

ZADANIE 01 INTERFERENCJA I DYFRAKCJA ŚWIATŁA LASEROWEGO

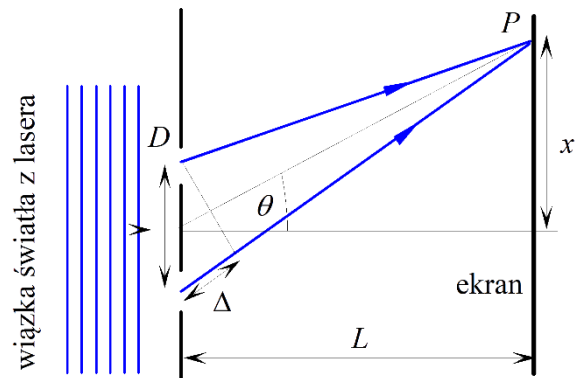
I. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest pomiar obrazu interferencyjno-dyfrakcyjnego pojedynczej i podwójnej szczeliny oraz wyznaczenie ich parametrów.

II. Wprowadzenie

Interferencja światła na dwóch nieskończenie cienkich szczelinach

Zgodnie z zasadą Huygensa, w przypadku skierowania światła lasera na przesłonę, w której wycięte są dwie równoległe szczeliny, każda ze szczelin, staje źródłem fali kulistej. Jeśli szczeliny mają szerokość d znacząco mniejszą od długości fali lasera, a ich długość 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.



Rysunek 1 Interferencja światła na podwójnej szczelinie

Przyjmijmy, że na szczeliny w przysłonie światło z lasera pada prostopadle, 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:

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

i składają się do wypadkowego natężenie pola:

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

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:

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

gdzie

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

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

Niech obserwacja prowadzona będzie na równoległym do powierzchni szczelin ekranie znajdujący się w odległości L za przesłoną pod kątem θ do wiązki światła z lasera, jak to przedstawia Rysunek 1, wtedy:

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

gdzie D jest odległością między szczelinami.

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:

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

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 zgodnie ze wzorem (1) obserwujemy wzmocnienie (tzw. interferencję konstruktywną) natężenia światła do maksymalnej wartości $4I_0$. Zgodnie ze wzorem (2) wzmocnienie interferencyjne obserwowane jest w punktach, dla których różnica długości dróg promieni jest wielokrotnością długości fali:

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

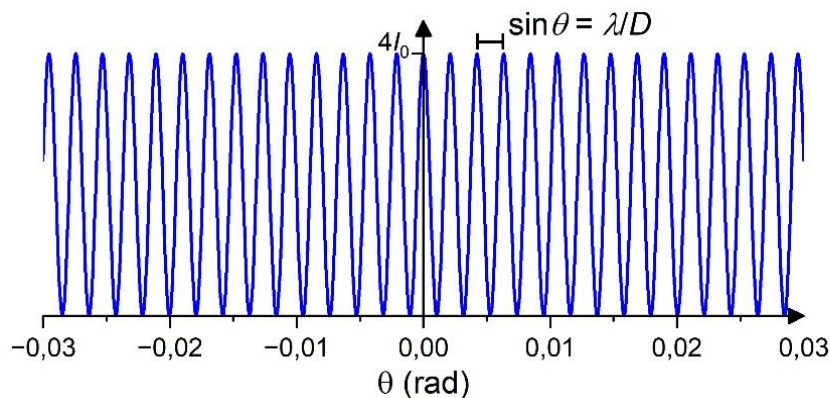
Jeśli kąt jest taki, że różnica δ faz wynosi $\pm\pi, \pm 3\pi, \dots$, czyli:

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

to mamy wygaszenie oświetlenia do zera (dochodzi do tzw. interferencji destruktywnej). Następuje to gdy różnica długości dróg jest równa nieparzystej wielokrotności połówki długości fali:

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

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 2. Jasny prążek odpowiadający wartości $n = 0$ zwany jest prążkiem zerowego rzędu, a następne prążki zwiemy odpowiednio prążkami pierwszego, drugiego, ..., n -tego rzędu.



