

## Ćwiczenie Nr 452

Temat: Pomiar prędkości światła w powietrzu i cieczy

### I. Literatura:

1. I. Kruk, J. Typek, „Ćwiczenia laboratoryjne z fizyki” Część II, Wydawnictwo Uczelniane P.S., Szczecin 2007.
2. I.W. Sawieliew, „Wykłady z fizyki”, T.2, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1994.
3. D. Hallyday, R. Resnick, „Fizyka”, T.2, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1994.
4. J. Rydzewski „Pomiary oscyloskopowe”, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1994.

### II. Tematy teoretyczne:

1. Fala elektromagnetyczna; równania fali, prędkość fazowa, prędkość grupowa, zależności pomiędzy długością, prędkością, okresem i częstotliwością fali. Odbicie i załamanie światła, całkowite wewnętrzne odbicie. Współczynnik załamania światła.
2. Prędkość światła i metody wyznaczania prędkości światła.

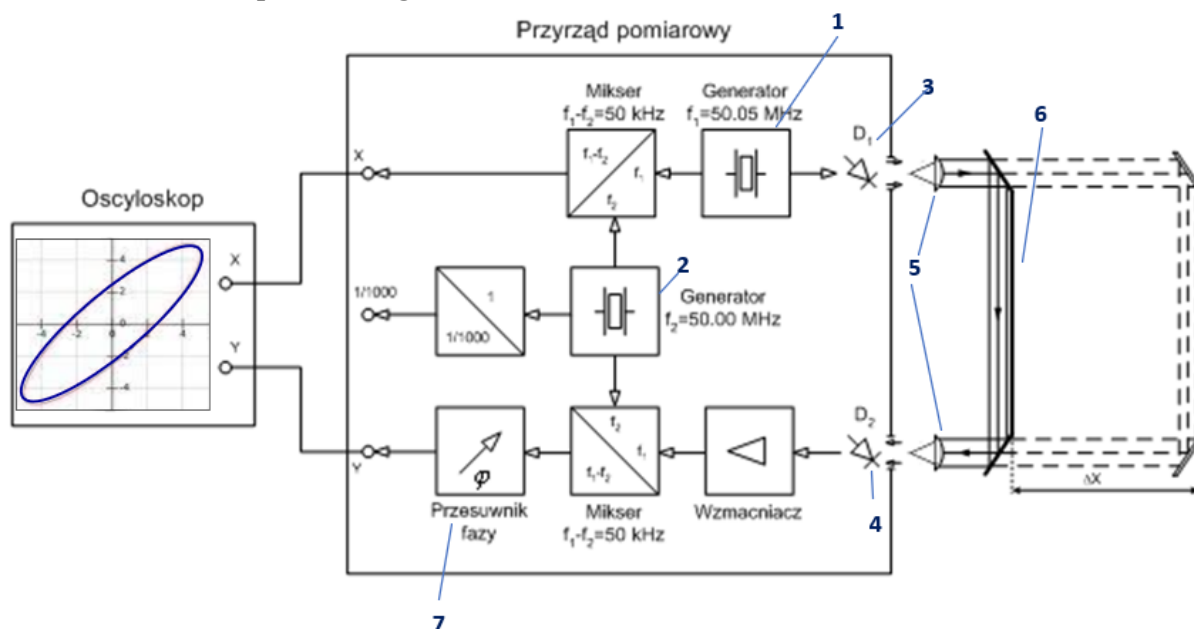
### III. Cel ćwiczenia:

Celem ćwiczenia jest wyznaczenie prędkości światła w powietrzu i w cieczy przezroczystej.

### IV. Zestaw pomiarowy:

Kompletny zestaw do pomiaru prędkości światła obejmuje następujące podzespoły: oscyloskop, przyrząd do pomiaru prędkości światła, soczewki płasko-wypukłe, zwierciadło podwójnie odbijające, kuweta rurowa (do określania prędkości światła w przezroczystych cieczach oraz do wyznaczania współczynnika załamania), łąwa optyczna.

