

ZADANIE 05

DOŚWIADCZENIE YOUNGA DLA ŚWIATŁA LASEROWEGO

Cel ćwiczenia

Dane uzyskane w trakcie wykonywania tego ćwiczenia mogą posłużyć do wyznaczenia:

- A. parametrów szczelin, zakładając, że długość fali światła lasera jest znana i wynosi 632,8 nm;
- B. długości fali światła lasera z danych uzyskanych z pomiarów obrazu interferencyjnego dla szczelin o znanych parametrach, a następnie wyznaczenie parametrów szczelin w innej przysłonie, wykorzystując znaną w poprzednim kroku długość fali światła.

Wypytaj asystenta, który z tych wariantów ma się realizować z Twoim udziałem.

Masz do dyspozycji

- laser;
- dwie przysłony, każda z dwiema szczelinami;
- fotodiodę, czyli detektor pozwalający mierzyć natężenie światła;
- miernik uniwersalny;
- ławę optyczną ze uchwytami do zamocowania lasera, przysłony i detektora.

Wykonanie ćwiczenia

- Zadbaj o to, by przy braku szczelin, wiązka lasera była równoległa do ławy optycznej i aby dobrze celowała w detektor.
- Odnotuj parametry szczelin.
- Ustaw przysłonę ze szczelinami na ławie optycznej i zmierz odległość L między przesłoną a detektorem. Zwróć uwagę na to, by po wstawieniu przysłony, ugięte promienie świetlne trafiały do detektora w całym obszarze obrazu interferencyjnego, także na jego skrajach.
- Podłącz do detektora miernik uniwersalny i ustaw go w trybie pomiaru napięcia. Napięcie wskazywane przez miernik jest wprost proporcjonalne do natężenia światła padającego na fotodiodę – w ten sposób mierzone natężenie światła wyrażane jest w jednostkach umownych – napięciu na zaciskach fotodiody. Woltomierz należy ustawić na zakres pozwalający na możliwie najbardziej dokładny pomiar. Zauważ, że fotodioda ma na wierzchu przełącznik – przed pomiarami należy ją włączyć, a po pomiarach wyłączyć, by uniknąć niepotrzebnego rozładowania baterii.
- Wykonaj pomiar pozycji minimów obrazu interferencyjnego dwóch szczelin.
- W rozkładzie natężenia zidentyfikuj i odnotuj pozycje minimów dyfrakcyjnych.
- Powtórz powyższe pomiary dla drugiej przysłony.
- Zmierz, dla jednej, wybranej przysłony, profil natężenia światła na prawo i lewo od centralnego maksimum do trzeciego minimum interferencyjnego.

Literatura przedmiotu

- Sz. Szczeniowski, *Fizyka doświadczalna* Część IV – Optyka, Warszawa, 1983;
- D. Halliday, R. Resnick i J. Walker, *Podstawy fizyki*, t. 4, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2003;
- H. Szydłowski, *Pracownia fizyczna wspomagana komputerem*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, szereg wydań w latach 2003 ÷ 2012;
- J.R. Meyer-Arendt, *Wstęp do optyki*, PWN, Warszawa, 1977;
- A. Zięba, *Analiza danych w naukach ścisłych i technice*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2013.

ZADANIE 05

DOŚWIADCZENIE YOUNGA DLA ŚWIATŁA LASEROWEGO

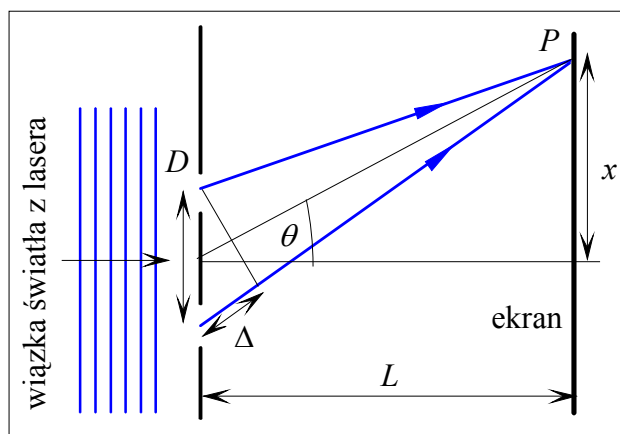
Cel ćwiczenia

Dane uzyskane w trakcie wykonywania tego ćwiczenia mogą posłużyć do wyznaczenia:

- A. parametrów szczelin, zakładając, że długość fali światła lasera jest znana i wynosi 632,8 nm;
 - B. długości fali światła lasera z danych uzyskanych z pomiarów obrazu interferencyjnego dla szczelin o znanych parametrach, a następnie wyznaczenie parametrów szczelin w drugiej przysłonie, wykorzystując znaną w poprzednim kroku długość fali światła.
- Wypytaj asystenta, który z tych wariantów ma się realizować z Twoim udziałem.