Rys. 2. Wykres natężenia światła dla dwóch nieskończenie cienkich szczelin odległych od siebie o 0,3 mm oświetlonych laserem o długości fali 632,8 nm.

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

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

co wyznacza ich pozycję x_n względem maksimum centralnego:

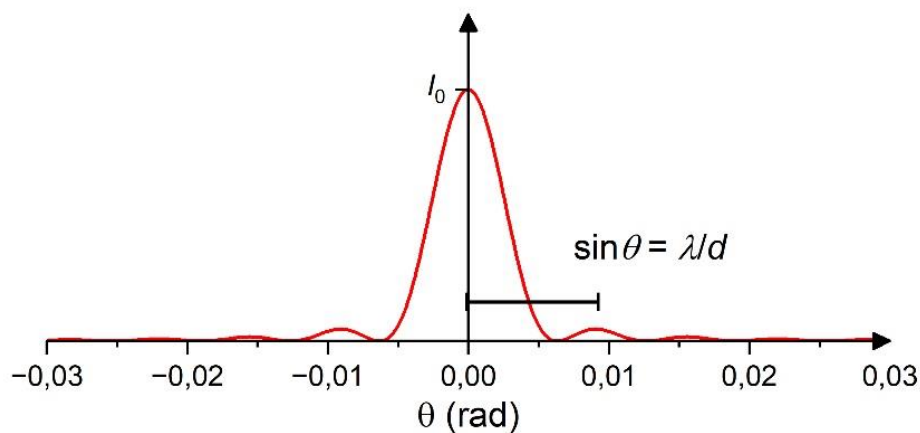
$$x_n \approx \frac{(2n+1)\lambda L}{2D}. \quad (4)$$

Dyfrakcja światła na szczelinie/szczelinach o niezanedbywalnej szerokości

W przypadku pojedynczej szczeliny o szerokości porównywalnej lub większej od długości fali, fala rozprzestrzeniająca się za nią nie ma charakteru cylindrycznego. Zgodnie z zasadą Huygensa każdy punkt ośrodka, do którego dociera fala staje się źródłem fali kulistej. Należy zatem szczelinę 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 zaprezentowano na Rysunku 3. Warto zwrócić uwagę na relację między wysokością głównego maksimum, a pierwszym maksimum pobocznym: jest ono ponad 20 razy niższe, a następne, jeszcze ponad 60 razy niższe niż maksimum główne. Oznacza to, że niemal cała energia niesiona przez światło mieści się w maksimum głównym.



Rys. 3. Wykres natężenia światła dla pojedynczej szczeliny o szerokości 0,1 mm oświetlonej laserem o długości fali 632,8 nm.

Minima dyfrakcyjne obserwowane są pod kątami θ , dla których argument ϑ funkcji $I_d(\theta)$ przyjmie wartość będącą wielokrotnością liczby π .

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

Dla obszaru kątów, dla których akceptowalne jest przybliżenie $\sin \theta \approx \text{tg } \theta$, minima dyfrakcyjne obserwowane są w punktach

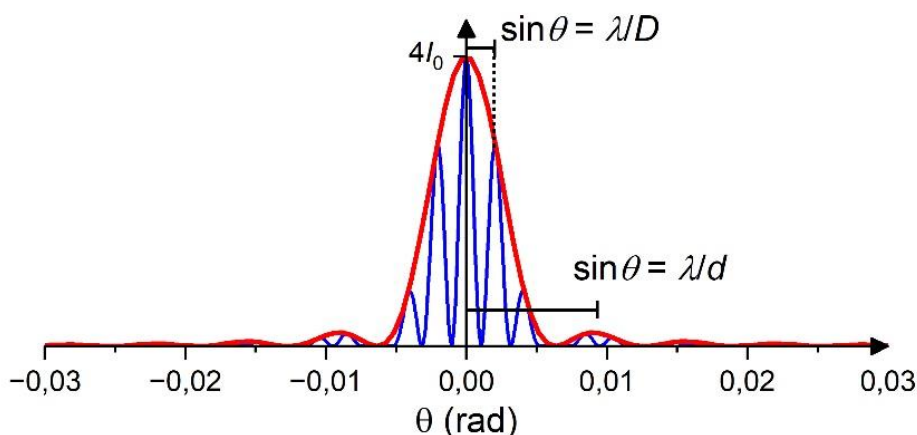
$$x_n = \frac{n\lambda L}{d}, \quad n = \pm 1, \pm 2, \dots$$

