Ćwiczenie 52

WYZNACZANIE ROZMIARÓW SZCZELIN I PRZESZKÓD ZA POMOCĄ ŚWIATŁA LASEROWEGO

52.1. Wiadomości ogólne

Wyznaczanie rozmiarów szczelin i przeszkód za pomocą światła oparte jest na zjawiskach ugięcia (dyfrakcji) i nakładania (interferencji) fal świetlnych. Obserwacja tych zjawisk jest możliwa tylko wówczas, gdy ugięte i interferujące ze sobą wiązki światła spełniają określone warunki. Zasadniczym warunkiem uzyskania wyraźnego i niezakłóconego obrazu interferencyjnego jest spójność (koherencja) światła. Oznacza to zgodność między fazami w różnych punktach wiązki światła lub w różnych wiązkach światła. Rozróżnia się spójność światła przestrzenną i czasową.

Spójność czasową określa zgodność fazowa między wiązkami światła wychodzącymi z jednego punktu źródła rozciągłego po przebyciu przez nie pewnej drogi optycznej l_c, zwanej długością spójności. Charakteryzuje ją również czas spójności τ, tj. najdłuższy przedział czasu, w którym zachowana jest zgodność fazowa między tymi wiązkami. Oczywiście zachodzi relacja $\tau = l_c/c$ (c – prędkość światła). Np. dla światła pochodzącego ze zwykłych, naturalnych (termicznych) źródeł najdłuższy osiągalny czas spójności wynosi 10^{-8} s, co odpowiada długości koherencji ok. 3 m.

Spójność światła przestrzenna jest to zgodność fazowa między wiązkami światła pochodzącymi z dwóch różnych punktów źródła rozciągłego. Zwykłe termiczne źródła światła wykazują bardzo mały stopień spójności przestrzennej.

Przykładowo, używając źródła światła monochromatycznego o długości fali λ = 600 nm, którego średnica równa jest 1 mm, w odległości 20 m, w płaszczyźnie równoległej do płaszczyzny źródła, uzyskujemy średnicę obszaru spójności równą 3,8 mm. Oznacza to, że odległość między dwiema szczelinami (np. w doświadczeniu Younga) musi być mniejsza niż 3,8 mm.

Stopień spójności wiąże się bezpośrednio z monochromatycznością światła – światło spójne musi być monochromatyczne. Jeżeli światło monochromatyczne ma szerokość widmową $\Delta\nu$, to czas spójności wynosi $1/\Delta\nu$, a długość spójności $c/\Delta\nu$. Wynika stąd, że im mniejsza szerokość spektralna $\Delta\nu$, tym większy czas spójności. Oznacza to, że światło idealnie monochromatyczne ($\Delta\nu = 0$) jest całkowicie spójne.

Światło spójne możemy uzyskać następującymi sposobami:

a) przepuszczając wiązkę światła niespójnego przez mały otworek – długość spójności rośnie w miarę zmniejszania średnicy otworu. Ten sposób zastosowano w doświadczeniu Younga (spójność przestrzenna);
b) rozdzielając wiązkę światła na cienkiej warstwie a następnie zbierając po pewnym czasie rozdzielone wiązki w jednym punkcie. Ten sposób zastosowano w interferometrze Michelsona (spójność czasowa);
c) używając laserów pracujących przy wykorzystaniu zjawiska wymuszonej emisji, zapewniających wysoki stopień spójności emitowanego światła.

Lasery są jedynymi urządzeniami (źródłami światła) zapewniającymi, przy doskonałej monochromatyczności, możliwie największą długość spójności (i czas spójności) przy dużym natężeniu światła. Typowe lasery gazowe pracujące w sposób ciągły mają szerokość widmową $\Delta\nu \approx 10^2\ s^{-1}$, co zapewnia długość spójności około 3000 km! (dla zwykłego termicznego źródła zaledwie 3 m). Tak więc, przy użyciu światła laserowego doświadczenie Younga można przeprowadzić, przesuwając dwie szczeliny bezpośrednio do lasera.

Wszystkie przeszkody znajdujące się na drodze fal świetlnych powodują zakłócenie kształtu powierzchni falowych, co prowadzi do zjawiska ugięcia, czyli dyfrakcji światła. Zjawisko ugięcia zachodzi tak samo na przeszkodach, jak i na otworach o tych samych rozmiarach. Oznacza to, że obraz interferencyjno-dyfrakcyjny przeszkody o średnicy d, jest taki sam, jak otworu o takiej samej średnicy (twierdzenie Babineta).

