

Ćwiczenie 323

Adam Buczek

Badanie zjawisk dyfrakcji i interferencji światła

Cel ćwiczenia

Eksperymentalna obserwacja zjawisk dyfrakcji i interferencji. Wyznaczenie szerokości badanych szczelin oraz stałych siatek dyfrakcyjnych.

Wprowadzenie

Zjawiska interferencji i dyfrakcji dotyczą procesów związanych z rozchodzeniem i nakładaniem się fal. Fala jest to zaburzenie – często periodyczne – zmienne zarówno w czasie, jak i przestrzeni. Zależnie od rodzaju takiego zaburzenia i typu ośrodka, w jakim się ono rozchodzi, możemy mieć do czynienia z różnymi typami fal (akustycznymi, elektromagnetycznymi, falami na wodzie itd.). Niniejsze opracowanie odnosi się szczególnie do fal elektromagnetycznych, lecz należy pamiętać, że interferencja i dyfrakcja dotyczą wszystkich rodzajów zjawisk falowych.

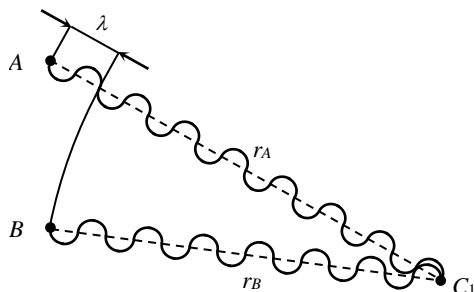
Interferencja

Ze zjawiskiem *interferencji* mamy do czynienia, gdy dwie fale lub więcej fal spotyka się w tym samym punkcie przestrzeni. Następuje wówczas ich wzajemne *nałożenie*. W większości przypadków możemy przyjąć, że fala wypadkowa w punkcie spotkania będzie prostą sumą fal składowych. Jest to tak zwana *zasada superpozycji*, którą przyjmujemy również w niniejszym opracowaniu. Dodatkowo – upraszczając zagadnienie – będziemy rozpatrywać tylko nałożenie fal o tych samych długościach λ (*fale monochromatyczne*) i amplitudach oraz zachowujących stałość fazy w czasie i przestrzeni (*fale spójne*).

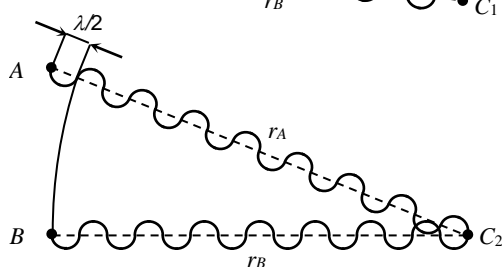
Najprostszy przykład interferencji jest nakładanie się fal pochodzących z dwóch punktów przestrzeni A i B . Szczególne przypadki takiego nałożenia pokazano na rysunkach 17.1 i 17.2.

Na rysunku 17.1 pokazano przypadek, w którym różnica przebytych przez fale dróg $\Delta S = r_A - r_B$ jest równa długości fali λ i w punkcie spotkania C_1 fale się wzmacniają. W tym punkcie fala wypadkowa ma amplitudę dwukrotnie większą od amplitud fal składowych. Na rysunku 17.2 pokazano z kolei przypadek, w którym różnica przebytych przez fale dróg ΔS jest równa połowie długości fali $\lambda/2$ i w punkcie spotkania C_2 fale się osłabiają. W tym punkcie fala wypadkowa ma amplitudę zerową.

Należy pamiętać, że źródła w punktach A i B emitują fale we wszystkich kierunkach, nie tylko w pokazanych na rysunkach 17.1 i 17.2. Dodatkowo fale, które już uległy nałożeniu, będą dalej zgodnie z pierwotnymi kierunkami i mogą interferować w następnych punktach. Zatem wzmocnienia i osłabienia pojawią się również w kolejnych punktach C w przestrzeni wokół źródeł A i B . Uogólniając warunki interferencji na wszystkie takie punkty, stwierdzamy, co następuje:



Rys. 17.1. Nałożenie się fal wybiegających ze źródeł A i B . Przypadek powstania wzmocnienia w punkcie C_1 . Różnica dróg przebytych przez fale od źródeł do punktu C_1 wynosi λ



Rys. 17.2. Nałożenie się fal wybiegających ze źródeł A i B . Przypadek powstania osłabienia w punkcie C_2 . Różnica dróg przebytych przez fale od źródeł do punktu C_2 wynosi $\lambda/2$