Wprowadzenie

Skierujmy światło lasera na przesłonę, w której wycięte są dwie równoległe szczeliny, każda o szerokości d i środkach oddległych od siebie o D . Za przesłoną, w odległości L od niej, znajduje się równoległy do powierzchni szczelin ekran. Zgodnie z zasadą Huygensa, każdy punkt ośrodka, do którego dociera fala, staje źródłem fali kulistej. Jeśli szczeliny są znacząco węższe niż długość fali, długość zaś szczelin jest znacząco większa od długości fali, to fale kuliste wytwarzane przez punkty szczelin interferują w taki sposób, że po drugiej stronie przesłony za każdą ze szczelin powstaje fala, którą z dobrym przybliżeniem można opisać jako cylindryczną. Taka symetria pozwala rozważać zagadnienie w płaszczyźnie prostopadłej do osi szczelin, a jego istotę ukazuje Rysunek 1.



Rys. 1. Schemat układu pomiarowego

Przyjmijmy, że na szczeliny w przysłonie światło z lasera pada prostopadłe, a fala emitowana przez laser ma długość λ i okres T . Wtedy w niezbyt odległym od środka ekranu punkcie P spotykają się dwie, spolaryzowane w tym samym kierunku, fale elektromagnetyczne o natężeniach pola elektrycznego:

$$E_1 = E_0 \sin(kr_1 - \omega t), \quad E_2 = E_0 \sin(kr_2 - \omega t), \quad k = \frac{2\pi}{\lambda}, \quad \omega = \frac{2\pi}{T}$$

i składają się do wypadkowego natężenie pola:

$$E = E_1 + E_2 = E_0 \left(\sin(kr_1 - \omega t) + \sin(kr_2 - \omega t) \right) = 2E_0 \sin\left(k \frac{r_1 + r_2}{2} - \omega t\right) \cos\left(k \frac{r_2 - r_1}{2}\right).$$

Wielkości $kr_1 - \omega t$ oraz $kr_2 - \omega t$ nazywamy *fazami fal*. Natężenie I światła, jakie odbiera nasze oko, jest proporcjonalne do wartości kwadratu natężenia pola elektrycznego uśrednionego względem czasu. Ponieważ zmienność czasowa natężenia E jest okresowa, więc wystarczy wykonać uśrednienie względem jednego okresu:

$$\frac{1}{T} \int_0^T \sin^2\left(k \frac{r_1 + r_2}{2} - \omega t\right) dt = \frac{1}{2},$$

co daje stałą, którą włączymy do definicji natężenia oświetlenia, otrzymując w wyniku:

$$I = 4I_0 \cos^2\left(k \frac{r_2 - r_1}{2}\right) = 2I_0 \left(1 + \cos(k(r_2 - r_1))\right) = 2I_0 (1 + \cos \delta), \quad (1)$$

gdzie

$$\delta = \frac{2\pi\Delta}{\lambda}, \quad \Delta = r_2 - r_1 \quad (2)$$

jest różnicą faz obu fal, a Δ jest różnicą dróg, jakie pokonały obie fale.

Niech obserwacja prowadzona będzie pod kątem θ do wiązki światła z lasera, jak to przedstawia Rysunek 1, wtedy:

$$\Delta = r_2 - r_1 = \sqrt{\left(x + \frac{D}{2}\right)^2 + L^2} - \sqrt{\left(x - \frac{D}{2}\right)^2 + L^2}.$$

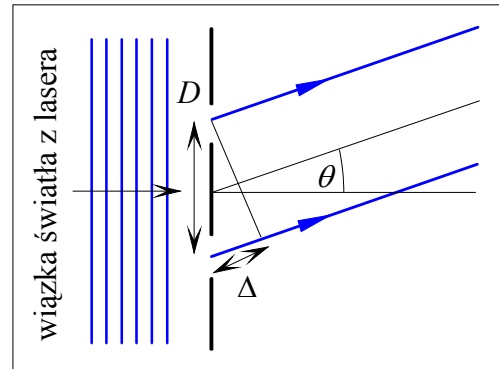
Ponieważ odległość D między szczelinami jest znacząco mniejsza niż odległość L ekranu od szczelin, możemy więc rozwinąć różnicę dróg wokół punktu $D = 0$ i zachować jedynie wyraz najniższego rzędu:

$$\Delta \approx \frac{Dx}{\sqrt{x^2 + L^2}} = D \sin \theta,$$

co prowadzi do różnicy faz:

$$\delta = \frac{2\pi D \sin \theta}{\lambda}.$$

Warto zwrócić uwagę na fakt, że ten ostatni wzór przedstawia ściśle różnicę faz, jaką znajdziemy w przypadku, gdy promienie są równoległe, jak te na Rysunku 2. O takich promieniach mówimy, że dają obraz w nieskończoności. W praktycznych doświadczeniach, na drodze promieni ustawiamy soczewkę i otrzymujemy obraz na ekranie w płaszczyźnie jej ogniskowej.



