

ĆWICZENIE 45

POMIARY PRZY WYKORZYSTANIU ZJAWISKA INTERFERENCJI

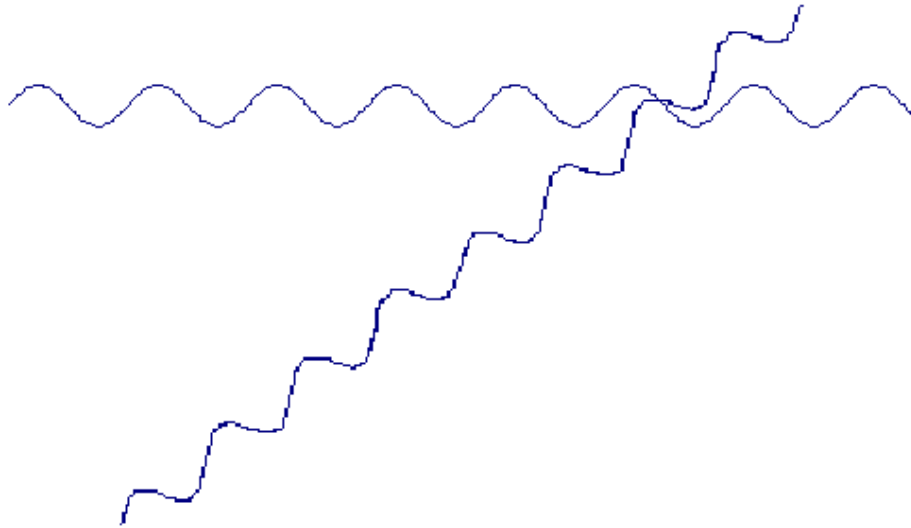
Wprowadzenie teoretyczne

Interferencja, to zjawisko wzmocnienia lub osłabienia fal, zachodzące w wyniku wzajemnego nakrywania się. Wzmocnionemu odpowiadają na ekranie lub w przestrzeni jasne prążki a osłabionemu - ciemne. Aby eksperymentalnie otrzymać prążki interferencyjne, źródła i wysyłane przez nie promieniowanie, muszą spełniać określone warunki. Wiązki światła wysyłane przez nie powinny być przynajmniej częściowo spójne o amplitudach równych lub prawie równych. Ostatni warunek gwarantuje uzyskanie możliwie silnego kontrastu. Teoretycznie światło spójne dają źródła punktowe.

Każde naturalne źródło światła jest rozciągle i wysyła promieniowanie niespójne. Źródłem promieniowania są przejścia elektronów między wzbudzonymi poziomami energetycznymi atomów i cząsteczek. Są przypadkowe i nieskorelowane. Każdemu przejściu odpowiada krótka wiązka falowa (paczka), z którą stowarzyszony jest foton. Paczki nie pokrywają się. Początek i koniec emisji kwantu jest nieokreślony. Dwie wiązki fal niespójnych dochodzących do wspólnego punktu i przecinające się nie interferują ze sobą. Różnica faz w tym punkcie nie jest stała i zmienia się w czasie.

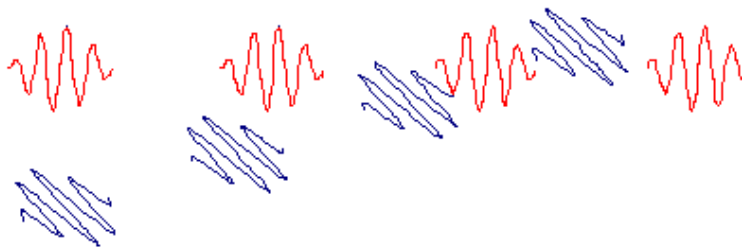
Światło spójne zachowuje stabilność fazy w czasie i przestrzeni. Innymi słowy, jeżeli dwie wiązki światła nakładają się w punkcie P zachowując stałą różnicę faz, to nazywamy je spójnymi. Faza jest stabilna przestrzennie, jeżeli różnica faz między dwoma ciągami fal jest stała. Jeżeli faza zachowuje się w pojedynczej fali, wówczas mamy spójność czasową.]