- w danym punkcie wystąpi *wzmocnienie* nakładających się fal, gdy różnica przebytych przez nie dróg ΔS będzie parzystą wielokrotnością połowy długości fali (czyli całkowitą wielokrotnością długości fali):

$$\Delta S = n \lambda, \quad \text{gdzie} \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (17.1)$$

- w danym punkcie wystąpi *osłabienie* nakładających się fal, gdy różnica przebytych przez nie dróg ΔS będzie nieparzystą wielokrotnością połowy długości fali:

$$\Delta S = (2n + 1) \frac{\lambda}{2}, \quad \text{gdzie} \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (17.2)$$

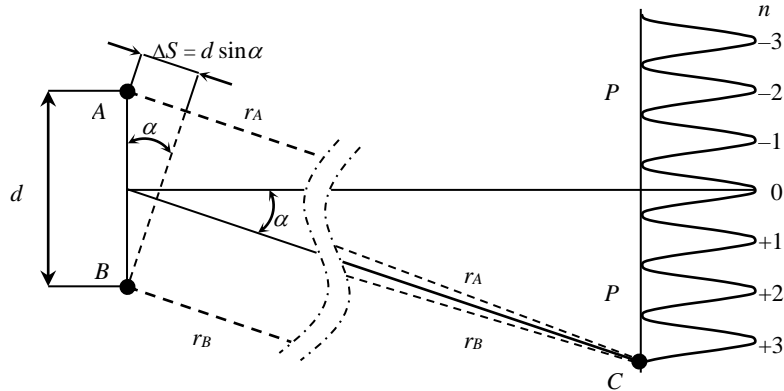
Parametr n zwany jest rzędem interferencji.

Założmy, że interesują nas punkty wzmocnień i osłabień leżące w odległości od źródeł A i B znacząco większej od odległości d między źródłami. Sytuację tę pokazano na rysunku 17.3. W pobliżu źródeł kierunki biegu fal r_A i r_B są z dobrym przybliżeniem równoległe. Zatem różnicę przebytych dróg można zapisać prostą formułą trygonometryczną:

$$\Delta S = r_A - r_B = d \sin \alpha. \quad (17.3)$$

Po podstawieniu wyrażenia (17.3) do wzoru (17.1) otrzymuje się formułę na kierunki (kąty α), wzdłuż których obserwowane są punkty wzmocnień:

$$d \sin \alpha = n \lambda, \quad \text{gdzie} \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (17.4)$$



Rys. 17.3. Interferencja w punkcie C znacząco odległym od źródeł A i B . Na rysunku zamiast fal narysowano schematyczne kierunki ich biegu r_A i r_B . Odległość linii pomiarowej P od źródeł A i B powinna być znacznie większa niż rozmiary rysunku. Literą n oznaczono rzędy wzajemnych wzmocnień interferencyjnych fal ze źródeł

Analogicznie, po podstawieniu wzoru (17.3) do wzoru (17.2) otrzymuje się warunki, jakie spełniają kąty α dla kierunków, wzdłuż których występują osłabienia:

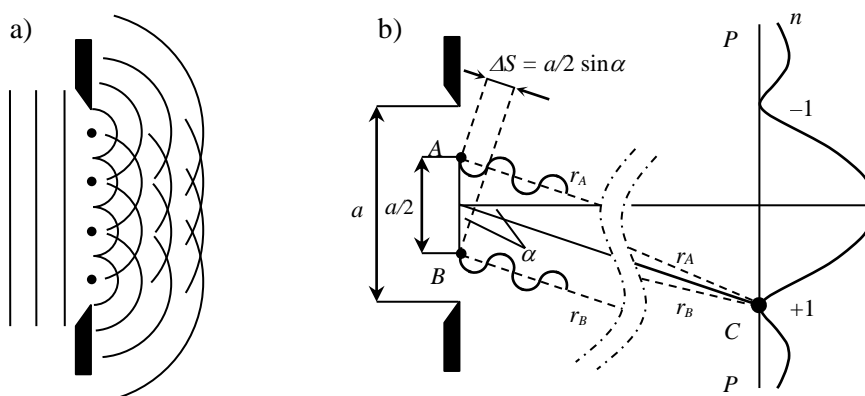
$$d \sin \alpha = (2n + 1) \frac{\lambda}{2}, \quad \text{gdzie} \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (17.5)$$

Zatem w miejscach znacząco odległych od źródeł punkty wzmocnień i osłabień układają się we wzajemnie naprzemienne linie proste rozchodzące się promieniście od punktu środkowego między źródłami. Prowadząc pomiary amplitud wzdłuż prostej P przecinającej powyższe linie, można zaobserwować wzmocnienia n -tych rzędów i stosowne osłabienia między nimi, schematycznie przedstawione na rysunku 17.3.

