

LABORATORIUM OPTYKI GEOMETRYCZNEJ I INSTRUMENTALNEJ

ĆWICZENIE OG-7 POMIAR KRZYWIZNY SOCZEWEK

1 Cele ćwiczenia

Zapoznanie z niektórymi technikami pomiaru krzywizny soczewek i zwierciadeł. Poznanie pojęć związanych z dyfrakcją i interferencją światła.

2 Zakres wymaganych zagadnień wstępnych

Do poprawnego wykonania ćwiczenia niezbędna jest znajomość poniższych zagadnień, weryfikowanych w trakcie egzaminu wejściowego:

- Zjawisko dyfrakcji i interferencji światła
- Doświadczenie Younga – warunki powstawania minimum i maksimum interferencyjnego
- Spójność światła
- Powstawanie pierścieni Newtona
- Zwierciadło wypukłe

3 Wstęp teoretyczny

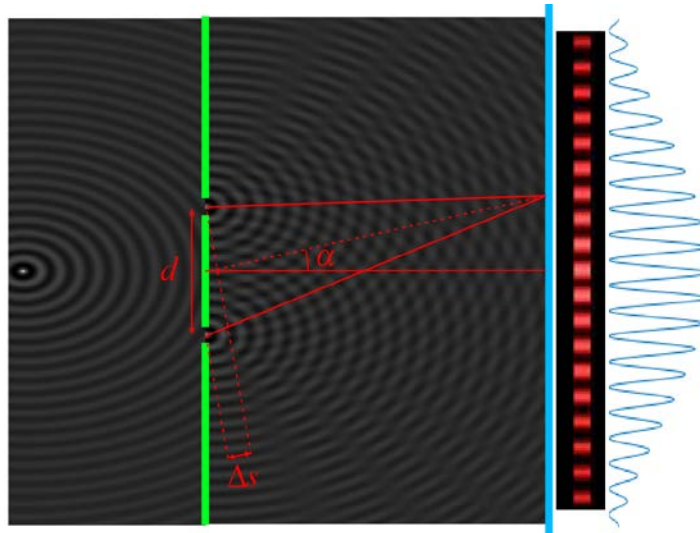
Dla elementów optycznych, takich jak soczewki i zwierciadła, jednym z podstawowych parametrów określających ich działanie jest kształt powierzchni. Dlatego rozwinięto szereg metod służących pomiarowi kształtu i jakości powierzchni. W zależności od wielkości krzywizny danej powierzchni i od tego czy jest ona sferyczna czy ma inny kształt stosuje się różne metody i urządzenia. Do najważniejszych metod pomiaru kształtu powierzchni należą metody:

- Interferometryczne
- Geometryczne (sferometry)
- Obrazowe (oftalmometry)
- Autokolimacyjne
- Cieniowe
- Astygmatyczne

Najbardziej wszechstronną metodą pozwalającą na pomiar krzywizny na dużym obszarze i z bardzo dużą dokładnością jest metoda interferometryczna.

Interferencja to nakładanie się, czyli superpozycja fal rozchodzących się w przestrzeni, w wyniku czego lokalnie amplituda fali wypadkowej ulega wzmocnieniu lub osłabieniu. Interferencja jest cechą ogólną wszystkich fal, nie tylko fal elektromagnetycznych (światlnych), ale także mechanicznych. Aby zjawisko interferencji światła mogło być zarejestrowane okiem lub innym przyrządem, fale powinny mieć jednakową częstotliwość (długość fali) oraz stałą w czasie różnicę faz. O takim świetle mówimy, że jest spójne lub koherentne.

Prostym eksperymentem, gdzie można prześledzić zasadę działania interferencji, jest doświadczenie Younga. W doświadczeniu tym dwie, blisko siebie leżące równoległe wąskie szczeliny oświetlone są światłem spójnym (rys. 1).



Rysunek 1. Schemat eksperymentu Younga.

