

WYZNACZANIE DŁUGOŚCI FALI ŚWIETLNEJ ZA POMOCĄ SIATKI DYFRAKCYJNEJ

Cel ćwiczenia: Zapoznanie się z działaniem siatki dyfrakcyjnej, wyznaczenie stałej siatki dyfrakcyjnej oraz długości fali badanych widm.

Zagadnienia: Ugięcie światła, siatka dyfrakcyjna, pomiar długości fali świetlnej.

84.1. Wprowadzenie

Siatka dyfrakcyjna

Przed przystąpieniem do ćwiczenia należy zapoznać się ze wstępem W1 *Wstęp do ćwiczeń z interferencji i dyfrakcji światła* rozdział W1.4, zwracając szczególną uwagę na rozkład natężenia światła na ekranie oświetlonym dwiema wiązkami światła wychodzącymi z dwóch źródeł punktowych oraz na rozkład natężenia światła na ekranie oświetlonym przez wiązkę światła przechodzącą przez jedną szczelinę, zrobioną w nieprzezroczystej przysłonie.

Wiązka światła przechodząc przez dwie jednakowe, wzajemnie równoległe szczeliny ulega na nich ugięciu, dając po przejściu przez nie dwie spójne (koherentne), interferujące ze sobą fale. W wyniku interferencji otrzymuje się na ekranie umieszczonym w znacznej odległości za szczelinami jasne i ciemne prążki interferencyjne. Jest to znane z ogólnego kursu fizyki doświadczenie Younga z opisem którego należy się zaznajomić przed przystąpieniem do ćwiczenia.

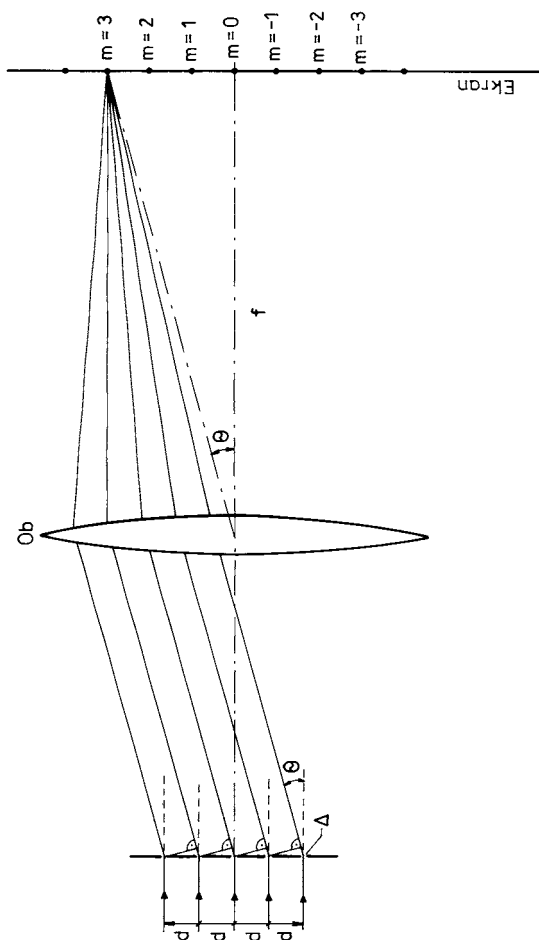
Siatka dyfrakcyjna jest w zasadzie powieleniem doświadczenia z dwiema szczelinami. Zasadnicza różnica polega na tym, że zamiast dwóch znajduje się

na niej duża liczba (od kilkudziesięciu do kilkunastu tysięcy) jednakowych, równoodległych szczelin. Z tego powodu przez siatkę dyfrakcyjną przechodzi znacznie więcej światła niż przez dwie szczeliny w doświadczeniu Younga.

Założmy, że płaska fala świetlna pada prostopadle na siatkę dyfrakcyjną z lewej strony jak pokazano na rys. 84.1. Pamiętamy, że każdy punkt szczelin siatki jest źródłem elementarnej fali kulistej. Wybierzmy spośród wielu, jeden określony kierunek promieni ugiętych pod kątem θ do początkowego biegu promieni.

