

4.8 Wyznaczanie ogniskowych soczewek i badanie wad soczewek (O2)

Celem ćwiczenia jest pomiar ogniskowych soczewek skupiających i rozpraszających oraz badanie wad soczewek: aberracji sferycznej, aberracji chromatycznej i astygmatyzmu.

Zagadnienia do przygotowania:

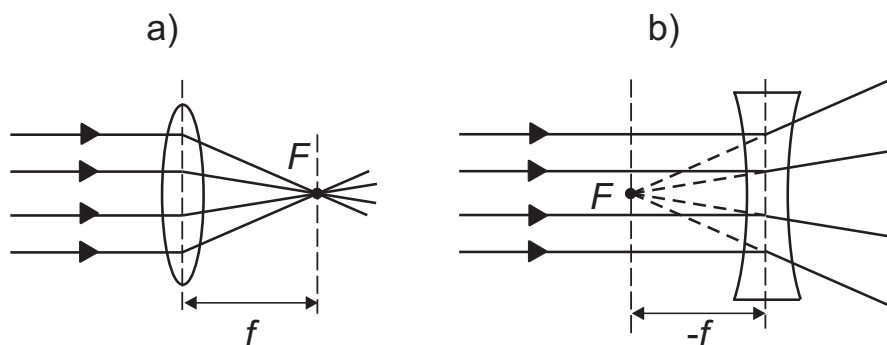
- podstawowe wiadomości dotyczące rozchodzenia się światła: załamanie i odbicie światła, dyspersja i zależność współczynnika załamania światła od długości fali;
- soczewki: rodzaje i zastosowanie soczewek, powstawanie obrazu w soczewce skupiającej i rozpraszającej, równanie soczewki;
- metody wyznaczania ogniskowych soczewek: w oparciu o równanie soczewki, metoda Bessela, ogniskowa układu dwóch cienkich soczewek;
- wady soczewek: aberracja sferyczna, aberracja chromatyczna, astygmatyzm.

Literatura podstawowa: [1], [2], [14].

4.8.1 Podstawowe pojęcia i definicje

Soczewki

Soczewka jest zbudowana z przezroczystego materiału ograniczonego z dwóch stron powierzchniami sferycznymi. Środki ograniczających powierzchni sferycznych znajdują się na osi optycznej soczewki. Promienie świetlne przechodzące przez soczewkę ulegają dwukrotnemu załamaniu na granicy ośrodków, np. powietrze – szkło, a następnie szkło – powietrze. Równoległe promienie, padające na soczewkę skupiającą prostopadłe do jej płaszczyzny po przejściu przez soczewkę przecinają się w jednym punkcie F zwanym ogniskiem głównym soczewki (rysunek 4.8.1a). Odległość ogniska soczewki F od płaszczyzny środkowej soczewki jest równa jej ogniskowej f . Soczewka rozpraszająca posiada ognisko pozorne, w którym przecinają się przedłużenia promieni załamanych (rysunek 4.8.1b).



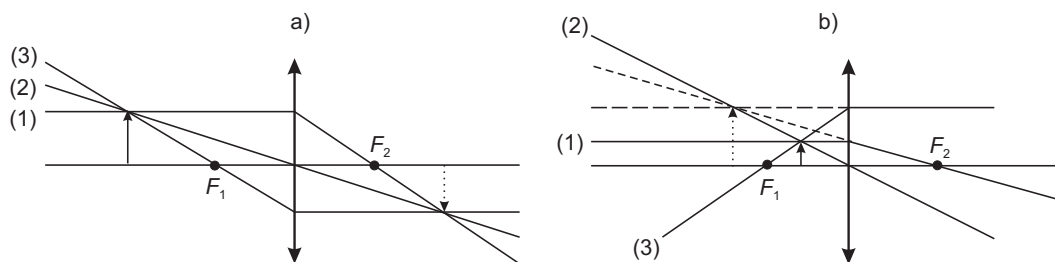
Rys. 4.8.1: Ogniska soczewki skupiającej i rozpraszającej.

Dla soczewek cienkich, tzn. takich, których grubość jest mała w porównaniu z jej promieniami krzywizny R_1 , R_2 , zachodzi:

$$\frac{1}{f} = (n - 1) \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right), \quad (4.8.1)$$

gdzie n jest współczynnikiem załamania materiału, z którego jest wykonana soczewka względem, otaczającego ją środowiska.

