

Ćwiczenie 418

Pomiar prędkości światła

Przed zapoznaniem się z instrukcją i przystąpieniem do wykonywania ćwiczenia należy opanować następujący materiał teoretyczny:

1. Równania Maxwella, fale elektromagnetyczne [1] lub [2] lub [3]
2. Prędkość światła i metody jej wyznaczania [1] lub [2] lub [3] lub [4]

Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest wyznaczenie prędkości światła przy pomocy metody korzystającej z modulacji natężenia wiązki światła.

Opis zjawiska

Światło jest falą elektromagnetyczną, która w ośrodku materialnym rozchodzi się zgodnie z prędkością v określoną wzorem wywodzącym się z równań Maxwella:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\epsilon_0\mu\mu_0}} \quad (1)$$

gdzie $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ F/m oznacza przenikalność elektryczną próżni, $\mu_0 = 1,257 \cdot 10^{-6}$ H/m – przenikalność magnetyczną próżni, ϵ – względną przenikalność elektryczną ośrodka, μ – względną przenikalność magnetyczną ośrodka. Prędkość światła w próżni, tradycyjnie oznaczana przez c , wynosi

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0\mu_0}} \quad (2)$$

Stąd współczynnik załamania światła n ośrodka materialnego dany jest wzorem

$$n = \frac{c}{v} = \sqrt{\epsilon\mu} \quad (3)$$

Ponieważ dla pól magnetycznych o częstotliwości promieniowania widzialnego $\mu = 1$, to dla ośrodków przezroczystych $n = \sqrt{\epsilon}$.

Prędkość światła jest stałą fizyczną o podstawowym znaczeniu. Zgodnie z teorią względności i wynikami wielu doświadczeń jest to największa prędkość rozchodzenia się oddziaływań w przyrodzie, stała we wszystkich inercjalnych układach odniesienia.

Metoda pomiaru

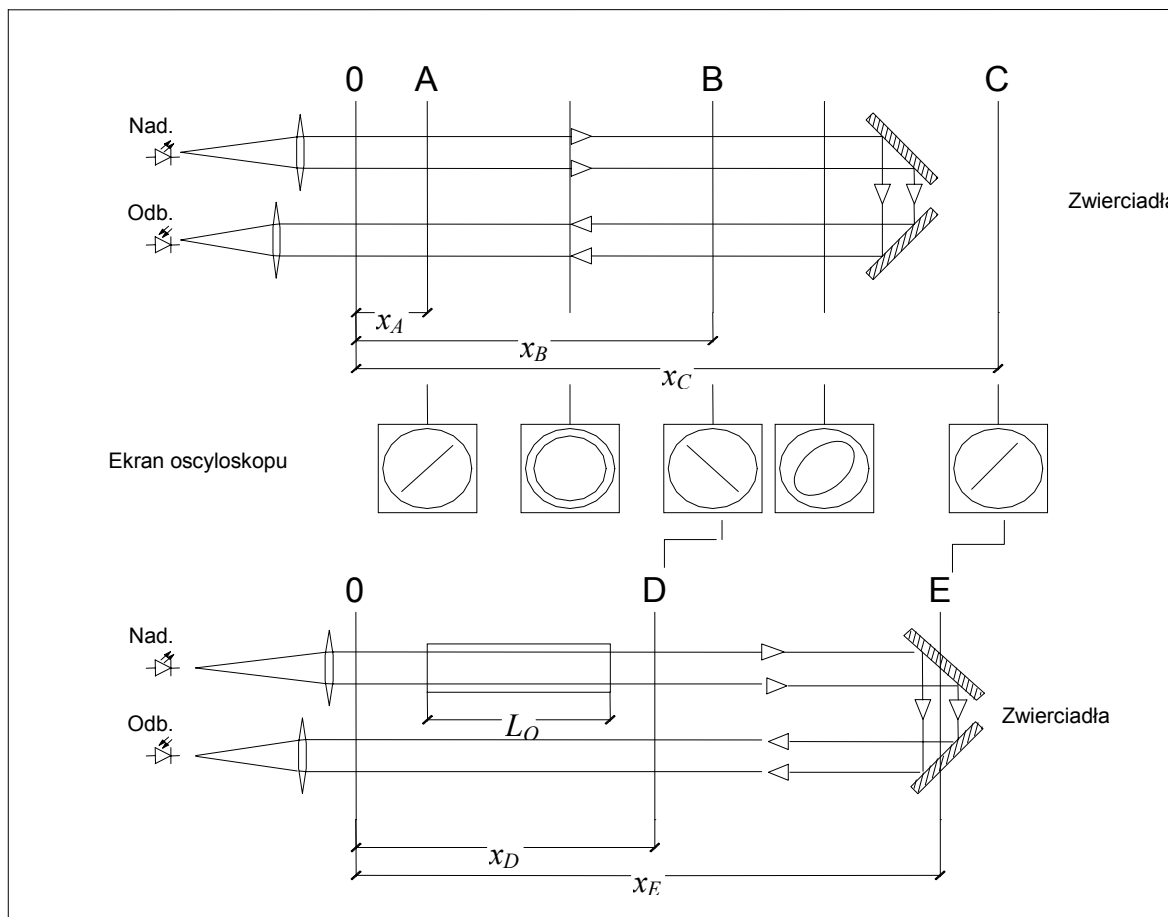
Istota pomiaru polega na określeniu czasu, w jakim światło przebywa określoną, stosunkowo niewielką drogę L (około 3 m). Czas ten jest bardzo krótki, więc nie mierzy się go bezpośrednio. Dla jego wyznaczenia stosuje się następującą metodę.