Weźmy dwie fale o takiej samej amplitudzie i długości. Niech ich obrazem geometrycznym będą dwie sinusoidy bez początku i końca. Jeżeli nakładają się, wówczas otrzymamy prążki o maksymalnej widzialności i kontrastowości (ostrości). Źródłem takiego promieniowania byłoby idealne źródło punktowe, którego promieniowanie należałoby rozdzielić na dwie wiązki i następnie je złożyć. Przypadek zupełnie nie fizyczny, chociażby ze względu na mechanizm powstawania promieniowania.



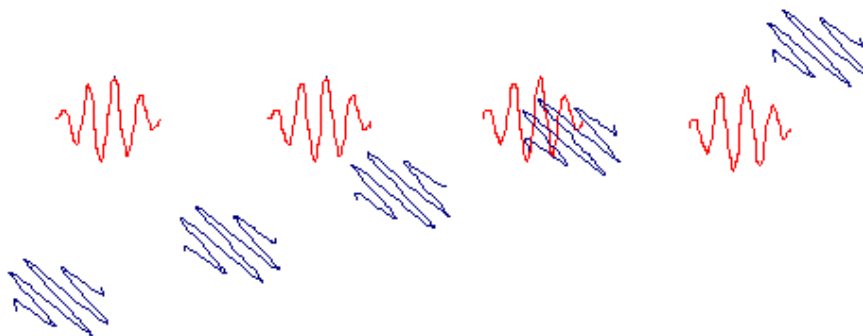
Rys.1

Jeżeli, te dwa ciągi zachodzą na siebie, wówczas otrzymane prążki są słabiej widoczne o mniejszym kontraście. Wiązki takie są częściowo spójne. W rzeczywistości promieniowanie wysyłane jest paczkami tworzącymi ciągi skończone.



Rys.2

Na rysunku 2 pokazano dwa ciągi częściowo spójne, a na rysunku 3 niespójne.



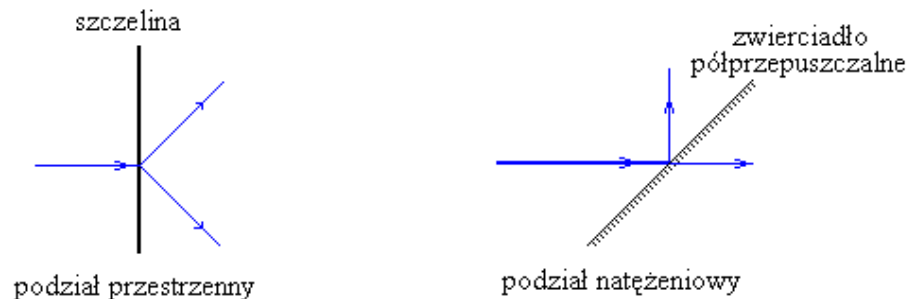
Rys.3

Fizyczne źródła promieniowania na ogół nie dają promieniowania monochromatycznego (o jednakowej częstotliwości). Jest to jedna z przyczyn zmniejszania kontrastu i częściowej spójności czasowej.

Nie ma ostrych granic między spójnością a niespójnością. Kontrast zanika stopniowo i powstaje stopniowo.

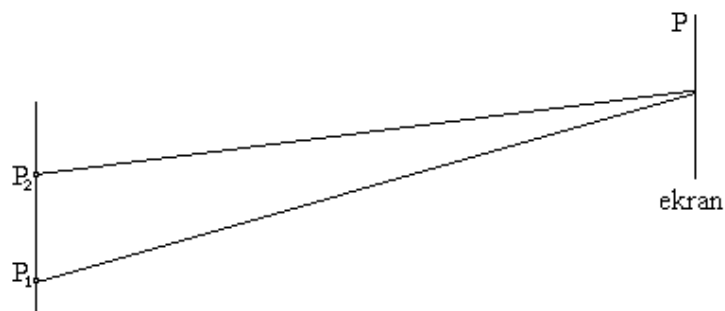
Jeżeli z rozciągniętego źródła światła wytniemy mały obszar stosując odpowiednią przesłonę, to otrzymane światło będzie częściowo spójne. Stopień spójności wzrasta ze zmniejszaniem się średnicy otworka. Stopień spójności również zależy od miejsca obserwacji. Obecnie znamy rozciągnięte źródła dające promieniowanie o bardzo wysokim stopniu spójności czasowej i przestrzennej - są to lasery.