W celu konstrukcji obrazu w soczewce skupiającej wykorzystuje się bieg charakterystycznych promieni: (1) biegnącego równoległe do osi optycznej soczewki, (2) przechodzącego przez środek optyczny soczewki oraz (3) przechodzącego przez ognisko soczewki F_1 . Promień (1) po załamaniu przechodzi przez ognisko F_2 , promień (2) nie zmienia swojego kierunku, a promień (3) po załamaniu biegnie równoległe do osi soczewki (rysunek 4.8.2). Jeśli odległość przedmiotu od soczewki skupiającej jest większa od jej ogniskowej (rysunek 4.8.2a), to powstaje obraz rzeczywisty. Obraz ten jest wyznaczony przez przecięcie promieni załamanych. Natomiast, gdy odległość przedmiotu od soczewki jest mniejsza od jej ogniskowej, to powstaje obraz pozorny na przedłużeniu rozbieżnej wiązki promieni załamanych (rysunek 4.8.2b).



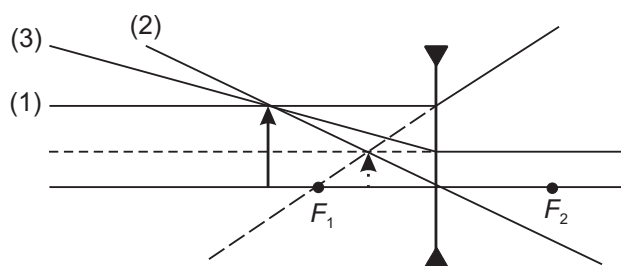
Rys. 4.8.2: Konstrukcja obrazu w soczewce skupiającej.

Soczewka rozpraszająca daje obraz pozorny. Do jego konstrukcji wykorzystuje się bieg charakterystycznych promieni: (1) biegnącego równoległe do osi optycznej soczewki, (2) przechodzącego przez środek optyczny soczewki oraz (3) biegnącego w kierunku ogniska F_2 . Promień (1) ulega załamaniu w taki sposób, że jego przedłużenie przechodzi przez ognisko F_1 . Promień (2) nie zmienia swojego biegu, a promień (3) po przejściu przez soczewkę jest równoległy do jej osi optycznej (rysunek 4.8.3).

Wyznaczanie ogniskowej soczewki skupiającej w oparciu o równanie soczewki

Równanie soczewki wiąże ze sobą odległość przedmiotu od soczewki a oraz odległość obrazu od soczewki b z jej ogniskową f

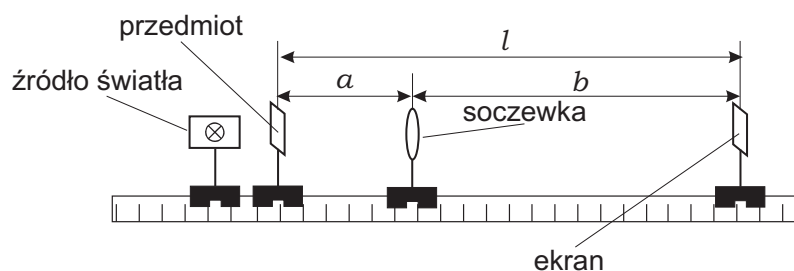
$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}. \quad (4.8.2)$$



Rys. 4.8.3: Konstrukcja obrazu w soczewce rozpraszającej.

Przesuwając soczewkę skupiającą wzdłuż ławy optycznej (rysunek 4.8.4), można znaleźć takie położenie soczewki, w którym obserwuje się ostry powiększony obraz przedmiotu. Mierząc odległości a i b można wyznaczyć ogniskową soczewki korzystając z przekształconego wzoru (4.8.2)

$$f = \frac{ab}{a + b}. \quad (4.8.3)$$



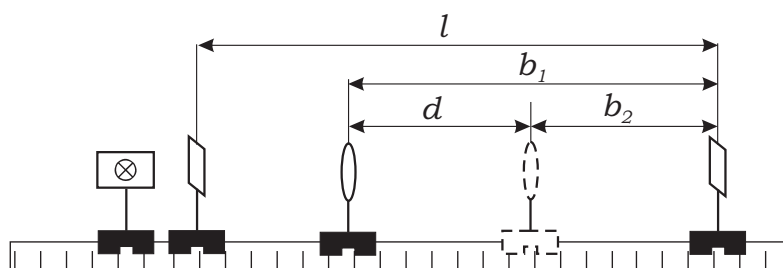
Rys. 4.8.4: Ława optyczna do wyznaczania ogniskowych soczewek.