położonych symetrycznie względem maksimum centralnego.

W przypadku skierowania światła lasera na przesłonę, w której wycięte są dwie równoległe szczeliny o szerokości d , których środki są odległe od siebie o D , profil interferencyjny (1) dwóch szczelin nałoży się na profil dyfrakcyjny każdej z nich (5) i uzyskany 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 4.



Rys. 4. Wykres natężenia światła dwóch szczelin dla dwóch szczelin o szerokości 0,1 mm, odległych od siebie o 0,3 mm oświetlonych laserem o długości fali 632,8 nm.

III. Wykonanie pomiarów

III.1. Wyposażenie

Masz do dyspozycji:

- laser He-Ne LASOS o długości fali 632,8 nm;
- filtr szary regulowany
- przysłonę z dwiema szczelinami o znanych parametrach;
- pojedynczą szczelinę o regulowanej szerokości;
- ekran do obserwacji obrazu interferencyjno-dyfrakcyjnego;
- skaner dyfrakcyjny PASCO OS-8441;
- oprogramowanie Capstone/SparkVue do odczytów sygnału ze skanera;
- blat optyczny z uchwytami do zamocowania lasera, filtra, przysłony i skanera.

III.2. Planowanie pomiarów

Skaner dyfrakcyjny PASCO OS-8441 łączy w sobie czujnik położenia z czujnikiem światła. Czujnik światła zamontowany jest na szynie, którą można przesuwac w bok w zakresie 15,5 cm poprzez obracanie korby z boku skanera. Położenie czujnika jest odczytywane z rozdzielczością 0,01 mm. Aby zmierzyć dokładnie położenie czujnika, należy obracać korbą z niewielką prędkością. Przed czujnikiem światła, umieszczony jest uchwyt z sześcioma przesłonami o szerokości 0,1 mm, 0,2 mm, 0,3 mm, 0,5 mm, 1,0 mm i 1,5 mm, które można zmieniać obracając pokrętkę "aperture width" umieszczone z tyłu skanera. Zmiana szerokości przesłony pozwala kontrolować rozdzielczość przestrzenną i ilość wpadającego światła do czujnika natężenia światła. Aby wpuścić więcej światła do czujnika należy wybrać szerszą przesłonę, aby zwiększyć rozdzielczość przestrzenną należy wybrać węższą przesłonę. Dodatkowo istnieje możliwość regulacji czułości czujnika światła za pomocą oprogramowania. Po podłączeniu do urządzenia, wybierz ikonę koła zębatego obok „Czujnik natężenia dyfrakcji”. Spowoduje to otwarcie Menu Właściwości, które zawiera opcję ustawienia czujnika na wysoką, średnią lub niską czułość. Podczas podłączania czujnika do urządzenia z oprogramowaniem zwróć uwagę na numer czujnika którym dysponujesz, tak aby podczas pomiaru połączyć się z nim (a nie na przykład z czujnikiem kolegów czy koleżanek pracującymi na innych stanowiskach). Są to numery w formacie xxx-xxx widoczne z tyłu na każdym z czujników obok ikony ⚙️. Jeśli czujnik sygnalizuje rozładowaną baterię podłącz go do ładowarki. Przed rozpoczęciem pomiarów sprawdź czy potrafisz swobodnie posługiwać się interfejsem programu, w tym uruchomić i zakończyć pomiar, zmienić odpowiednie ustawienia czujnika itp.