Jako źródła światła używa się diody, która wysyła promieniowanie o natężeniu modulowanym z częstotliwością f równą około 50 MHz. Światło dochodzi do zwierciadeł, odbija się, wraca i jest odbierane przez detektor (rys. 1). Pomiedzy sygnałem modulującym i odebrany występuje różnica faz związana z opóźnieniem o czas w jakim światło pokonuje całą drogę. Czas ten można obliczyć jeśli zmierzy się różnicę faz. Można ją określić podając obydwa sygnały na wejścia X i Y oscyloskopu i obserwując krzywe Lissajous. Na ogół mają one kształt elips, a w szczególnych przypadkach – okręgu lub prostych. Proste pojawiają się wtedy, gdy przesunięcie fazowe wynosi 0 lub wielokrotność π . Proste są nachylone w lewo lub w prawo tj. pod kątem α lub $-\alpha$ względem poziomu. Kąt nachylenia prostej zależy od wzmocnienia któregośkolwiek toru oscyloskopu. Przesunięcia fazowe odpowiadające dwóm kierunkom nachylenia (tj. dwóm znakom kąta) różnią się o π . Prostim o tym samym kierunku nachylenia odpowiadają przesunięcia fazowe różniące się o 2π .

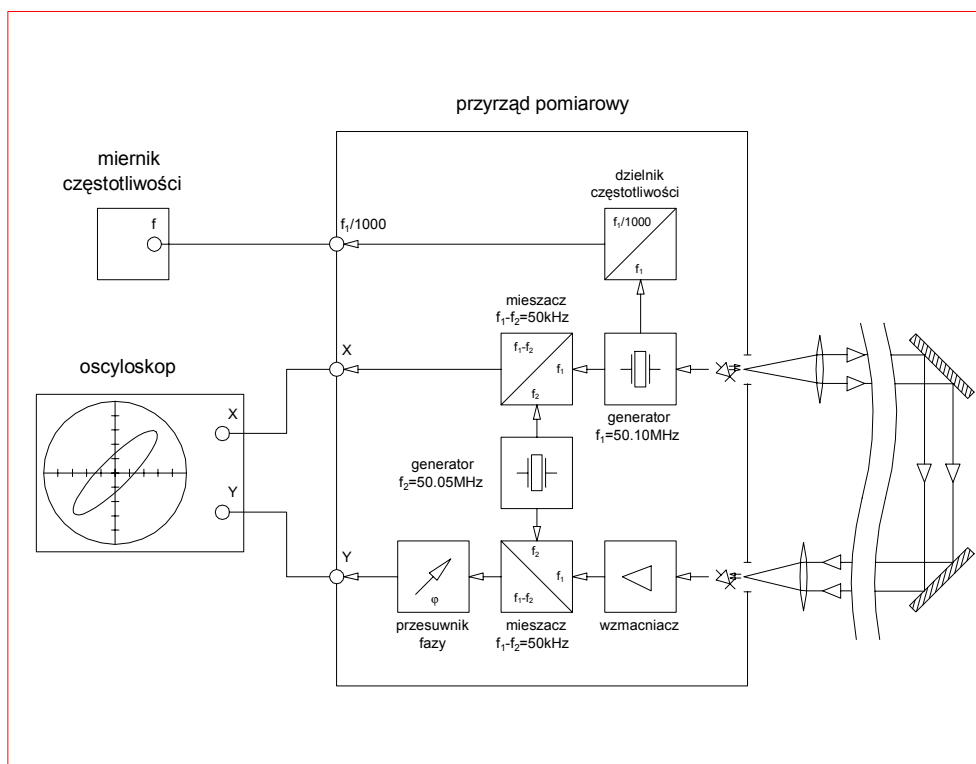
Jednakowo nachylone proste można otrzymać przy dwóch położeniach zwierciadeł odległych o taki odcinek L , który pociąga za sobą zmianę różnicy faz o 2π . Odpowiada ona zmianie opóźnienia czasowego o okres modulacji $T = 1/f$. Ponieważ czas T jest zużywany przez światło na dwukrotne przebycie odcinka L , to prędkość światła w powietrzu może być obliczona jako $c = 2L/T = 2Lf$. Podobnie, proste nachylone w przeciwnych kierunkach powstają przy położeniach zwierciadeł oddalonych o $L/2$, którym odpowiada różnica faz π , czyli opóźnienie o $T/2$. Ta relacja również pozwala wyznaczyć prędkość światła.

Opis układu pomiarowego

