:

$$R = \frac{U}{I}. \quad (6)$$

Ostatecznie należy wykreślić zależności $I = f(U)$ ($E = \text{const}$), $I = f(E)$ ($U = \text{const}$), $R = f(E)$ ($U = \text{const}$) oraz zapisać wnioski.

Przebieg ćwiczenia

A. Wyznaczenie zależności natężenia oświetlenia E od kąta skręcenia analizatora α

1. Włączyć lampę i luksomierz, obrócić detektor luksomierza (DL) w stronę lampy a analizator ustawić pod kątem $\alpha = 0^\circ$. Obracając pokrętką zoom lampy, ustawić natężenie oświetlenia na około 1800 lx .
2. Zmieniać kąt skręcenia analizatora α co 5° w zakresie $0 - 90^\circ$ oraz mierzyć natężenie oświetlenia E . Pomiary powtórzyć, a następnie uśrednić wyniki natężenia oświetlenia uzyskane dla poszczególnych wartości α .

B. Wyznaczenie zależności natężenia prądu od napięcia $I = f(U)$

1. Wyłączyć luksomierz i obrócić fotorezystor (FR) w stronę światła.
2. Włączyć zasilacz, woltomierz i miliamperomierz, a następnie, zmieniając napięcie zasilacza co 1 V w zakresie $0 - 10 \text{ V}$, wykonać pomiary natężenia prądu I przy stałej wartości natężenia oświetlenia E (dla $\alpha = 0^\circ$). Pomiar powtórzyć dwukrotnie dla innych wartości natężenia oświetlenia.
3. Na wspólnym wykresie przedstawić zależności natężenia prądu od napięcia $I = f(U)$ oraz zapisać wnioski.

C. Wyznaczenie zależności natężenia prądu od natężenia oświetlenia $I = f(E)$ oraz rezystancji fotorezystora od natężenia oświetlenia $R = f(E)$

1. Ustawić na zasilaczu napięcie $U = 6 \text{ V}$, a następnie, zmieniając kąt skręcenia analizatora α co 5° w zakresie $0 - 90^\circ$, zapisywać wartości natężenia prądu. Pomiar powtórzyć dla dwóch kolejnych napięć (4 V i 2 V).

2. Korzystając z wyników uzyskanych w punkcie A , przyporządkować kątom skręcenia analizatora α odpowiadające im wartości natężenia oświetlenia E .
3. Na wspólnym wykresie przedstawić zależności natężenia prądu od natężenia oświetlenia $I = f(E)$ oraz zapisać wnioski.
4. Wyliczyć rezystancję fotorezystora R dla różnych wartości natężenia oświetlenia E , korzystając z wyników pomiarów natężenia prądu I dla napięcia $U = 6 \text{ V}$.
5. Wykreślić zależność rezystancji fotorezystora od natężenia oświetlenia $R = f(E)$ oraz zapisać wnioski.

Badanie zjawiska absorpcji światła przez roztwory

Cele ćwiczenia

- Wyznaczenie zależności absorbancji wodnych roztworów rodaminy od jej stężenia oraz sprawdzenie słuszności prawa Lamberta-Beera.
- Wyliczenie molowego współczynnika absorpcji dla rodaminy.
- Porównanie widm transmisji dla różnego rodzaju płytek szklanych oraz filtrów.

Wprowadzenie

Światło po przejściu przez ośrodek materialny ulega osłabieniu. Przeanalizujmy drogę monochromatycznego światła o natężeniu I_0 padającego prostopadle na kufkę wypełnioną substancją absorbującą lub jej roztworem. Jak widać na rys. 1, natężenie światła po przejściu przez kufkę maleje do wartości I . Zjawisko osłabienia światła może być spowodowane:

- odbiciem światła od powierzchni kufki związanym z różnicą współczynników załamania światła pomiędzy graniczącymi ośrodkami ($I_{od} = I_{od1} + I_{od2}$)
- rozpraszaniem światła przez skupiska cząstek w substancji, rysy na powierzchni kufki itp. (I_r)
- absorpcją czyli pochłanianiem światła wskutek oddziaływania z materią (I_{abs}).