Na ekranie, wskutek dyfrakcji na poszczególnych szczelinach i interferencji fal pochodzących z obu szczelin, obserwowane są charakterystyczne prążki, tzn. obszary, w których światło jest wzmacniane lub wygaszane. Miejsce, gdzie wystąpi wzmocnienie lub osłabienie, jest uzależnione od różnicy długości dróg optycznych od obu szczelin Δs . Warunek powstania maksimum dany jest wzorem

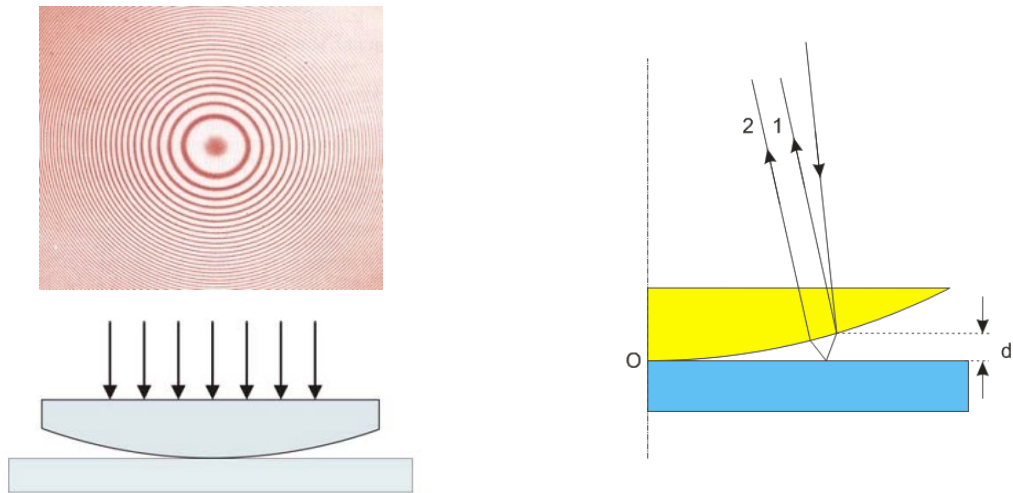
$$d \sin(\alpha_k) = k\lambda, \quad (1)$$

zaś minima, z kolei, powstają w punktach, dla których spełniony jest warunek

$$d \sin(\alpha_k) = \left(\frac{2k+1}{2}\right) \lambda, \quad (2)$$

gdzie α_k jest kątem, pod jakim tworzy się k -te minimum lub maksimum w obrazie interferencyjnym. Przy czym, zerowe maksimum (wzmocnienie) leży na prostej wyznaczającej środek między szczelinami, odległymi od siebie o d .

W przypadku pomiaru krzywizny soczewki przy wykorzystaniu zjawiska interferencji, obserwujemy interferencję fal odbitych od dwóch powierzchni. W szczególności, jeśli soczewkę płasko-wypukłą położymy na płytce szklanej zgodnie z rys. 2 i oświetlimy z góry światłem spójnym to interferencja zachodzić będzie między promieniami odbitymi od górnej powierzchni płytki oraz od dolnej powierzchni soczewki.



Rysunek 2. Schemat pomiaru krzywizny soczewki przy wykorzystaniu zjawiska interferencji. Promienie Newtona.