Podstawowym problemem jaki musi rozwiązać eksperymentator jest uzyskanie wiązki spójnej. W dalszych rozważaniach pominiemy możliwość wykorzystania lasera. Z rozciągniętego źródła światła niespójnego, przy pomocy wąskich przesłon wycinamy wąską wiązkę światła, którą dzielimy na dwie: przestrzennie - z podziału czoła fali (np. doświadczenie Younga) lub natężeniowo - z podziałem amplitudy, (np. interferencja w cienkich warstwach).



Rys. 4

Ostatni podział jest szeroko stosowany w interferometrach. Wyobraźmy sobie, że w punktach P_1 i P_2 znajdują się dwa dipole elektryczne wykonujące synchronizowane drgania wokół położenia równowagi.



Rys. 5

W kierunku punktu P wysyłane są fale

$$\psi_1 = A_1 \cos(\omega t - \varphi_1),$$

$$\psi_2 = A_2 \cos(\omega t - \varphi_2),$$

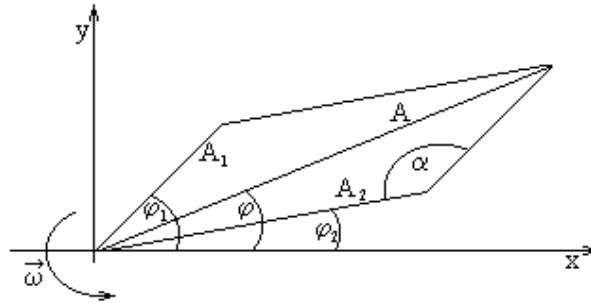
gdzie: A_1, A_2 - amplitudy drgań, ω - częstość własna drgań dipoli elektrycznych, φ_1, φ_2 - fazy początkowe.

Złożenie tych fal w punkcie P da falę opisaną równaniem:

$$\psi = A \cos(\omega t - \varphi), \quad (2)$$

przy czym $\psi = \psi_1 + \psi_2$.

Amplitudę A i przesunięcie fazowe φ znajdujemy korzystając z metody wskazów, którą ilustruje rysunek 6 przy dodatkowym założeniu, że cały układ obraca się z prędkością kątową ω w kierunku przeciwnym do ruchu wskazówek zegara.



Rys. 6

Z twierdzenia kosinusów wynika, że

$$A^2 = A_1^2 + A_2^2 - 2A_1A_2 \cos \alpha,$$

ale

$$\alpha = 180^\circ - (\varphi_1 - \varphi_2),$$

zatem

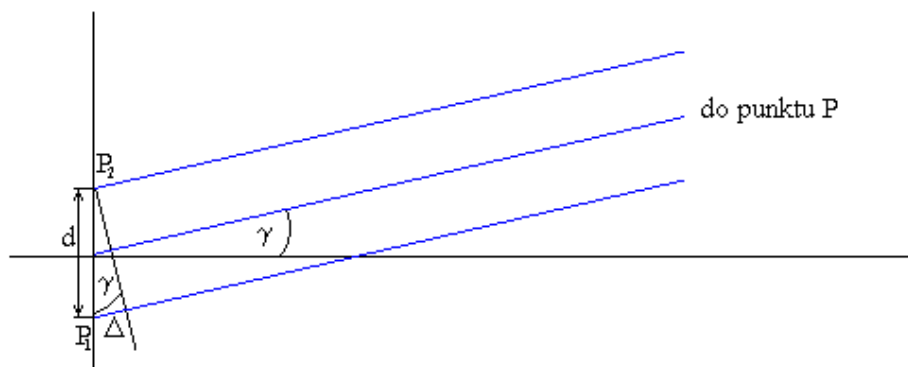
$$A^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2). \quad (3)$$

Trzeci wyraz po prawej stronie wzoru 3 jest poprawką interferencyjną.