Jeżeli d jest odległością pomiędzy szczelinami to różnica Δ przebytych dróg pomiędzy dwoma promieniami ugiętymi na sąsiednich szczelinach (od ich szczeliny do wspólnego czoła fali za siatką) (rys. 84.1) wyraża się podobnie jak w doświadczeniu Younga, równaniem

$$\Delta = d \sin \theta . \quad (84.1)$$



Rys. 84.1. Schemat siatki dyfrakcyjnej

Fale przechodzące przez szczeliny mają w nich jednakowe fazy drgań a więc będą się wzmacniać w tych kierunkach, w których będzie spełniony podany we wstępie W1 warunek na interferencyjne wzmocnienie natężenie światła

$$\Delta = m \lambda , \quad (84.2)$$

gdzie $m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3 \dots$ – rząd widma dyfrakcyjnego, λ – długość fali.

Wobec tego kierunki interferencyjnego wzmacniania się natężenia światła (maksima) są określone równaniem siatki dyfrakcyjnej

$$\sin \theta_m = m \frac{\lambda}{d} . \quad (84.3)$$

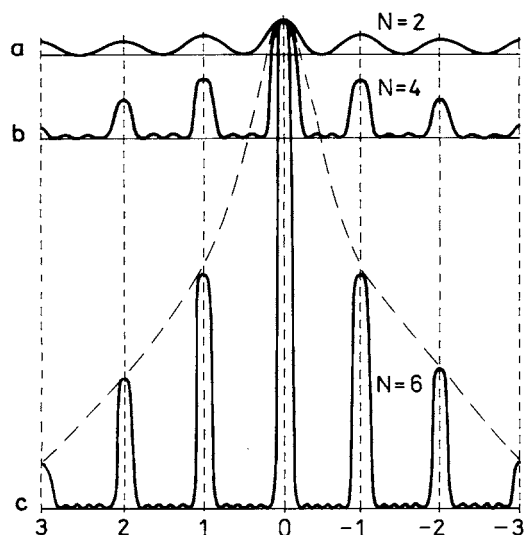
Zakłada się przy tym, że ekran na którym ma miejsce interferencja promieni leży bardzo daleko. W praktyce ugięte promienie przepuszcza się przez obiektyw *Ob* (rys. 84.1). Wtedy wszystkie wzajemnie równoległe, ugięte promienie spotykają się i interferują w płaszczyźnie ogniskowej tego obiektywu. Ten sposób realizacji interferencji jest wygodniejszy, a widmo dyfrakcyjne (obraz dyfrakcyjny) siatki znacznie wyraźniejsze.

W przypadku dyfrakcji na dwóch szczelinach, jasne maksima na ekranie są rozdzielone ciemnymi minimami, których kierunki są określone przez warunek na interferencyjne wygaszenie się fal

$$\sin \theta_m = \frac{2m+1}{2} \frac{\lambda}{d} . \quad (84.4)$$

W siatce dyfrakcyjnej występuje większa liczba N szczelin. W widmie dyfrakcyjnym siatki po obu stronach środkowego maksimum rzędu zerowego, tworzą się boczne maksima główne dla $m = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$. Ze wzrastającą liczbą N stają się one coraz węższe i jaśniejsze, jak pokazano na rys. 84.2. Jest to związane z tym, że coraz większa liczba promieni, pochodząca od wielu szczelin bierze udział w interferencji światła. Zjawisko to nazywa się interferencją wielopromieniową. W takiej sytuacji nie można mówić o zlokalizowanym ciemnym minimum dyfrakcyjnym.

Dokładniejsza analiza matematyczna wykazuje, że dla wzrastającej ilości szczelin N , pomiędzy maksimami głównymi spełniającymi warunek (84.2) pojawia się $N-2$ znacznie słabszych maksimów wtórnych, oddzielonych $N-1$ minimami, które można zauważyć na rys. 84.2. Rozkład natężenia światła w maksimach głównych i wtórnych pokazano na rys. 84.2..