Rys. 2. Promienie równoległe

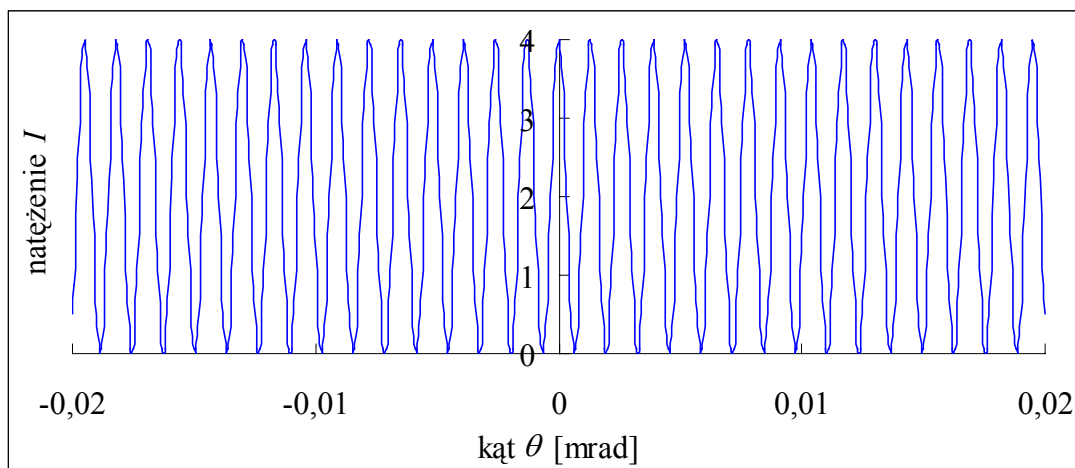
Wróćmy do wyrażenia (1), z którego widzimy, że jeśli obserwacje prowadzimy pod takim kątem θ , że różnica δ faz w punkcie P wynosi $0, \pm 2\pi, \pm 4\pi, \dots$, czyli:

$$\sin \theta_n = \frac{\lambda}{D} n, \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots,$$

to obserwujemy wzmocnienie (tzw. interferencję konstruktywną) natężenia światła do maksymalnej wartości $4I_0$, a jeśli kąt jest taki, że różnica δ faz wynosi $\pm\pi, \pm 3\pi, \pm 5\pi, \dots$, czyli:

$$\sin \theta_n = \frac{\lambda}{2D} (2n + 1), \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots,$$

to mamy wygaszenie oświetlenia do zera (dochodzi do tzw. interferencji destruktywnej). Przy pośrednich wartościach fazy mamy pośrednie wartości intensywności oświetlenia. Mówimy, że wiązki światła interferują ze sobą – na ekranie widzimy prążki jasne i ciemne, jak ukazuje to przykładowy wykres natężenia na Rysunku 3.



Rys. 3. Wykres natężenia światła dla dwóch nieskończenie cienkich szczelin

Jeśli skonfrontujemy te wyniki z relacją ukazaną w związku (2) i wiążącą różnicę faz z różnicą dróg, to zobaczymy, że wzmocnienie interferencyjne znajdujemy w punktach, dla których różnica długości dróg promieni jest wielokrotnością długości fali:

$$\delta = \frac{2\pi\Delta}{\lambda} = 2\pi n \Rightarrow \Delta = n\lambda.$$

Jasny prążek odpowiadający wartości $n = 0$ zwany jest prążkiem zerowego rzędu, a następne prążki zwiemy odpowiednio prążkami pierwszego, drugiego, ... rzędu. Ciemne prążki, czyli obszary, gdzie następuje wygaszenie pojawiają się tam, gdzie różnica długości dróg jest równa nieparzystej wielokrotności połówki długości fali:

$$\delta = \frac{2\pi\Delta}{\lambda} = (2n+1)\pi \Rightarrow \Delta = (2n+1)\frac{\lambda}{2}.$$

Powracając do kwestii przybliżeń zauważmy, że dla obszaru kątów, dla których akceptowalne jest przybliżenie $\sin \theta \approx \operatorname{tg} \theta$, zarówno wzmocnienia jak i osłabienia znajdują się w równych odstępach. Na przykład, obszary wygaszenia interferencyjnego znajdujemy dla $\delta = (2n+1)\pi$, czyli

$$(2n+1)\pi = \frac{2\pi D}{\lambda} \sin \theta_n \approx \frac{2\pi D}{\lambda} \operatorname{tg} \theta_n = \frac{2\pi D}{\lambda L} x_n, \quad (3)$$

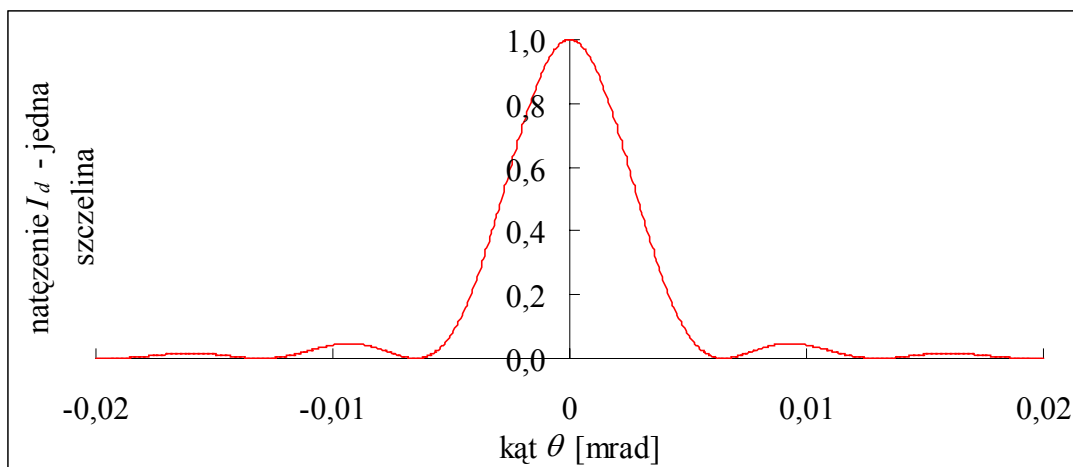
co wyznacza ich pozycję x_n względem maksimum centralnego:

$$x_n \approx \frac{(2n+1)\lambda L}{2D}. \quad (4)$$

Jeśli szerokość szczeliny jest porównywalna z długością fali lub większa od niej, to fala rozprzestrzeniająca się za szczelinami nie ma charakteru cylindrycznego, a to modyfikuje wzór (1). Modyfikację tę można łatwo określić. Zaczniemy od pojedynczej szczeliny. Musimy ją podzielić na wąskie paski i zsumować w punkcie P przyczynki do całkowitego natężenia pola elektrycznego od każdego paska, a następnie wykonać przejście graniczne z szerokością każdego paska do zera. W rezultacie otrzymujemy rozkład, zwany obrazem dyfrakcyjnym szczeliny, który mówi, że natężenie $I_d(\theta)$ światła wysyłanego ze szczeliny pod kątem θ jest proporcjonalne do

$$I_d(\theta) = I_0 \frac{\sin^2 \vartheta}{\vartheta^2}, \quad \vartheta = \frac{\pi d \sin \theta}{\lambda}, \quad (5)$$

jak ukazuje to Rysunek 4. Warto zwrócić uwagę na relację między wysokością głównego maksimum, a pierwszym maksimum pobocznym: jest ono ponad 20 razy niższe, a następne, jeszcze mniejsze, ponad 60 razy niższe niż maksimum główne. Oznacza to, że niemal cała energia niesiona przez światło mieści się w maksimum głównym.



Rys. 4. Dyfrakcja światła na pojedynczej szczelinie

Zauważmy, że minima dyfrakcyjne otrzymamy pod kątami θ , dla których argument ϑ funkcji $I_d(\theta)$ przyjmie wartość będącą wielokrotnością liczby π .

$$n\pi = \frac{\pi d \sin \theta}{\lambda} \Rightarrow \sin \theta = \frac{n\lambda}{d}.$$

Jeśli, jak poprzednio, funkcję *sinus* zastąpimy funkcją *tangens*, to będziemy mogli zapisać, że

w płaszczyźnie detektora zobaczymy minima dyfrakcyjne w punktach

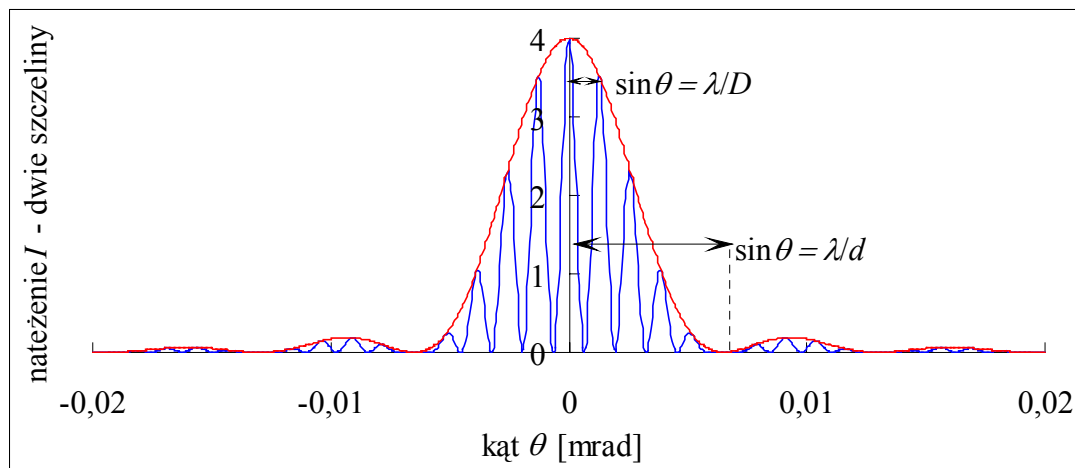
$$x_n = \frac{n\lambda L}{d}, \quad n = \pm 1, \pm 2, \dots$$

położonych symetrycznie względem maksimum centralnego.

Jeśli teraz uwzględnimy fakt skończonej szerokości szczelin, to profil dyfrakcyjny (5) nałoży się na pierwotny rozkład (1) i uzyskamy rozkład natężenia na ekranie w postaci:

$$I(\theta) = 2 \left(1 + \cos \left(\frac{2\pi D \sin \theta}{\lambda} \right) \right) I_d(\theta), \quad (6)$$

którego kształt ilustruje Rysunek 5.



Rys. 5. Obraz interferencyjny dwóch szczelin

Masz do dyspozycji

- laser;
- dwie przysłony, każda z dwiema szczelinami o różnych parametrach;
- fotodiode, czyli detektor pozwalający mierzyć natężenie światła;
- miernik uniwersalny;
- ławę optyczną z uchwyty do zamocowania lasera, przysłony i detektora.

Planowanie pomiarów

W układzie doświadczalnym odległość między płaszczyzną szczelin a detektorem wynosi około 1 m, a długość fali światła lasera to 632,8 nm. Detektor można przesuwac, za pomocą śruby, w kierunku prostopadłym do wiązki lasera na odległość około 20 cm w każdą ze stron, przy czym pozycję detektora odnajdujemy odczytując położenie wskaźnika na tle miarki milimetrowej.