Dyfrakcja

Ze zjawiskami *dyfrakcji* mamy do czynienia, gdy fala napotyka na swej drodze materialne przeszkody. Mogą nimi być otwory o różnych kształtach (prostokątne, okrągłe itd.) lub przedmioty ustawione na drodze wędrówki fal. Wówczas kierunek ich biegu zostaje zakłócony i traci swą prostoliniowość. Oznacza to, że napotykając taką przeszkodę, część fali *uginą się*, wnikając w obszar geometrycznego cienia. Skoro nie daje się biegu fali opisać metodami tradycyjnymi należało stworzyć stosowne modele. Formalnie opis takich zjawisk powinien się sprowadzać do rozwiązania równania, właściwego dla danej fali, z odpowiednimi warunkami brzegowymi. W przypadku fal elektromagnetycznych oznaczałoby to odwołanie się do równań Maxwella. Jednak opis taki prowadzi zwykle do skomplikowanych rachunków niedających się rozwiązać ściśle. Z tego powodu często stosuje się pewne przybliżenia i uproszczenia. W omawianym przypadku zastosujemy *przybliżenie Huygensa* (lub inaczej *zasadę Huygensa* – czytaj *Hoichensa*).

Zgodnie z zasadą Huygensa, każdy punkt ośrodka, do którego dociera fala, staje się samodzielnym źródłem nowej fali. Te nowe fale, zwane cząstkowymi lub elementarnymi, interferują ze sobą w dalszym biegu. Dla przykładu rozpatrzmy otwór w postaci prostokątnej szczeliny o szerokości a , pokazany na rysunku 17.4.



Rys. 17.4. Bieg fal przez szczelinę o szerokości a : a) ilustracja zasady Huygensa: przykładowe punkty w szczelinie będące źródłami fal elementarnych, b) interferencja dwóch fal elementarnych pochodzących ze źródeł A i B oddalonych o $a/2$ i odpowiadające jej osłabienie w profilu dyfrakcyjnym „promieniowania” szczeliny (linia ciągła). Literą n oznaczono rzędy osłabień dyfrakcyjnych fal emitowanych ze szczeliny

Na rysunku 17.4a pokazano kilka przykładowych źródeł fal elementarnych (punkty w szczelinie). Fale te nakładają się i tworzą nową powierzchnię fali wypadkowej (powierzchnię falową). Fale elementarne pochodzące od źródeł znajdujących się bliżej środka szczeliny nakładają się i częściowo wzajemnie znoszą w taki sposób, że odpowiadająca im powierzchnia falowa jest równoległa do powierzchni pierwotnej fali padającej. Ich równoległość jest jednak zaburzona bliżej brzegów szczeliny, gdyż w ich pobliżu fale elementarne, nie mając „sąsiadek”, pozostają niezniesione przez interferencję i zginają się za szczeliną w strefę geometrycznego cienia. Aby określić rozkład kątowy natężenia fali wypadkowej, należy uwzględnić sumę przyczynków pochodzących od wszystkich fal cząstkowych. Taką sumę wyraża całka, ponieważ występuje tutaj promieniowanie ciągłego rozkładu źródeł. Jest to sytuacja znacznie bardziej skomplikowana niż rozpatrywany wcześniej prosty przypadek dwóch źródeł. Jednak opierając się na nim, można łatwo wyprowadzić przynajmniej warunki występowania minimów w obrazie dyfrakcyjnym. Podzielmy szerokość szczeliny na połowę i weźmy pod uwagę dwa punkty: jeden w górnej połowie szczeliny (punkt A rys. 17.4b), a drugi w dolnej połowie (punkt B rys. 17.4b) oddalony od górnego o odległość równą połowie szerokości szczeliny. Przy spełnionym warunku $\Delta S = a/2 \sin \alpha = \lambda/2$ czyli $a \sin \alpha = \lambda$ (na podstawie wzoru (17.5)), fale wybiegające z tych punktów są przesunięte o $\lambda/2$ i osłabiają się. W sumie w kierunku określonym przez kąt α wszystkie fale zostaną zniesione, ponieważ dla każdego punktu A z górnej połówki szczeliny znajdzie się analogiczny punkt B z dolnej połówki spełniający warunek wygaszenia. Podobnie, dzieląc szczelinę na cztery części, można wykazać znikanie natężenia dla $a \sin \alpha_2 = 2 \lambda$, a po podziale na sześć części dla $a \sin \alpha_3 = 3 \lambda$ i tak dalej. Ogólnie

zatem warunek osłabienia (minimum) dyfrakcyjnego ma postać:

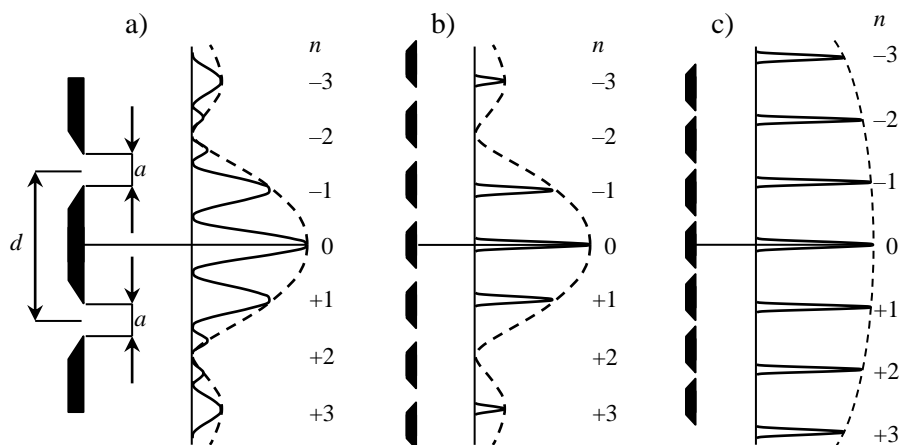
$$a \sin \alpha_n = n \lambda, \quad \text{gdzie} \quad n = \pm 1, \pm 2, \dots \quad (17.6)$$

Oczywiście między minimami będą się pojawiać stosowne maksima natężenia fali wypadkowej. Zwróćmy uwagę, że powyższy warunek znikania natężenia fali rozproszonej na szczeliny jest formalnie identyczny z warunkiem wzmocnienia dla prostej interferencji fal z dwóch źródeł (wzór 17.4). Pamiętaj jednak należy, że wzory te zawierają inne parametry (d – odległość między źródłami, a – szerokość szczeliny), a we wzorze (17.6) na minimum dyfrakcyjne n jest liczone od ± 1 , a nie od zera, jak we wzorze (17.4) na wzmocnienie fal pochodzących z dwóch źródeł.

Siatka dyfrakcyjna

W 1830 roku Young (czytaj *Jang*) wykonał doświadczenie z układem szczelin przedstawionym na rysunku 17.5a. Young skierował wiązkę światła na pokazany układ i obserwował obraz powstały z drugiej strony. Ponieważ zachodzi zjawisko dyfrakcji każdą ze szczelin można potraktować jako oddzielne źródło o rozkładzie kątowym promieniowania zgodnym z obwiednią dyfrakcyjną (podobnie jak na rys. 17.4). Dodatkowo fale pochodzące z obu szczelin ulegają wzajemnej interferencji (podobnie jak na rys. 17.3). Ostatecznie na powierzchni pomiarowej (w przypadku doświadczenia Younga – na ekranie) uzyskuje się obraz wzmocnień interferencyjnych, przedstawionych na rysunku 17.5a linią ciągłą, których amplitudy określone są obwiednią dyfrakcyjną, przedstawioną na rysunku linią przerywaną. Dodajmy, że obwiednia dyfrakcyjna może wręcz uniemożliwiać obserwacje niektórych wzmocnień interferencyjnych przewidywanych wzorem (17.4) (np. dla rzędu $n = \pm 2$ na rys. 17.5a, gdzie występuje minimum dyfrakcyjne).

Logicznym uogólnieniem doświadczenia Younga jest skonstruowanie układu N równoodległych, identycznych szczelin o szerokości a . Taki element, bardzo popularny w optyce, nazywa się *siatką dyfrakcyjną* (rys. 17.5b, 17.5c). Odległość d między środkami najbliższych szczelin zwana jest *stałą siatki dyfrakcyjnej*.



