

4.16 Pomiar prędkości dźwięku w cieczy metodą optyczną (O22)

Celem ćwiczenia jest wyznaczanie prędkości rozchodzenia się dźwięku w cieczy przy użyciu światła laserowego i obrazu cieniowego fali stojącej w alkoholu propylowym.

Zagadnienia do przygotowania:

- ultradźwięki – dźwięki o częstościach $20\text{ kHz} - 20\text{ MHz}$;
- rozchodzenie się dźwięku w cieczech – fala podłużna;
- fala stojąca – złożenie dwóch sinusoidalnych fal o równych częstościach i amplitudach, biegnących w przeciwnych kierunkach;
- metody uwidaczania fal dźwiękowych – obrazy smugowe.

Literatura podstawowa: [28], [29], [30], [31].

4.16.1 Podstawowe pojęcia i definicje

Większość potrzebnych informacji teoretycznych podana jest w rozdziałach 4.3 i 4.4, tutaj przedstawione są dodatkowe pojęcia konieczne do wykonania i opracowania doświadczenia.

Fala stojąca

Rozważmy dwie identyczne fale y_1 i y_2 rozchodzące się w przeciwnych kierunkach. Korzystając z równania (4.3.3) fale te możemy zapisać jako:

$$y_1 = A \cos(\omega t - kx) \quad (4.16.1)$$

$$y_2 = A \cos(\omega t + kx), \quad (4.16.2)$$

gdzie równanie (4.16.1) opisuje falę biegnącą w prawo, a równanie (4.16.2) opisuje falę biegnącą w lewo. Częstość fali można wyrazić przez jej częstotliwość $\omega = 2\pi\nu$, a liczbę falową przez długość fali $k = 2\pi/\lambda$. Korzystając z tego podstawienia można falę wypadkową powstającą ze złożenia fal y_1 i y_2 zapisać w postaci:

$$y = y_1 + y_2 = 2A \cos\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right) \cos(2\pi\nu t). \quad (4.16.3)$$

W ten sposób otrzymujemy falę stojącą, czyli drgania zachodzące z częstotliwością ν i o amplitudzie $A(x)$:

$$A(x) = 2A \cos\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right). \quad (4.16.4)$$

Dla fali stojącej możemy wyróżnić pewne charakterystyczne punkty zwane węzłami i strzałkami fali. Węzły fali stojącej powstają w punktach, które nie wykonują drgań, czyli dla takich wartości x_w dla których $A(x) = 0$. Odpowiada to warunkowi:

$$\cos\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right) = 0 \rightarrow x_w = (2n+1)\frac{\lambda}{4}. \quad (4.16.5)$$

Strzałki powstają w punktach x_s , w których amplituda $A(x)$ fali stojącej jest maksymalna, co odpowiada warunkowi:

$$\cos\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right) = 1 \rightarrow x_s = n\frac{\lambda}{2}. \quad (4.16.6)$$

Jak wynika z wzorów (4.16.5) i (4.16.6) kolejne węzły (i strzałki) oddalone są od siebie o połowę długości fali.

Falę stojącą można wytworzyć w zamkniętym zbiorniku z gazem lub z cieczą. Na jednym końcu znajduje się generator wytwarzający falę, a drugi koniec zbiornika jest zamknięty. Następuje wtedy złożenie fali wytwarzanej przez generator z falą odbitą od drugiego końca zbiornika. Fala stojąca powstanie tylko wtedy gdy odległość L pomiędzy końcami zbiornika będzie całkowitą wielokrotnością połowy długości fali:

$$L = n\frac{\lambda}{2}. \quad (4.16.7)$$

Jeżeli odległość z pomiędzy końcami zbiornika będzie się zmieniała to kolejne fale stojące będą obserwowane po zmianie odległości Δz końców zbiornika o połowę długości fali:

$$\Delta z = \frac{\lambda}{2}. \quad (4.16.8)$$

4.16.2 Przebieg pomiarów

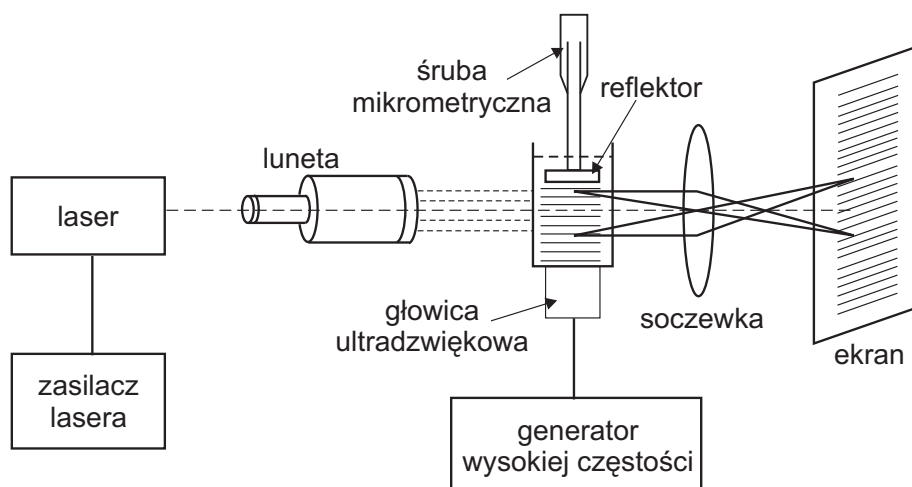
Układ doświadczalny

Generator wysokiej częstotliwości, głowica ultradźwiękowa, przesuwany reflektor, laser, lunetka, ekran. Aparatura używana w doświadczeniu przedstawiona jest na rysunku 4.16.1.