52.2. Zadania

52.2.1. Wyznaczyć długość fali światła lasera He–Ne, wykorzystując siatkę dyfrakcyjną o znanej stałej – a.
52.2.2. Wyznaczyć stałą siatki dyfrakcyjnej za pomocą światła laserowego o znanej długości fali – λ.
Uwaga! Punkty 52.2.1 i 52.2.2 należy wykonywać zamiennie wg poleceń prowadzącego ćwiczenia.
52.2.3. Wyznaczyć średnice kilku cienkich drucików i szerokości kilku szczelin.
52.2.4. Wyznaczyć średnice kilku otworów kołowych.
52.2.5. Wyznaczyć średnicę cząstek pyłków.

52.3. Zasada i przebieg pomiarów

Podczas pracy z laserem należy zwracać uwagę na to, aby równoległa (nierozproszona) wiązka nie wpadła do oka. Nawet wiązka o małej mocy, rzędu 5 mW, może – w przypadku zogniskowania jej na siatkówce – wywołać lokalne uszkodzenie receptorów wzrokowych. Warunkiem pracy lasera jest odpowiednie ustawienie rezonatora Fabry'ego-Perrota – w grę wchodzą odległości rzędu długości fali generowanego światła λ = 0,6328 μm – wobec tego wszelkie czynności należy wykonywać ostrożnie, aby nie rozstroić przypadkowo lasera.

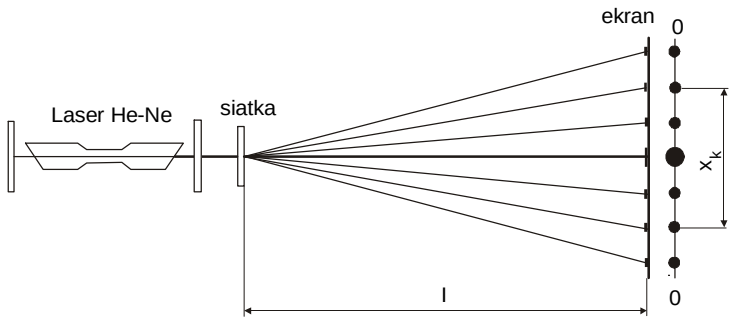
52.3.1. Wyznaczanie długości fali światła laserowego i stałej siatki

Wiązkę światła z lasera kierujemy na siatkę dyfrakcyjną o znanej stałej, ustawioną w odległości l od ekranu. Siatka i ekran powinny być prostopadłe do wiązki. Na ekranie dokonujemy pomiarów położeń maksimów obrazu dyfrakcyjnego.

Jeżeli przez x_1, x_2, ..., x_k oznaczymy odległości między maksimami 1., 2., k-tego rzędu (rys. 52.1), to długość fali możemy obliczyć z warunku dla maksimum przy interferencji światła ugiętego przez siatkę dyfrakcyjną:

$$\lambda = \frac{a \cdot x_k}{2kl\sqrt{1+\frac{x_k^2}{4l^2}}}, \qquad (52.1)$$

gdzie: a – stała siatki,
l – odległość ekranu od siatki,
λ – długość fali światła laserowego.



Rys. 52.1

Przy założeniu, że $x_k << l$ (sprawdzić, czy w ćwiczeniu ten warunek jest spełniony), wyrażenie (52.1) można uprościć do postaci

$$\lambda = \frac{a \cdot x_k}{2kl}. \qquad (52.2)$$

Wyrażenia (52.1) i (52.2) można wykorzystać również do wyznaczenia stałej siatki (a), znając długość fali światła laserowego:

$$a = \frac{2kl \cdot \lambda}{x_k}. \qquad (52.3)$$

52.3.2. Wyznaczanie średnic drucików i szerokości szczelin

Wiązkę światła laserowego kierujemy na badany drucik i na ekranie, ustawionym prostopadle do wiązki w odległości l od drucika, mierzymy położenie jasnych plamek. Należy zwracać uwagę na numerację rzędów plamek (rys. 52.2). Plamka rzędu zerowego na tle śladu silnej wiązki nieugiętej może być błędnie uważana za dwie symetrycznie położone plamki rzędu pierwszego. Średnice drucików obliczamy ze wzorów:

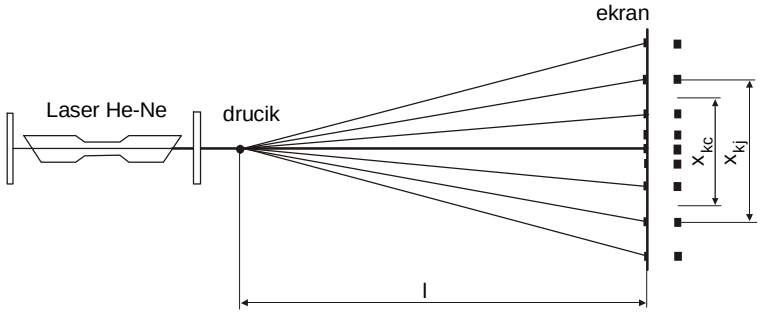
$$d = \frac{(2k+1)\lambda \cdot l}{x_{kj}}; \quad d = \frac{2k\lambda \cdot l}{x_{kc}}, \qquad (52.4)$$

gdzie: k – rząd widma,

x_{kj} – odległość między środkami dwóch jasnych plamek k-tego rzędu, leżących na ekranie z prawej i lewej strony prążka zerowego,

x_{kc} – odległość między środkami dwóch ciemnych plamek k-tego rzędu, leżących na ekranie z prawej i lewej strony śladu wiązki nieugiętej.

Wzory (52.4), podobnie jak wzór (52.3), są słuszne tylko gdy $x_k << l$.



Rys. 52.2

Przy wyznaczaniu szerokości szczelin pomiary wykonujemy tak samo, jak przy wyznaczaniu średnic drucików. Korzystamy również z tych samych wzorów (52.4).

52.3.3. Wyznaczanie średnic otworków

Wiązkę światła laserowego przepuszczamy przez badany otworek o średnicy mniejszej niż przekrój wiązki. Na ekranie powstaje jasny krążek o średnicy D, zwany krążkiem Airy'ego, który otoczony jest jasnymi i ciemnymi pierścieniami.

Średnicę otworku obliczamy ze wzoru

$$d = 1{,}22\,\frac{\lambda \cdot l}{D}. \qquad (52.5)$$

52.3.4. Wyznaczanie średnic pyłków

Badany pyłek umieszczamy na szklanej płytce (cienka warstwa pyłku). Przepuszczając światło laserowe przez warstwę pyłku, otrzymamy na ekranie obraz interferncyjno-dyfrakcyjny w postaci krążków podobnych do zjawiska „halo".

Średnicę pyłków obliczamy ze wzoru (52.5), w którym zamiast D wstawiamy średnicę centralnego, jasnego krążka.

52.4. Ocena niepewności pomiarów

Niepewność wszystkich pomiarów oceniamy metodą różniczki logarytmicznej dla niepewności systematycznych (wzór (15) – Wstęp). Względna niepewność pomiarów długości fali λ światła laserowego (jeżeli realizowany jest p. 52.2.1)

$$\left|\frac{\Delta\lambda}{\lambda}\right| = \left|\frac{\Delta x}{x}\right| + \left|-\frac{\Delta l}{l}\right|. \qquad (52.6)$$

Względna niepewność pomiarów stałej a siatki dyfrakcyjnej

$$\left|\frac{\Delta a}{a}\right| = \left|-\frac{\Delta x}{x}\right| + \left|\frac{\Delta l}{l}\right|, \qquad (52.7)$$

(jeżeli realizowany jest p.52.2.2).
Względna niepewność pomiaru grubości drucików

$$\left|\frac{\Delta d}{d}\right| = \left|-\frac{\Delta x}{x}\right| + \left|\frac{\Delta l}{l}\right| + \left|\frac{\Delta\lambda}{\lambda}\right|, \qquad (52.8)$$

gdzie: Δx, Δl – niepewności systematyczne pomiarów określone w czasie ich wykonywania (wzór (3) – Wstęp).

Względna niepewność pomiaru średnicy otworków i średnicy pyłku

$$\left|\frac{\Delta d}{d}\right| = \left|-\frac{\Delta D}{D}\right| + \left|\frac{\Delta l}{l}\right| + \left|\frac{\Delta\lambda}{\lambda}\right|, \qquad (52.9)$$

gdzie wartość $|\Delta\lambda/\lambda|$ obliczamy z wzoru (52.6), jeżeli realizowany jest p. 52.2.1. Jeżeli realizowany jest pkt 52.2.2, wówczas we wszystkich wzorach (52.8) i (52.9) przyjmujemy $|\Delta\lambda/\lambda| = 0$.

Literatura

[1] Halliday D., Resnick R.: Fizyka, t. II. Warszawa: PWN 1983.
[2] Szczeniowski S. Fizyka doświadczalna, cz. VI. Warszawa: PWN 1983.
[3] Sawieliew I.W.: Kurs fizyki, t. III. Warszawa: PWN 1989.