Rys. 84.2. Rozkład natężenia światła na ekranie za siatką dyfrakcyjną dla $N = 2, 4$ oraz 8 szczelin (położenia kolejnych maksimów nie zmienia się)

Rodzaje siatek dyfrakcyjnych

Siatki dyfrakcyjne odgrywają bardzo ważną rolę w wielu przyrządach stosowanych w nauce i technice. Szczególnie często siatki są wykorzystywane do otrzymywania światła monochromatycznego lub do rozszczepiania światła i analizy widm. Z tego powodu istnieje praktyczna potrzeba wytwarzania siatek dyfrakcyjnych o bardzo wysokiej jakości.

Siatki dyfrakcyjne dzielą się na transmisyjne i odbiciowe. Siatki transmisyjne to takie przez które przechodzi światło, jak pokazano schematycznie na rys. 84.1. Siatki takie można uzyskać przez nacinanie rys na płytkach szklanych lub w cienkich nieprzezroczystych warstwach (najczęściej metalicznych) nanoszonych na płytki szklane. Taką metodą można uzyskać od kilku do kilkuset linii na jednym milimetrze długości, prostopadle do nacięć. Metoda ta jest jednak bardzo żmudna i kosztowna.

Innymi metodami otrzymywania siatek transmisyjnych są metody fotograficzne lub holograficzne. W metodach tych, na specjalnych kliszach fotograficznych, o bardzo wysokiej zdolności rozdzielczej, rejestruje się obraz jasnych i ciemnych narysowanych linii lub jasnych i ciemnych, wzajemnie równoodległych prążków interferencyjnych. W taki sposób można uzyskiwać siatki dyfrakcyjne o bardzo dużej gęstości linii, nawet do 4000 linii/mm.

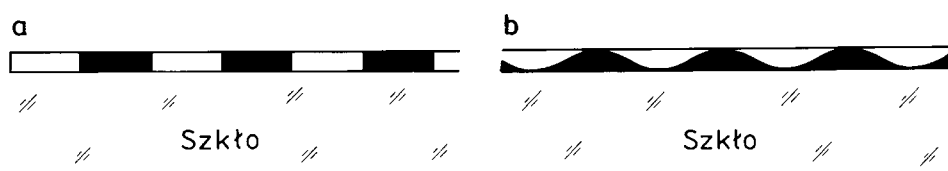
W siatkach odbiciowych światło nie przechodzi przez siatkę lecz odbija się od periodycznej struktury naciętej na powierzchni metalu lub szkła, dając taki sam rezultat jak podczas przejścia przez siatkę transmisyjną (efekt ten jest widoczny przy obserwacji światła odbitego np. od dysku optycznego – *CD*).

Siatki dyfrakcyjne transmisyjne dzielimy na siatki amplitudowe i fazowe.

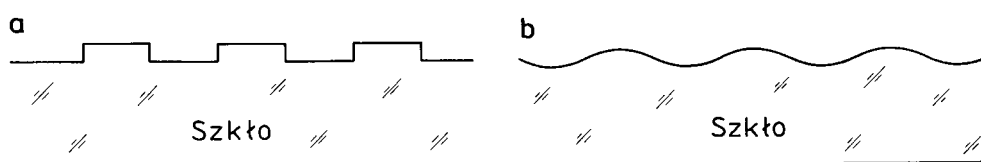
Siatką amplitudową nazywamy siatkę z kolejno nieprzezroczystymi (ciemnymi) i przezroczystymi (szczeliny) liniami. Profil zmiany stopnia zaciemnienia prostopadle do linii może być skokowy lub łagodny. Stąd częsty podział siatek amplitudowych ze względu na profil – na siatki prostokątne lub sinusoidalne. Rys. 84.3 przedstawia w powiększeniu siatki amplitudowe o profilu a) prostokątnym b) sinusoidalnym. Ważną cechą siatek amplitudowych sinusoidalnych jest to, że w odróżnieniu od innych siatek, za siatką powstają tylko trzy maksima interferencyjne, dla $m = 0$ i $m = \pm 1$.