Możemy więc zapisać, że natężenie światła padającego rozkłada się na cztery składowe:

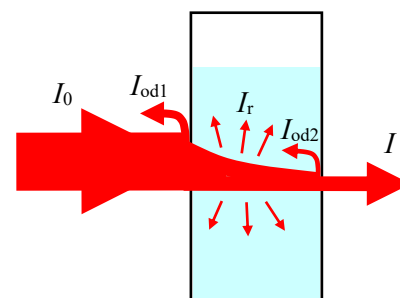
$$I_0 = I_{od} + I_r + I_{abs} + I. \quad (1)$$

W odróżnieniu do zjawisk obicia i rozpraszania zjawisko absorpcji wiąże się z zamianą energii fal elektromagnetycznych na inne formy energii. Istotną rolę w zjawisku absorpcji światła odgrywa obecność w związku grup atomowych nazywanych chromoforami. Zawierają one sprzężone lub odosobnione atomowe wiązania podwójne, które szczególnie łatwo ulegają wzbudzeniu kwantami promieniowania świetlnego (fotonami), przechodząc na wyższe poziomy energetyczne. Foton może zostać pochłonięty w przypadku, gdy jego energia E_f równa się różnicy energii ΔE pomiędzy poziomami energetycznymi absorbującej cząsteczki

$$E_f = \frac{hc}{\lambda} = \Delta E, \quad (2)$$

gdzie h - stała Plancka, c - prędkość światła w próżni, λ - długość fali świetlnej. W przeciwnym przypadku energia promieniowania nie jest absorbowana. Absorpcja promieniowania może więc przebiegać selektywnie, silnie dla kwantów promieniowania świetlnego o energiach wzbudzenia lub wcale dla pozostałych. Poznanie mechanizmów związanych ze zjawiskiem absorpcji światła umożliwia więc uzyskanie informacji o budowie molekularnej związku.

Zjawisko absorpcji ma bardzo istotny wpływ na obraz otaczającego nas świata. Zwykle przedmioty widzimy, gdyż są oświetlane światłem białym pochodzącym od Słońca lub sztucznych źródeł światła. Barwa postrzeganego przez nas przedmiotu zależy w dużej mierze od zjawiska absorpcji. Na przykład, obserwując białą kartkę, możemy stwierdzić, że wszystkie fale świetlne są podobnie odbijane i rozpraszane. Narysowana na niej czarna kreska absorbuje większość padającego na nią światła. Barwnik kredki czerwonej pochłania promieniowanie fioletowe, niebieskie, zielone i żółte, a odbija czerwone. Wybierając kolor farby, tak naprawdę dobieramy kompozycję cząsteczek absorbujących odpowiednie barwy. Barwy dopełniające (nie zaabsorbowane) dadzą w efekcie oczekiwany kolor.



Rys. 1 Przejście światła przez kufkę wypełnioną substancją absorbującą.

Prawa absorpcji światła

Jak już wiemy, pochłanianie światła jest procesem kwantowym, jednak w analizie zjawiska wygodnie jest posługiwać się natężeniem światła, które dla światła monochromatycznego jest proporcjonalne do liczby kwantów promieniowania. Omówmy proces absorpcji monochromatycznego światła przez roztwory.

Pomiary absorpcji światła wykonuje się w zestawieniu z odnośnikiem. Umożliwia to wyeliminowanie wpływu odbicia oraz absorpcji przez kuwetę i rozpuszczalnik. Jeżeli roztwór jest klarowny, rozproszenie jest pomijalnie małe, więc równanie (1) przybierze postać:

$$I_0 = I_{abs} + I. \quad (3)$$

Wielkościami fizycznymi charakteryzującymi ilościowo proces absorpcji są *absorbancja* A i *transmitancja* T zdefiniowane następująco:

$$A = \log \frac{I_0}{I}, \quad T = \frac{I}{I_0}. \quad (4)$$

Spadek natężenia światła jest związany z rodzajem oraz liczbą cząsteczek substancji absorbującej, jakie napotyka na swej drodze równoległa, monochromatyczna wiązka światła. W roztworach liczba napotkanych cząsteczek uzależniona jest od stężenia substancji oraz drogi, jaką pokonuje światło w kuvecie. Spadek natężenia światła na elementarnej drodze dx wyraża poniższa zależność:

$$dI = -kI dx, \quad (5)$$

gdzie k jest liniowym współczynnikiem proporcjonalności zależnym głównie od rodzaju i stężenia substancji absorbującej oraz długości fali absorbowanego światła. Jeżeli wiązka światła przebiega przez warstwę jednorodnego ośrodka o grubości L , równanie (5) można przekształcić i obustronnie scałkować w odpowiednich granicach:

$$\int_{I_0}^I \frac{dI}{I} = -k \int_0^L dx. \quad (6)$$

Obliczenie powyższej całki prowadzi do równania zwanego *prawem Lamberta*:

$$I = I_0 e^{-kL}. \quad (7)$$

Korzystając z faktu, że $\log(e) = 0,4343$, możemy zapisać następującą zależność na absorbancję:

$$\log \frac{I_0}{I} = aL, \quad (8)$$

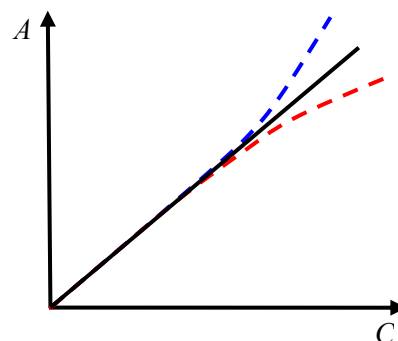
gdzie a jest współczynnikiem absorpcji równym $0,4343 \cdot k$. Równanie (8) jest więc inną formą zapisu prawa Lamberta mówiącym, że, jeżeli monochromatyczne światło przechodzi przez jednorodny ośrodek, to absorbancja jest proporcjonalna do grubości tego ośrodka. Prawo Lamberta można rozszerzyć, wykorzystując *prawo Beera*, zgodnie z którym dla roztworów o niewielkim stężeniu absorbancja jest proporcjonalna do stężenia roztworu C . Łącząc prawa Lamberta i Beera, uzyskujemy *prawo Lamberta-Beera*:

$$A = aLC, \quad (9)$$

gdzie C oznacza względne, objętościowe stężenie substancji absorbującej w przezroczystym rozpuszczalniku.

Treść prawa Lamberta-Beera można zapisać następująco:

Jeżeli na roztwór o niewielkim stężeniu pada monochromatyczna, równoległa wiązka światła, to



Rys. 2 Zależności absorbancji od stężenia roztworu. Linia ciągła - układ spełniający prawa absorpcji, krzywe przerywane - przykłady odstępstw od praw absorpcji.

absorbancja A jest proporcjonalna do grubości warstwy absorbującej L i stężenia roztworu C .

W równaniu (9) stężenie C jest wielkością bezwymiarową, ale często w badaniach wykorzystuje się pojęcie stężenia molowego C_M [mol/dm³]. W takim przypadku prawo Lamberta-Beera przybierze postać:

$$A = \varepsilon L C_M, \quad (10)$$

gdzie ε jest molowym współczynnikiem absorpcji [dm³/mol·cm].

Współczynnik absorpcji charakteryzuje badaną substancję, natomiast absorbancja jest wielkością związaną z właściwościami konkretnej próbki. Należy jednak zaznaczyć, że zarówno współczynnik absorpcji jak i absorbancja zależą od długości fali świetlnej, dlatego, podając te wielkości, należy również określić długość fali, dla której zostały wyznaczone.