Między tymi promieniami istnieje różnica dróg optycznych

$$\Delta = 2d + \frac{\lambda}{2} \quad (3)$$

Porównując wzory 2 oraz 3 dostajemy warunek na występowanie ciemnych prążków. Grubość warstwy powietrza d jest zmienna i dlatego obraz zmienia się wraz ze wzrostem odległości od punktu podparcia soczewki. Wzmocnienie uzyskujemy gdy $\Delta = k\lambda$, zaś osłabienie gdy $\Delta = (2k+1)\lambda/2$. Różnica dróg jest stała dla tej samej wartości d , dlatego w przypadku soczewki sferycznej uzyskujemy obraz koncentrycznych pierścieni na przemian jasnych i ciemnych. Przy czym, pierwszy środkowy pierścień jest ciemny ($\lambda/2$ we wzorze 3). Jest to doświadczalne potwierdzenie faktu, że chociaż różnica dróg geometrycznych promieni wynosi zero (soczewka przylega do płytki), to różnica dróg optycznych wynosi $\lambda/2$. Promień biegnący w powietrzu (po wyjściu z soczewki) doznaje bowiem przy odbiciu od powierzchni szklanej płytki zmiany fazy na przeciwną (zmiana fazy o 180°) co odpowiada drodze $\lambda/2$. Natomiast promień, który biegnie w soczewce, odbija się od jej dolnej powierzchni i nie zmienia fazy.

Jeżeli promień krzywizny soczewki R jest dużo większy od promienia r pierścienia ciemnego i grubości warstwy powietrza d (rys. 2), to można napisać

$$r^2 = R^2 - (R - d)^2 = 2Rd - d^2 \cong 2Rd, \quad (4)$$

stąd

$$d = \frac{r^2}{2R}. \quad (5)$$

W szczególności, gdy wybierzemy pierścień o numerze k , uzyskujemy

$$d_k = \frac{r_k^2}{2R} \quad (6)$$

gdzie r_k – promień k -tego ciemnego pierścienia, d_k – grubość warstwy powietrza odpowiadająca k -temu pierścieniowi ciemnemu. Gdy porównamy wzory 3 i 5, otrzymamy

$$\frac{k\lambda}{2} = \frac{r_k^2}{2R}$$

stąd

$$r_k^2 = k\lambda R. \quad (6)$$

Równanie to można sprowadzić do postaci liniowej: $y = ax$ przez podstawienie $y = r_k^2$, $x = k$. Wtedy współczynnik kierunkowy prostej będzie równy $a = R\lambda$.

Znajdując współczynnik nachylenia a prostej metodą najmniejszych kwadratów lub graficznie, możemy obliczyć jedną z pozostałych dwóch wielkości (R lub λ).

Rozmiary pierścieni Newtona zmieniają się, jeżeli między soczewką a płytką umieścimy warstwę cieczy o współczynniku załamania n . Wtedy wzór 6 przyjmie postać

$$r_k^2 = \frac{k\lambda R}{n}. \quad (7)$$

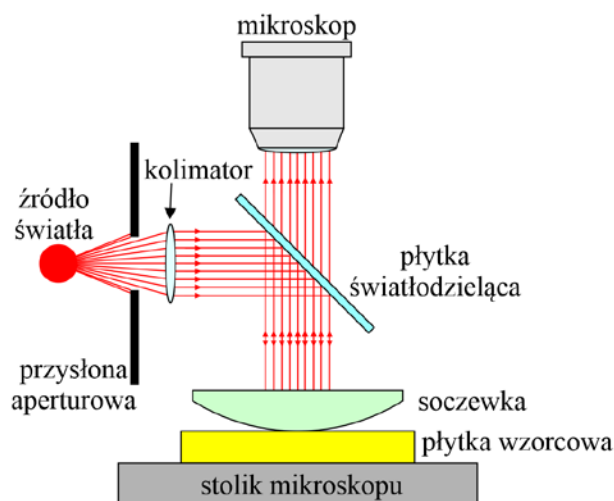
Metoda oparta na interferencji wymaga specjalnego oprzyrządowania i warunków pomiaru, dlatego często wykorzystuje się prostsze metody. W przypadku powierzchni sferycznych można wykorzystać metodę geometryczną i urządzenia zwane sferometrami. W metodzie tej na podstawie pomiarów różnicy wysokości w środku powierzchni i na jej skraju można określić promień krzywizny.

Inną możliwością jest wykorzystanie własności obrazujących powierzchni sferycznych. Krzywiznę powierzchni oblicza się na podstawie wielkości powstałego obrazu testowego przedmiotu. Urządzenia bazujące na tej metodzie nazywamy oftalmometrami.