Schemat układu pomiarowego przedstawiają rysunki 1 i 2. Jego zasadniczą częścią jest przyrząd pomiarowy zawierający źródło światła jakim jest czerwona dioda elektroluminescencyjna oraz podzespoły służące do jej zasilania oraz detekcji światła. Dioda zasilana jest napięciem o częstotliwości około 50 MHz. Przy takim sposobie



Rys. 1. Schemat zestawu pomiarowego; u góry przedstawiono pomiar prędkości światła w powietrzu a u dołu – w ośrodku zawartym w kuwecie o długości L_0



Rys. 2. Szczegóły układu zasilania i detekcji

zasilania dioda wysyła impulsy światła z tą właśnie częstotliwością. Impulsy te po przebyciu pewnej drogi w ośrodku trafiają, dzięki układowi soczewek i zwierciadeł do detektora, którym jest fotodiody. Sygnał elektryczny otrzymywany z fotodiody ma taki sam kształt jak sygnał elektryczny, który pobudzał diodę nadawczą do świecenia jest jednak względem niego opóźniony. Czas opóźnienia zależy od długości drogi, którą musi przebyć światło zanim dotrze do detektora.

Pomiar prędkości światła opisaną tu metodą, przy stosowanych odległościach rzędu kilku metrów, wymaga użycia światła zmodulowanego o częstotliwości około 50 MHz. Bezpośredni pomiar czasu opóźnienia sygnału powracającego wymagałby zastosowania układów elektronicznych o wysokiej jakości. Dużo prościej jest zastosować do sygnału modulującego i odbieranego technikę mieszania częstotliwości zwaną heterodynowaniem (rys. 2). Pozwala ona na prowadzenie pomiarów dla sygnałów o częstotliwości różnicowej tj. dużo mniejszej niż używana do modulacji, z jednoczesnym zachowaniem relacji fazowych pomiędzy sygnałami. Dzięki temu do obserwacji krzywych Lissajous można zastosować standardowy oscyloskop.