Metoda pomiarowa

Wiązka światła z lasera He-Ne przechodząc przez lunetę zostaje uformowana w wiązkę równoległą i oświetla naczynie, w którym znajduje się alkohol propylowy. Po przejściu przez ciecz światło pada na soczewkę skupiającą, a następnie na ekran. Laser, luneta, naczynie z propanolem, soczewka i ekran umieszczone są na ławie optycznej, dzięki czemu możliwe jest wspólnie ustawienie wszystkich elementów układu.

Naczynie z alkoholem umocowane jest na specjalnym stoliku. Dno naczynia stanowi głowica ultradźwiękowa, na którą podawany jest sygnał z generatora wysokiej częstotliwości. Od góry wprowadza się do naczynia tarczę metalową (reflektor) zamocowaną do śruby mikrometrycznej. Umożliwia to zmianę odległości pomiędzy głowicą nadawczą



Rys. 4.16.1: Schemat aparatury.

i reflektorem. Fala dźwiękowa wysyłana przez głowicę rozchodzi się w cieczy i dociera do zanurzonego w niej reflektora, od którego następuje odbicie fali i zmiana kierunku rozchodzenia się na przeciwny. Jeżeli odległość pomiędzy głowicą i reflektorem równa jest całkowitej wielokrotności połowy długości fali $\lambda/2$, w cieczy powstaje fala stojąca, tzn. nie zmieniają swojego położenia węzły i strzałki takiej fali. Oznacza to, że w przekroju pionowym naczynia istnieją miejsca, gdzie gęstość ośrodka jest większa (węzły fali) i mniejsza (strzałki fali). Różnice gęstości oznaczają różne wartości współczynników załamania światła co z kolei powoduje, że padające na naczynie promienie po przejściu przez ciecz o periodycznie zmiennej gęstości opuszczają naczynie pod różnymi kątami. Ze względu na spójność promieniowania laserowego, zmiany gęstości cieczy obserwuje się na ekranie w postaci poziomych, ciemnych i jasnych prążków – tzw. obraz smugowy lub cieniowy.

Przebieg doświadczenia

Ustawić na ławie optycznej współosiowo laser, lunetę, naczynie z propanolem, soczewkę i ekran. Kuwetę napęlnić propanolem. Włączyć laser i generator. Ustawić najniższą możliwą częstotliwość generatora. Za pomocą śruby mikrometrycznej umieścić reflektor w cieczy. Powoli przesuwać reflektor aż do momentu, gdy na ekranie pojawią się ciemne i jasne prążki. Wyregulować ostrość, odczekać aż obraz ustabilizuje się. Odczytać i zapisać położenie śruby mikrometrycznej. Ponownie przesunąć reflektor, znaleźć następny ostry obraz poziomych prążków. Czynność tę powtarzać, za każdym razem zapisując położenie śruby mikrometrycznej. W czasie pomiarów należy oszacować błąd ustawienia ostrego obrazu. W tym celu kilkakrotnie wyznaczyć położenia śruby dla tego samego obrazu cieniowego (dla kilku punktów pomiarowych). Pomiary powtórzyć dla kilku innych częstotliwości sygnału z generatora.

4.16.3 Opracowanie wyników

Otrzymane wyniki pomiarów przedstawić na wykresie zależności położenia śruby mikrometrycznej z w zależności od numeru obserwowanego obrazu $n = 1, 2, 3, \dots$. Wykresy wykonać oddzielnie dla każdej częstotliwości sygnału z generatora. Dopasować do otrzymanych punktów prostą o równaniu:

$$z = an + b. \quad (4.16.9)$$

Różnice kolejnych położzeń śruby mikrometrycznej Δz , przy których obserwuje się ostry obraz poziomych prążków odpowiadają połowie długości fali dźwiękowej. Dla kolejnych obrazów $\Delta n = 1$, więc z wzoru (4.16.9) otrzymujemy $\Delta z = a$ i korzystając z wzoru (4.16.8) możemy wyznaczyć długość fali $\lambda = 2a$. Korzystając z niepewności współczynników regresji liniowej obliczyć niepewności pomiarowe wyznaczonej długości fali.

Prędkość dźwięku u jest związana z długością fali λ i jej częstotliwością ν poprzez $u = \nu\lambda$. Korzystając z wyznaczonych długości fali λ dla danej częstotliwości ν wyznaczyć metodą regresji liniowej prędkość fali dźwiękowej korzystając z równania:

$$\nu = \frac{u}{\lambda} + c. \quad (4.16.10)$$

Częstotliwość i długość fali wyznaczone są z pewnymi niepewnościami pomiarowymi. Dlatego przy zastosowaniu regresji liniowej należy uwzględnić dodatkową stałą c . W ramach niepewności pomiarowych stała c powinna być równa zero.

Obliczyć niepewność pomiarową wyznaczonej prędkości dźwięku i przedyskutować uzyskany wynik. Otrzymaną wartość liczbową prędkości rozchodzenia się dźwięku w propanolu porównać z wartościami tablicowymi.