Siatka fazowa jest w całym swoim obszarze przezroczysta dla światła. Odpowiednikami naprzemian przezroczystych i nieprzezroczystych linii siatki amplitudowej są tutaj linie o okresowo zmiennej grubości ośrodka

przezroczystego, zmieniające okresowo fazę przechodzącej fali świetlnej. Podobnie jak w przypadku siatki amplitudowej, w zależności od profilu grubości ośrodka, siatka fazowa może być prostokątna lub sinusoidalna. Rysunek 84.4 przedstawia profil siatki fazowej a) prostokątnej, b) sinusoidalnej.



Rys. 84.3. Profil stopnia zaczerwienienia siatki amplitudowej: a) prostokątnej, b) sinusoidalnej



Rys. 84.4. Profil zmiany grubości siatki fazowej: a) prostokątnej, b) sinusoidalnej

Ze względu na to, że siatki dyfrakcyjne stosuje się głównie do uginania światła, ważnym parametrem siatek dyfrakcyjnych jest ich wydajność dyfrakcyjna η , którą definiuje się jako stosunek natężenia światła ugiętego w pierwszym rzędzie dyfrakcyjnym I_1 do całkowitego natężenia światła padającego na siatkę I_0

$$\eta = \frac{I_1}{I_0}.$$

Wydajność siatek amplitudowych nie przekracza 10%, podczas gdy wydajność siatek fazowych może dochodzić do kilkudziesięciu procent. Z tego

względnie siatki fazowe nadają się do wielu zastosowań lepiej niż siatki amplitudowe.

Dyspersja kątowa

Kątowa dyspersja siatki dyfrakcyjnej jest miarą zdolności siatki do rozszczepiania światła polichromatycznego na wiązki monochromatyczne.

Przypuśćmy, że źródło światła emituje światło o dwóch długościach fali λ oraz $\lambda + \Delta\lambda$. Ich maksima dyfrakcyjne m -tego rzędu będą powstawać dla kierunków opisanych kątami θ oraz $\theta + \Delta\theta$, dla których zgodnie z (84.3) spełnione są warunki

$$\sin \theta = \frac{m \lambda}{d} \quad (84.6)$$

oraz

$$\sin(\theta + \Delta\theta) = \frac{m (\lambda + \Delta\lambda)}{d} . \quad (84.7)$$

Jeżeli $\Delta\lambda \ll \lambda$, wtedy $\Delta\theta \ll \theta$, i wzór na sinus sumy można zapisać jako $\sin(\theta + \Delta\theta) \cong \sin \theta + \Delta\theta \cos \theta$. (84.8)

Podstawiając zależności (84.6) i (84.7) do (84.8) otrzymuje się

$$\frac{m (\lambda + \Delta\lambda)}{d} = \frac{m \lambda}{d} + \Delta\theta \cos \theta , \quad (84.9)$$

a stąd wynika, że

$$\frac{\Delta\theta}{\Delta\lambda} = \frac{m}{d \cos \theta} . \quad (84.10)$$

Powyższą wielkość nazywa się dyspersją kątową siatki. Dyspersja (zdolność do rozszczepiania światła) wzrasta wraz z rzędem widma m i jest odwrotnie proporcjonalna do stałej siatki d . Kąt ugięcia θ_m (wzór 84.3) jest

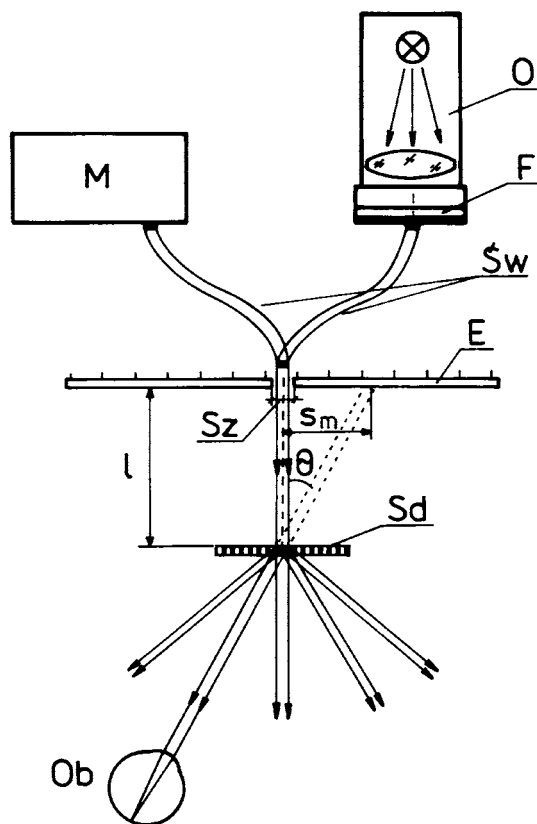
wprost proporcjonalny do λ , co oznacza, że czerwony kraniec widma światła białego jest ugięty bardziej niż kraniec niebieski. Odwrotnie do tego co obserwuje się przy rozszczepieniu światła w pryzmacie.