Jeśli szczeliny mają szerokość $d = 0,03$ mm, a odległość D między nimi wynosi także 0,03 mm, to jakiej odległości między kolejnymi minimami interferencyjnymi oczekujesz w miejscu, gdzie znajduje się detektor? A jakiej oczekujesz odległości między minimami dyfrakcyjnymi? Jak zmieniają się te odległości, jeśli szczeliny mają szerokość $d = 0,03$ mm, a odległość D między nimi wynosi 0,06 mm? Ile minimów interferencyjnych będzie dostępne pomiarowi, jeśli założymy, że zdołasz zidentyfikować trzecie minimum dyfrakcyjne? W związku (3) wykorzystane jest przybliżenie funkcji sinus funkcją tangens. Gdybyśmy zrezygnowali z tego przybliżenia, to jak dużej ilościowej różnicy w wartości x_n dziesiątego minimum interferencyjnego oczekujesz?

Pomiary jakich wielkości są niezbędne do wyznaczenia szerokości szczelin i odległości między nimi?

Jak planujesz wykonać, od strony technicznej, pomiary pozycji minimów? Jak planujesz zebrać profil natężenia światła?

Wykonanie ćwiczenia

- Zadbaj o to, by przy braku szczelin, wiązka lasera była równoległa do ławy optycznej i aby dobrze celowała w detektor.

- Odnotuj parametry szczelin.
- Ustaw przysłonę ze szczelinami na ławie optycznej i zmierz odległość L między przysłoną a detektorem. Zwróć uwagę na to, by po wstawieniu przysłony, ugięte promienie świetlne trafiały do detektora w całym obszarze obrazu interferencyjnego, także na jego skrajach. Tak się nie stanie, jeśli przysłona ze szczelinami będzie ustawiona ukośnie.
- Podłącz do detektora miernik uniwersalny i ustaw go w trybie pomiaru napięcia stałego. Napięcie wskazywane przez miernik jest proporcjonalne do natężenia światła padającego na fotodiody – w ten sposób mierzone natężenie światła wyrażane jest w jednostkach umownych – napięciu na zaciskach fotodiody. Woltomierz należy ustawić na zakres pozwalający na możliwie najbardziej dokładny pomiar. Zauważ, że fotodiody ma na wierzchu przełącznik – przed pomiarami należy ją włączyć, a po pomiarach wyłączyć, by uniknąć niepotrzebnego rozładowania baterii.
- Odnotuj napięcia, jakie wskazuje miernik przy włączonym i wyłączonym oświetleniu górnym.
- Przesuwając detektor za pomocą śruby, wykonaj pomiar pozycji z_n minimum interferencyjnych i dyfrakcyjnych dwóch szczelin. Wyznaczając pozycję minimum metodą szukania minimum wskazań miernika, staraj się zawsze przesunąć detektor w jedną i tę samą stronę.
- Jeśli realizujesz punkt B celu ćwiczenia, powtórz powyższe pomiary dla drugiej przysłony.
- Zmierz, dla jednej, wybranej przysłony, profil natężenia światła na prawo i lewo od centralnego maksimum do trzeciego minimum interferencyjnego.

W celu bieżącej kontroli Twojej pracy, równoległe z wykonywaniem pomiarów położeń minimum, wykonuj na papierze milimetrowym odręczny szkic tej pozycji, jako funkcję jej numeru. Jakiej zależności oczekujesz?

Analiza wyników pomiarów

Główny materiał doświadczalny w tym ćwiczeniu to zestaw par wartości (n, z_n) numerów n i pozycji z_n minimum obrazu interferencyjnego dwóch szczelin mierzonych w pewnym arbitralnie wybranym układzie odniesienia (zdefiniowanym zerem miarki milimetrowej przy detektorze). Przedstaw na wykresie te wyniki. Wykonaj analogiczny wykres (np. na tym samym rysunku) dla minimum dyfrakcyjnych wynikających z niezerowej szerokości szczelin.

Ustal realistyczne, dopuszczalne błędy graniczne wielkości bezpośrednio mierzonych i wyznacz odpowiadające im niepewności standardowe – pamiętaj, że zdolność rozdzielcza przyrządu nie zawsze gwarantuje realistyczne błędy graniczne. Oczywiście, możesz też od razu oszacować niepewności standardowe, bez przechodzenia przez etap błędów granicznych.

Zgodnie z poleceniem asystenta przeprowadź stosowną analizę, której celem jest zrealizowanie zadania określonego punktem A lub B podanym w części **Cel ćwiczenia**.

W raporcie zamieść rysunek ukazujący zmierzony, dla jednej z przysłon, profil obrazu interferencyjnego. Zastanów się, jak na rysunku zaznaczy się wpływ oświetlenia sali, w której wykonujesz pomiary. Rysunek ma mieć charakter jedynie poglądowy i ilustrujący problem, ale jeśli chcesz, możesz dopasować zależność (6) do uzyskanych danych.

Istotne, w Twojej opinii, kroki analizy danych podsumuj stosownymi tabelami z wynikami pośrednimi i zilustruj odpowiednimi rysunkami (które nie muszą być wykonane za pomocą komputerowego programu – nic nie umniejsza wartości Twojej pracy, jeśli w raporcie umieścisz ręcznie wykonany, z dołożeniem wszelkiej staranności, rysunek np. na papierze milimetrowym).