W skład zestawu pomiarowego wchodzi też miernik częstotliwości, który pokazuje wartość 1000 razy mniejszą niż częstotliwość modulacji f .

Korzystając z tego układu można wyznaczyć prędkość rozchodzenia się światła w powietrzu oraz prędkość rozchodzenia się światła i współczynnik załamania światła w dowolnym ośrodku wypełniającym choćby częściowo przestrzeń pomiędzy źródłem i detektorem światła. W ćwiczeniu wyznacza się prędkość światła w wodzie. Zestaw pomiarowy zawiera odpowiednią kasetę w postaci rury o długości L_0 zamkniętej na końcach przezroczystymi pokrywami.

Warto zwrócić uwagę, że przy zmianie fazy pokręteł przesuwnika fazowego lub przesunięciem zwierciadeł istnieje pewien zakres nastaw przy którym obraz prostej na ekranie pozornie nie zmienia się mimo małych zmian fazy sygnałów X i Y. Efekt ten (związany z szerokością linii rysowanej na ekranie oscyloskopu) może mieć wpływ na dokładność pomiaru, co należy spróbować oszacować.

Przebieg pomiaru

Przed przystąpieniem do pomiarów dobrze jest włączyć przyrząd pomiarowy, oscyloskop i miernik częstotliwości na kilkanaście minut wcześniej.

Przyrząd pomiarowy posiada wyjścia dla sygnałów X, Y i sygnał z dzielnika częstotliwości. Wyjścia X i Y należy podłączyć do wejść kanałów X i Y oscyloskopu, oscyloskop nastawić przy pomocy pokręta podstawy czasu na tryb X-Y. Wzmocnienia kanałów X i Y należy tak dobrać, aby na ekranie oscyloskopu uzyskać możliwie duży obraz. W przypadku nieostrych obrazu należy go wyregulować, wygodnie to zrobić jeśli na ekranie widać niezbyt spłaszczoną elipsę.

Aby przygotować zestaw do pomiaru należy po włączeniu aparatury ustawić zwierciadła zawracające w skrajnym końcowym położeniu i tak wyregulować zwierciadła i ustawienie soczewek formujących wiązkę światła aby uzyskać najjaśniejsze oświetlenie fotodiody odbiorczej. Następnie ustawić na podporach kasetę z wodą i ewentualnie skorygować ustawienie układu optycznego w ten sposób aby usunięcie kasety nie miało istotnego wpływu na oświetlenie detektora, po czym usunąć kasetę.

Wyznaczanie prędkości światła w powietrzu

1. Zwierciadła zawracające ustawić w położeniu A (rys. 1).
2. Przy pomocy przesuwnika fazowego uzyskać na ekranie oscyloskopu obraz prostej nachylonej pod kątem α (około 45°), co oznacza, że nie występuje przesunięcie w fazie impulsów światła emitowanych i odbieranych.
3. Przesunąć zwierciadła do takiego położenia B, w którym obraz na ekranie oscyloskopu będzie prostą o nachyleniu $-\alpha$ i dalej do położenia C, w którym na ekranie oscyloskopu znów jest prosta taka jak w położeniu A. Zmierzyć odległości x_A , x_B i x_C .
4. Pomiar powtórzyć 8 do 10 razy.

Obliczenia wykonać na podstawie następującego rozumowania:

Droga przebyta przez światło pomiędzy położeniami A i B wynosi

$$L_{AB} = 2(x_B - x_A). \quad (4)$$

Została ona przebyta w czasie

$$t_{AB} = \frac{T}{2} = \frac{1}{2f}. \quad (5)$$

Prędkość światła w powietrzu wynosi więc:

$$c_{AB} = \frac{L_{AB}}{t_{AB}} = 4f(x_B - x_A). \quad (6)$$

Podobnie droga między położeniami A i C równa

$$L_{AC} = 2(x_C - x_A) \quad (7)$$

została przebyta w czasie

$$t_{AC} = T = 1/f. \quad (8)$$

Stąd

$$c_{AC} = L_{AC}/t_{AC} = 2f(x_C - x_A). \quad (9)$$

Jako wynik doświadczenia należy przyjąć średnią z wyznaczonych wartości.