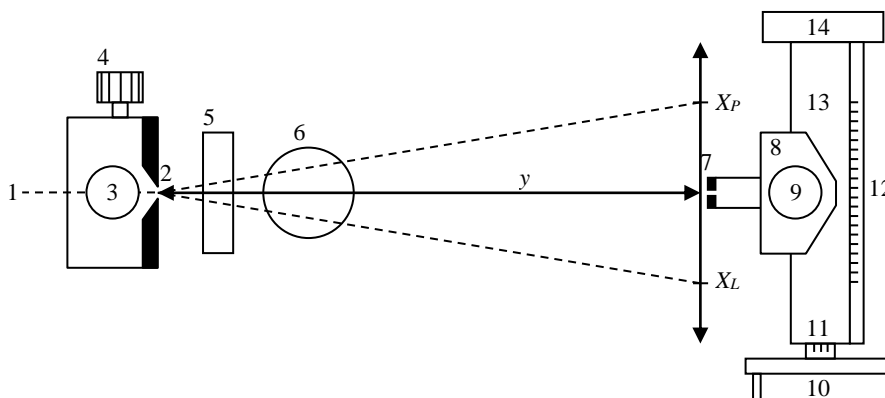
Rys. 17.5. Układy szczelin i ich obrazy: a) dwie szczeliny o szerokości a oddalone od siebie o odległość d (doświadczenie Younga), b) układ o większej liczbie szczelin (siatka dyfrakcyjna), ale o tych samych rozmiarach a i d jak na rysunku a), c) siatka dyfrakcyjna o mniejszych wartościach a i d niż w przypadkach a) i b). Linią przerywaną pokazano profile dyfrakcyjne. Na rysunkach nie zachowano proporcji rozmiarów układów szczelin (powinny być znacznie mniejsze) i odległości od ekranów (powinny być znacznie większe). Literą n oznaczono rzędy wzajemnych wzmocnień interferencyjnych fal ze szczelin

Wypadkowe natężenie fal przechodzących przez taką siatkę będzie łącznym wynikiem następujących efektów: dyfrakcji na każdej ze szczelin z osobna (obwiednia dyfrakcyjna – linia przerywana na rys. 17.5b, 17.5c), interferencji fal pochodzących od par sąsiadujących ze sobą szczelin (wzmocnienia i osłabienia – linia ciągła na rys. 17.5b, 17.5c) oraz interferencji fal pochodzących od par niesąsiadujących ze sobą szczelin. Na skutek tego ostatniego efektu pojawiają się dodatkowe minima leżące gęściej niż w przypadku tylko dwóch szczelin, ale nie zmienia to układu wzmocnień. Jednocześnie większa liczba szczelin umożliwia przejście większej liczby fal składowych i powoduje wzrost wypadkowej amplitudy wzmocnień. W sumie zwiększanie liczby N szczelin prowadzi do pojawiania się coraz bardziej ostrych maksimów na ciemnym tle gęsto leżących osłabień (rys. 17.5b). Dodatkowo dzięki zmniejszeniu szerokości szczelin można uzyskać szerszy przebieg obwiedni dyfrakcyjnej i minima dyfrakcyjne dla bardzo dużych kątów. Pozwala to na obserwację większej liczby wzmocnień interferencyjnych niższych rzędów, które mają w przybliżeniu to samo natężenie (rys. 17.5c). Formuła określająca położenie wzmocnień dla siatki dyfrakcyjnej o stałej d jest oczywiście identyczna z równaniem (17.4).

Stanowisko pomiarowe

Na rysunku 17.6 pokazano schemat stanowiska pomiarowego.

W układzie pomiarowym źródłem światła jest laser, którego promień biegnie wzdłuż kierunku (1). W zależności od badanych efektów na ławie optycznej można umieścić układ ze szczeliną (2) o regulowanej szerokości lub ustawić na stoliku (6) siatkę dyfrakcyjną.



Rys. 17.6. Schemat układu pomiarowego (widok z góry): 1 – promień lasera, 2 – szczelina, 3 – pokrętło regulacji szerokości szczeliny, 4 – pokrętło regulacji położenia szczeliny w poziomie, 5 – polaryzator, 6 – stolik pomocniczy, 7 – czujnik natężenia światła, 8 – przesuwna podstawa czujnika światła, 9 – pokrętło regulacji wysokości czujnika światła, 10 – korbka zmiany położenia czujnika światła, 11, 12 – skale położenia czujnika światła, 13 – sanie, 14 – czujnik położenia

Uzyskane rozkłady promieniowania mierzy się za pomocą ruchomego czujnika natężenia światła (7) przesuwanego za pomocą korbki (10). Program komputerowy

obsługi eksperymentu pozwala na automatyczną rejestrację natężenia światła padającego na czujnik w funkcji jego położenia. Przesunięcie podstawy czujnika można też kontrolnie odczytać z pomocniczych skal (11) i (12). Obrotowy polaryzator (5) pozwala na regulację natężenia wiązki laserowej i dopasowanie jej do wzmocnienia czujnika światła.