Niech oscylatory P_1 i P_2 (rys.5) oddalone będą od siebie o odcinek d , a amplitudy drgań $A_1=A_2$ oraz

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \beta + 2\pi k, \quad (4)$$

gdzie: k - jest liczbą całkowitą.



Rys.7

Różnice dróg optycznych Δ między oscylatorami P_1 i P_2 , a punktem P rys.7 obliczymy ze wzoru

$$\Delta = d \sin \gamma. \quad (5)$$

W punkcie P pojawi się wzmocnienie, jeżeli

$$\Delta = k\lambda, \quad (6)$$

a osłabienie, gdy

$$\Delta = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}. \quad (7)$$

Porównując (5) i (6) dostajemy:

$$k = \frac{d \sin \gamma}{\lambda},$$

a wzór (4) otrzyma postać

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \beta + \frac{2\pi d \sin \gamma}{\lambda}. \quad (8)$$

Różnica faz wywołane stałą różnicą w drganiach oscylatorów wynosi β , a wywołana różnicą odległości

$$\frac{2\pi d \sin \gamma}{\lambda}.$$

Korzystając z zależności(3) i (8) możemy wyliczyć wszystkie przypadki szczegółowo.

Prążki powstające przy interferencji równoległych wiązek światła z różnicą fazy określoną przez kąt nachylenia α nazywają się prążkami jednakowego nachylenia. Kątowy rozmiar maksimum obliczamy ze wzoru:

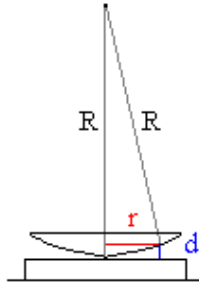
$$2d \cos \alpha = k\lambda$$

gdzie: d - jest różnicą dróg optycznych.

W soczewce skupiającej obraz prążków obserwujemy w płaszczyźnie ogniskowej. Zjawisko powstawania prążków jednakowego nachylenia wykorzystano do budowy interferometrów np. Michelsona.

Zjawisko interferencji możemy otrzymać przy przechodzeniu światła przez cienkie płytki płasko równoległościennie lub skośnie ściennie (mogą to być przestrzenie między płytkami). Interferencja zachodzi w wyniku nakładania się promieni odbitych od jednej i drugiej powierzchni płytki. Prążki powstają na powierzchni i nazywamy je prążkami jednej grubości. Otrzymujemy tą samą różnicę dróg optycznych dla punktów, w których grubość warstewki jest taka sama. Przykładem tego typu interferencji są np. barwy cienkich płytek, pierścienie Newtona.

Pierścienie Newtona otrzymujemy w świetle odbitym lub przechodzącym. W drugim przypadku obserwujemy znacznie gorszy kontrast. Aby je otrzymać należy na płycie płasko równoległościennej umieścić cienką płasko-wypukłą soczewkę o dużym promieniu krzywizny (R) oświetlić równoległą wiązką światła monochromatycznego od góry.



Rys.8

Na rysunku 8 przedstawiono układ do otrzymywania pierścieni Newtona, gdzie przez d - oznaczono grubość warstwy powietrza, w której zachodzą interferencje dające pierścień o promieniu r . Z twierdzenia Pitagorasa otrzymujemy

$$R^2 = r^2 + (R - d)^2,$$

a stąd

$$r^2 = 2Rd - d^2.$$

Ponieważ $R \gg d$ możemy przyjąć

$$r^2 \approx 2Rd,$$

oraz

$$d \approx \frac{r^2}{2R}. \quad (10)$$

Wskazywałoby to, że odległości między zewnętrznymi pierścieniami zmniejszają się. Pierścienie jasne otrzymujemy dla takich grubości d , dla których zachodzi warunek