Schemat układu pomiarowego:



Rys. 1. Schemat układu pomiarowego zawiera: 1,2-generatory stabilizowane 50,05 MHz oraz 50,00 MHz; 3- nadawcza dioda elektroluminescencyjna ( $D_1$ ); 4- dioda odbiorcza -fotodioda ( $D_2$ ); 5- soczewki płasko-wypukłe; 6- zwierciadło podwójnie odbijające; 7 - pokrętko "Faza"

## V. Metoda pomiaru:

Źródłem światła jest dioda elektroluminescencyjna  $D_1$  (rys.1), której intensywność świecenia jest modulowana napięciem zmiennym o częstotliwości  $f=50,05 \text{ MHz}$ , pochodzącym z generatora. Po przebyciu przez promień świetlny określonej drogi zwierciadło odbijające kieruje ten promień na fotodiodę  $D_2$ , w której jest wytwarzane napięcie zmienne o tej samej częstotliwości, ale z przesunięciem fazowym w stosunku do sygnału wyjściowego. Sygnał optyczny zostaje przetworzony na sygnał elektryczny i po zmieszaniu z sygnałem o częstości  $50,00 \text{ MHz}$  daje sygnał różnicowy  $50,00 \text{ kHz}$ . Występująca różnica faz, między sygnałami modulującym i odebrany, związana jest z opóźnieniem o czas, w jakim światło pokonuje całą drogę. Oba sygnały są podawane na wejścia X i Y oscyloskopu.

Metodą krzywych Lissajous porównywane są fazy sygnału modulującego świecenie diody elektroluminescencyjnej  $D_1$  oraz fazy sygnału pochodzącego z fotodiody  $D_2$  (rys.1). Jak już wiemy, sygnały te są doprowadzone na wejścia X i Y oscyloskopu. Obserwując na oscyloskopie kształt i orientację figur Lissajous można stwierdzić, że podczas wydłużania drogi przebytej przez światło, przesunięcie fazy sygnału z fotodetektora w stosunku do fazy sygnału modulującego świecenie osiąga w pewnym momencie wartość  $\pi$  ( $180^\circ$ ). Występująca różnica faz związana jest z czasem w jakim światło pokonuje całą drogę. Dla przesunięcia fazowego  $0$  lub  $\pi$  na oscyloskopie obserwowana elipsa przechodzi w nachyloną linię prostą. Prosta nachylona jest w lewo lub w prawo pod kątem  $\alpha$  lub  $-\alpha$  względem poziomu.

Przesuwając zwierciadło do takiego położenia  $x_1$ , dla którego przesunięcie fazowe pomiędzy sygnałem modulującym świecenie diody i sygnałem odebrany wynosi  $0$  oraz do położenia  $x_2$ , dla którego przesunięcie fazowe jest równe  $\pi$ . Występujące przesunięcie fazowe o  $\pi$  odpowiada widocznym na oscyloskopie dwóm kierunkom nachylenia prostych względem poziomu. Należy nadmienić, iż prostym o tym samym kierunku nachylenia odpowiadają przesunięcia fazowe różniące się o  $2\pi$ ; co uwzględnimy przy wyznaczeniu prędkości światła w cieczy.

Znając długość drogi  $x_1$ , dla której przesunięcie fazowe pomiędzy sygnałem modulującym świecenie diody i sygnałem odebrany wynosi  $0$  oraz długość drogi  $x_2$ , dla której przesunięcie fazowe jest równe  $180^\circ$ , to na podstawie różnicy tych dróg  $\Delta x = |x_1 - x_2|$  i znanej wartości częstotliwości modulacji wiązki świetlnej  $f$ , możemy obliczyć prędkość rozchodzenia się światła w powietrzu ( $c_p$ ):

$$c_p = \frac{l}{t} \quad (1)$$

Droga, jaką przebiega światło wynosi (rys.1):

$$l = 2\Delta x \quad (2)$$

Zauważmy, że proste nachylone w przeciwnych kierunkach powstają przy położeniach zwierciadło oddalonych o  $\Delta x = \frac{l}{2}$ , co odpowiada występującej różnicy faz o  $\pi$ , stąd światło pokona całą drogę ( $l$ ) w czasie:

$$t = \frac{T}{2} = \frac{1}{2f} \quad (3)$$

Po uwzględnieniu powyższych zależności (2) i (3) w (1), prędkość światła rozchodzącego się w powietrzu ( $c_p$ ) wyznaczamy ze wzoru:

$$c_p = \frac{l}{t} = \frac{2\Delta x}{\frac{1}{2f}} = 4f\Delta x \quad (4)$$

## VI. Wykonanie ćwiczenia

1. Sprawdzić, czy układ połączony jest według schematu (rys. 1).
2. Włączyć przyrząd pomiarowy i oscyloskop do sieci.
3. Sprawdzić, czy układ jest wyjustowany. W tym celu usunąć rurę z wodą (ustawić ją z boku ławy optycznej na podpórkach) i przesunąć zwierciadło na koniec ławy optycznej. Na ekranie oscyloskopu powinna być widoczna wyraźna elipsa lub inna krzywa Lissajous, której kształt daje się regulować za pomocą pokrętki zmiany fazy na przyrządzie pomiarowym, a wielkość pokrętkami oznaczonymi VOLTS/DIV na oscyloskopie. Jeśli opisanego obrazu nie da się uzyskać poprosić prowadzącego o pomoc w wyjustowaniu przyrządu.