Chromatyczna zdolność rozdzielcza siatki

Chromatyczna zdolność rozdzielcza siatki, podobnie jak i pryzmatu, jest miarą zdolności rozdzielania dwóch blisko siebie leżących linii widmowych o długościach fali λ i $\lambda + \Delta\lambda$. Jeżeli obrazy dyfrakcyjne w m -tym rzędzie dyfrakcji tych dwóch linii są na tyle rozsunięte, że maksimum jasności jednej linii przypada na najbliższe minimum drugiej linii (zgodnie z kryterium Rayleigha), to można pokazać, że zachodzi równość

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = m N . \quad (84.11)$$

Zależność ta, pozwala określić najmniejszą różnicę długości fali $\Delta\lambda$ dwóch linii spektralnych, które można rozdzielić w m -tym rzędzie dyfrakcji za pomocą siatki o N szczelinach. Zdolność rozdzielcza $R = \lambda / \Delta\lambda$ siatki dyfrakcyjnej mówi ile razy długość fali λ jest większa od rozdzielanego przedziału $\Delta\lambda$. Jak widać, zdolność rozdzielczą siatki można zwiększyć używając siatki o większej liczbie szczelin N lub wykorzystując wyższe rzędy dyfrakcji $m > 1$. Należy zwrócić uwagę na fakt, że chromatyczna zdolność rozdzielcza, w przeciwieństwie do dyspersji kątowej jest niezależna od stałej siatki d .



Rys. 84.5. Schemat układu pomiarowego: O – oświetlacz, M – monochromator, F – filtr interferencyjny, Św – światłowody, E – ekran ze skalą, Sz – szczelina w ekranie ze skalą, Sd – siatka dyfrakcyjna, Ob – oko obserwatora

84.2. Zasada pomiaru

Pomiary stałej siatki dyfrakcyjnej i długości fali światła wykonuje się zwykle na spektrometrze z siatką dyfrakcyjną. W sposób mniej dokładny

można te pomiary wykonać opisaną niżej metodą uproszczoną, przedstawioną na rysunku 84.5.

Źródłem światła jest monochromator, albo oświetlacz O zaopatrzony w filtr interferencyjny F . Istotną częścią układu pomiarowego jest ekran E ze skalą. W miejscu odpowiadającym zerowej działce skali zrobiono szczelinę Sz o szerokości około 1 mm. Szczelina ta jest oświetlona za pomocą światłowodów $\acute{S}w$ albo przez oświetlacz z filtrem interferencyjnym, albo przez monochromator. Światło po przejściu przez tą szczelinę pada na siatkę dyfrakcyjną Sd , umieszczoną w odległości l od ekranu ze skalą i doznaje na niej ugięcia. Za siatką, a więc w przestrzeni ugiętych wiązek znajduje się oko obserwatora Ob . Wiązki nieugięte (zerowego rzędu) oraz ugięte pod kątem θ wpadają do oka obserwatora. Na ekranie, w odległości s_m od środka skali, na przedłużeniu wiązek wpadających do oka, widać urojone obrazy szczeliny w ekranie, utworzone przez ugięte wiązki m -tego rzędu ($m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$).