$$2nd + \frac{\lambda}{2} = k\lambda$$

gdzie: k - liczba całkowita przybierająca wartości 1, 2, 3

przy czym dla $n=1$ możemy przyjąć współczynnik $n=1$, wówczas

$$d = (2k - 1) \frac{\lambda}{4} \quad (11)$$

i

$$r \approx \sqrt{R(2k - 1) \frac{\lambda}{2}}. \quad (12)$$

Zauważmy, że

$$\lambda \approx \frac{2r^2}{R(2k - 1)}, \quad (13)$$

a także

$$R = \frac{2r^2}{\lambda(2k - 1)}. \quad (14)$$

Podobnie dla promieni ciemnych pierścieni

$$d_k = \frac{k\lambda}{2},$$

oraz

$$r_k^2 = 2Rd_k \quad \text{i} \quad \lambda = \frac{r_k^2}{kR}.$$

Zauważmy, że $r_k^2 = Rk\lambda$,

oraz $r_{k+1}^2 = R(k+1)\lambda$.

Biorąc różnicę $r_{k+1}^2 - r_k^2 = R\lambda$,

a stąd
$$\lambda = \frac{r_{k+1}^2 - r_k^2}{Rl}, \quad (15)$$

gdzie: r_{k+1}, r_k - są to $k + 1$ i k -tego pierścienia Newtona.

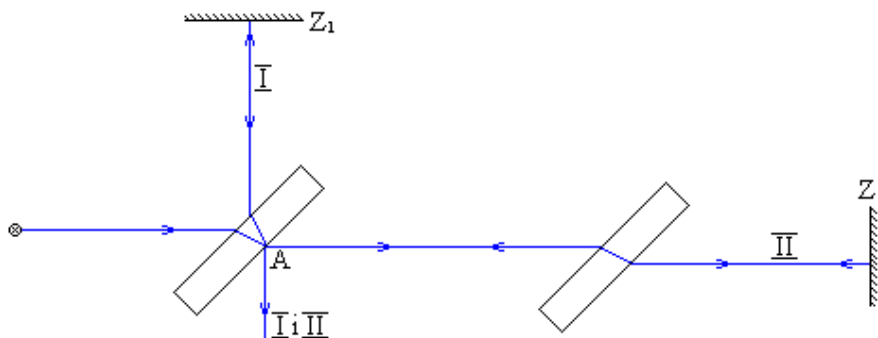
Promień krzywizny obliczamy ze wzoru

$$R = \frac{r_{k+1}^2 - r_k^2}{\lambda}. \quad (16)$$

Interferometry

Zasadę działania interferometru można opisać w kilku zdaniach. Z szerokiej wiązki światła otrzymanej ze źródła rozciągniętego, przy pomocy różnych urządzeń wycinana jest wąska wiązka promieniowania, rozdzielona na dwie, przepuszczona wzdłuż różnych dróg optycznych, a następnie ponownie nakładana na siebie. W ten sposób otrzymujemy światło w drugim stopniu spójności i jakość interferencji zależy przede wszystkim od różnicy dróg optycznych jakie obie wiązki przed nałożeniem się mogą pokonać.

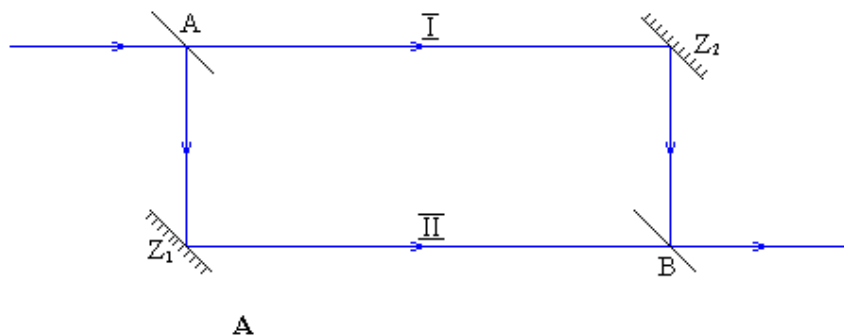
Najbardziej znany jest interferometr Michelsona, którego schemat ideowy przedstawiono na rysunku 9.