Wydawałoby się, że relacja (4) podpowiada, iż dla każdej pary $(n; x_n)$ wartości numeru n minimum i jego położenia x_n mierzonego względem pozycji x_0 centralnego maksimum można utworzyć ocenę λ_n długości fali:

$$\lambda_n = \frac{2Dx_n}{(2n+1)L}$$

lub, przy znanej długości fali, ocenę D_n odległości między szczelinami:

$$D_n = \frac{(2n+1)\lambda L}{2x_n}.$$

Można także utworzyć niepewności tych wielkości wynikające z niepewności odległości L i pozycji x_n , aby następnie wyznaczyć średnią ważoną tych ocen wraz z jej niepewnościami. Procedura taka jest równie atrakcyjna, co błędna i nie powinna być stosowana. Znane wzory na średnią ważoną i jej niepewności słuszne są jedynie dla pomiarów statystycznie niezależnych, a więc takich, w których każda ocena λ_n długości fali lub ocena D_n odległości między szczelinami wyznaczana jest z oddzielnych pomiarów. Ponieważ zarówno ocena odległości L jak i pozycji x_0 maksimum centralnego jest tylko jedna i obie wielkości wchodzi do wszystkich ocen λ_n lub D_n , oceny te nie są statystycznie niezależne i stosownie algorytmu średniej ważonej przywiedzie do błędnej wartości niepewności oceny długości fali lub odległości między szczelinami.

Jeśli na którymś z etapów analizy prowadzisz dopasowanie modelowej zależności do danych metodą najmniejszych kwadratów, **obowiązkowo** podaj jawną postać wielkości minimalizowanej, jako że postać ta jednoznacznie wyznacza oceny poszukiwanych współczynników modelowej zależności wraz z ich macierzą kowariancji i nie musisz cytować stosownych wzorów dla tych obiektów. Pamiętaj, że niezbędnym elementem tego podejścia jest uzasadnienie wyboru zmiennej zależnej i niezależnej, a także sprawdzenie, jeśli to możliwe, zgodności danych z modelem metodą testu χ^2 . Pamiętaj też, że wersja metody najmniejszych kwadratów, którą poznałeś na wykładzie i która jest powszechnie prezentowana w wielu książkach i na sieci WWW, wymaga wyników pomiarowych, z których każdy uzyskany jest w niezależnym akcie pomiarowym. **Nie mają takiego charakteru wielkości uzyskane np. w wyniku odejmowania jednej ustalonej wartości od wszystkich wyników pomiarów, jeśli wartość odejmowana pochodzi z pomiaru.**

Literatura przedmiotu

- Sz. Szczeniowski, *Fizyka doświadczalna* Część IV – Optyka, Warszawa, 1983;
- D. Halliday, R. Resnick i J. Walker, *Podstawy fizyki*, t. 4, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2003;
- H. Szydłowski, *Pracownia fizyczna wspomagana komputerem*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, szereg wydań w latach 2003 ÷ 2012;
- J.R. Meyer-Arendt, *Wstęp do optyki*, PWN, Warszawa, 1977;
- A. Zięba, *Analiza danych w naukach ścisłych i technice*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2013.

Dodatkowe uwagi odnośnie do raportu

W raporcie należy zamieścić, w stosownie dobranych tabelach, wszystkie surowe wyniki pomiarów tak, aby sięgając jedynie do raportu i bez potrzeby odwoływania się do dziennika doświadczenia można było wykonać pełną i niezależną analizę Twych danych. Zadbaj o wierne przeniesienie wszystkich wartości do raportu.

Nim przygotujesz raport, zaznajom się z uwagami zawartymi w opracowaniu *Instrukcja – Jak pisać raport końcowy* oraz z przykładową realizacją tych uwag w postaci *Przykładowy raport końcowy*. Materiały te zamieszczone są na stronie <http://anipw.igf.fuw.edu.pl> Pracowni wstępnej. Wymagania ukazane w tych opracowaniach będą bezwzględnie egzekwowane przy sprawdzaniu Twego raportu. W szczególności pamiętaj o konwencji odnoszącej się do precyzji przedstawiania niepewności, a co za tym idzie, również wartości wielkości zmierzonej.

Absolutnie zalecane jest świadome przyjrzenie się redakcji tekstu, tabel, rysunków i wzorów, sposobów ich numerowania, tytułowania i opisywania w dowolnym, ale wydanym przez uznane wydawnictwo, akademickim podręczniku do fizyki, jak również zajrzenie do kilku publikacji w różnych czasopismach naukowych, co może Ci ułatwić podjęcie decyzji co do podziału Twego raportu na części.

Pytania i zadania definiujące wymagania do ćwiczenia

Problem 1. W jakim miejscu między laserem a fotodiodą należy ustawić przysłonę z dwiema szczelinami: blisko lasera, blisko fotodiody, a może gdzieś w środku?

Problem 2. Jeśli w obrazie interferencyjnym dwóch szczelin przychodzimy od jednego jasnego prążka do kolejnego, leżącego dalej od głównego maksimum, to różnica dróg wzrasta, czy też maleje?

Problem 3. Czy odstęp między prążkami interferencyjnymi obrazu dwóch szczelin wzrasta, maleje, czy też nie zmienia się, gdy: a) odległość między szczelinami zostaje powiększona, b) barwa światła ulega zmianie z czerwonej na niebieską?