84.3. Zadania do wykonania

A) Pomiary

Wyznaczanie stałej siatki dyfrakcyjnej

Aby wyznaczyć stałą siatki dyfrakcyjnej, należy wiązkę światła z monochromatora o znanej długości fali λ skierować na siatkę dyfrakcyjną zgodnie z rys. 84.5. Na ekranie po lewej i prawej stronie plamki centralnej obserwuje się plamki ± 1 i ± 2 rzędu dyfrakcji. Mierząc ich odległości S_m od środka plamki centralnej należy wyznaczyć odpowiedni kąt ugięcia θ_m dla pierwszego i drugiego rzędu dyfrakcji. Korzystamy przy tym ze wzoru

$$\sin \theta_m = \frac{S_m}{\sqrt{S_m^2 + l^2}} \quad (84.12)$$

Mierzmy kąty θ_1 i θ_2 , pierwszego i drugiego rzędu ugięcia. Pomiar powtarzamy trzykrotnie dla różnych odległości l i wyznaczamy średnie wartości $\sin \theta_1$ i $\sin \theta_2$.

Z równania siatki dyfrakcyjnej (84.3) wyznaczamy stałą siatki, korzystając z danych dla pierwszego i drugiego rzędu dyfrakcji

$$d_1 = \frac{\lambda}{\sin \theta_1} \quad \text{oraz} \quad d_2 = \frac{2 \lambda}{\sin \theta_2}. \quad (84.14)$$

Stałą siatki wyznaczamy jako wartość średnią d_1 i d_2 .

Należy zauważyć, że podczas obserwacji widm za siatką amplitudową sinusoidalną, nie występuje widmo drugiego rzędu.

Wyznaczanie długości fali badanego widma

Na oświetlacz nakładamy jeden z filtrów interferencyjnych o nieznanym zakresie przepuszczania długości fali. Po ustawieniu siatki dyfrakcyjnej w odległości l od ekranu należy zaobserwować na tle skali obraz widma dyfrakcyjnego. Podobnie jak podczas wyznaczania stałej siatki należy obliczyć kąt ugięcia θ_m dla brzegów widm 1 i 2 rzędu. Korzystając z równań siatki (84.13) wyznacza się przedział długości fal przepuszczanych przez filtr dla obu rzędów dyfrakcji (o ile drugi rząd występuje). Porównanie tego przedziału dla 1 i 2 rzędu dyfrakcji jest sprawdzianem poprawności obliczeń. Szerokość pasma przepuszczania filtru wyznacza się ze wzoru

$$\Delta \lambda = \lambda_k - \lambda_p, \quad (84.14)$$

gdzie λ_k i λ_p oznaczają odpowiednio koniec i początek widma.

Zakładając symetryczny rozkład energii świetlnej w widmie należy wyznaczyć długość fali świetlnej maksymalnie przepuszczalnej przez filtr jako średniej arytmetycznej długości fali końca i początku widma pasma przepuszczania.

Wyznaczenie zdolności rozdzielczej siatki dyfrakcyjnej

Mierzac suwmiarką długość czynną siatki dyfrakcyjnej (prostopadle do szczelin) i dzieląc przez stałą siatki d otrzymuje się liczbę szczelin siatki N . Doświadczalnie należy wyznaczyć najwyższy obserwowalny rząd dyfrakcji m . Ze wzoru (84.11) należy wyznaczyć zdolność rozdzielczą R siatki dyfrakcyjnej.

B) Opracowanie wyników

Maksymalny błąd podczas wyznaczania stałej siatki dyfrakcyjnej Δd należy obliczyć z równania siatki (84.3) i (84.12). Błąd ΔS_m można oszacować jako błąd przeciętny, błąd Δl przyjąć jako równy dokładności pomiaru za pomocą linijki milimetrowej. Nie uwzględniać błędu $\Delta \lambda$ długości fali świetlnej monochromatora.

Sprawdzić, czy d obliczone dla 1 i 2 rzędu dyfrakcji mieści się w granicach błędu wyznaczonego z rachunku błędów. Podczas obliczania błędu $\Delta \lambda$ wyznaczonej długości fali przepuszczonej przez filtr interferencyjny należy się posłużyć wyliczonym wcześniej błędem stałej siatki Δd .