Rys.9

W punkcie A następuje rozdzielenie promienia na dwa. Po odbiciu od zwierciadeł Z_1 i Z_2 promienie wracają tymi samymi drogami (odpowiednio I i II) i w polu widzenia lunety nakładają się dając prążki interferencyjne jeżeli różnica dróg optycznych $l_I - l_{II} \geq \frac{\lambda}{2}$.

Inny typ interferometru przedstawiono na rysunku 10



Rys.10

Rozdzielenie wiązki następuje na elemencie A, a rekombinacja na elemencie B. Zaletą tego interferometru jest szeroka separacja pomiędzy obiema wiązkami, co zezwala na dużych obszarach (Interferometr Macha-Zehndera). W użytym w ćwiczeniu interferometrze wykorzystano podobną zasadę.

A. Wyznaczanie maksymalnego stężenia dwutlenku węgla w powietrzu wydychanym.

1. W komorze interferometru umieścić zestaw 10-cio centymetrowych rurek do przepływu gazu. Na prawym ramieniu przymocować uchwyty doprowadzenia i odprowadzenia powietrza wydychanego z płuc.
1. Przedmuchać dokładnie mieszkami obie rury (na początku ćwiczenia skład chemiczny i temperatura gazów w obu rurkach powinna być jednakowa). Odczekać dwie minuty (aby prądy w gazach wywołane różnicą ciśnień lub konwekcją zanikły, ponieważ są przyczyną zacierania się obrazu prążków interferencyjnych w polu widzenia lunety).
3. Włączyć oświetlenie interferometru. Sprawdzić ustawienie prążków w górnej i dolnej części pola widzenia lunety. Jeżeli prążki się nie pokrywają, powtórzyć czynności z punktu 2.
4. Jeżeli prążki w dalszym ciągu nie pokrywają się, wykonać obrót śrubą mikrometryczną doprowadzając je do pokrycia, jak to pokazano na rysunku 11.



Rys.11

5. Na bębnie śruby mikrometrycznej odczytać stan wyjściowy (n_0) interferometru (np. 0,00).
6. Przyłożyć profilowaną końcówkę rury do nosa i wykonać wydech do wnętrza rury.

UWAGA! Należy oddychać normalnie. Wydech nie powinien być , ani zbyt płytki, ani zbyt głęboki.

7. Wykonać obrót śrubą pomiarową tak, prążki interferencyjne w głównej części pola lunety ustawiły się tak, jak pokazano na rys. 11. Odczytać wskazania śruby mikrometrycznej (n).

UWAGA! Najciemniejszy prążek w górnej części pola widzenia jest prążkiem zerowym, pozostałe są barwne i w miarę oddalania się od prążka centralnego coraz bardziej rozmyte. Przed odczytem mierzonej wielkości należy śrubę mikrometryczną doprowadzić do idealnego dopasowania zerowego prążka, w górnej części pola widzenia z zerowym prążkiem w części dolnej.

8. Powtórzyć czynności z punktów 6 i 7 przynajmniej dziesięciokrotnie w odczytach nie krótszych niż 2 min. (patrz pkt 2).

(Praktycznie należy powtarzać pomiary tak długo, aż prążki w górnym polu widzenia nie będą zmieniały położenia w widoczny sposób względem prążków dolnego pola widzenia).