W układzie doświadczalnym odległość między płaszczyzną szczelin a detektorem wynosi około 1 m, a długość fali światła lasera to ok 600 nm. 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? Ile minimów interferencyjnych będzie dostępne podczas pomiaru, 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 w celu wyznaczenia szerokość szczelin i odległość między nimi?

Jak planujesz wykonać, od strony technicznej, pomiary pozycji minimów?

Jak planujesz zebrać profil natężenia światła, mierząc natężenie światła prążka centralnego oraz prążków bocznych (charakteryzujących się znacznie mniejszym natężeniem światła), tak aby zachować stosunek wskazań czujnika proporcjonalny do stosunku natężeń światła, oraz aby jednocześnie były one wyodrębnione z poziomu szumu? Zwróć uwagę, że zmiana szerokości przesłony zmienia wskazania czujnika światła.

III.3. Wykonanie ćwiczenia

- Zadbaj o to, by przy braku szczelin, wiązka lasera do ławy optycznej i aby dobrze celowała w detektor, umieszczony na środku możliwego przesuwu skanera.
- 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.
- Zmieniając położenie filtra szarego zadbaj aby światło lasera nie nasycalo czujnika światła w głównym maksimum.
- Odnotuj wskazania, jakie rejestruje czujnik przy włączonym i wyłączonym oświetleniu górnym.
- Przesuwając powoli detektor za pomocą korby, wykonaj pomiar pozycji z_n minimów interferencyjnych i dyfrakcyjnych dwóch szczelin. Wyznaczając pozycję minimum metodą szukania minimum wskazań miernika, staraj się zawsze przesuwac detektor w jedną i tę samą stronę. W celu bieżącej kontroli Twojej pracy, równoległe z wykonywaniem pomiarów położenia minimów, wykonuj na papierze milimetrowym odręczny szkic tej pozycji, jako funkcję jej numeru. Jakiej zależności oczekujesz?
- Zmierz, profil natężenia światła na prawo i lewo od centralnego maksimum do trzeciego minimum interferencyjnego dobierając odpowiednio szerokość przesłony i czułość czujnika. Zadbaj, aby światło lasera nie nasycalo czujnika światła w głównym maksimum.
- Odnotuj parametry użytych szczelin.
- Powtórz powyższe pomiary umieszczając na drodze lasera pojedynczą szczelinę o regulowanej szerokości, dobierając szerokość szczeliny tak aby uzyskać wyraźny obraz dyfrakcyjny.

IV. Analiza wyników pomiarów

Główny materiał doświadczalny w tym ćwiczeniu to zestaw par wartości (n, z_n) numerów n i pozycji z_n minimów obrazu interferencyjnego mierzonego w pewnym arbitralnie wybranym układzie odniesienia (zdefiniowanym zerem czujnika położenia skanera). Przedstaw na wykresie te wyniki. Wykonaj analogiczny wykres (np. na tym samym rysunku) dla minimów dyfrakcyjnych wynikających z niezerowej szerokości szczelin dla szczeliny podwójnej i pojedynczej. Ustal realistyczne, niepewności pomiarowe wielkości bezpośrednio mierzonych – pamiętaj, że zdolność rozdzielcza przyrządu nie zawsze gwarantuje realistyczne niepewności pomiarowe. Wykonaj

dopasowanie odpowiednich zależności i wyznacz parametry szczelin. W przypadku szczelin podwójnej porównaj wyznaczone wielkości z parametrami nominalnymi.

W raporcie zamieść rysunek ukazujący zmierzone profile obrazu interferencyjno-dyfrakcyjnego. Zastanów się, jak na wykresie zaznaczy się wpływ oświetlenia sali, w której wykonujesz pomiary. Spróbuj dopasować zależność (5) i (6) do uzyskanych danych. Jeśli Ci się to nie uda, porównaj stosunki natężenia światła w kolejnych maksimach z przewidywaniami teoretycznymi.