4 Opis elementów części pomiarowej ćwiczenia

4.1 Pomiar krzywizny soczewki przy wykorzystaniu pierścieni Newtona

Schemat układu pomiarowego przedstawiono na rys. 3. Monochromatyczne światło o znanej długości fali pada na płytkę światłodzielną ustawioną pod kątem 45° w taki sposób, że częściowo odbija się od niej i pada w dół na badaną soczewkę i płytkę szklaną, dając skutek odbicia i interferencji obserwowane przez nas pierścienie Newtona. Promienie odbite ku górze przechodzą jeszcze raz przez płytkę światłodzielną i trafiają do obiektywu mikroskopu i oka obserwatora. Mikroskop zaopatrzony jest w okular z krzyżem, ruchomy w płaszczyźnie poziomej stolik oraz przesuwany w płaszczyźnie pionowej tubus mikroskopu. Położenie krzyża odczytuje się korzystając ze skali na śrubach mikrometrycznych, służących do przesuwu stolika mikroskopu. Krzywiznę soczewki określa się na podstawie zmierzonych wartości promieni obserwowanych pierścieni Newtona korzystając ze wzoru 6.



Rysunek 3. Schemat układu pomiarowego opartego na pomiarze promieni pierścieni Newtona.

4.2 Pomiar nieznannej długości fali światła przy wykorzystaniu pierścieni Newtona

Pomiaru dokonuje się w identycznym układzie jak w punkcie 4.1, jednak tym razem soczewka oświetlona jest światłem o nieznannej długości fali. Długość fali świetlnej określa się na podstawie zmierzonych wartości promieni obserwowanych pierścieni Newtona i znanej krzywizny soczewki wykorzystując wzór 6.

4.3 Pomiar współczynnika załamania wody przy wykorzystaniu pierścieni Newtona

Pomiaru dokonuje się w identycznym układzie jak w punkcie 4.1, korzystając z soczewki o znanej krzywiznie i światła o znanej długości fali. Badaną ciecz nanosi się między płaską powierzchnią a powierzchnią sferyczną soczewki. Wartość współczynnika załamania określa się na podstawie zmierzonych wartości promieni obserwowanych pierścieni Newtona, przy wykorzystaniu wzoru 7.

5 Wykonanie ćwiczenia i opracowanie wyników

A. Wyznaczanie krzywizny soczewki przy wykorzystaniu pierścieni Newtona

1. Ustawić źródło światła o znanej długości fali, tak aby światło trafiało przez boczny oświetlacz do układu mikroskopowego.
2. Ustawić stolik mikroskopu w pozycji środkowej.
3. Na stoliku umieścić płytkę wzorcową i na niej soczewkę, zwróconą wypukłą powierzchnią w dół.
4. Patrząc przez okular mikroskopu znaleźć pierścienie Newtona. Należy zwrócić uwagę, aby w centrum znajdował się czarny okrąg (pierścień zerowy).
5. Ustawić krzyż widoczny w okularze na środku pierścienia zerowego.
6. Przesuwać stolik w prawą stronę, jednocześnie zliczając mijane ciemne pierścienie, tak aby „dojechać” do ciemnego pierścienia o numerze 10. Przejechać kawałek dalej, aby krzyż wskazywał kolejny pierścień jasny.
7. Przesuwając stolikiem w lewą stronę (od teraz kręcimy śrubą mikrometryczną tylko w jedną stronę, przez co minimalizujemy błędy wynikające z luzów występujących w układzie mechanicznym mikroskopu) ustawić krzyż na ciemnym pierścieniu o numerze 10. Odczytać położenie stolika ze śruby mikrometrycznej i zapisać wynik w tabeli 1, w najniższym rzędzie odpowiadającym pierścieniowi o numerze 10.
8. Przesuwając się dalej, odczytać położenie kolejnych ciemnych pierścieni po lewej stronie od środka (pierścienie o numerach 9, 8, ..., 2, 1). Wyniki zapisać w tabeli 1 w kolejnych wierszach od dołu do góry.
9. Po minięciu środkowego, ciemnego pierścienia kontynuować pomiary z prawej strony, aż do pierścienia o numerze 10. Wyniki wpisywać w tabeli 1 jadąc od góry do dołu tabeli.
10. Obliczyć promienie poszczególnych pierścieni.
11. Sporządzić wykres r_k^2 w funkcji numeru pierścienia k .
12. Poprowadzić prostą, która najlepiej przybliży położenie punktów pomiarowych.
13. Obliczyć współczynnik nachylenia prostej ($y = ax + b$, gdzie $y = r_k^2$, $x = k$) na podstawie wykresu, biorąc punkt na prostej, który odpowiadałby pierścieniowi o numerze 20.
14. Obliczyć promień krzywizny R badanej soczewki.