Wyznaczanie ogniskowej soczewki skupiającej metodą Bessela

Przesuwając soczewkę wzdłuż ławy optycznej, można znaleźć dwie odległości soczewki od ekranu b_1 i b_2 (rysunek 4.8.5), w których obserwowany jest ostry obraz. W jednym położeniu obraz ten jest powiększony (b_1), a w drugim pomniejszony (b_2). Odległości pomiędzy ekranem a soczewką, przy których jest obserwowany ostry obraz, można wyznaczyć z równania soczewki

$$\frac{1}{l - b} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}, \quad (4.8.4)$$

gdzie l jest ustaloną odległością między przedmiotem a ekranem (rysunek 4.8.5). Równanie (4.8.4) jest równaniem kwadratowym ze względu na b posiadającym dwa rozwiązania:



Rys. 4.8.5: Metoda Bessela wyznaczania ogniskowych soczewek.

$$b_1 = \frac{l + \sqrt{l^2 - 4lf}}{2}, \quad b_2 = \frac{l - \sqrt{l^2 - 4lf}}{2}, \quad (4.8.5)$$

pod warunkiem iż $l > 4f$. Odległość d między położeniami soczewki, w których widoczny jest ostry obraz wynosi:

$$d = b_1 - b_2 = \sqrt{l^2 - 4lf}. \quad (4.8.6)$$

Mierząc odległość między położeniami soczewki, w których jest obserwowany ostry obraz przedmiotu, można wyznaczyć ogniskową soczewki

$$f = \frac{l^2 - d^2}{4l} = \frac{(l + d)(l - d)}{4l}. \quad (4.8.7)$$

Ogniskowa układu soczewek

Ogniskowa f układu soczewek zbudowanego z dwóch cienkich soczewek o ogniskowych f_1 i f_2 znajdujących się blisko siebie spełnia zależność:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2}, \quad (4.8.8)$$

która jest konsekwencją równania soczewki (4.8.2). W przypadku gdy odległość między soczewkami wynosi δ , ogniskowa układu soczewek wynosi:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{\delta}{f_1 f_2}. \quad (4.8.9)$$

Aberracja sferyczna

Równanie soczewki (4.8.2) jest wyprowadzone przy założeniu, że soczewka jest cienka, a wiązka padających na nią promieni jest niezbyt odległa od głównej osi optycznej soczewki. W przypadku gdy wiązka światła padającego na soczewkę jest szeroka, podczas przejścia przez soczewkę promienie przyosiowe (bliskie osi głównej soczewki) załamują się inaczej niż brzegowe (dalekie od osi głównej). Promienie brzegowe załamują

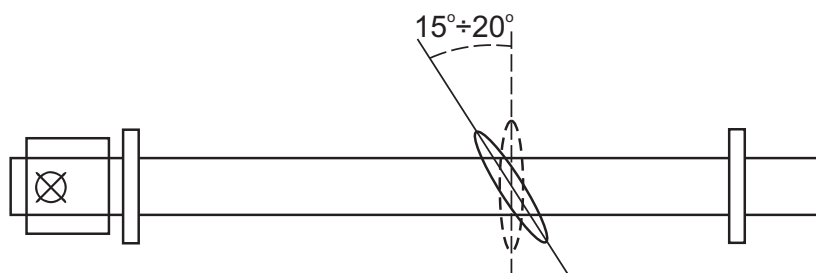
się silniej, a promienie przyosiowe słabiej. Dlatego równoległa wiązka po przejściu przez soczewkę nie skupi się w jednym punkcie. Ognisko dla promieni przyosiowych znajdzie się dalej od soczewki, a dla promieni peryferyjnych bliżej soczewki. Odległość między ogniskami dla promieni przyosiowych i brzegowych jest miarą podłużnej aberracji sferycznej.

Aberracja chromatyczna

Aberracja chromatyczna związana jest ze zjawiskiem dyspersji. Ze względu na zależność współczynnika załamania światła od długości fali, różne składowe światła białego przechodzące przez to samo miejsce w soczewce zostaną różnie załamane. W związku z tym soczewka będzie miała różne ogniska dla różnych długości fali – patrz równanie (4.8.1). Spowodowane jest to tym, że soczewka zachowuje się jak pryzmat rozszczepiający przechodzące przez nią światło białe. Promienie czerwone po przejściu przez soczewkę załamują się słabiej od promieni fioletowych, dlatego ognisko soczewki dla promieni czerwonych znajduje się dalej od soczewki niż ognisko dla promieni fioletowych.