Odstępstwa od praw absorpcji

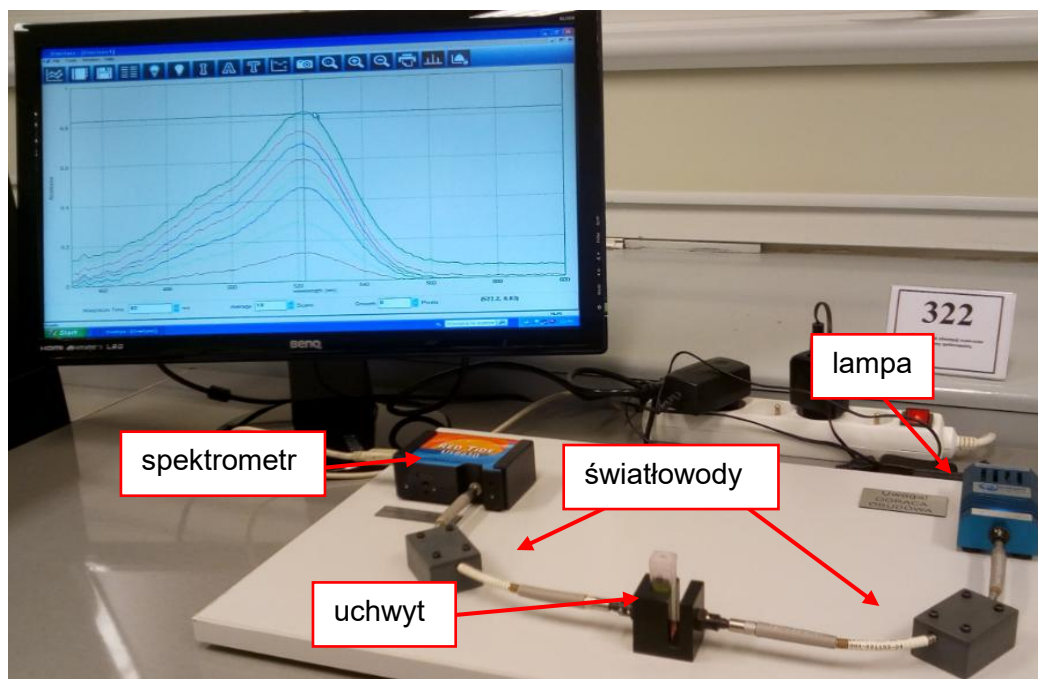
Zgodnie z prawami Beera i Lamberta-Beera absorbancja liniowo zależy od stężenia roztworu. W praktyce jednak często obserwuje się odstępstwa od tych praw (rys. 2). Powody tych nieścisłości z teorią są różne, np:

- zbyt duże stężenie roztworu powodujące: łączenie się cząsteczek, polimeryzację, solwatację
- oddziaływanie rozpuszczalnika z cząsteczkami substancji badanej
- zmętnienie roztworu
- brak monochromatyczności wiązki
- zbyt duże natężenie padającego światła.

Układ pomiarowy i zasada pomiaru

Do pomiarów absorpcji światła wykorzystuje się najczęściej spektrofotometry, w których absorbancję mierzy się kolejno dla każdej emitowanej przez źródło długości fali. W zastosowanym układzie pomiarowym użyto spektrometr (zakres pomiarowy 300 - 1000 nm) połączony z komputerem, uchwyt na próbki oraz źródło światła białego. W tym przypadku emitowana i równocześnie rejestrowana jest wiązka światła w szerokim zakresie spektralnym (wiele długości fal). Zaletą takiego układu jest możliwość pomiaru absorbancji równocześnie dla całego zakresu spektralnego, natomiast wadą możliwość niewielkiego przekłamania wyników pomiarowych w przypadku niektórych substancji. W warunkach studenckiej pracowni fizycznej dokładność zastosowanej metody pomiarowej jest dostateczna, ale musimy mieć świadomość, że w badaniach profesjonalnych właściwe jest użycie spektrofotometru.

Na rys. 3 przedstawiono układ pomiarowy. Światło ze źródła przesyłane jest do uchwytu próbek za pomocą światłowodu. Po przejściu przez badaną próbkę światło jest kierowane do spektrometru kolejnym światłowodem. Obsługę spektrometru umożliwia program *Overture*, który należy uruchomić po włączeniu komputera. Oznaczenia wybranych funkcji programu znajdują się na stanowisku pomiarowym.



Rys. 3 Układ eksperymentalny do badania absorpcji światła.