**Uwaga: Nie zmieniać samodzielnie położenia soczewek na ławie optycznej.**

4. **Wyznaczanie prędkość rozchodzenia się światła w powietrzu:**
  - a. Zwierciadło ustawić w położeniu  $x_1$ ; za pomocą pokrętki „Faza” należy otrzymać na oscyloskopie linię prostą. W razie konieczności dobrać wzmocnienie oscyloskopu (pokrętką VOLTS/DIV) tak, aby prosta była pochylona pod kątem  $\alpha$  (ok.  $45^\circ$ ), a jej długość była porównywalna z przekątną ekranu;
  - b. Przesuwać zwierciadło wzdłuż ławy optycznej do położenia  $x_2$ , dla którego na ekranie oscyloskopu ponownie pojawi się linia prosta, ale o zmienionym znaku kąta nachylenia  $-\alpha$  (przesunięcie fazowe wynosi teraz  $180^\circ$  lub  $0^\circ$ ). W razie konieczności ponownie dobrać właściwe wzmocnienie oscyloskopu;
  - c. Czynności pomiarowe z punktów 4.a. – 4.b. powtórzyć 10 razy; wyniki pomiarów zapisać w tabeli pomiarowej 1.

**Tabela 1.** Pomiar prędkości światła w powietrzu

| Lp. | $x_1$<br>[m] | $\bar{x}_1$<br>[m] | $u(\bar{x}_1)$<br>[m] | $x_2$<br>[m] | $\bar{x}_2$<br>[m] | $u(\bar{x}_2)$ | $\Delta x =  \bar{x}_1 - \bar{x}_2 $<br>[m] | $u(\Delta x)$<br>[m] | $c_p$<br>[m/s] | $u(c_p)$<br>[m/s] |
|-----|--------------|--------------------|-----------------------|--------------|--------------------|----------------|---------------------------------------------|----------------------|----------------|-------------------|
| 1   |              |                    |                       |              |                    |                |                                             |                      |                |                   |
| 2   |              |                    |                       |              |                    |                |                                             |                      |                |                   |
| 3   |              |                    |                       |              |                    |                |                                             |                      |                |                   |
| 4   |              |                    |                       |              |                    |                |                                             |                      |                |                   |
| 5   |              |                    |                       |              |                    |                |                                             |                      |                |                   |
| 6   |              |                    |                       |              |                    |                |                                             |                      |                |                   |
| 7   |              |                    |                       |              |                    |                |                                             |                      |                |                   |
| 8   |              |                    |                       |              |                    |                |                                             |                      |                |                   |
| 9   |              |                    |                       |              |                    |                |                                             |                      |                |                   |
| 10  |              |                    |                       |              |                    |                |                                             |                      |                |                   |

5. **Wyznaczanie prędkości światła w cieczy:**
  - a. Umieścić rurową kuwetę z badaną cieczą na ławie optycznej tak, aby przechodził przez nią promień świetlny padający lub powrotny;
  - b. Zwierciadło należy ustawić tuż za kuwetą i uzyskać maksymalną amplitudę na ekranie oscyloskopu;
  - c. Dla zwierciadła ustawionego w położeniu  $x_1$ , za pomocą pokrętki „Faza” należy uzyskać na oscyloskopie prostą nachyloną pod kątem ok.  $45^\circ$  do poziomu;

- d. Zdjąć kufkę i oddalać zwierciadło od przyrządu tak, aby ponownie powstała prosta o identycznym nachyleniu; to odpowiadające położenie zwierciadła jest określane jako  $x_2$ ;
- e. Czynności pomiarowe z punktów 5.a.-5.d powtórzyć 10 razy, a wyniki pomiarów zapisać w tabeli pomiarowej 2.

**Tabela 2.** Pomiar prędkości światła w cieczy

| Lp. | $x_1$<br>[m] | $\bar{x}_1$<br>[m] | $u(\bar{x}_1)$<br>[m] | $x_2$<br>[m] | $\bar{x}_2$<br>[m] | $u(\bar{x}_2)$<br>[m] | $\Delta x =  \bar{x}_1 - \bar{x}_2 $<br>[m] | $u(\Delta x)$<br>[m] | $c_c$<br>[m/s] | $u(c_c)$<br>[m/s] |
|-----|--------------|--------------------|-----------------------|--------------|--------------------|-----------------------|---------------------------------------------|----------------------|----------------|-------------------|
| 1   |              |                    |                       |              |                    |                       |                                             |                      |                |                   |
| 2   |              |                    |                       |              |                    |                       |                                             |                      |                |                   |
| 3   |              |                    |                       |              |                    |                       |                                             |                      |                |                   |
| 4   |              |                    |                       |              |                    |                       |                                             |                      |                |                   |
| 5   |              |                    |                       |              |                    |                       |                                             |                      |                |                   |
| 6   |              |                    |                       |              |                    |                       |                                             |                      |                |                   |
| 7   |              |                    |                       |              |                    |                       |                                             |                      |                |                   |
| 8   |              |                    |                       |              |                    |                       |                                             |                      |                |                   |
| 9   |              |                    |                       |              |                    |                       |                                             |                      |                |                   |
| 10  |              |                    |                       |              |                    |                       |                                             |                      |                |                   |