Astygmatyzm

Równoległa wiązka promieni świetlnych padających na soczewkę pod dużymi kątami względem głównej osi optycznej po przejściu przez soczewkę (rysunek 4.8.6) nie przecina się w jednym punkcie, ale daje rozmytą plamę świetlną. Spowodowane jest to tym, że różne części wiązki ulegają załamaniu na innych fragmentach soczewki różniących się warunkami geometrycznymi. Dlatego obraz przedmiotu nie znajdującego się na osi optycznej soczewki jest zdeformowany.



Rys. 4.8.6: Ława optyczna do badania astygmatyzmu soczewek (widok z góry).

Efekt ten można zbadać używając jako przedmiotu matówki z narysowanymi prostopadłymi liniami. Przesuwając soczewkę można znaleźć dwa charakterystyczne położenia. W jednym z nich widoczne są tylko linie pionowe (soczewka znajduje się dalej od ekranu), a w drugim tylko poziome (soczewka znajduje się bliżej ekranu). Odległość między wspomnianymi punktami zależy od kąta padania wiązki na soczewkę i jest miarą pełnego astygmatyzmu.

4.8.2 Przebieg pomiarów

Układ doświadczalny

W skład układu doświadczalnego wchodzi następujące przyrządy: ława optyczna z naniesioną podziałką, źródło światła, soczewki skupiające i rozpraszające, przedmiot (litera na matówce), ekran, gruba soczewka do badania wad soczewek, przysłony do badania aberracji sferycznej (przepuszczające promienie przyosiowe, pośrednie i brzegowe), filtry do badania aberracji chromatycznej (niebieski, czerwony i zielony), matówka z naniesioną siatką prostopadłych linii, latarka.

Metoda pomiarowa

Ogniskowe soczewek wyznacza się przy użyciu ławy optycznej. Zasadniczą częścią pomiarów jest znajdowanie położenia soczewki, przy którym obserwowany jest ostry obraz przedmiotu. Dla ułatwienia pomiarów należy wykonywać je w ciemności, oświetlając ławę optyczną latarką. Określenie położenia soczewki, w którym obserwuje się ostry obraz jest subiektywne, dlatego położenie soczewki dla ustalonej odległości przedmiot – ekran należy znajdować kilkakrotnie.

W celu uzyskania możliwie najlepszych warunków eksperymentalnych należy układ pomiarowy zestawić w taki sposób, aby wszystkie elementy wchodzące w jego skład znajdowały się na takiej samej wysokości. Płaszczyzny przedmiotu, ekranu i soczewek winny być prostopadłe do wiązki światła, zaś przedmiot powinien znajdować się możliwie najbliżej źródła światła.

Metoda Bessela jest dokładniejszą od metody wyznaczania ogniskowej soczewki w oparciu o jej równanie. Dlatego do wyznaczenia ogniskowej soczewki rozpraszającej oraz do badania wad soczewek należy użyć tej metody. Kolejną zaletą metody Bessela jest to, że wykorzystuje się odległości między położeniami soczewki, w których obserwowany jest ostry obraz. Ponieważ jest to pomiar względny, metoda ta nie wymaga znajomości dokładnego położenia płaszczyzn głównych soczewki. Dlatego między innymi metoda Bessela może być stosowana do wyznaczania ogniskowych soczewek grubych.

Przebieg doświadczenia

Dla wybranej soczewki skupiającej wyznaczyć jej ogniskową metodą wykorzystującą równanie soczewki. W tym celu ustalić i zmierzyć odległość pomiędzy przedmiotem a ekranem. Odczytać wielokrotnie położenie soczewki, dla którego obserwuje się ostry powiększony obraz. Powtórzyć pomiar obracając soczewkę o 180° . W ten sposób uwzględnia się fakt, iż położenie soczewki może być przesunięte względem wskaźnika używanego do odczytu jej położenia. Wykonać analogiczne pomiary dla innych odległości pomiędzy przedmiotem a ekranem.