Pomiary i obliczenia




Ćwiczenie składa się z dwóch etapów. Pierwszy z nich polega na wyznaczeniu zależności absorbancji od stężenia molowego wodnych roztworów rodaminu $A = f(C_M)$, a następnie - przy skorzystaniu z równania (10) - wyliczeniu molowego współczynnika absorpcji ϵ . Do pomiaru absorbancji wodnych roztworów rodaminu wykorzystywane są kuwety, w których droga światła wynosi $L = (1,00 \pm 0,01)$ cm. W celu wyeliminowania wpływu zjawisk odbicia, rozproszenia i absorpcji pochodzących od kuwety i rozpuszczalnika na początku pomiarów kalibruje się przyrząd przy pomocy tzw. kuwety odniesienia. Polega to na wstawieniu do układu pomiarowego kuwety wypełnionej rozpuszczalnikiem (stężenie 0 mol/dm^3) i zarejestrowaniu widma odniesienia. Po skalibrowaniu przyrządu można przystąpić do pomiarów absorbancji zgodnie z opisem przebiegu ćwiczenia.

W drugim etapie ćwiczenia należy zarejestrować widma transmitancji dla szeregu płytek szklanych oraz filtrów. Pomiaru te mają na celu przybliżenie zjawiska absorpcji oraz zasady działania filtrów światła.





Przebieg ćwiczenia

A. Wyznaczenie zależności absorbancji wodnych roztworów rodaminu od jej stężenia oraz sprawdzenie słuszności prawa Lamberta-Beera


1. Uruchomić program *Overture*, włączyć lampę i odczekać ok. 5 min.
2. Do uchwytu wstawić kuwetę z rozpuszczalnikiem - nr 0 (kuwetę odniesienia). Uwaga: chwytać kuwety za ich górną, matową część tak, aby nie zabrudzić fragmentu, przez który przechodzi światło. Dobrać czas integracji ms, aby intensywność promieniowania nie przekraczała 4000 impulsów.
3. Zasłonić wiązkę światła docierającą do kuwety przy pomocy przesłony. Ustawić uśrednianie sygnału na 10 Scans oraz wcisnąć przycisk „zapamiętaj widmo ciemności” .


4. Odślonić wiązkę światła. Wcisnąć przycisk „zapamiętaj widmo odniesienia” .
5. W celu rejestracji widma absorpcji wcisnąć ikonę „absorbancja” .
6. Dla roztworu o najmniejszym stężeniu (kuweta nr 1) wykonać pomiar absorbancji. Wyznaczyć z widma długość fali λ_{\max} , dla której występuje maksymalna absorpcja (klikając na krzywej) oraz odczytać absorbancję z położenia kursora. W razie potrzeby powiększyć obraz .
7. Zarejestrować widma absorpcji dla pozostałych roztworów (kuwety o numerach 2-8 oraz X). Odczytać z nich wartości absorbancji dla długości fali λ_{\max} wyznaczonej wcześniej.
8. Wykreślić zależność absorbancji w funkcji molowego stężenia roztworu $A = f(C_M)$.
9. Korzystając z metody regresji liniowej, wyznaczyć współczynnik nachylenia prostej zależności $A = f(C_M)$. Do obliczeń należy wziąć punkty z zakresu niskich stężeń spełniające prawo Lamberta-Beera (punkty tworzące prostą).
10. Korzystając z wyliczonego współczynnika nachylenia prostej oraz równania (10), wyznaczyć molowy współczynnik absorpcji ε dla rodaminy oraz jego niepewność pomiarową, a następnie wyznaczyć stężenie roztworu w kувecie oznaczonej X.

B. Obserwacja widm transmisji

1. Wyjąć kувetę i wybrać nowy wykres, klikając ikonę . Dobrać czas integracji, aby intensywność promieniowania nie przekraczała 4000 impulsów.
2. Wstawić przesłonę oraz wcisnąć przycisk „zapamiętaj widmo ciemności” .
3. Odślonić wiązkę światła. Wcisnąć przycisk „zapamiętaj widmo odniesienia” .
4. Wcisnąć ikonę transmitancja . Zaobserwować widma transmisji dla płytek wykonanych z różnego rodzaju szkła oraz filtrów. Zapisz wnioski z obserwacji.

Uwaga!

W trakcie pomiarów wygodnie jest skorzystać z przycisku „migawka” , który służy do „zamrożenia” bieżącego widma (pomiaru można dalej wykonywać).

W celu zapisu danych należy wcisnąć ikonę „zapisz”  i wybrać rozszerzenie *.csv.