9. Przedmuchać czystym powietrzem obie rurki i czynności z punktów 2-7 powtarza druga osoba.

10. Zmienić zestaw rurek na 25 cm i powtórzyć czynności z punktów 2-9.

11. Zmienić zestaw rurek na 50 cm i powtórzyć czynności z punktów 2-9.

12. Zmienić zestaw rurek na 100 cm i powtórzyć czynności z punktów 2-9.

13. Sporządzić wykresy funkcji $\Delta n = f(N)$, gdzie: $\Delta n = n - n_0$, a N - liczba wydechów).

14. Znaleźć na wykresie maksymalną wartość Δn .

15. Dokonać analizy wyników błędów.

B. Badanie roztworów o małych stężeniach. Szacowanie zanieczyszczeń wody.

1. Przygotować dwa lub trzy roztwory wzorcowe o stężeniach znanych przez prowadzących ćwiczenia.

2. Ustawić łąźnię wodną w komorze interferometru.

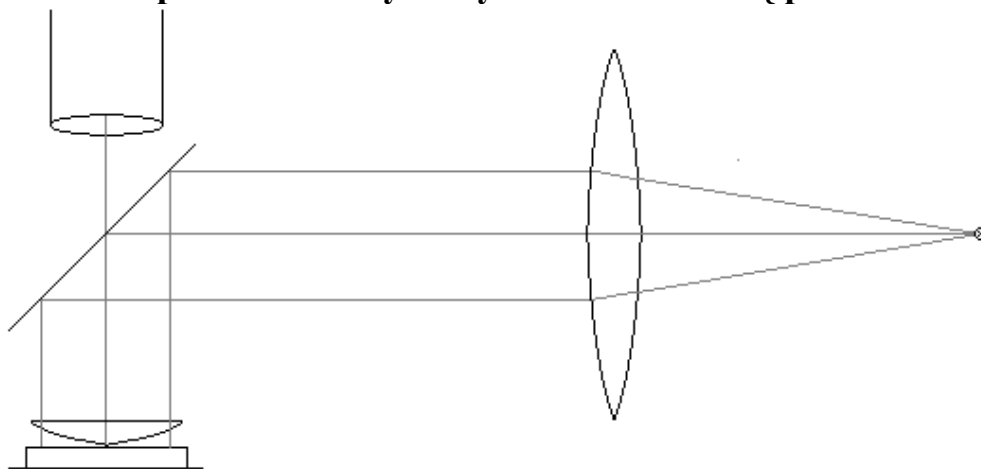
3. W łąźni wodnej umieścić kuwetę pięciomilimetrową i napełnić ją wodą destylowaną.

4. Odczekać 2-5 minut, aby temperatura łąźni wodnej i użytej kuwety wyrównały się zanikły prądy konwekcyjne.

5. Włączyć oświetlenie interferometru. Sprawdzić ustawienie prążków w górnej i dolnej części pola widzenia lunety. Jeżeli prążki się nie pokrywają odczekać dalsze 2 minuty. Jeżeli w dalszym ciągu brak pokrycia prążków wyregulować ich ustawienie śrubą mikrometryczną. Odczytać wskazania (u_0) na bębnie mikrometru.

6. Do prawej kuwety wrzucić dwa kryształki badanej substancji, rozpuścić, a po wyrównaniu temperatur wykonać czynności jak w punkcie 7A. Pomiar powtórzyć 3-krotnie w odstępach 30 sekundowych.
7. Czynności z punktu 6 powtórzyć 10-krotnie dodając za każdym razem po dwa kryształki badanej substancji.
8. Z prawej lunety usunąć roztwór, osuszyć a następnie wlać roztwór wzorcowy.
9. Po wyrównaniu temperatur wykonać czynności jak w 7A.
10. Odczyt z punktu 9 powtórzyć w odstępach minutowych 3-krotnie.
11. Usunąć I roztwór wzorcowy, osuszyć kuwetę i napęlić ją II roztworem wzorcowym. Wykonać czynności jak w punktach 9 i 10.
12. Powtórzyć czynności z punktów 5-11 dla kuwety dziesięcio-, dwudziesto-, czterdziesto- i osiemdziesięcio-milimetrowych.
13. Sporządzić wykresy skalujące interferometr dla każdej kuwety oddzielnie biorąc wartości średnie.
14. Odczytać stężenie roztworów mieszanych.
15. Przeprowadzić dyskusję wyników i błędów.
16. Napęlić prawą kuwetę 40-milimetrową wodą z wodociągu a lewą wodą destylowaną. Wykonać pomiary jak w punkcie &A.
17. Przeprowadzić dyskusję wyników.