Tabela 1. Wyniki pomiarów do wyznaczenia promienia krzywizny soczewki, długości fali i współczynnika załamania światła.

Rząd pierścienia	Położenie lewe d_l [mm]	Położenie prawe d_p [mm]	Średnica pierścienia $r_k = (d_l - d_p)/2$ [mm]	r_k^2
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				

B. Wyznaczanie długości fali światła przy wykorzystaniu pierścieni Newtona

1. Ustawić źródło światła o nieznannej długości fali, tak aby światło trafiało przez boczny oświetlacz do układu mikroskopowego.
2. Przeprowadź pomiary zgodnie z procedurą opisaną wyżej w punktach A2–A13. Wyniki umieścić w takiej samej tabeli jak w punkcie A.
3. Znając promień krzywizny z pierwszego pomiaru obliczyć długość nieznanego źródła światła.

C. Wyznaczanie współczynnika załamania światła dla wody przy wykorzystaniu pierścieni Newtona

1. Ustawić źródło światła o znanej długości fali, tak aby światło trafiało przez boczny oświetlacz do układu mikroskopowego.
2. Między soczewką a płytkę wzorcową nanieść kroplomierzem niewielką objętość wody.
3. Dociśnąć soczewkę w taki sposób, aby prążek zerowy był ciemny.
4. Przeprowadzić pomiary zgodnie z procedurą opisaną wyżej w punktach A5–A13. Wyniki umieścić w takiej samej tabeli jak w punkcie A.
5. Znając promień krzywizny z pierwszego pomiaru i znając długość fali światła, obliczyć współczynnik załamania światła dla wody.

D. Pomiar krzywizny soczewki za pomocą śruby mikrometrycznej

1. Zmierzyć za pomocą suwmiarki średnicę badanej soczewki.
2. Zmierzyć za pomocą śruby mikrometrycznej grubość soczewki w 2 punktach: w środku geometrycznym i możliwie jak najbliżej brzegu soczewki.
3. Sporządzić rysunek i wyprowadzić wzór, który pozwoli na podstawie zmierzonych wartości na wyznaczenie promienia krzywizny soczewki.
4. Obliczyć promień krzywizny soczewki.

E. Pomiar krzywizny soczewki przy wykorzystaniu odbicia (zwierciadło)

1. Ustawić mierzoną soczewkę na ławie optycznej.

2. Przed soczewką na podstawce umieścić przedmiot o znanej długości i o dobrze widocznych końcówkach.
3. Ustawić oko tuż za przedmiotem i tak zmieniać odległość soczewki od przedmiotu, aby zaobserwować w niej obraz przedmiotu o wielkości równej średnicy soczewki.
4. Zmierzyć odległość między przedmiotem a soczewką oraz średnicę soczewki.
5. Sporządzić rysunek i wyprowadzić wzór, który pozwoli na podstawie zmierzonych wartości na wyznaczenie promienia krzywizny soczewki.
6. Obliczyć promień krzywizny soczewki.

Literatura:

1. Szydłowski H., *Pracownia fizyczna*, PWN, Warszawa 1999.
2. Hanc T., *Pomiary optyczne*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 1964.
3. Ratajczyk F.: *Instrumenty optyczne*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2005.