## VII. Opracowanie wyników pomiarów

### 1. Obliczanie prędkości światła w powietrzu ( $c_p$ ) oraz jej niepewność $u(c_p)$ :

- a. Obliczyć średnie wartości położenia  $\bar{x}_1$ ,  $\bar{x}_2$  zwierciadła i ich niepewności pomiarowe  $u(\bar{x}_1)$ ,  $u(\bar{x}_2)$ ; niepewność standardową całkowitą  $u(x_i)$  obliczamy ze wzoru:

$$u(\bar{x}_i) = \sqrt{u_A^2(\bar{x}) + u_B^2(x)} \quad (5)$$

gdzie:  $u_A(\bar{x})$  - niepewność typu A obliczamy stosując wzór:  $u_A(\bar{x}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n \cdot (n-1)}}$ ;

$u_B(x) = \frac{\Delta x}{\sqrt{3}}$  - niepewność typu B, przy czym  $\Delta x$  - oznacza niepewność maksymalną wielkości  $x$

- b. Obliczyć prędkość światła w powietrzu  $c_p$  z zależności (4):

$$c_p = 4f \cdot \Delta x$$

gdzie:  $f = (50.05 \pm 0.01) \text{ MHz}$  - częstotliwość modulacji wiązki świetlnej

$\Delta x = |\bar{x}_1 - \bar{x}_2|$  - różnica położenia zwierciadła dla powietrza

- c. Obliczyć niepewność całkowitą pomiaru prędkości światła  $u(c_p)$  ze wzoru:

$$u(c_p) = c_p \sqrt{\left(\frac{u_B(f)}{f}\right)^2 + \left(\frac{u(\Delta x)}{\Delta x}\right)^2} \quad (6)$$

gdzie:  $u_B(f) = \frac{\Delta f}{\sqrt{3}}$  - niepewność typu B;

$u(\Delta x) = \sqrt{u(\bar{x}_1)^2 + u(\bar{x}_2)^2}$  - niepewność całkowita różnicy położenia zwierciadła.

d. Wyniki obliczeń zapisać w tabeli 1.

**2. Obliczanie prędkości światła w cieczy ( $c_c$ ) oraz jej niepewność  $u(c_c)$ :**

a. Obliczyć średnie wartości położenia  $\bar{x}_1$ ,  $\bar{x}_2$  i ich niepewności  $u(\bar{x}_1)$ ,  $u(\bar{x}_2)$ ;

b. Obliczyć prędkość światła  $c_c$  w przezroczystej cieczy z zależności:

$$c_c = \frac{l_0 \cdot c_p}{2\Delta x + l_0} \quad (7)$$

gdzie:  $c_p$  - prędkością światła w powietrzu,

$l_0 = (1,00 \pm 0,01) \text{ m}$  – długość kowety z badaną cieczą

$\Delta x = |\bar{x}_1 - \bar{x}_2|$  – różnica położenia zwierciadła dla cieczy ( $\bar{x}_1$ ) i powietrza ( $\bar{x}_2$ )  
(po zdjęciu kowety z cieczą).

c. Obliczyć niepewność całkowitą pomiaru prędkości światła w cieczy  $u(c_c)$  ze wzoru:

$$u(c_c) = \frac{c_c}{2\Delta x + l_0} \cdot \sqrt{4 \left(\frac{\Delta x}{l_0}\right)^2 \cdot u^2(l_0) + 4u^2(\Delta x) + \frac{(2\Delta x + l_0)^2}{c_p^2} \cdot u^2(c_p)} \quad (8)$$

gdzie:  $u(\Delta x) = \sqrt{u^2(\bar{x}_1) + u^2(\bar{x}_2)}$  - niepewność całkowita różnicy położenia zwierciadła.

e. Wyniki obliczeń zapisać w tabeli 2.

**3. We wnioskach dokonaj interpretacji uzyskanych wyników i porównaj z danymi tablicowymi. Oblicz także błąd względny procentowy.**