Wyznaczanie prędkości światła w cieczy i jej współczynnika załamania światła

1. Zwierciadła zawracające ustawić w odległości od źródła większej niż długość kuwety z badaną cieczą, w takim położeniu B, by uzyskać na ekranie oscyloskopu obraz prostej nachylonej pod kątem α , co świadczy o zgodności w fazie impulsów światła emitowanych i odbieranych.
2. W wiązkę światła wstawić kuwetę z cieczą. Obraz na ekranie oscyloskopu przybierze kształt elipsy.
3. Przesuwając zwierciadła w kierunku źródła światła znaleźć położenie D, w którym obraz jest znów wyraźną prostą, nachyloną tak jak w położeniu B. Zmierzyć odległości x_B i x_D .
4. Pomiary powtórzyć 8 do 10 razy.

Obliczenia wykonać na podstawie następującego rozumowania:

Impulsy odbite od zwierciadeł w położeniu D docierają do detektora w takim samym czasie jak impulsy odbite od zwierciadeł w położeniu B. Czasy te wyrażają się wzorami

$$t_D = \frac{2x_D - L_O}{c} + \frac{L_O}{(c/n)} + t_0 \quad (10)$$

i

$$t_B = \frac{2x_B}{c} + t_0, \quad (11)$$

gdzie n oznacza współczynnik załamania cieczy a t_0 jest czasem przejścia niemierzonych odcinków drogi od źródła do płaszczyzny 0 i od tej płaszczyzny do detektora (rys. 1). Wielkość c/n jest prędkością światła w tej cieczy, dalej oznaczaną przez v . Z równości czasów

$$t_D = t_B \quad (12)$$

dostajemy wzór na współczynnik załamania

$$n = 2 \frac{(x_B - x_D)}{L_O} + 1, \quad (13)$$

dzięki któremu można prędkość v wyrazić jako

$$v = \frac{L_O c}{2(x_B - x_D) + L_O}.$$

W podobny sposób można wykorzystać równość czasów t_C i t_E zużytych przez światło gdy zwierciadła ustawione są w położeniach C i E, w których proste na ekranie oscyloskopu również są nachylone jednakowo. Z pomiaru odległości x_C i x_E otrzymuje się wtedy

$$n = 2 \frac{(x_C - x_E)}{L_O} + 1 \quad (14)$$

oraz

$$v = \frac{L_O c}{2(x_C - x_E) + L_O}. \quad (15)$$

Jako wyniki doświadczenia należy przyjąć średnie z wyznaczonych wartości.

Warto zwrócić uwagę, że światło biegnie nie tylko w powietrzu i w wodzie, ale także w materiale, z którego zrobione są okienka kuwety, co wprowadza stały błąd. Należy oszacować jego wielkość i zaproponować sposób jego eliminacji przez uwzględnienie okienek.

Opracowanie sprawozdania

1. Obliczyć średnie wartości prędkości światła c i v oraz średni współczynnik załamania n .
2. Oszacować błędy uzyskanych wyników.
3. Porównać uzyskane wyniki z danymi tablicowymi.
4. Przedyskutować przyczyny błędów.

Literatura

1. D. Halliday, R. Resnick, *Fizyka*, t. 1 i 2, PWN, Warszawa, 1994.
2. I. W. Sawieliew, *Wykłady z fizyki*, t. 2, PWN, Warszawa, 2002.
3. J. R Meyer-Arendt, *Wstęp do optyki*, PWN, Warszawa, 1979.
4. *Encyklopedia fizyki*, PWN, Warszawa, 1972.