Przebieg ćwiczenia

1. Włączyć zasilanie lasera i interfejsów pomiarowych oraz komputer.
2. Uruchomić program *Science Workshop* i otworzyć plik `interfer.sws`.
3. Za pomocą korbki (10) (rys. 17.6) przesunąć szczelinę czujnika światła (7) na środek wiązki lasera. Sprawdzić, czy w pionie promień lasera pada na środek okienka czujnika i ewentualnie skorygować jego położenie pokrętłem (9). *Uwaga:* układ przesuwu czujnika światła jest przyrządem precyzyjnym i bardzo delikatnym! Należy zwrócić szczególną uwagę, aby go nie uszkodzić zbyt gwałtownymi zmianami położeń lub używając zbyt dużej siły.
4. Ustawić statyw ze szczeliną (2) na ławie optycznej zgodnie z rysunkiem 17.6. Pokrętłem (4) skorygować położenie szczeliny tak, aby promień lasera przechodził przez jej środek. Zmierzyć odległość y między szczeliną a płaszczyzną czujnika światła.
5. Pokrętłem (3) ustawić dowolną wartość szerokości szczeliny z zakresu 0,15 – 0,35 mm.
6. Za pomocą korbki (10) przesunąć czujnik światła (7) na skraj uzyskanego obrazu dyfrakcyjnego.
7. W programie komputerowym nacisnąć przycisk REC.
8. Jednostajnym ruchem korbki (10) przesunąć czujnik światła na drugi kraniec obrazu dyfrakcyjnego. *Uwaga:* przemieszczanie powinno się odbywać z prędkością mniejszą niż 0,5 mm/s (środkowe położenie wskaźnika prędkości) oraz, w ramach danego pomiaru, z zachowaniem stałego kierunku bez chwilowego cofania korbki.
9. W programie komputerowym nacisnąć przycisk STOP. Powinien się pojawić wykres natężenia światła w funkcji położenia czujnika. Jeśli zajdzie potrzeba, skorygować natężenie światła, obracając polaryzator (5), i powtórzyć pomiar.
10. Z wykresu odczytać położenia osłabień dyfrakcyjnych x_{Pn} i x_{Ln} odpowiednich rzędów n .
11. Na podstawie zależności (17.6) i z pomocą poniższego wzoru (17.7) obliczyć wartości szerokości szczeliny odpowiadające uzyskanym rzędom osłabień

$$\sin \alpha_n = \sqrt{\frac{(x_{Pn} - x_{Ln})^2}{4y^2 + (x_{Pn} - x_{Ln})^2}}. \quad (17.7)$$

Obliczyć średnią arytmetyczną z uzyskanych wartości oraz odchylenie standardowe średniej. Zestawić końcowe wyniki pomiarów.

12. Powtarzając punkty 5 – 11, wyznaczyć szerokości dwóch innych szczelin.
13. Zdjąć z ławy optycznej statyw ze szczeliną. Ustawić na stoliku pomocniczym (6) siatkę dyfrakcyjną. Zmierzyć odległość y między siatką a płaszczyzną czujnika światła. Opisaną wcześniej metodą określić położenie wzmocnień interferencyjnych x_{Pn} i x_{Ln} odpowiednich rzędów n .

14. Korzystając ze wzorów (17.4) i (17.7), obliczyć wartości stałych siatki odpowiadające uzyskanym rzędom wzmocnień i ich średnią z odchyleniem standardowym. Pomiary powtórzyć dla innej siatki dyfrakcyjnej (wskazanej przez prowadzącego zajęcia). Zestawić końcowe wyniki pomiarów.
15. Zaobserwować obrazy dyfrakcyjne po ustawieniu na drodze wiązki laserowej przedmiotów o innych kształtach (wskazanych przez prowadzącego zajęcia).
Uwaga: dokładny opis działania programu *Science Workshop* znajduje się w rozdziale 20.

Zestaw ćwiczeniowy

Komputer z interfejsami pomiarowymi, układ optyczny z laserem, szczelina, polaryzator, siatki dyfrakcyjne, przesuwany układ z czujnikami światła i położenia

Pojęcia kluczowe

- Fale elektromagnetyczne
- Interferencja
- Dyfrakcja
- Zasada Huygensa
- Doświadczenie Younga
- Siatka dyfrakcyjna