C. Wyznaczanie promienia krzywizny soczewki metodą pierścieni Newtona.



Rys.12

1. Wyskalować okular mikrometryczny mikroskopu.
 - a) Na stoliku mikroskopu umieścić płytkę ze skalą wzorcową (o minimalnej działce $d_0=0,01\text{mm}$). Znaleźć ostry obraz skali.
 - b) Odczytać na skali głównej i na bębnie mikrometru wartość L_0 , gdy przecięcie nici pajęczych w okularze znajdzie się na kresce 0 skali wzorcowej.
 - c) Odczytać na skali głównej okularu i na bębnie mikrometru wartość L , gdy przecięcie nici pajęczych znajduje się odpowiednio na 5-tej, 10-tej, 15-tej50-tej kresce skali wzorcowej.

d) Obliczyć współczynnika skalowania ze wzoru $k = \frac{L - L_o}{nd_o}$ (gdzie: n - liczba działek skali wzorcowej) dla każdego pomiaru oddzielnie .

e) Wyznaczyć średni współczynnik skalowania ze wszystkich pomiarów.

2. Na stoliku S mikroskopu ustawić płytkę płaskorównoległą (1) , na niej soczewkę płaskowypukłą (2) oraz płytkę skośną (3).

3. Ustawić mikroskop na ostre widzenie powierzchni soczewki.

4. Przy pomocy (4) skierować na płytkę (3) równoległą wiązkę światła (laserowego o długości fali $\lambda_1 = 0,633 \mu\text{m}$, lub sodowego o długości fali $\lambda_2 = 589 \mu\text{m}$).

5. Ustawić nitkę krzyża stycznie do najdalszego wyraźnego ciemnego pierścienia z lewej strony i odczytać ze skali milimetrowej i z bębna śruby mikrometrycznej położenie krzyża (L_{li}).

6. Czynności z punktu 5 powtórzyć dla kolejnych pierścieni wewnętrznych.

7. Przesunąć skrzyżowanie nici pajęczych na prawą stronę i określić odpowiednio położenie ciemnych pierścieni (L_{pi}).

8. Obliczyć promień pierścienia ze wzoru

$$r_i = \frac{L_{pi} - L_{li}}{2k}$$

Obliczenia wykonać dla każdego pierścienia oddzielnie.

9. Obliczyć promień krzywizny soczewki R ze wzoru 16. Wykonać obliczenia dla kilku różnych wartości l. Znaleźć średnią wartość promienia krzywizny R.

10. Przeprowadzić rachunek błędów oraz dyskusję błędów i wyników.

UWAGA! Przy oświetlaniu światłem uzyskanym z lasera używać okularów zaciemniających. Zachować ostrożność.

D. Wyznaczanie długości fali promieniowania laserowego i sodowego przy pomocy pierścieni Newtona.

1. Wykonać czynności z punktów !C.- 8C.

2. Wykonać czynności z punktu 1 oświetlając układ płytka-soczewka płaskowypukła promieniowaniem sodowym.

3. Obliczyć długość fali ze wzoru 15, przynajmniej dla pięciu różnych przypadków, (odpowiednio dobierając l) dla promieniowania laserowego i sodowego.

4. Obliczyć średnią wartość długości fali.

5. Wykonać rachunek błędów oraz dyskusję błędów i wyników.

UWAGA! Przy oświetlaniu światłem uzyskanym z lasera używać okularów zaciemniających. Zachować daleko idącą ostrożność.

Literatura

1. A. Piekara - Nowe oblicze optyki.
2. S.Szczeniowski - Fizyka doświadczalna.
3. J.R. Meyer - Arendt - Wstęp do optyki.
4. T. Dryński - Ćwiczenia laboratoryjne z fizyki.
5. A. Zawadzki, H.Hofmokl - Laboratorium fizyczne.