Problem 4. Jeśli dwie szczeliny są oświetlone widzialnym światłem białym, tj. w zakresie od czerwonego do niebieskiego, to czy boczne maksima obrazu interferencyjnego znajdujące się bliżej centralnego maksimum zostaną wytworzone przez składową czerwoną, czy niebieską?

Problem 5. Narysuj rysunek ukazujący kierunek, w którym interferencja fal światła emitowanego przez dwie bardzo wąskie szczeliny prowadzi do pierwszego minimum w obrazie interferencyjnym. Na rysunku wskaż różnicę dróg, która jest odpowiedzialna za wynik tej interferencji. Ile, w relacji do długości fali, ta różnica dróg wynosi?

Problem 6. Narysuj rysunek ukazujący kierunek, w którym interferencja fal światła emitowanego przez jedną szczelinę prowadzi do pierwszego minimum w obrazie dyfrakcyjnym. Na rysunku wskaż różnicę dróg, która jest odpowiedzialna za wynik tej interferencji. Ile ta różnica dróg wynosi?

Problem 7. Jaki musi być stosunek długości dwóch fal emitowanych przez laser oświetlający przysłonę z dwiema bardzo wąskimi szczelinami, aby kierunek odpowiadający pierwszemu minimum dla jednej fali pokrywał się z kierunkiem odpowiadającym maksimum pierwszego rzędu dla drugiej fali?

Problem 8. Jaki musi być stosunek długości dwóch fal emitowanych przez laser oświetlający przysłonę z jedną szczeliną, aby kierunek odpowiadający minimum pierwszego rzędu dla jednej fali pokrywał się z kierunkiem odpowiadającym drugiemu minimum dla drugiej fali?

Problem 9. Laser emitujący światło o długości fali $\lambda = 500$ nm oświetla przysłonę z pojedynczą szczeliną o szerokości $d = 1$ mm. Ile kierunków odpowiadających minimum natężenia znajdzie się w obszarze kątowym o szerokości 2 mrad położonym symetrycznie wokół maksimum głównego?

Problem 10. Laser emitujący światło o długości fali $\lambda = 500$ nm oświetla przysłonę z dwiema bardzo wąskimi szczelinami odległymi o $D = 1$ mm. Ile kierunków odpowiadających minimum natężenia znajdzie się w obszarze kątowym o szerokości 2 mrad położonym symetrycznie wokół maksimum głównego?

Problem 11. W ośrodku sprężystym, wzdłuż osi X propagują się dwie fale poprzeczne:

$$\psi_1(x, t) = A \sin(kx - \omega t), \quad \psi_2(x, t) = A \sin(kx + \omega t), \quad k = \frac{2\pi}{\lambda}, \quad \omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}, \quad \omega = kv,$$

gdzie λ jest długością fali, T jej okresem, a v jej prędkością. Wyznacz postać fali $\psi(x, t)$ zadanej sumą obu fal i narysuj wykres zależności $\psi(x, t)$ od położenia x w chwili czasu $t = 0$. Omów, jak będzie zmieniała się fala $\psi(x, t)$ z upływem czasu.

Problem 12. Dwa punktowe źródła światła wysyłają zgodne w fazie monochromatyczne fale. Interferencja tych fal obserwowana jest na ekranie, który jest prostopadły do linii łączącej źródła. Opisz jakościowo charakter obrazu interferencyjnego na ekranie. Jakim zmianom będzie on ulegał, jeśli jedno ze źródeł będzie się poruszać wzdłuż łączącej je linii?

Problem 13. Dlaczego w ćwiczeniu wykonywany jest pomiar pozycji minimów a nie maksimów?

Problem 14. Doświadczenie Younga jest dowodem na falową czy korpuskularną naturę światła?

Pytania i zadania przybliżające, uzupełniające lub poszerzające treść ćwiczenia

Problem 15. Gdy Thomas Young przeprowadzał swoje doświadczenie z dwiema szczelinami w 1801 roku, nie istniały lasery a nawet oświetlenie elektryczne i musiał używać oświetlenia naturalnego. Jego doświadczenie różniło się tym od doświadczenia z laserem, że między źródłem a dwiema szczelinami umieszczona była dodatkowa przesłona z małą dziurką. Dlaczego?

Problem 16. Wzdłuż osi X propaguje się N fal postaci:

$$E_n(x, t) = E_0 \sin(kx - \omega t + (n-1)\delta), \quad n = 1, 2, \dots, N, \quad k = \frac{2\pi}{\lambda}, \quad \omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}, \quad \omega = kv,$$

gdzie δ jest pewną znaną i zadaną fazą. Wyznacz obraz interferencyjny, jakie one tworzą i przedyskutuj jego postać w zależności od wartości fazy δ .