Istotne, w Twojej opinii, kroki analizy danych podsumuj stosownymi tabelami z wynikami pośrednimi i zilustruj odpowiednimi rysunkami.

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 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 jednak 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 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 danych prowadzisz dopasowanie zależności modelowej metodą najmniejszych kwadratów, **obowiązkowo** podaj postać dopasowywanej funkcji oraz określ przyjęte niepewności. Podaj uzasadnienie wyboru zmiennej niezależnej, za wyjątkiem sytuacji, w których ona jest z góry narzucona. Przeprowadź walidację modelu uwzględniającą zasadność przyjętych niepewności pomiarowych. Jako wynik dopasowania podaj estymaty dopasowywanych parametrów wraz z ich niepewnościami. W uzasadnionych przypadkach przedyskutuj istotność dopasowywanych parametrów. Do dobrej praktyki należy również w przypadku dopasowania funkcji opisanej więcej niż jednym parametrem podanie kowariancji i współczynników korelacji parametrów a także wykresu reszt z tego dopasowania oraz jego dyskusja.

Pamiętaj też, że najczęściej używana metoda najmniejszych kwadratów 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.**

V. Dodatkowe uwagi odnośnie do raportu

Nim przygotujesz raport, zaznajom się z uwagami zawartymi w [wymaganiach dotyczących raportu](#) zamieszczonymi na stronie pracowni. Absolutnie zalecane jest także świadome przyjrzenie się redakcji tekstu, a także 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 ułatwić podjęcie decyzji co do podziału Twojego raportu na części.

W raporcie **obowiązkowo** zamieść wszystkie surowe wyniki pomiarów tak, aby sięgając jedynie do raportu i bez potrzeby odwoływania się do protokołu z doświadczenia można było wykonać pełną i niezależną analizę Twoich danych. Pamiętaj, że w niektórych przypadkach uzasadnione jest przeniesienie tych danych do Suplementu. W przypadku bardzo dużej liczby danych pomiarowych (np. zebranych komputerowo) dopuszczalne jest umieszczenie danych nie w formie

tabel, ale w formie wykresów. Wówczas oryginalne dane należy dołączyć do raportu w formie cyfrowej (np. w wiadomości email do prowadzącego).

VI. 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.

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:

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

gdzie λ jest długością fali, T jej okresem, a v jej prędkością. Wyznacz postać fali $\psi(x,t)$ zadanej sumą obu fal i naszkicuj 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:

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

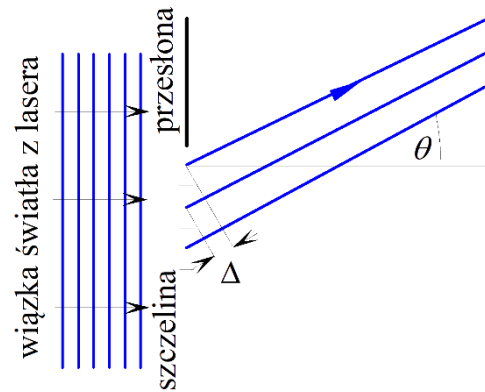
gdzie δ jest pewną znaną i zadaną fazą. Wyznacz obraz interferencyjny, jakie one tworzą i przedyskutuj jego postać w zależności od wartości fazy δ .

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 prostopadle na szczelinę i fale rozchodzące się od każdego z pasków. Rysunek 5 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

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

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 z 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



Rysunek 5. Dyfrakcja na pojedynczej szczelinie

$D_1 = 2$ 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 periodycznych 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 prostopadle wiązka światła z lasera, który emituje fale o długościach $\lambda = 633$ nm w powietrzu.

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

Opracowała: Aneta Drabińska, sierpień 2023 r.

Na podstawie instrukcji autorstwa: Romana J. Nowaka i Wojciecha Wasilewskiego, 16 stycznia 2017.