Dla wcześniej badanej soczewki skupiającej wyznaczyć jej ogniskową korzystając z metody Bessela. W tym celu ustalić i zmierzyć odległość pomiędzy przedmiotem

a ekranem. Odczytać wielokrotnie położenia soczewki, dla których obserwuje się ostre obrazy (powiększony i pomniejszony). Pomiary powtórzyć dla innych odległości pomiędzy przedmiotem a ekranem.

Ogniskową soczewki rozpraszającej wyznacza się mierząc ogniskową układu soczewek składającego się z soczewki rozpraszającej i soczewki skupiającej o znanej ogniskowej. Badany układ soczewek powinien być skupiający (tzn. powinien dawać obraz rzeczywisty przedmiotu). Umocować blisko siebie badaną wcześniej soczewkę skupiającą i wybraną soczewkę rozpraszającą. Zmierzyć ogniskową układu soczewek korzystając z metody Bessela.

Do badania aberracji sferycznej wykorzystać soczewkę grubą. Montując na soczewce kolejne przysłony wyznaczyć (korzystając z metody Bessela) ogniskową dla promieni przyosiowych, pośrednich i brzegowych.

W celu zbadania aberracji chromatycznej soczewki wyznaczyć jej ogniskową (korzystając z metody Bessela) dla światła czerwonego, zielonego i niebieskiego. W tym celu umieścić odpowiedni filtr pomiędzy źródłem światła a przedmiotem. Wyznaczanie ogniskowej dla światła czerwonego, niebieskiego i zielonego ze względu na właściwości ludzkiego oka jest mniej precyzyjne.

Badając astygmatyzm soczewki jako przedmiotu należy użyć matówki z naniesioną siatką prostopadłych linii. Soczewkę umieścić na statywie zaopatrzonym w podziałkę kątową (rysunek 4.8.6). W pierwszej kolejności należy odnaleźć takie położenie soczewki, w którym jej płaszczyzna główna jest prostopadła do wiązki światła, a na ekranie jest obserwowany ostry powiększony obraz przedmiotu. Następnie obrócić soczewkę o około 15° – 20° i znaleźć dwa charakterystyczne położenia, dla których w obrazie przedmiotu są widoczne jedynie linie poziome lub pionowe. Wielokrotnie odczytać położenia soczewki dla dwóch wymienionych przypadków. Odległość między tymi położeniami zależy od kąta, jaki płaszczyzna soczewki tworzy z wiązką światła.

Badane wady soczewek występują równocześnie. Podczas badania jednej z wybranych wad, może się okazać, że wpływ innej wady w sposób istotny zakłóca pomiary. Dlatego przy badaniu aberracji chromatycznej i astygmatyzmu, celowym może okazać się zminimalizowanie wpływu aberracji sferycznej poprzez zastosowanie odpowiednich przysłon (wybrać tylko promienie przyosiowe).

4.8.3 Opracowanie wyników

Ogniskowa soczewki skupiającej

Obliczyć ogniskową soczewki skupiającej używając metody wykorzystującej bezpośrednio równanie soczewki oraz metody Bessela. Obliczając niepewność pomiarową wyznaczenia ogniskowej należy pamiętać, że pewne wielkości są obarczone niepewnością statystyczną, a pewne niepewnością systematyczną. Porównać ogniskowe soczewki wyznaczone dwiema metodami.

Ogniskowa soczewki rozpraszającej

Obliczyć ogniskową układu soczewek skupiającej i rozpraszającej oraz jej niepewność pomiarową. Ogniskową soczewki rozpraszającej wyznaczyć korzystając z równania (4.8.8) i wyznaczonej wcześniej ogniskowej soczewki skupiającej. Określić niepewność pomiarową wyznaczonej ogniskowej.

Aberracja sferyczna i chromatyczna

Obliczyć ogniskową grubej soczewki dla kolejnych stosowanych przysłon. Jako miarę aberracji sferycznej podać różnicę ogniskowych dla promieni przyosiowych i brzegowych. Wyznaczyć niepewność pomiarową wielkości aberracji sferycznej.

Obliczyć ogniskową soczewki dla kolejnych stosowanych filtrów. Jako miarę aberracji chromatycznej podać różnicę ogniskowych dla światła czerwonego i niebieskiego. Określić niepewność pomiarową wielkości aberracji chromatycznej.

Astygmatyzm

Obliczyć różnicę położenia soczewki, przy których widoczne są tylko linie pionowe lub tylko linie poziome. Określić niepewność pomiarową obliczonej różnicy. Wyznaczona wielkość jest miarą pełnego astygmatyzmu.