Problem 17. Aby wyznaczyć postać rozkładu natężenia światła za pojedynczą szczeliną o szerokości d , czyli jej obraz dyfrakcyjny, wyobraźmy sobie, że szczelinę tę dzielimy na bardzo dużą liczbę N bardzo wąskich pasków, każdy o szerokości d/N , równoległych do osi szczeliny. Rozważmy dowolny kierunek określony kątem θ mierzonym od kierunku wiązki laserowej padającej prostopadłe na szczelinę i fale rozchodzące się od każdego z pasków. Rysunek 6 pokazuje trzy takie kolejne paski rozciągające się od jednej z krawędzi szczeliny i trzy promienie wychodzące ze środka pasków wyznaczające kierunek obserwacji. Dwie fale rozprzestrzeniające się w wybranym kierunku, a wyemitowane z dwóch sąsiednich pasków, różnią się fazą $\delta = 2\pi\Delta/\lambda$ wynikającą z różnicy $\Delta = d \sin\theta/N$ pokonanych dróg. Niech fala emitowana przez laser ma długość λ i okres T . Oznaczmy też symbolem x współrzędną wzdłuż kierunku propagacji fal, a wtedy zapiszemy, że za przesłoną mamy N fal postaci

$$E_n(x, t) = \frac{E_0}{N} \sin(kx - \omega t + (n-1)\delta), \quad n = 1, 2, \dots, N, \quad k = \frac{2\pi}{\lambda}, \quad \omega = \frac{2\pi}{T},$$

We wzorze tym amplitudę każdej z fal pomniejsziliśmy o czynnik N , gdyż przy oświetleniu np. na wprost szczeliny, gdzie sumują się wszystkie fale, musimy odzyskać natężenie pola elektrycznego fali padającej. Wyznacz sumę fal $E_n(x, t)$, wykonaj przejście graniczne z liczbą N do nieskończoności i znajdź natężenie oświetlenia jako funkcję kąta obserwacji.

Problem 18. Wiązka światła laserowego pada na przesłonę, w której wykonano dwie, bardzo wąskie szczeliny. Obraz interferencyjny obserwowany jest na ekranie równoległym do przesłony ze szczelinami i odległym o $L = 8$ m od nich.

W pewnym momencie jedna ze szczelin jest odsuwana od drugiej bez zmiany ich szerokości. Po raz pierwszy ciemny prążek jest obserwowany na ekranie, dokładnie w punkcie naprzeciw szczeliny nieruchomej, gdy odległość między szczelinami wynosi $D_1 = 2$ mm. Na jaką dodatkową odległość należy oddalić szczelinę ruchomą, aby na ekranie pojawił się ponownie ciemny prążek w tym samym miejscu?

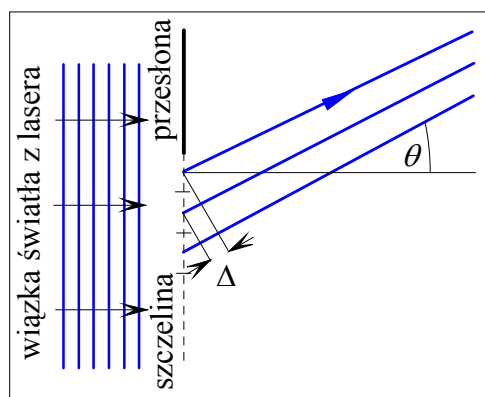
Problem 19. W odległości $H = 1$ m od przesłony, w której wykonano odległe o $D = 2$ mm dwie wąskie szczeliny, porusza się ze stałą prędkością v monochromatyczne, punktowe źródło światła emitujące izotropowo falę o długości $\lambda = 600$ nm. Źródło porusza się wzdłuż prostej prostopadłej do osi szczelin i równoległe do przesłony. Za przesłoną, w pewnej odległości od niej i połowie odległości między szczelinami znajduje się detektor, który rejestruje częstotliwość $f = 15$ GHz okresowych zmian oświetlenia. Oblicz prędkość v , z jaką porusza się źródło. Przyjmij, że źródło porusza się w obszarze naprzeciw szczelin.

Wskazówka do dalszych zadań.

Jeśli fala wędruje w ośrodku o współczynniku załamania n , to jej długość λ' fali skraca się i wiąże się z długością λ fali w próżni wzorem: $\lambda' = \lambda/n$. Wyrażenie na różnicę faz pozostaje bez zmiany, ale różnica Δ dróg fizycznych powiększa się o czynnik n : $\Delta = n(r_2 - r_1)$ i zwana jest wtedy różnicą dróg optycznych.

Problem 20. W doświadczeniu Younga użyto światła o długości $\lambda = 550$ nm. Gdy jedną ze szczelin pokryto cienkim płatkem miki o współczynniku załamania $n = 1,58$, jasny prążek zerowego rzędu przesunął się do poprzedniego położenia jasnego prążka siódmego rzędu. Oblicz grubość D płatka.

Problem 21. Na płaskiej powierzchni grubej, szklanej płyty płasko-równoległej o współczynniku załamania $n = 1,5$ pomalowanej na czarno, usunięto farbę w taki sposób, że powstały dwie bardzo wąskie szczeliny w odległości $D = 10^{-6}$ m. Od strony powietrza na szczeliny pada prostopadłe wiązka światła z lasera, który emituje fale o długościach $\lambda = 633$ nm w powietrzu.



Rys. 6. Dyfrakcja na szczelinie

- a) Ile prążków odpowiadających maksimum będzie można zobaczyć na drugiej ścianie płyty płasko-równoległej odgrywającej rolę ekranu?
- b) Czy prążki obserwowane w szkle będą bardziej rozciągnięte, niż gdybyśmy obserwację prowadzili w powietrzu? Przyjmij, że współczynnik załamania powietrza jest równy jedności.

Opracował: Roman J. Nowak i Wojciech Wasilewski, 16 stycznia 2017.